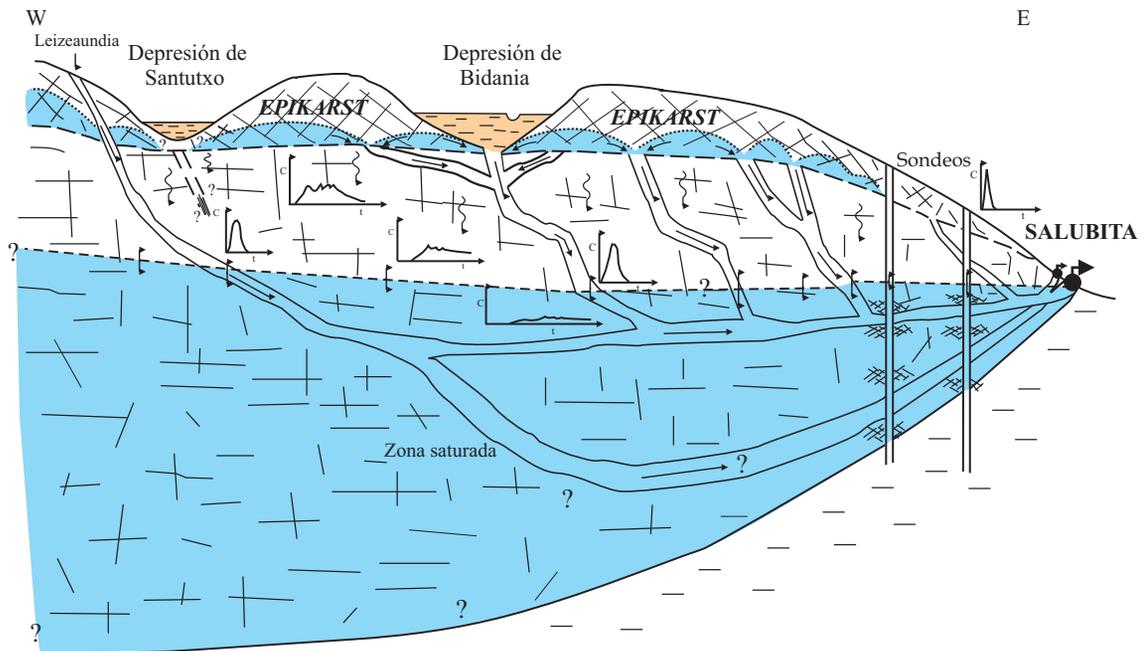




## ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA KÁRSTICA DE ALBIZTUR (GIPUZKOA).

ESTABLECIMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN Y  
CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA  
EN ACUÍFEROS KÁRSTICOS.



Memoria presentada por  
**INMACULADA MUGUERZA PERELLÓ**  
para optar al grado de Doctora en Ciencias Geológicas  
Leioa, Febrero de 2001

## AGRADECIMIENTOS

*Este trabajo no hubiera podido llevarse a cabo sin la colaboración y el apoyo de numerosas personas y varias entidades, a las que, mediante estas líneas, quisiera expresar mi más sincero agradecimiento:*

*Al Departamento de Educación Universidades e Investigación de Gobierno Vasco/Eusko Jaurlaritza por la financiación de este estudio mediante la concesión de una beca para la Formación de Investigadores entre los años 1996-2000.*

*A Patxi Tamés y Andoni Da Silva de la Diputación Foral de Gipuzkoa, no sólo por los datos facilitados, sino también por el aporte económico para la realización de análisis químicos específicos y por los aparatos prestados.*

*Eusko Jaurlaritzako Euskal Meteorologia Zerbitzuko José Antonio Aranda Jaunari, tesi honetan erabilitako hainbat estazioen datu meteorologikoak emateagatik.*

*Bereziki Iñaki Antigüedad Jaunari, hidrogeologiaz dakidan guztia irakasteagatik eta, bere garaian, karstaren mundu zabalean murgiltzeko aukera eman izanagatik. Baina, batez ere, tesi honetan jarritako interesagatik eta baita berari eskeinitako denboragatik. Mila esker!*

*A los profesores del Grupo de Hidrogeología por sus consejos y apoyo: Tomás Morales y Vicente Iribar. A éste último quiero agradecer también su ayuda y orientación en todo lo referente a isótopos.*

*A Luis Miguel Torres del Departamento de Geodinámica, por su ayuda y consejos en la toma de medidas de discontinuidades.*

*A M<sup>a</sup> Pilar Bezares del Departamento de Química Analítica de la Universidad del País Vasco-Euskal Herriko Unibertsitatea, por la realización de los análisis químicos.*

*A Koldo Sansinenea de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, por la información aportada sobre las cavidades de la zona de estudio. Y a Angel Navas, Oscar y Raquel del Grupo Espeleológico OARGI de Tolosa, por su ayuda durante el ensayo con trazadores llevado a cabo en Noviembre de 1999.*

*Juanjori, Anoetako (Gipuzkoa) Udaletxeko Alguazila, 1999ko Azaro-Abenduko laginketa luzean laguntzeagatik. Baita Tolosako Arrantzaleak taldeko Miguel Gomezi ere, Etxeberri iturburuko laginketan parte hartzeagatik 2000ko Apirilean.*

*A Martin Sauter de la Universidad de Tübingen (Alemania), por su ayuda en la comprensión de la complejidad que entraña la aplicación de modelos matemáticos a sistemas kársticos y por su amabilidad durante mi estancia en su universidad.*

*A Heinz Hötzl y Nico Goldscheider de la Universidad de Karlsruhe (Alemania), por sus consejos y orientaciones acerca de los ensayos con trazadores y por su amable acogida en su universidad.*

*A Juan Tuñón, por su ayuda en el cálculo de la evapotranspiración y por la realización de los sondeos manuales.*

*Osinondo (Bidegoian) beserriko familiari, beraien lur-eremuan plubiometroa jartzen utzi eta zaintzeagatik eta baita markaketetan eskainitako laguntzagatik.*

*Albizturko Herriko Etxeko Juan Mari Mendizabali esker bereziak luzatu nahi dizkiot, 2000ko Apirilaren 18an Isetxeko kobako sarrera erakusteagatik, bere semearen ezkontza-egun berberean.*

*A los estudiantes de 5º que en Mayo de 1997 me ayudaron a realizar mi primer ensayo con trazadores: Iñigo Atxa, Aida Fullaondo, Terese García, Olatz Lejarza, Amaia Méndez, Elena Ugarte y Unai Villanueva. A Iñigo Atxa quiero agradecer, además, su gran ayuda en la digitalización de los mapas de vulnerabilidad.*

*A los compañeros y ex-compañeros del Grupo de Hidrogeología por sus consejos, sugerencias, apoyo y ayuda, con quienes he compartido despacho-laboratorio: Miguel Ángel Gómez, José Miguel Gonzalo, Carlos Luengo, Jesús Uriarte, Cristina García, Gorka Uribe-Etxeberria, Iker Fdez. de Ortega e Iñigo Fdez. de Valderrama.*

*Azken lau urteotan nerekin hain beste bazkaritan horren konbertsazio ugari, bitxi eta aberats izandako lagunei: Ainhoa Alonso, Arturo Apraiz, Arantza Aranburu, Javi Murelaga (Okabixo) Josu Azkarraga, Mainer Etxebarria Raquel García, Marina Menéndez, Pablo Puelles Ainhoa Pujana, Javier Rodríguez, Alberto Bandrés, Néstor Vegas, Fernando Sarrionaindia, Rut Jiménez, José Julián Esteban (Jota), Sonia García de Madinabeitia eta Monica Valls.*

*Nere anahia gazteenari tarte berezi bat gorde nahi izan diot, bera izan bait da landa-lanetan gehien lagundu didan pertsona. Bere elektrizitate-ezagupenari esker, erabilitako tresnak landan montatzen lagundu eta beste batzutan horiek konpondu ditu. Eskerrik asko beti hortxe egoteagatik*

*Eta amaitzeko, ezin ahaztu nere hitzaldi amaigabeak jasateko gaitasuna eta pazientzia neurgabea izan duten lagunei, eskerrik asko koadrila osoari.*

*Anai-arrebei.  
Jon eta Norari.  
Berezi-bereziki gorasoei,  
eskerrik asko!*

*(...) urak haundi dire,  
sakon dire,  
murgildu nahi dutenentzat.*

## LABURPENA

Albiztur Unitate Hidrogeologiko Karstikoa (27 km<sup>2</sup>) karbonatodun material urgondarrez (Salubita Sistema, 21 km<sup>2</sup>) osatuta dago eta, azalera txikiagoan, material jurasikoz. Salubita iturburua da kareharri eta kalkarenita urgondarren deskarga-puntua. Bere hidrograma, Albiztur errekaaren aforo-estazioan jasotako hidrogramatik ondorioztatu da, datu hidrokimikotaz baliatuz. Bere urteko batez besteko emaria 670 l/s-koa da, muturreko balioak 491 eta 902 l/s izanik. Honek errekaaren emariaren 77-85% suposatzen du. Akuiferoaren *baseko* fluxuaren urteko batez besteko emaria nahiko konstante (286-309 l/s) mantentzen da, urte lehorrenetan handituz. Honek, akuiferoaren ahalmen erregulatzaileria islatzen du.

Markaketek Bidaniako depresioaren eta Salubitaren arteko lotura zuzena erakutsi dute. Hala ere, Santutxoko depresioa ez dago Salubitarekin ondo lotuta, nahiz eta beharbada akuiferoarekin lotura hori zuzena izan; eite hau garrantzi handikoa da bulnerabilitate-mapak garatzeko. Salubita Sistemaren drenatze karstikoko sarea oso sakabanatua dago, goikaldean epikarstak zeregin hidrauliko garrantzitsua bete arren, fluxua metatuz eta kontzentratuz.

Prezipitazioaren eta emarien analisiak akuiferoaren erantzun ezberdinak erakusten ditu, urteen arabera, eta baita analisisia urte bakar batera ez mugatzearen garrantzia ere. Beharrezkoa da prezipitazioa egokiro kontsideratzea sarrerako seinalearekin lotutako zenbait ezaugarri akuiferoaren berezko portaerarekin ez lotzeko. Ur-balantzearen arabera, Allen eta Penmanen metodoek ebapotranspirazio erreala kalkuluan emaitza onak eman dituzte. Sentsibilitate-analisiak, prezipitazioaren eta emarien zehaztasunik ezak kalkulu honetan sor dezakeen eragina erakutsi du. Zehazgabetsun hauek handiagoak dira urte hezeenetan. Prezipitazioaren eta emarien arteko erlazio plurianual bat ezarri da egokitze matematiko on batekin. Prezipitazioaren eta ETRaren arteko erlazioa, ostera, ez da ona.

Iturburu guztiek ur bikarbonatatu-kaltzikoak erakusten dituzte. Sulfatoa da elementurik aldakorrena espazioan eta denboran, eta horrexegatik markagai natural garrantzitsua da inguru honetan. Datuen Osagai Nagusien Análisiak erakusten duenez, I faktoreak **mineralizazioa** islatzen du eta II faktoreak **kanpo-eragina**, bai lurzorua erabilerari lotutakoa eta baita gertakizun meteorologikoei lotutakoa ere.

Berezko bulnerabilitatea bi metodoren bidez ondorioztatu da; EPIK eta OC. Bigarrena (gaur egun COST 620 Akzio Europearrean garatzen ari dena) objektiboagoa da eta estalki babeslearen *bypass* efektua kontutan hartzen du. Bulnerabilitate-mapak bost tarte erakusten ditu eta beraien banaketa espaziala bat dator Salubita Sistemari buruz egun ezagutzen den portaera hidrogeologikoarekin.

## RÉSUMÉ

L'unité hydrogéologique karstique d'Albiztur (27 km<sup>2</sup>) est constituée de matériaux carbonatés urgoniens (Système Salubita) et, en plus petite extension, jurassiques. La source Salubita est le point de décharge des calcaires et des calcarénites urgoniens. L'hydrogramme de cette source a été déduit, au moyen des données hydrochimiques, de l'hydrogramme enregistré dans la station de jaugeage du ruisseau Albiztur. Le débit annuel moyen est de 670 l/s, avec des extrêmes de 491 et 902 l/s, ce qui suppose le 77-85% du débit total du ruisseau. Le débit annuel moyen de l'*écoulement de base* de l'aquifère est plus ou moins constant (286-309 l/s), étant plus haut pendant les années sèches, ce qui traduit la capacité régulatrice de l'aquifère.

Les traçages montrent une très bonne connexion entre le bassin de Bidania et Salubita. Néanmoins, le bassin de Santutxo n'est pas vraiment bien lié avec Salubita, même s'il peut l'être avec l'aquifère. Ce fait est à tenir en compte à l'heure de construire les cartes de vulnérabilité. Le réseau de drainage karstique du Système Salubita est dispersé dans l'espace, bien que dans sa partie amont l'épikarst joue un rôle hydraulique très important en accumulant et en concentrant l'écoulement.

L'analyse des débits et des pluies montre une réponse différente de l'aquifère par rapport aux années et l'importance de pas limiter l'analyse à une année concrète. Il est nécessaire de considérer convenablement les pluies pour ne pas rattacher au comportement propre de l'aquifère, informations qui sont implicites au signal d'entrée. Le bilan hydrique démontre que les méthodes d'Allen et de Penman pour le calcul de l'évapotranspiration réel procure des bonnes résultats. L'analyse de sensibilité montre l'influence que les imprécisions dans l'estimation des pluies et des débits ont dans ce calcul. Ces imprécisions sont plus grandes pendant les années humides. Il a été établi un rapport pluriannuel entre précipitations et apports avec un bon ajustage mathématique. Le rapport n'est pas bon entre les précipitations et l'évapotranspiration réel.

Toutes les sources présentent des eaux bicarbonatées calciques. Le sulfate est l'élément plus variable, dans l'espace et dans le temps, c'est pourquoi qu'il est un traceur très important dans cette zone. L'analyse en Composantes Principales met en évidence que le facteur I représente la **minéralisation** et le facteur II l'**influence externe** dû à l'usage du sol et/ou aux événements météorologiques.

La vulnérabilité intrinsèque a été estimée au moyen de deux méthodes: EPIK et OC. La deuxième, actuellement en discussion dans l'Action Européenne COST 620, plus objective, considère mieux l'effet bypass de la couverture protectrice. La Carte de Vulnérabilité présente cinq rangs, dont la distribution spatiale est cohérente avec ce qu'on connaît sûr le fonctionnement hydrogéologique du Système Salubita.

## ABSTRACT

The Albiztur Karstic Hydrogeological Unit (27 km<sup>2</sup>) is formed by urgonian (Salubita System, 21 km<sup>2</sup>), and by Jurassic carbonate rocks in a small part of the area. The Salubita spring is the point of discharge of the urgonian limestones. Its hydrograph is obtained from the hydrograph registered in the small Albiztur River, according to hydrochemical data. The mean yearly discharge is 670 l/s, with extreme values of 491 and 902 l/s, which is a 77-85% of the total discharge of the small Albiztur River. The mean yearly discharge of the base flow is quit constant (286-309 l/s) and it increases during dry years, which reflects the regulating capacity of the aquifer.

The tracer tests show a very good connection between the Bidania depression and the Salubita spring. However, the Santutxo depression is not well connected with the spring but it might be well connected with the aquifer; this is a very important aspect to consider in the develop of vulnerability maps. The net of the Salubita karstic drainage system is spatially very scattered but during headwaters the epikarst plays an important hydraulic role collecting and concentrating the flow.

The discharge and precipitation analysis show the different answer of the aquifer according to different years. Moreover, the importance of not to limit the analysis to an only year is shown. It is necessary to consider the precipitation adequately in order not to relate some aspects implied in the entrance signal (precipitation) with the behaviour of the aquifer. The water balance shows that the methods from Allen and Penman for the calculation of the real evapotranspiration provide good results. The sensitivity analysis shows the influence of the lack of precision in precipitation and discharge data. The lack of precision is larger for wet years. A plurianual relation with a good mathematical adjustment has been established between the precipitation and the discharge. The relation between rainfall and evapotranspiration is not good.

The water of all the springs is calcium-carbonated. Sulphate is the most variable element, in time and space and, because of it, it is an important natural tracer in this area. The Principal Component Analysis makes clear that the I factor represents the **mineralization** and the II factor the **external influence** due to uses of the soil and/or meteorological events.

The intrinsic vulnerability has been estimated according to two methods: EPIK and OC. The second method (being discussed in the COST Action 620) is more objective and it considers better the *bypass* effect of the protective cover. The Vulnerability Map shows five classes whose spatial distribution is in line with the knowledge about the hydrogeological behaviour of the Salubita System.

## RESUMEN

La Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur (27 km<sup>2</sup>) está constituida por materiales carbonatados urgonianos (Sistema Salubita, 21 km<sup>2</sup>) y, en menor extensión, jurásicos. El manantial Salubita es el punto de descarga de las calizas y calcarenitas urgonianas. Su hidrograma se ha deducido del hidrograma registrado en la estación de aforos de la Regata Albiztur mediante datos hidroquímicos. El caudal medio anual es de 670 l/s, con extremos de 491 y 902 l/s, lo que supone un 77-85% del caudal total anual de la regata. El caudal medio anual del *flujo base* del acuífero se mantiene bastante constante (286-309 l/s) siendo mayor en los años secos, lo que refleja la capacidad reguladora del acuífero.

Los trazados muestran una muy buena conexión entre la depresión de Bidania y Salubita. Sin embargo, la depresión de Santutxo no está bien relacionada con Salubita, aunque sí pueda estarlo con el acuífero; este aspecto es de gran importancia para su consideración en los mapas de vulnerabilidad. La red de drenaje kárstico del Sistema Salubita está muy dispersa espacialmente, aunque en su cabecera juega un importante papel hidráulico el epikarst, acumulando y concentrando el flujo.

El análisis de caudales y lluvias muestra la diferente respuesta del acuífero, según los años, y la importancia de no limitar el análisis a un año concreto. Es necesario considerar adecuadamente las lluvias, para no relacionar con el comportamiento propio del acuífero aspectos que están implícitos en la señal de entrada. El Balance Hídrico demuestra que los métodos de Allen y Penman en el cálculo de la evapotranspiración real proporcionan buenos resultados. El análisis de sensibilidad muestra la influencia que en este cálculo tienen las imprecisiones en la estimación de lluvias y caudales. Estas imprecisiones son mayores en los años húmedos. Se ha establecido una relación plurianual entre precipitaciones y aportaciones con un buen ajuste matemático. La relación no es buena entre precipitaciones y ETR.

Todos los manantiales presentan aguas bicarbonatadas cálcicas. El sulfato es el elemento más variable, en el espacio y en el tiempo, por lo que constituye un trazador natural muy importante en esta zona. El Análisis de Componentes Principales pone de manifiesto que el factor I representa la **mineralización** y el factor II la **influencia externa** debida a usos del suelo y/o a eventos meteorológicos.

La vulnerabilidad intrínseca se ha estimado con dos métodos: EPIK y OC. El segundo (en discusión actual en la Acción COST 620), más objetivo, considera mejor el efecto *bypass* de la cubierta protectora. El Mapa de Vulnerabilidad presenta cinco rangos cuya distribución espacial es coherente con lo que se conoce sobre el funcionamiento hidrogeológico del Sistema Salubita.

**ESTUDIO HIDROGEOLÓGICO DE LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA  
KÁRSTICA DE ALBIZTUR (GIPUZKOA).  
ESTABLECIMIENTO DE UNA METODOLOGÍA PARA LA EVALUACIÓN  
Y CARTOGRAFÍA DE LA VULNERABILIDAD INTRÍNSECA EN ACUÍFEROS  
KÁRSTICOS.**

**ÍNDICE**

## CAPÍTULO 1: INTRODUCCIÓN

1.1. Generalidades	3
1.2. Antecedentes	4
1.3. Objetivos	6
1.4. Metodología	7

## CAPÍTULO 2: SITUACIÓN GEOGRÁFICA

2.1. Límites de la zona de estudio	13
2.2. El suelo	16
2.2.1. Tipos	16
2.2.2. Usos	17
2.3. Rasgos meteorológicos	18

## CAPÍTULO 3: GEOLOGÍA Y GEOMORFOLOGÍA

3.1. Encuadre geológico	23
3.2. Estratigrafía	24
3.2.1. Trías	24
3.2.2. Jurásico	24
3.2.2.1. Jurásico marino	24
3.2.2.2. Complejo Purbeck-Weald	26
3.2.3. Cretácico	26
3.2.3.1. Complejo Purbeck-Weald	26
3.2.3.2. Complejo Urganiano (Aptiense-Albiense Inferior)	27
3.2.3.3. Complejo Supraurgoniano (Albiense Superior)	31
3.2.4. Depósitos cuaternarios	31
3.2.4.1. Sondeos manuales	32
3.2.4.2. Información geofísica	35
3.3. Geología estructural	34
3.3.1. Evolución tectónica	40
3.3.1.1. Origen tardi-hercínico	40
3.3.1.2. Tectónica sinsedimentaria	40
3.3.1.3. Tectónica postsedimentaria	41
3.3.2. Análisis de la fracturación	42
3.4. Geomorfología	44
3.4.1. Formas del relieve – desarrollo de la karstificación	44
3.4.1.1. Dolinas y otras depresiones kársticas	44
3.4.1.2. Cavidades	47
3.4.1.3. El lapiaz	55
3.5. Conclusiones	56

**CAPÍTULO 4: HIDROGEOLOGÍA**

4.1. Introducción	61
4.1.1. Asignación de permeabilidades	62
4.2. Red de drenaje. Inventario de puntos de agua	63
4.3. Obtención del hidrograma de Salubita	68
4.3.1. Descomposición del hidrograma de Salubita	79
4.3.2. Origen del flujo rápido	84
4.4. Los estavelle	89
4.4.1. Los estavelle de Salubita	91
4.5. La Regata Albiztur. Influencia en el manantial de Salubita	92
4.6. Hidrología de la depresión de Bidania. Influencia en el manantial de Salubita	105
4.7. Análisis de la piezometría	116
4.7.1. Período 1985-86	117
4.7.2. Período 1997-99	120
4.8. Ensayos con trazadores	126
4.8.1. Principales características de los trazadores utilizados	127
4.8.1.1. Fluoresceína sódica (uranina)	127
4.8.1.2. Litio	129
4.8.1.3. Estroncio	129
4.8.1.4. Bromuro	130
4.8.1.5. Naftionato sódico	130
4.8.2. Diciembre de 1975	131
4.8.3. Abril de 1986	131
4.8.4. Noviembre de 1986	133
4.8.5. Mayo de 1997	135
4.8.6. Noviembre de 1997	136
4.8.7. Noviembre de 1998	138
4.8.8. Junio de 1999	140
4.8.9. Agosto de 1999	141
4.8.10. Noviembre de 1999	143
4.8.11. Diciembre de 1999	147
4.8.12. Marzo de 2000	148
4.8.13. Abril de 2000	151
4.8.14. Comparación de resultados	152
4.9. Análisis de los quimiogramas. Trazados naturales	159
4.9.1. Manantial Salubita (Noviembre de 1999)	159
4.9.2. Presa de Regata Albiztur-Manantial Salubita (Noviembre de 1999)	163
4.9.3. Manantial Igaran-Presa de Regata Albiztur (Marzo-Abril de 2000)	165
4.10. Estudio de las series cronológicas	168
4.10.1. Análisis de la curva de recesión	168

4.10.1.1. Método propuesto por Mangin (1970, 1975)	169
4.10.1.2. Clasificación de los sistemas kársticos	172
4.10.1.3. Análisis de las curvas de recesión del manantial de Salubita	173
4.10.1.4. Posición del Sistema Kárstico de Salubita en el marco de la clasificación de Mangin	179
4.10.1.5. Análisis del agotamiento en Salubita	182
4.10.2. Análisis Correlatorio y Espectral (ACE)	186
4.10.2.1. Breve introducción al análisis	186
4.10.2.2. Aplicación del Análisis Correlatorio y Espectral a las series temporales el Sistema Kárstico de Salubita	190
4.11. Cálculo del balance hídrico	208
4.11.1. Introducción	208
4.11.2. Evapotranspiración potencial (ETP) y evapotranspiración de referencia (ET <sub>0</sub> )	209
4.11.3. Datos meteorológicos	210
4.11.4. Cálculo de la insolación (n) a partir de la radiación solar global (S <sub>t</sub> )	215
4.11.5. Métodos para el cálculo de la evapotranspiración potencial basados en la temperatura y/o en la humedad del aire	216
4.11.5.1. Método de Thornthwaite	216
4.11.5.2. Método de Primault	218
4.11.6. Métodos basados en la radiación solar	219
4.11.6.1. Método de Penman para el cálculo de la evapotranspiración de referencia ET <sub>0</sub> (programa ETOCIM)	219
4.11.6.2. Método de Allen	223
4.11.7. Cálculo de la evapotranspiración real en la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur	224
4.11.7.1. Método de Thornthwaite	224
4.11.7.2. Método de Primault	225
4.11.7.3. Método de Penman (programa ETOCIM)	226
4.11.7.4. Método de Allen	227
4.11.8. Comparación de resultados	228
4.11.9. Consideraciones acerca del balance hídrico. Análisis de sensibilidad	231
4.11.10. Relación precipitación-aportación a escala plurianual	242
4.12. Resumen-conclusiones	252

## CAPÍTULO 5: HIDROQUÍMICA

5.1. Introducción	259
5.2. Análisis químicos	259
5.2.1. Antecedentes	259
5.2.1.1. Análisis de mayoritarios y específicos (E.V.E.-D.F.G.)	259
5.2.1.2. Análisis de mayoritario (Sancho y Antigüedad, 1988)	263
5.2.1.3. Isótopos	264
5.2.2. Análisis efectuados en el marco de este estudio	265
5.2.2.1. Análisis de mayoritarios y específicos	265

5.2.2.2. Isótopos	267
5.3. Selección y depuración de los datos hidroquímicos de los elementos mayoritarios. Balance iónico	267
5.4. Estadística descriptiva de las principales especies iónicas	269
5.5. Análisis espacial	273
5.6. Análisis en Componentes Principales (ACP)	279
5.6.1. Salubita	279
5.6.2. Igaran	285
5.6.3. Gain (Regata Albiztur aguas arriba del manntial de Salubita)	289
5.6.4. Presa	293
5.6.5. Osinondo	297
5.6.6. Cuaternario	300
5.6.7. Salubita/presa	303
5.6.8. Igaran/presa	305
5.6.9. Etxeberri	309
5.6.10. Legorreta	311
5.6.11. Comparación de todos los puntos de agua	313
5.7. Análisis temporal	315
5.7.1. Salubita	316
5.7.2. Presa	317
5.7.3. Igaran	317
5.7.4. Gain	321
5.7.5. Osinondo	322
5.7.6. Cuaternario	322
5.7.7. Etxeberri	326
5.7.8. Legorreta	326
5.7.9. Precipitación	329
5.7.10. Otros elementos: amonio y hierro	331
5.8. Isótopos	331
5.8.1. Información isotópica recopilada en el marco de este estudio	332
5.8.1.1. Definición de las zonas de recarga de los manantiales	338
5.8.1.2. Tiempo de permanencia del agua en el acuífero	339
5.9. Muestreo específico	342
5.10. Resumen-conclusiones	343
<b>CAPÍTULO 6: VULNERABILIDAD INTRÍNSECA EN SISTEMAS KÁRSTICOS</b>	
6.1. Introducción: Sobre la vulnerabilidad del medio kárstico	351
6.2. Método EPIK	353
6.2.1. Generalidades	353
6.2.2. Subdivisión de los factores	354

6.2.2.1. Epikarst: E	354
6.2.2.2. Cubierta protectora: P	355
6.2.2.3. Condiciones de infiltración: I	356
6.2.2.4. Red kárstica: K	357
6.2.3. Construcción del mapa de vulnerabilidad. Evaluación del factor de protección	358
6.2.4. Relación del grado de vulnerabilidad con las zonas de protección	359
6.2.5. Aplicación del método EPIK a la Unidad Kárstica de Albiztur (Sistema Kárstico de Salubita)	360
6.2.5.2. Cubierta protectora: P	360
6.2.5.3. Condiciones de infiltración: I	361
6.2.5.4. Red kárstica: K	362
6.2.6. Consideraciones acerca del método EPIK	364
6.2.6.1. El método de ponderación es contradictorio	364
6.2.6.2. No e considera el efecto <i>bypass</i> en los sumideros	365
6.2.6.3. Las condiciones de infiltración previas para la aplicación del método no siempre se cumplen	365
6.2.6.4. El método no está definido para todas las situaciones hidrogeológicas	366
6.2.6.5. Los asentamientos humanos no se consideran	367
6.2.6.6. La transformación del mapa de vulnerabilidad en zonas de protección es dudosa	367
6.2.6.7. Funcionalidad del epikarst	368
6.2.6.8. Sugerencias para la revisión del método	368
6.3. Método Europeo (Método OC)	369
6.3.1. Generalidades	369
6.3.2. Mapa O	372
6.3.2.1. Aspectos a tener en cuenta para la construcción del Mapa O	374
6.3.3. Mapa C	375
6.3.4. Construcción del mapa de vulnerabilidad	377
6.3.4.1. Mejoras al método OC	378
6.3.5. Aplicación del método OC a la Unidad Kárstica de Albiztur (Sistema Kárstico de Salubita)	379
6.3.5.1. Mapa O	379
6.3.5.2. Mapa C	382
6.3.6. Construcción del mapa de vulnerabilidad para la Unidad Kárstica de Albiztur (Sistema Kárstico de Salubita)	384
6.3.7. Consideraciones acerca del método OC	384
6.4. Comparación de ambos métodos: resumen y conclusiones	385
<b>CAPÍTULO 7: CONCLUSIONES</b>	389
<b>CAPÍTULO 8: BIBLIOGRAFÍA</b>	399
<b>ANEXO I</b>	409
<b>ANEXO II</b>	413

## **1.1. GENERALIDADES**

Una parte significativa de la demanda de agua potable de varios países europeos se cubre a partir de acuíferos kársticos: 50% en Austria y Eslovenia, 30-35% en Croacia y Bélgica, 20-25% en Francia y Reino Unido, 12-15% en Suiza y Estado Español (COST 65, 1995). Los acuíferos asociados a formaciones carbonatadas poseen una gran importancia estratégica también para los sistemas de abastecimiento de agua potable de la Comunidad Autónoma del País Vasco (C.A.P.V.). La razón de esta importancia radica en la distribución equitativa de estos acuíferos, mayoritariamente kársticos, a lo largo y ancho de nuestro territorio y en el alto interés tanto cualitativo como cuantitativo de sus recursos. Este hecho queda claramente reflejado en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco a escala 1:100.000, editado por el Ente Vasco de la Energía (1996).

Aunque los recursos subterráneos ligados a los acuíferos carbonatados suponen un 85% (710 hm<sup>3</sup>/año) de la totalidad de los recursos de aguas subterráneas estimados para la C.A.P.V. (835 hm<sup>3</sup>/año), la explotación actual ronda los 82 hm<sup>3</sup>/año (ANTIGÜEDAD et al., in print), lo que supone un 11,6% de la totalidad de aquéllos recursos, si bien este valor va en aumento en los últimos años. Surge así la necesidad de profundizar en el conocimiento de la dinámica de flujo y de transporte de los acuíferos carbonatados y de utilizar esta información en la explotación y protección de sus recursos. Este último aspecto es más importante, si cabe, en los acuíferos carbonatados de comportamiento más típicamente kárstico en la medida que su particular estructura de drenaje hace del medio kárstico un medio muy vulnerable a la contaminación.

Los métodos de investigación más adecuados en el caso de los acuíferos kársticos son propios de este tipo de medios, teniendo en cuenta su especificidad hidrogeológica derivada de su estructura de drenaje: *el karst como heterogeneidad organizada*. Además, la frecuente inexistencia de suelos, de cierta entidad al menos, y la existencia de formas superficiales muy karstificadas junto con la habitual estrecha relación entre aguas superficiales y subterráneas, suele favorecer la entrada de contaminantes directamente a la zona saturada sin haber sido objeto de ningún tipo de filtración. Así pues, también desde el punto de vista de la protección se hace imprescindible el desarrollo de métodos específicos que permitan evaluar dicha vulnerabilidad, y representarla cartográficamente, para poder preservar adecuadamente los recursos.

La presente Memoria recoge los métodos, los datos, los tratamientos, los resultados y las reflexiones de una investigación basada fundamentalmente en el estudio de las respuestas naturales de un sistema acuífero kárstico, la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur (Gipuzkoa). Se han considerado datos hidroquímicos, isotópicos (<sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H), hidrodinámicos (precipitaciones, caudales,

piezometría), meteorológicos, climáticos, de ensayos con trazadores, espeleológicos y geológicos *sensu stricto*.

El tratamiento conjunto de toda esta información ha hecho posible llegar a un mejor conocimiento de la compleja dinámica y del grado de organización del sistema estudiado, y ello para diferentes escalas de tiempo, desde la horaria hasta la plurianual. Una consecuencia de este conocimiento ha sido la elaboración de mapas de vulnerabilidad, siguiendo varios métodos, para el desarrollo de un sistema específico de protección. Otra consecuencia ha sido el establecimiento de pautas metodológicas a aplicar en regiones kársticas próximas en el contexto de la regionalización.

## **1.2. ANTECEDENTES**

La imagen de buena parte del País Vasco ha estado a menudo estrechamente ligada a un incesante “xiri-miri”, lo que durante años fortaleció la idea de que el agua jamás sería un problema para este territorio. Posiblemente éste sea el motivo de la casi inexistencia, hasta la década de los 70, de estudios hidrogeológicos de envergadura en muchas zonas del territorio vasco. No obstante, son varios los trabajos existentes en la zona ahora investigada, que abarcan aspectos estratigráficos, paleontológicos y tectónicos.

ADÁN de YARZA (1885) establece la base cartográfica de una geología que poco a poco comienza a crear cierto interés. Años más tarde, el francés RAT (1959) desarrolla en su tesis doctoral una cartografía geológica a escala 1:200.000 de la Cuenca Vasco-Cantábrica en la que se incluye la zona de estudio. El I.G.M.E. (1971, 1986) lleva a cabo el “Estudio Geológico de la Provincia de Guipúzcoa” y establece la cartografía geológica a escala 1:50.000 de la hoja de Tolosa (89). El Ente Vasco de La Energía (E.V.E.) (1988) realiza un exhaustivo estudio estratigráfico y tectónico del área comprendida entre Regil y Tolosa, en el cual se incluyen puntos de agua y que da como resultado una cartografía geológica detallada 1:10.000.

La geología estructural del área es investigada por EGUÍLUZ et al. (1988) y reflejada en el trabajo denominado “Deformación y estructuras asociadas al área de Tolosa”. BUENO (1991) y PAYROS (1991) de la Universidad del País Vasco/Euskal Herriko Unibertsitatea (U.P.V./E.H.U.), realizan también sendos trabajos en los que se estudia detalladamente la sedimentología de las calizas y calcarenitas urgonianas que constituyen el acuífero de Albiztur. El sistema kárstico estudiado se encuentra dividido entre las hojas de Tolosa (89-I) y Zumarraga (88-II) del Mapa Geológico del País Vasco 1:25.000 realizado por el E.V.E. (1992).

En lo referente a la geomorfología, Don José Miguel de BARANDIARAN lleva a cabo a finales de los años cincuenta una serie de excavaciones arqueológicas que sirven para descubrir varias

simas y cuevas de interés. Su situación se detalla en el libro “El castro de Inchur” publicado por la Diputación Foral de Gipuzkoa (D.F.G.) en 1961. La Sociedad de Ciencias Aranzadi, por su parte, da comienzo a mediados de los setenta a un estudio de cavidades en el cual se incluye un inventario de cuevas, simas y depresiones. Una de ellas (Leizeaundia), además, es topografiada y sometida a coloración para realizar un estudio cualitativo del agua subterránea que discurre a través de ella.

Las aguas subterráneas comienzan a ser foco de atención a principios de los setenta, realizándose en 1971 el “Estudio Hidrogeológico de la Provincia de Guipúzcoa” por el I.G.M.E. (actual I.T.G.E.) con la colaboración de la Diputación Foral de Gipuzkoa (D.F.G.). A comienzos de la década de los ochenta se reanudan las investigaciones hidrogeológicas y la D.F.G. y el Servicio Geológico del Ministerio de Obras Públicas y Urbanismo llevan a cabo en 1985 el “Estudio de Evaluación de los Recursos Hidráulicos Subterráneos del Territorio Histórico de Guipúzcoa”.

En este estudio se definen las unidades hidrogeológicas más importantes del territorio y sirve como base del “Plan Integral de Abastecimiento y Saneamiento del Territorio Histórico de Gipuzkoa” (1985). Este trabajo sentó las bases de la planificación hidráulica con vistas al abastecimiento y saneamiento del territorio y sirvió como punto de referencia para el desarrollo de los trabajos de investigación en las distintas unidades hidrogeológicas, como es el caso del “Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental” desarrollado por el E.V.E. y por la D.F.G. (1987) y que incluye numerosos datos hidroquímicos, hidrodinámicos y geofísicos.

SANCHO y ANTIGÜEDAD (1988) elaboran el “Estudio de las Transferencias en Medio Kárstico: Aportación de la Hidroquímica al Conocimiento Hidrogeológico del Karst” en el que se aborda con cierto detalle la caracterización físico-química del agua de la principal surgencia (Salubita) de esta Unidad con vistas a establecer el origen de sus aguas. El ayuntamiento de Bidegoian, por su parte, realiza un estudio (LOMBIDE, 1995), para la protección de acuíferos subterráneos en el que se incluye la **Unidad Hidrogeológica de Salubita** y los depósitos cuaternarios relacionados con ella. En el Mapa Hidrogeológico del País Vasco a escala 1:100.000 editado por el E.V.E. (1996), esa unidad toma el nombre de **Subunidad Albiztur**, que junto con otras dos subunidades (Ugena e Igaran-Urrestilla) pasa a denominarse **Unidad Hidrogeológica Albiztur**.

Puesto que no existe conexión hidráulica apreciable entre las Subunidades de Ugena y Urrestilla con la Subunidad de Albiztur y puesto que, como se demuestra en esta Memoria, este último sistema posee la suficiente entidad, complejidad e importancia como para considerarse una unidad propia, en este trabajo se le ha dado el nombre genérico de **Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur**. Esto no significa que esté totalmente aislada de posibles aportes subterráneos externos.

Previamente al comienzo de este trabajo de investigación, el Grupo de Hidrogeología (1994) de la U.P.V./E.H.U. lleva a cabo una investigación sobre vertederos del País Vasco, en la cual se incluye el vertedero de Santutxo, ubicado sobre la Unidad Hidrogeológica objeto de estudio. Por otra parte este Grupo, en colaboración con la Diputación Foral de Gipuzkoa, realiza un seguimiento isotópico tanto del agua de lluvia como del agua de los principales puntos de descarga (incluido el manantial de Salubita) de ese territorio histórico, entre los años 1990 y 1994 (IRIBAR y ANTIGÜEDAD, 1996).

La Memoria ahora presentada como Tesis Doctoral supone un paso más, un paso muy notable, en la investigación que en el dominio de la **hidrogeología kárstica** viene realizando el Grupo de Hidrogeología de la Euskal Herriko Unibertsitatea-Universidad del País Vasco. Esta Tesis Doctoral se añade así a las previas en este dominio (ANTIGÜEDAD, 1986; MORALES, 1991; LLANOS, 1992; ARRATE, 1994) lo que significa la consolidación del Grupo en esta área de investigación.

### **1.3. OBJETIVOS**

El interés general de este estudio radica en mejorar considerablemente el conocimiento de la dinámica espacial y temporal de la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur (Gipuzkoa) y en ofrecer ese conocimiento para una mejor gestión de los recursos hídricos, y del suelo, asociados, incluyendo, como herramienta para la gestión, el mapa de vulnerabilidad. Dicho en otras palabras, se trata de establecer la funcionalidad de las distintas partes de la Unidad, tanto en la dinámica de flujo como en la de protección. Este objetivo general se puede desglosar en otros más específicos:

#### Respecto a la Unidad propiamente dicha

- Definir sus límites.
- Establecer la importancia de los distintos tipos de infiltración (lenta y rápida) en la surgencia.
- Establecer la relación de los cursos superficiales influentes (sumideros) con el acuífero.
- Delimitar, si existe, el área ocupada por el epikarst y caracterizar su relación con el acuífero.
- Establecer la importancia de la zona saturada.
- Aclarar la posible relación hidráulica entre los materiales cuaternarios de las depresiones y el acuífero carbonatado principal.
- Cuantificar los términos del balance hídrico y su variación anual y plurianual.
- Conocer la calidad de las aguas subterráneas y superficiales y su evolución temporal.

- Aclarar la posible afección del vertedero de Santutxo a las aguas del acuífero principal.
- Relacionar los aportes de otros acuíferos (Igaran) con los del acuífero principal.

#### Respecto a la Regionalización de acuíferos kársticos en el País Vasco

- Profundizar en los aspectos metodológicos más propicios para la investigación en regiones kársticas similares a la de Albiztur.
- Profundizar en la importancia de la consideración conjunta de los diversos métodos, incidiendo en la escala de conocimiento (tiempo-espacio) que cada método permite.
- Establecer una metodología para la descomposición de hidrogramas a partir de la información hidroquímica, en función de los elementos químicos que mejor sirvan como marcadores.
- Aplicar una metodología para el cálculo de la evapotranspiración potencial y real en regiones kársticas del tipo de la estudiada, más allá de la habitualmente utilizada.
- Realizar análisis de sensibilidad de los balances hídricos con el fin de ir acotando los aspectos más influyentes en los mismos.
- Desarrollar una metodología que permita la realización de mapas de vulnerabilidad del agua subterránea y facilite el establecimiento de perímetros de protección de cara a usos futuros del suelo.

#### **1.4. METODOLOGÍA**

Para poder cumplir los objetivos descritos en el apartado precedente, se ha establecido una estricta pauta de trabajo que queda resumida en los puntos citados a continuación:

1. Revisión y recopilación de la información geológica y espeleológica existente, de fotografías aéreas y reconocimiento de campo.
2. Información hidrogeológica inicial. A partir de los datos existentes se ha sumado información al inventario de cavidades y al de puntos de agua. También se han incorporado nuevas ideas al conocimiento de la geometría de la unidad (cortes, sondeos y datos geofísicos) y de los parámetros hidráulicos (ensayos con trazadores).
3. Los datos meteorológicos, piezométricos, hidrométricos e hidroquímicos previamente existentes han sido evaluados y tratados cuidadosamente, junto con los propios de esta investigación, e incluidos en esta Memoria.

Tras haber establecido los puntos de interés y el cauce de esta investigación, la Diputación Foral de Gipuzkoa (D.F.G.) instala, a petición del Grupo de Hidrogeología de la U.P.V/E.H.U. un

limnógrafo aguas abajo del principal punto de descarga (Salubita) de la unidad. Se establecen, además, otros puntos de control en arroyos, aguas de lluvia, sondeos y manantiales de menor entidad; caudales, niveles piezométricos, temperatura, quimismo y conductividad. El grupo de hidrogeología de la U.P.V./E.H.U. instala otro limnógrafo en un sumidero (Osinondo), zona de recarga puntual importante, y una sonda multiparamétrica de registro continuo en el manantial principal (Salubita).

4. Inventario de los principales puntos de descarga y recarga puntual de la unidad e identificación de las áreas de recarga difusa.

5. Cálculo del balance hídrico. Análisis de sensibilidad de sus elementos.

6. Muestras semanales en los puntos de control para análisis de mayoritarios ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{NH}_4^+$ ), muestras quincenales para análisis de isótopos ( $^{18}\text{O}$  y deuterio) y muestras esporádicas especiales (detergentes, hidrocarburos...).

7. Muestras a mayor frecuencia (tomamuestras automáticos) en el manantial principal y en la Regata Albiztur para análisis de mayoritarios.

8. Ensayos con trazadores (LiCl, fluoresceína, naftionato sódico, bromuro). Cuantificación de los parámetros hidráulicos referentes al flujo rápido (conductos).

9. Tratamiento de los datos de concentraciones de elementos mayoritarios en los puntos muestreados. Análisis de su evolución espacial y temporal y relación con los caudales. Los quimiogramas como medio de interpretación y descomposición de los hidrogramas.

10. Análisis estadístico y Análisis en Componentes Principales (A.C.P) de los datos recopilados. Análisis Correlatorio y Espectral (A.C.E.) de los crónicas temporales más representativas del funcionamiento del sistema acuífero.

11. Establecimiento de criterios y elaboración de mapas de vulnerabilidad.

12. Interpretación conjunta de toda la información disponible, previa y actual, y elaboración de la presente Memoria.

### **Enfoque metodológico de la investigación**

El enfoque aplicado en la presente investigación, dentro del cual se han considerado las pautas de trabajo arriba citadas, es el **enfoque funcional**, es decir, aquél que trata de inducir el comportamiento espacial del sistema kárstico objeto de estudio a partir del comportamiento temporal,

mediante el estudio conjunto de sus respuestas naturales de diversos tipos (caudales, niveles, quimismo, trazadores...).

El otro enfoque habitualmente usado por otros hidrogeólogos del karst, **el enfoque estructural**, que trata de deducir el comportamiento temporal a partir del espacial, no resulta útil en nuestra área de investigación habida cuenta de la escasez de puntos de observación más allá de las surgencias (práctica ausencia de pozos y piezómetros).

Este aspecto resulta de todo punto fundamental para entender en su justa medida los pasos dados en esta investigación, toda ella basada en las frecuentes observaciones de las respuestas naturales, siguiendo un procedimiento que podríamos llamar *down-up*.

A lo largo de la investigación se han tenido presente los aspectos metodológicos recogidos en el documento final de la Acción Europea COST 65 (1995) relativa a “Karst groundwater protection” y en los documentos internos que se han venido elaborando y discutiendo en la actualmente en curso Acción Europea COST 620 (materiales inéditos) relativa a “Vulnerability and risk mapping for the protection of the carbonate -karst- aquifers”. De hecho la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur ha sido una de las cuencas pilotos de la Acción COST 620, por lo que se ha beneficiado de las múltiples aportaciones realizadas por los miembros participantes en la Acción.

Por otra parte, la investigación llevada a cabo se ha beneficiado también de dos proyectos de investigación de sendas convocatorias de la CICYT: el proyecto HID96-1315 relativo a “Investigación hidrogeológica para la gestión de la explotación de acuíferos kársticos del País Vasco” y el proyecto HID99-0333, en curso, referente a “Evaluación de parámetros y métodos para la estimación y cartografía de la vulnerabilidad de acuíferos-piloto kársticos y detríticos del País Vasco”. En los dos proyectos se han venido investigando sistemas acuíferos kársticos del País Vasco, incluido el de Albiztur, siempre con ese enfoque funcional, y los aspectos metodológicos en ellos desarrollados y los resultados obtenidos también han influido, en positivo, en el buen desarrollo de la presente investigación.

### 2.1. LÍMITES DE LA ZONA DE ESTUDIO

La **Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur** se localiza en la zona central de la provincia de Gipuzkoa, en la margen izquierda del río Oria, al Oeste de Tolosa, antaño capital de la provincia (figura 2.1).

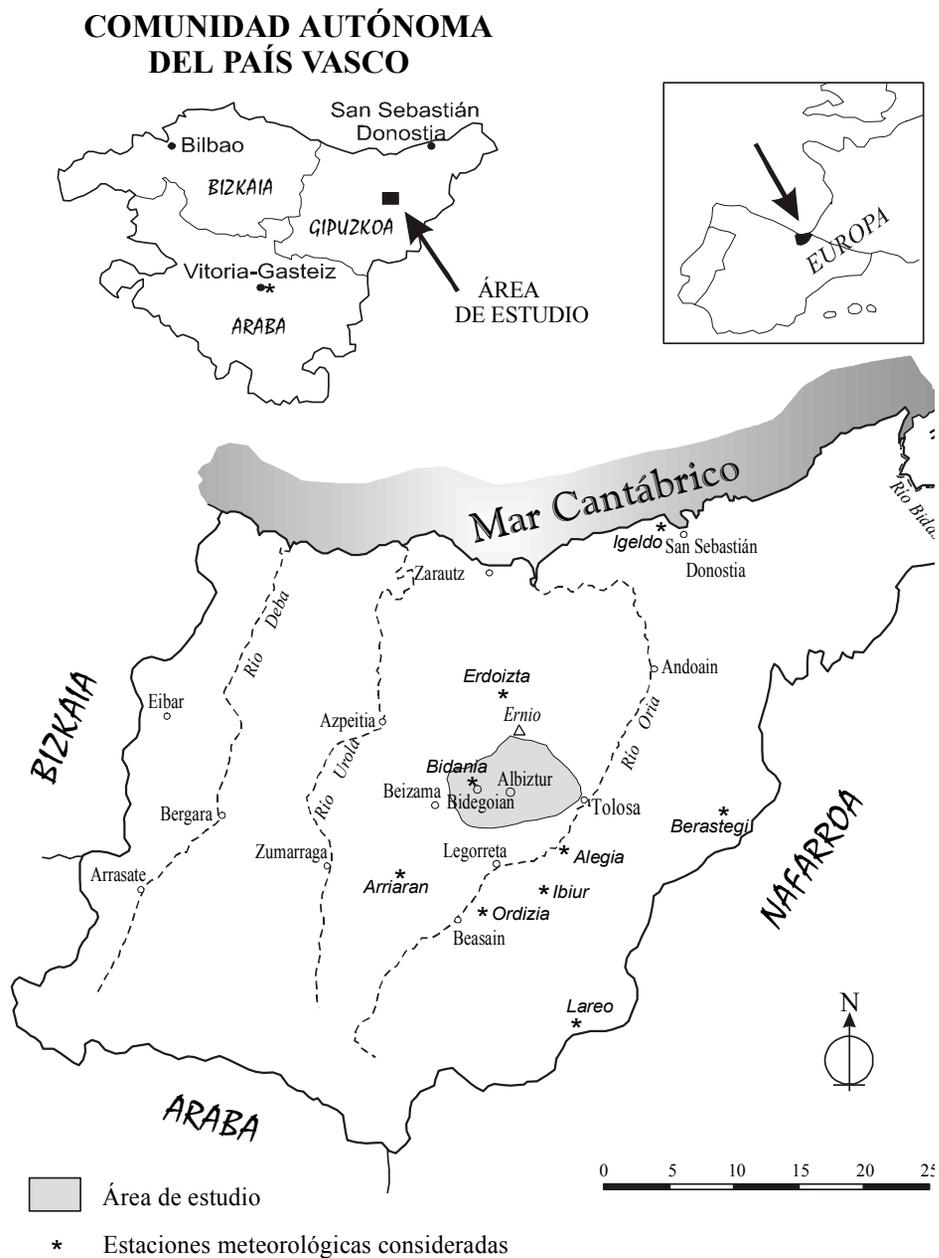


Figura 2.1. Situación geográfica del área de estudio.

El área de estudio, de unos 25 km<sup>2</sup>, engloba en su interior tanto los municipios de Bidegoian (550 habitantes) y Albiztur (350 habitantes), en su totalidad, como la zona Oeste de Tolosa, una pequeña parte al Este del municipio de Beizama y la zona Norte del municipio de Legorreta. Los núcleos urbanos de Bidegoian y Albiztur se sitúan en el centro del área, aunque debido a que se trata de un área rural dedicada a la ganadería y a la agricultura principalmente, la mayor parte de la población se encuentra muy repartida a tenor de los numerosos caseríos visibles a lo largo y ancho de todo el área.

Esta Unidad engloba, desde el punto de vista hidrológico, dos dominios cuyos puntos culminantes son (1) el manantial de Salubita y (2) la Regata Albiztur. El primero es el principal punto de descarga del **Sistema Kárstico de Salubita** *sensu stricto* y sus aguas van a parar a la Regata Albiztur, de forma que el Sistema Kárstico de Salubita forma parte de la **Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur**. No resulta fácil definir *a priori* de forma precisa los límites de ambos dominios ya que se solapan. Además, en períodos de estiaje las aguas de la regata se infiltran en el lecho del arroyo pasando a formar parte del Sistema Kárstico de Salubita y volviendo a la regata a través del manantial. En los apartados 4.3., 4.4. y 4.5. se aborda detalladamente la relación de los dos dominios.

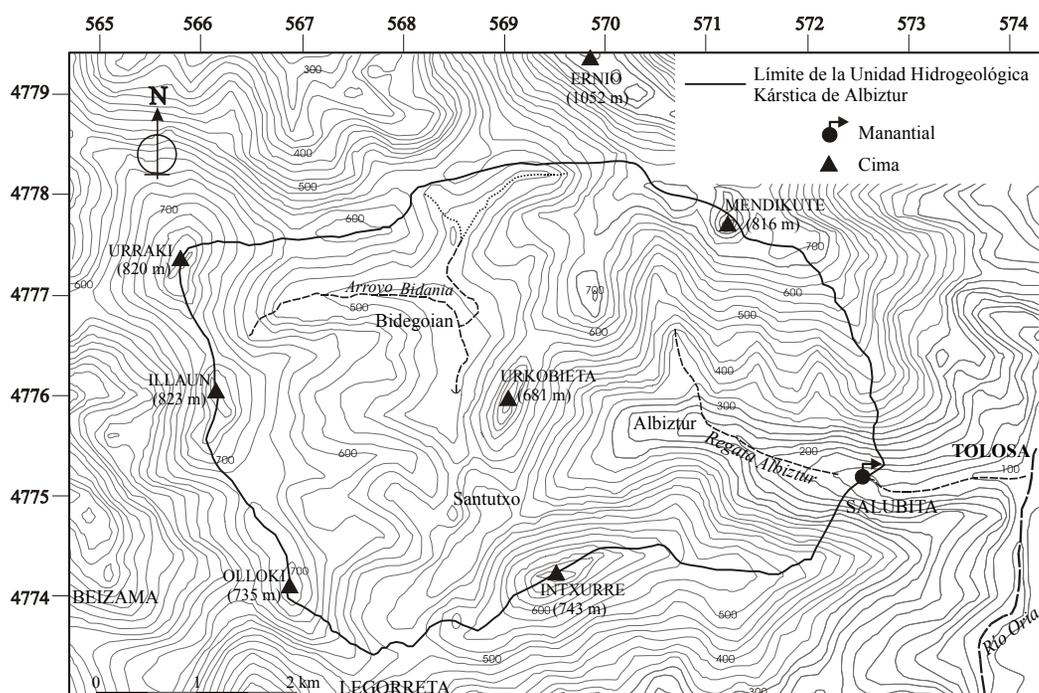
El limnógrafo situado en la Regata Albiztur, aguas abajo del manantial de Salubita, registra las variaciones de nivel en la regata originadas por las aguas provenientes tanto de la propia regata como del manantial. La figura 2.2 muestra esquemáticamente esta situación. No se puede omitir, sin embargo, la existencia del Arroyo Bidania, que se sume en su totalidad, y la de los otros cursos superficiales, en su mayoría intermitentes, que aparecen en la zona (figuras 2.3 y 4.1).



**Figura 2.2:** Esquema de situación de los dos dominios que conforman la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur.

Se trata de una zona de relieve abrupto con pendientes a menudo superiores al 30%, donde la mayor parte de los montes sobrepasan los 700 m de altitud (Oloki, 735 m; Intxurre, 743 m; Mendikute, 816 m; Urraki, 820 m; Illaun 823 m). Las cotas mínimas se encuentran al Este del área y se aproximan a los 100 m, siendo en esta zona donde se encuentra el manantial de Salubita (120 m), principal punto de descarga de la Unidad. Cabe destacar que el límite Norte de la Unidad está marcado por la ladera Sur del crestón calizo del Ernio (1052 m). El esquema de la figura 2.3 es un fiel reflejo de esta situación.

Los límites Sur, Este y Oeste de la zona de estudio se han definido según la divisoria de aguas superficiales uniendo los puntos de mayores cotas. Sin embargo, el límite Norte constituye una excepción ya que la presencia de la Falla de Errezil en esta zona hizo pensar en la posibilidad de que este accidente constituyera un límite de aguas. Los ensayos con trazadores realizados (apartado 4.8.) al Norte de dicha falla pusieron de manifiesto que no solo no existe conexión hidráulica, apreciable, alguna ni con la Regata Albiztur ni con el manantial de Salubita sino que el agua subterránea al Norte de la falla está en conexión hidráulica con otros manantiales localizados a unos 5 km al Noreste de la zona de estudio. Así pues, se ha tomado como límite Norte la Falla de Errezil, sin olvidar que durante períodos de fuertes precipitaciones parte de la escorrentía superficial generada al Norte de la falla puede penetrar a la cuenca vertiente a la Regata Albiztur.



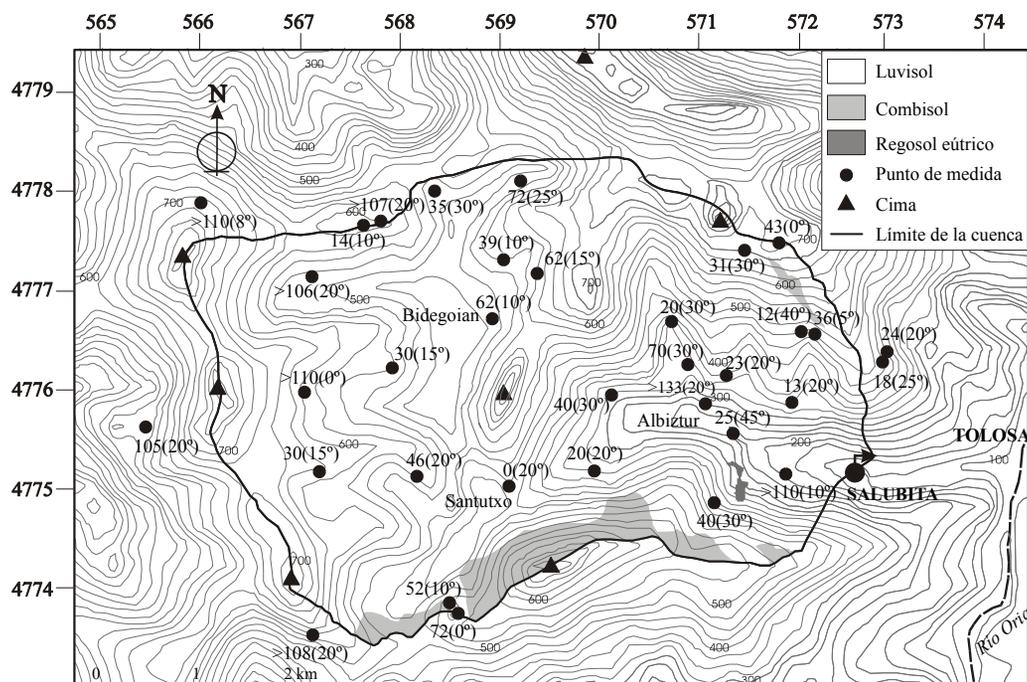
**Figura 2.3: Topografía y límites de la zona de estudio.**

## 2.2. EL SUELO

### 2.2.1. TIPOS

De acuerdo con la cartografía de Suelos y Capacidad de Uso realizada por el Departamento de Ordenación del Territorio, Vivienda y Medio Ambiente del Gobierno Vasco (1996) (figura 2.4), el luvisol cubre la totalidad de los materiales permeables y prácticamente todo el área de estudio, a excepción de dos pequeñas áreas al Sur y al Noreste, en las que el combisol cubre materiales detríticos. El luvisol es de tipo órtico primordialmente, aunque puntualmente pasa a ser de tipo cálcico y gleyco. Hacia el Sur de Albiztur aparece también algo de regosol eútrico, aunque de muy poca entidad. La potencia de estos suelos es, en general, muy baja apareciendo de forma generalizada afloramientos rocosos y una acusada pedregosidad. Por este motivo su capacidad de uso oscila entre baja y moderada.

Durante el mes de Agosto de 1999 se realizó una campaña de medidas de la potencia del suelo en el área. En total se llevaron a cabo 34 medidas de las cuales se sobrepasó el metro de potencia únicamente en 7 ocasiones. La situación geográfica de cada punto y su potencia correspondiente en cm se ha incluido en la figura 2.4, así como la pendiente medida en ese punto.



**Figura 2.4:** Localización geográfica de los puntos de medida de la potencia del suelo. El primer valor corresponde a la potencia en cm y el valor entre paréntesis se refiere a la pendiente medida en ese punto.

Resulta realmente difícil realizar una cartografía de la potencia de los suelos en esta zona. Por una parte, la existencia en superficie de una morfología kárstica muy bien desarrollada, representada primordialmente por el lapiaz, hace que en una superficie de muy pocos metros cuadrados el dato obtenido de la potencia del suelo varíe entre un valor de 0 m donde aflora la caliza, y un valor muy superior a 1 m si la medida se ha tomado en una zona de fractura, abierta posteriormente por la disolución de la roca y rellena. Ésto hace que existan posibles zonas discontinuas o aisladas de suelo con potencias importantes, cuya repercusión en la protección del agua subterránea es difícil de cuantificar.

### **2.2.2. USOS**

La agricultura extensiva (pastos y explotación forestal) está muy extendida en la zona aunque la agricultura intensiva (sobre todo cultivos de huerta) es también importante. Gran parte de la Unidad se encuentra cubierta de prados y pastos sobre los cuales padece un ganado fundamentalmente bovino. La agricultura y la ganadería intensiva representan focos potenciales de contaminación, debido al uso de pesticidas y fertilizantes y a las deyecciones sólidas y líquidas del ganado. Además, no son raros los vertidos producidos por las viviendas que carecen de alcantarillado o fosas sépticas, y que entran al medio subterráneo a través de sumideros, sin haber sido objeto de ningún tipo de depuración.

Por otra parte, algunas depresiones, simas y cuevas albergan vertidos incontrolados de todo tipo entre los cuales, aparte de la basura doméstica habitual, aparecen comúnmente desechos tales como electrodomésticos viejos, bicicletas, colchones, animales muertos, escombros de todo tipo, etc. Aunque estas zonas de vertido incontrolado representan puntos muy concretos y el volumen de vertidos es pequeño ( $<100 \text{ m}^3$ ), es conveniente limitar estas actividades con el fin de proteger el medio subterráneo. El vertedero de residuos sólidos industriales y urbanos existente desde mediados de los años setenta en la depresión de Santutxo (figura 2.4), cuya superficie es superior a  $5000 \text{ m}^2$ , constituye un ejemplo excepcional de vertedero incontrolado sobre un karst.

La actividad industrial es escasa aunque no por ello carezca de importancia, puesto que son numerosos los vertidos directos que se realizan sobre los cursos fluviales, relacionados con la zona de descarga principal del acuífero. La actividad de las cuatro empresas más importantes ubicadas en la zona se centra en (1) la manipulación del papel, (2) en la fabricación de maquinaria para la industria papelera, (3) en la manipulación de vidrio y (4) en la industria maderera.

Aunque las plantaciones forestales están muy extendidas, aún se conservan importantes masas arbóreas de hayas, robles y encinas cantábricas. En las laderas calizas muy rocosas, con escaso desarrollo del suelo y donde las condiciones de luminosidad y sequedad del suelo resultan poco apropiadas para el haya, se da una variante del bosque mixto en la que se pueden observar diversos

árboles o arbustos como el avellano, el arce o el fresno. La aliseda cantábrica, que en los últimos años ha ido en regresión limitándose a estrechas hileras de árboles, se presenta aquí unida a los tramos bajos y medios de los pocos cursos superficiales de agua existentes en la Unidad.

### 2.3. RASGOS METEOROLÓGICOS

El País Vasco se encuentra a caballo entre dos climas principales; el Oceánico al Norte y el Mediterráneo al Sur. Las provincias bañadas por el Atlántico, como es el caso de Gipuzkoa, se ven afectadas por el clima Oceánico que es de tipo mesotérmico, es decir, se caracteriza por experimentar una humedad alta durante todo el año concentrándose la mayor parte de las precipitaciones en los meses de otoño e invierno.

A continuación se comentan los datos meteorológicos de siete estaciones cercanas al área de estudio. Los datos termopluviométricos utilizados en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco (E.V.E., 1996) para el cálculo del balance hídrico en esta Unidad, fueron una precipitación media anual de 1500 mm y una temperatura media anual de 12 °C. Sin embargo, se ha optado por volver a calcular esos dos parámetros por medio de las estaciones que se especifican en la tabla 2.1 y se ubican geográficamente en la figura 2.1.

Estación	X (UTM)	Y (UTM)	Cota (m)	Cuenca	Propietario	Período considerado	
						precipitación	temperatura
Berastegi	582966	4775171	380	Oria	S.V.M.	1985-89; 1996-97	1997
Ibiur	568500	4772000	200	Oria	D.F.G.	1989-99	-
Erdoizta	567300	4782918	515	Urola	D.F.G.	1991-99	1991-98
Arriaran	561550	4770480	400	Oria	D.F.G.	1991-93; 1995-99	1994-99
Alegia	573009	4772505	90	Oria	D.F.G.	-	1997-99
Ordizia	567064	4766005	243	Oria	S.V.M.	1997-99	1997-99
Bidania	568815	4777366	592	Oria	S.V.M.	-	-

**Tabla 2.1: Estaciones utilizadas para la obtención de los valores medios de temperatura y precipitación de la zona de estudio. D.F.G. : Diputación Foral de Gipuzkoa. S.V.M. : Servicio Vasco de Meteorología.**

En esta tabla se ha incluido también la estación de Bidania, ya que es la única que se encuentra en el interior de la zona estudiada. No obstante, no se han considerado sus datos puesto que existen numerosos vacíos en el registro de los mismos, lo que hace impracticable su uso. Los períodos considerados para la precipitación y la temperatura no coinciden en algunas estaciones. Esto se debe al hecho de que en algunas de ellas para ese período solamente se dispone de los datos de temperatura (Alegia), en otras únicamente de los datos de precipitación (Berastegi e Ibiur) y en otras existen vacíos en el registro (Bidania) por lo que no han podido ser consideradas.

Por otra parte, en la figura 2.1 se han incluido también las estaciones de Lareo, Igeldo y Vitoria-Gasteiz. Las tres estaciones han sido consideradas por motivos diferentes, la primera de ellas por facilitar datos de evaporación (tanque evaporímetro) y las otras dos por proporcionar datos de la presión atmosférica. En cualquier caso, la utilidad de estos datos se comenta en el apartado 4.11. referente al Balance Hídrico.

Los datos de precipitación y temperatura para los años considerados en la tabla 2.1 se han incluido en la tabla 2.2. Se han considerado los datos diarios de todas las estaciones y posteriormente se ha calculado la media mensual para la temperatura y la suma mensual para la precipitación.

Mes	O	N	D	E	F	M	A	M	J	J	A	S	
<i>Precipitación (mm)</i>													Total
Berastegi	81	175	141	211	176	191	186	64	101	81	78	65	1550
Ibiur	111	136	132	92	76	85	129	94	67	54	54	74	1104
Erdoizta	162	163	148	110	87	86	120	98	97	104	91	124	1390
Arriaran	173	181	125	79	112	88	121	93	99	63	82	98	1314
Ordizia	161	186	130	94	109	112	134	68	57	51	67	107	1276
<i>Temperatura (°C)</i>													Media
Berastegi	15.1	11	7.2	6.4	9.1	9.1	9.8	14.4	14.9	15.9	20.9	17.4	12.6
Erdoizta	13.8	12.1	10.3	9.4	9.9	10.8	11	14.8	15.7	17.8	18.6	15.8	13.3
Arriaran	13.3	9.5	7.2	7.3	7.8	9	10.1	14.5	16	18.5	19.4	16	12.4
Alegia	10.6	9.8	7.1	7.4	7.8	10.4	11.4	15.8	17.3	19.7	18.4	18.5	12.9
Ordizia	11.9	8.9	6	7.4	7.1	9.5	10.1	14.6	16	18.1	18.3	17.6	12.1

**Tabla 2.2: Valores medios mensuales y anuales de temperatura y valores de las sumas mensuales y anuales en las estaciones consideradas.**

Debido a la irregular distribución espacial de las estaciones meteorológicas consideradas, el cálculo de la precipitación media anual según métodos tales como los polígonos de Thiessen, el de las isoyetas o el de los dos ejes (LLAMAS, 1993) no proporcionarían, posiblemente, datos representativos del área, por lo que se ha optado, como una aproximación previa, por calcular la media aritmética obteniéndose una precipitación media anual de 1327 mm (1326,8) y una temperatura media anual de 12,6 °C.

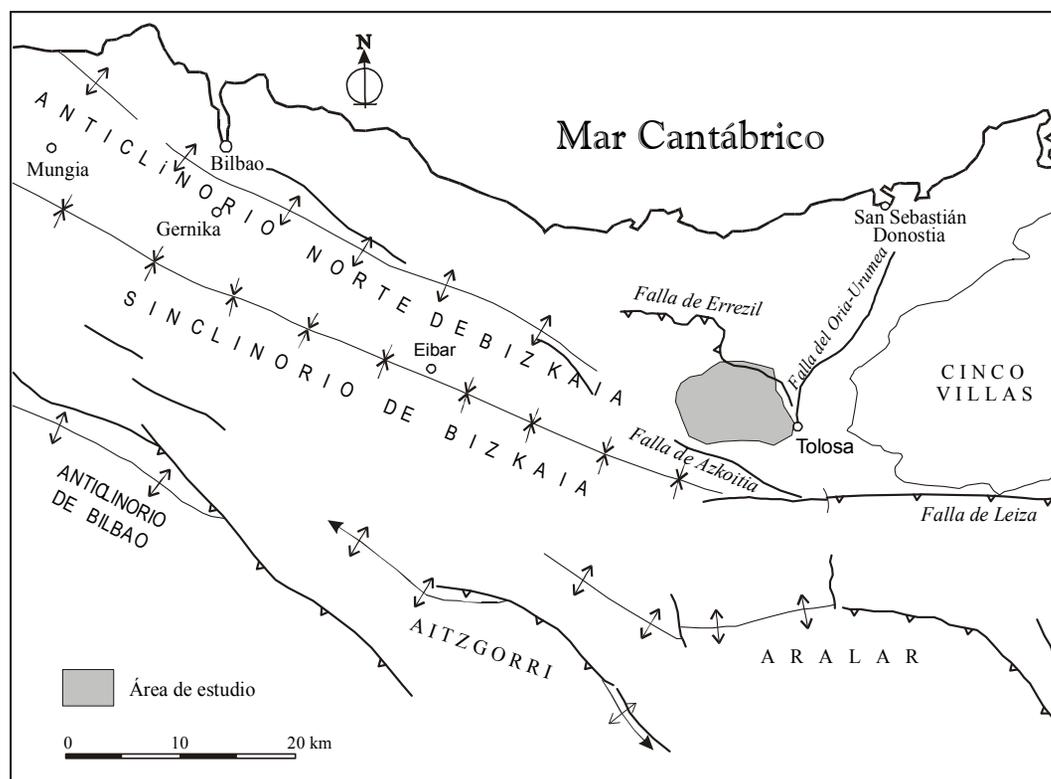
En cualquier caso, teniendo en cuenta que las estaciones de Erdoizta y Arriaran son las que proporcionan los valores de precipitación intermedios entre la máxima (Berastegi) y la mínima (Ibiur) y habida cuenta de que es la estación de Erdoizta la que, de las dos, se encuentra más cerca de la zona de estudio y a una cota de 515 m (tabla 2.1), más parecida a la cota media del área de estudio, los datos de precipitación utilizados para el desarrollo de los cálculos del capítulo 4 son los registrados en la estación de Erdoizta.

Sin embargo, esta estación no comienza a funcionar hasta el año 1990, por lo que para los años hidrológicos analizados en este estudio (1985-86, 1986-87 y 1988-89), para los cuales se carece

de registro de precipitación en esta estación, se dispone de los datos de precipitación en la estación de Berastegi y son éstos los que se han utilizado. De acuerdo con la tabla 2.2 la precipitación media en la estación de Berastegi (1550 mm) es un 10% superior a la de Erdoizta (1390 mm), de forma que para que los datos de precipitación utilizados para los años hidrológicos anteriores a 1990 sean comparables a los de la estación de Erdoizta, a la precipitación de la estación de Berastegi se le ha restado un 10%.

### 3.1. ENCUADRE GEOLÓGICO

Como se puede observar en la figura 3.1, el área de estudio está situada en el extremo oriental del Anticlinorio Norte de Bizkaia, formando parte de la Cuenca Vasco-Cantábrica y más concretamente de la parte Sur del Arco Vasco al Oeste del macizo paleozoico de Cinco Villas, representando la terminación occidental de los Pirineos.



**Figura 3.1: Situación de la zona de estudio dentro de un marco estructural general.**

Los materiales permeables que afloran en la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur (figura 3.2) son, sobre todo, de edad Cretácico Inferior (Aptiense-Albiense Inferior). Se trata de calcarenitas con abundantes cambios de facies que hacia el NE dan lugar a calizas masivas con rudistas. Su borde meridional está jalonado por materiales arenoso-arcillosos del Albiense Superior (Complejo Supraurgoniano) que hacia el SW aparecen en contacto con la Falla de Azkoitia (continuación de la Falla de Leiza). Su borde septentrional se define por la presencia de materiales lutíticos de facies de implantación urgoniana. Más hacia el Norte aparecen materiales jurásicos que afloran en estrechas bandas paralelas a la Falla de Errezil. Ésta, por su parte, hace aflorar al Norte de Urkizu materiales triásicos en típica facies Keuper ligados a una estrecha banda de dirección NW-SE.

Aunque la historia tectónica de la zona es complicada, la interpretación de la cartografía geológica existente junto con los datos recopilados en el campo permiten deducir que la estructura general de la Unidad corresponde a un suave sinclinal de amplio radio de eje N120E, modificado por frecuentes fallas agrupadas en dos familias, una de dirección N20-30E y otra de dirección N110-120E.

### **3.2. ESTRATIGRAFÍA**

Las características estratigráficas comentadas en este apartado han sido descritas en base a las observaciones de campo y a la información existente en la cartografía geológica a escala 1:25.000 editada por el E.V.E. (1996), en el Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987) y en el estudio sedimentológico detallado llevado a cabo por BUENO (1991). A continuación se sintetizan las características de las formaciones que afloran en la zona estudiada.

#### **3.2.1. TRÍAS**

Este término que aparece en superficie unido a la Falla de Errezil en una estrecha banda de unos 250 m de longitud y 75 m de anchura, está constituido por facies Keuper. Estos materiales se pueden observar con cierta claridad al Norte del barrio de Urkizu, al Este del monte Mendikute (figura 3.2). Se trata de un afloramiento definido por un conjunto de aspecto masivo integrado por arcillas de diversas tonalidades que incluyen yesos en diversa proporción y ofitas, cuya alteración da lugar a un suelo arcilloso-arenoso de tonos algo rojizos. El espesor original de este término no ha podido calcularse ya que se presenta muy mecanizado y asociado a importantes fracturas, constituyendo generalmente el nivel de despegue de la cobertera.

#### **3.2.2. JURÁSICO**

Este conjunto esencialmente carbonatado aflora al Norte de la Unidad Hidrogeológica estudiada, apareciendo a un lado y al otro de la Falla de Errezil en bandas casi paralelas a dicho accidente. Dentro del mismo se pueden diferenciar claramente el Jurásico Marino y el Complejo Purbeck-Weald.

##### **3.2.2.1. JURÁSICO MARINO**

###### Infralías-Lías inferior calizo-dolomítico

Se trata de un conjunto integrado por brechas intraformacionales, carniolas, calizas, dolomías y margas. Aflora de manera discontinua debido a su estrecha relación tectónica con el Keuper y con las grandes fracturas de la zona. Se puede observar al Este del monte Mendikute y al

Norte del término municipal de Bidegoian, asociado a la Falla de Errezil. Las brechas y carniolas integran el tramo basal de la serie, afectado por el nivel de despegue triásico que produce una apariencia desordenada y caótica de los materiales. Hacia techo, los paquetes exhiben una estratificación más evidente apareciendo paulatinamente margas, calizas dolomíticas y dolomías laminadas de colores claros. La escasez de afloramientos y su carácter discontinuo impiden una estimación fiable de su potencia; sin embargo, según las referencias bibliográficas consultadas, se estima en al menos 200 m.

### Lías margoso

Los afloramientos más importantes se encuentran al Norte del monte Mendikute en una banda de dirección NW-SE y al Norte y Noreste de Bidegoian. Es un término constituido por margas y margocalizas de color gris azulado que alternan con bancos decimétricos de calizas margosas, calizas limosas grises y margocalizas. Estos materiales que albergan abundante micro- y macrofauna suelen encontrarse frecuentemente alterados presentando un aspecto arcilloso de tonalidades pardo-amarillentas y rojizas. Las potencias medias oscilan entre 150 y 250 m.

### Dogger calizo

Se trata de un tramo fundamentalmente calcáreo que presenta intercalaciones margosas más frecuentes cuanto más a muro. El tramo basal se caracteriza por la presencia de calizas micríticas gris oscuro a negras con numerosos nódulos de silex. A techo aparece una variedad litológica mayor marcada por una macrofauna más abundante. La potencia media de este término es de 90 metros, aproximadamente, y aflora encaramado al Lías margoso, a ambos lados de la Falla de Errezil.

### Malm calizo-detrítico

Sobre el término anterior aflora un paquete de calizas arenosas, calcarenitas, areniscas, lutitas arenosas y lutitas. Se trata pues de una sucesión de litologías variadas que muestra la presencia de facies detríticas. Estos materiales afloran a lo largo de dos bandas paralelas de dirección NW-SE definiendo la estructura general del área. Al Noroeste de Bidegoian alcanza una potencia total de unos 130-140 m y está representada básicamente por areniscas y lutitas arenosas que se extienden hacia el Sureste, disminuyendo paulatinamente su potencia. El extremo oriental de esta banda, cerca ya de Tolosa, presenta un aumento del contenido carbonatado y una potencia próxima a los 100 m. Tanto esta barra como la que describe la estructura del Ernio, más al Norte, tienen características similares.

### **3.2.2.2. COMPLEJO PURBECK-WEALD**

El Jurásico marino da paso a una serie de litologías carbonatadas y detríticas que por sus características y posición estratigráfica son asimilables al Complejo Purbeck-Weald. La base de este conjunto no es sincrónica en toda la zona y en el techo aparecen cambios laterales hacia términos terrígenos de edad cretácica cuyas características se abordan en el apartado 3.2.3.1. Los materiales jurásicos del Complejo Purbeck-Weald están representados por calizas bioclásticas oscuras.

#### Calizas bioclásticas oscuras (Malm)

De forma general, este término está definido por un conjunto de calizas bioclásticas oscuras con intercalaciones de lutitas, margas y areniscas. Las calizas se presentan estratificadas en bancos decimétricos a métricos con cierta continuidad lateral aunque en detalle se pueden observar acuñaamientos progresivos en algunos bancos. Al Este de Bidegoian no presenta niveles de areniscas estando formada principalmente por unos 110-120 m de calizas bioclásticas y lutitas. Hacia su extremo Sureste la potencia aumenta aunque la deformación tectónica existente en esta zona dificulta su medida.

#### Calizas negras con sérpulas (Malm-Neocomiense)

Estas calizas oscuras, estratificadas en bancos de 20 a 70 centímetros, constituyen un excelente nivel guía ya que son fácilmente reconocibles en el campo y se apoyan bruscamente sobre diferentes términos del Jurásico. Se trata de calizas bien estratificadas con algunas intercalaciones lutítico-margosas. Su potencia varía entre 90 y 150 metros, siendo las estribaciones del monte Urraki la zona donde se han observado las mayores potencias.

### **3.2.3. CRETÁCICO**

El Complejo Purbeck-Weald aparece reflejado aquí por lutitas y margas, aunque la mayor parte de los materiales cretácicos que afloran en esta zona son rocas carbonatadas del Complejo Urgoniano y materiales detríticos del Complejo Supraurgoniano.

#### **3.2.3.1. COMPLEJO PURBECK-WEALD**

##### Lutitas y margas (Barremiense)

Básicamente se puede definir como un conjunto de lutitas y margas, en general hojosas o esquistosas de tonos oscuros que incluyen niveles areniscosos o de lutitas arenosas y de calizas similares a las de la formación anterior. Al Oeste de Bidegoian, la serie engloba un tramo inferior con niveles areniscosos y lutitas arenosas apareciendo paquetes discontinuos de calizas bioclásticas. El

término en esta zona presenta una potencia superior a los 500 m. Al Este de Bidegoian la serie muestra puntualmente delgados niveles arenosos en la base, así como bancos calizos y su potencia va disminuyendo hasta llegar a ser inferior a los 200 m.

### **3.2.3.2. COMPLEJO URGONIANO (APTIENSE-ALBIENSE INFERIOR)**

Se trata del término más ampliamente representado en el área y que constituye el Sistema acuífero Kárstico de Salubita, objeto principal de este estudio. Se han distinguido dos conjuntos principales, en función de criterios esencialmente litológicos:

#### Calizas bioclásticas

Afloran de manera general en los sectores más orientales del área de estudio (sector Albiztur-Salubita) y la serie se encuentra interrumpida a diversas alturas por intercalaciones de margas, lutitas, areniscas y litologías intermedias. Normalmente aparece estratificada en bancos métricos a decamétricos y lateralmente, hacia el Sur y Oeste, la serie entera sufre un cambio dando lugar a facies calcareníticas. Cerca de Albiztur este paso se produce de forma difusa por lo que el contacto no constituye un límite neto. Su potencia máxima llega a los 450 m, si bien cambia vertical y lateralmente de facies, no sólo a la facies calcarenítica ya citada, sino también a lutitas y margas. Este último cambio queda reflejado al Norte del núcleo urbano de Albiztur, donde aparece un banco lutítico individualizando niveles calcáreos.

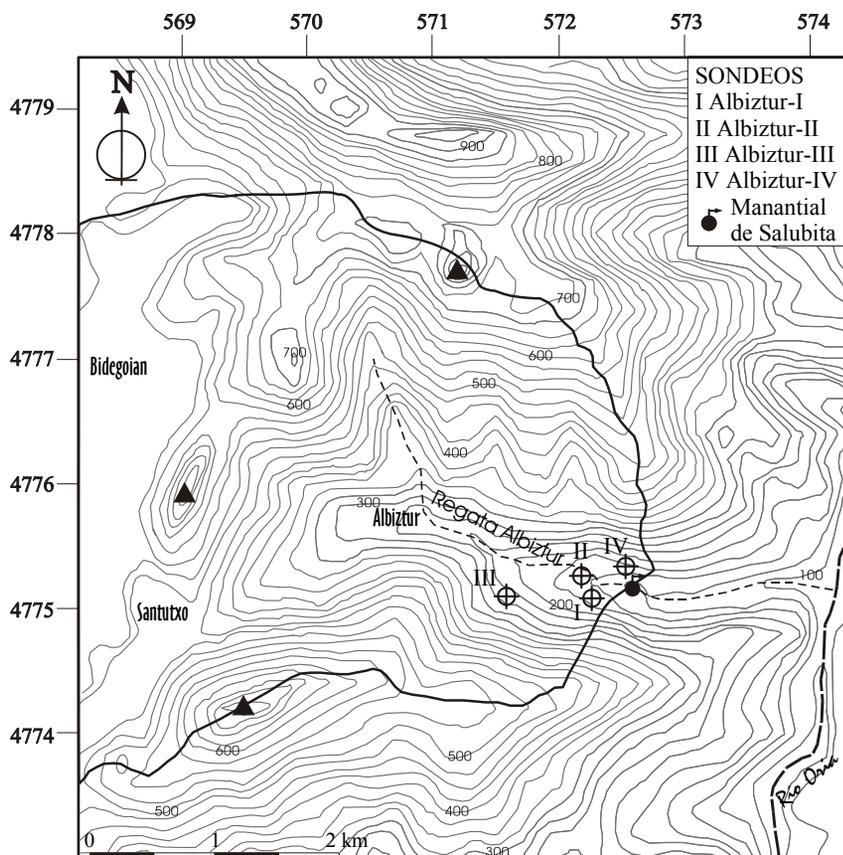
#### Calcarenitas

Las calizas bioclásticas pasan hacia el Oeste a calcarenitas grises bien estratificadas con algunas intercalaciones margosas discontinuas. Este término alcanza una potencia máxima de 700 metros y presenta silicificaciones similares a otras encontradas en otros sectores del Urgoniano de la región. Al Sureste de Albiztur este término aparece por encima de las calizas bioclásticas con una potencia de unos 200 m, alcanzando entre ambas una potencia aproximada de 650 m. Hacia el Oeste, fuera ya de la zona estudiada, esta serie pasa lateralmente a margas, margocalizas y calizas impuras. En las figuras 3.4a y 3.4b se han incluido las columnas estratigráficas obtenidas a partir de cuatro sondeos llevados a cabo a mediados de los años ochenta. Como se puede ver en la figura 3.3, todos ellos se encuentran relativamente cerca del manantial de Salubita y atravesaron fundamentalmente las calizas bioclásticas.

Salvo en zonas muy localizadas, las calizas se presentan muy compactas con escaso desarrollo de fracturas y escasos signos de karstificación. En el único sondeo de testigo continuo (Albiztur-IV) se aprecia importante presencia de intercalaciones terrígenas en el paquete carbonatado,

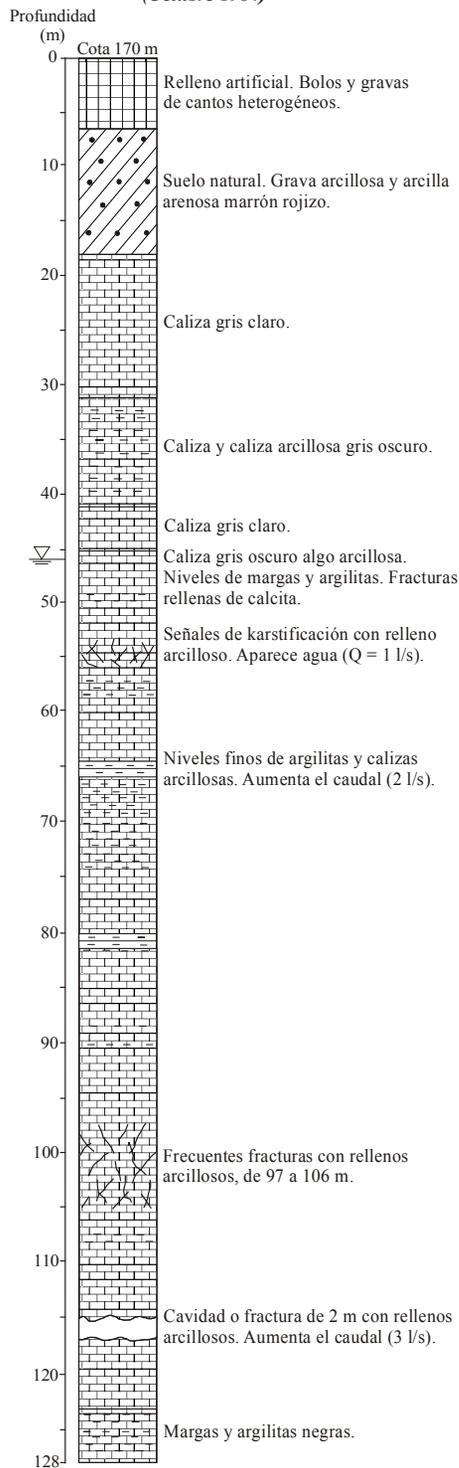
que no son tan observables a escala de afloramiento. La realización de este sondeo se enmarca dentro del Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G, 1987).

Uno de los sondeos (piezómetro Albiztur-IV) ha servido en este estudio para controlar las variaciones del nivel piezométrico durante varios meses. El resto de los sondeos, lamentablemente, no han podido ser utilizados por haber sido tapados o encontrarse en muy mal estado.



*Figura 3.3: Localización geográfica de los sondeos Albiztur-I, II y III, realizados a rotopercusión, y del piezómetro Albiztur-IV, de testigo continuo.*

### SONDEO ALBIZTUR-I (Octubre 1984)



### SONDEO ALBIZTUR-II (Marzo 1985)

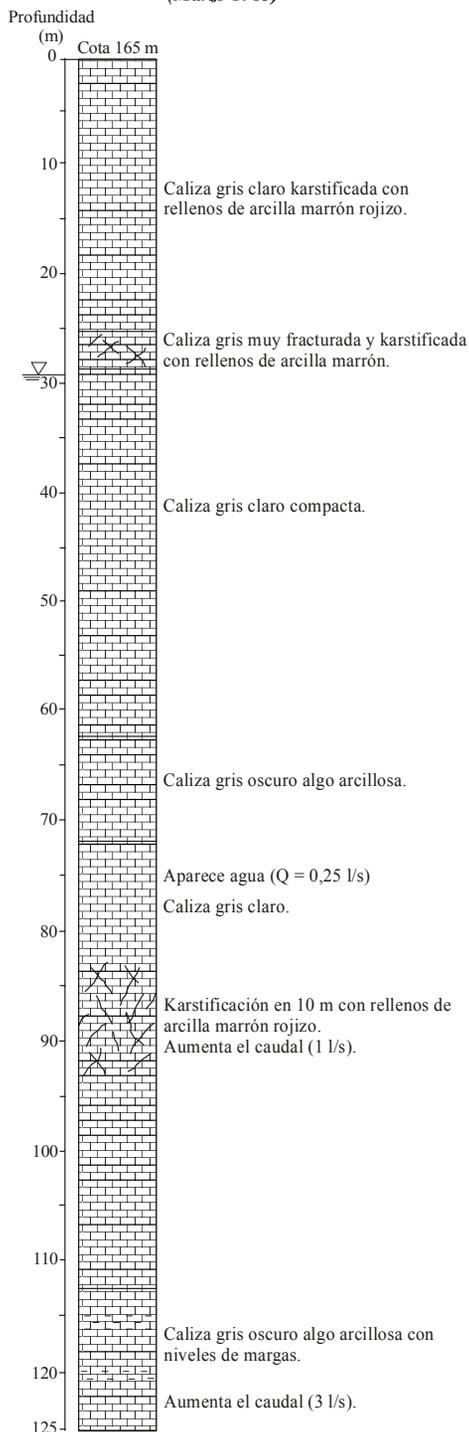
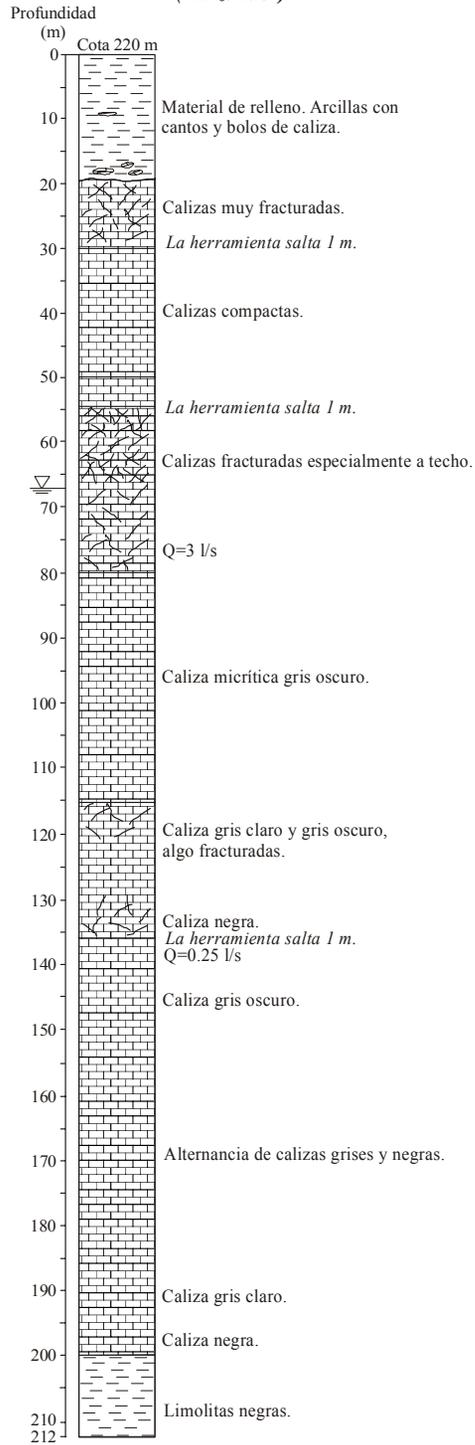


Figura 3.4a: Columnas estratigráficas de los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II.

### SONDEO ALBIZTUR-III (Marzo 1987)



### SONDEO ALBIZTUR-IV (Julio 1988)

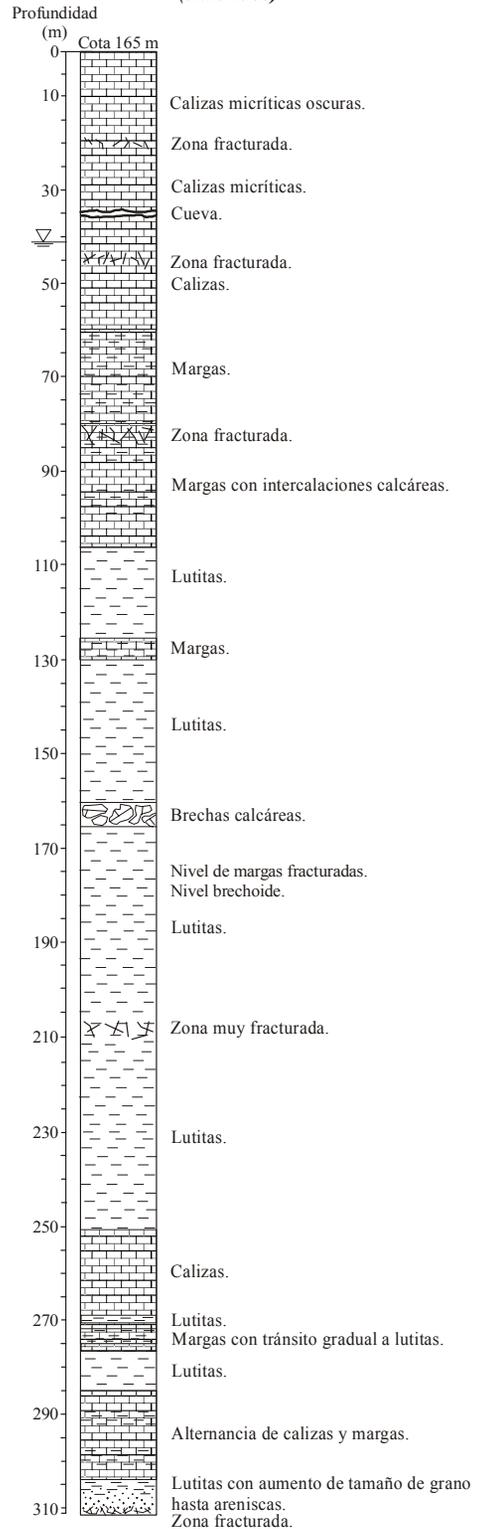


Figura 3.4b: Columnas estratigráficas de los sondeos Albiztur-III y Albiztur-IV.

### **3.2.3.3. COMPLEJO SUPRAURGONIANO (ALBIENSE SUPERIOR)**

Al Sur de los materiales carbonatados urgonianos aparece una serie detrítica alternante que constituye el límite meridional de la zona de estudio.

#### Lutitas y areniscas

La serie supraurgoniana está integrada por una sucesión de tipo flyschoides de areniscas y lutitas dispuestas en bancos decimétricos aparentemente regulares. Hay que destacar que el predominio litológico general corresponde a las lutitas. La potencia de esta sucesión únicamente puede calcularse al Sur de Albiztur debido a que allí afloran muro y techo. En esta zona su potencia es algo inferior a 400 m.

### **3.2.4. DEPÓSITOS CUATERNARIOS**

Sobre los materiales carbonatados de la Unidad Hidrogeológica se han desarrollado importantes depresiones kársticas rellenas, en su mayor parte, por materiales detríticos cuaternarios. Están constituidos por mezclas de gravas, arenas, limos y arcillas, con predominio de materiales gruesos en la base. La depresión más importante es la de Bidegoian (figura 3.2) que ocupa una superficie de 1.4 km<sup>2</sup>, con rellenos detríticos que en alguna zona alcanzan los 70 metros de potencia. Se trata de un polje (apartado 3.4.1.1.) jalonado de numerosas dolinas, a favor de las cuales tras períodos de fuertes lluvias desaparecen varias regatas (apartado 3.4.). En la dolina más importante, situada junto al caserío Osinondo, desaparece el Arroyo Bidania, que en aguas altas sobrepasa los 300 l/s de caudal, y cuya conexión con el manantial de Salubita ha sido probada en varias ocasiones por medio de ensayos con trazadores (apartado 4.8.).

El polje de Santutxo, de dirección NE-SW, se encuentra al Sur de Bidegoian y abarca una superficie de 0.3 km<sup>2</sup>. Alberga numerosas dolinas de muy diferentes dimensiones y la mayor parte de las aguas que en él se recogen van a parar a un sumidero situado en el extremo septentrional del estrecho valle. En la cabecera de esta depresión existe un relleno antrópico compuesto básicamente por residuos de papeleras, que data de mediados de los años 70. Este vertedero se encuentra en el interior de una dolina de grandes dimensiones y supone un potencial peligro de contaminación para las aguas subterráneas.

El municipio de Albiztur, por su parte, se asienta también sobre materiales detríticos cuaternarios que ocupan una depresión abierta en su extremo oriental de 0.34 km<sup>2</sup>, y aunque su potencia no supera los 30 metros, su dinámica podría afectar al acuífero kárstico objeto de este estudio, que se encuentra situado inmediatamente debajo.

### **3.2.4.1. SONDEOS MANUALES**

Durante el 31 de Mayo y el 2 de Junio de 2000 se realizan cuatro sondeos manuales de pequeño diámetro (5 cm) y poca profundidad (máximo 4,5 m) en los depósitos cuaternarios de las depresiones de Bidania y Santutxo. El objetivo es verificar la existencia de posibles niveles de agua en los materiales cuaternarios que pudieran alimentar el acuífero kárstico inferior. Los sondeos se realizan con la ayuda prestada por el Dr. Juan Tuñón, del Departamento de Ciencias Experimentales de la Universitat Jaume I de Castellón.

A continuación se comentan la localización geográfica de cada sondeo y su perfil (figura 3.5):

#### **- SONDEO OSINONDO:**

El fondo de la gran dolina que alberga el sumidero por el que desaparece el Arroyo Bidania (X: 568600 Y: 4776100 Z: 473) fue el punto elegido para la ubicación del primer sondeo. La perforación se llevó a cabo el 31 de Mayo de 2000 hasta una profundidad de 430 cm, hallándose un nivel saturado próximo a los 250 cm. Su perfil presenta estas características:

0-40 cm: Limo arenoso con mucha materia orgánica que le confiere un color negruzco.

40-100 cm: Matriz muy limosa de color marrón. A 90 cm aparecen cantos mezclados con trozos de ladrillos y escorias, lo que indica que se trata de un relleno antrópico.

100-200 cm: La matriz sigue siendo muy limosa y aparecen algunos cantos cuyo contenido aumenta hacia la parte inferior. A 190 cm los materiales parecen estar saturados.

200-290 cm: A 210 cm aparecen restos de materia orgánica y algunos cantos (1 cm). A 260 cm comienza a ser más arenoso aunque aún aparece algún canto que otro. La matriz presenta también algunos óxidos. Los pequeños cantos presentan en superficie un alto contenido en mica blanca. A 250 cm se halla un nivel de agua.

290-430 cm: El carácter arenoso se mantiene hasta los 310 cm en que se hace más limoso y desaparecen los cantos. Se trata de un limo de color gris en el que aparece algún resto de materia orgánica.

El Arroyo Bidania se encuentra a 20 m de distancia, en línea recta, de este punto y su cota es de 471 m aproximadamente. Se volvió a medir el nivel media hora más tarde y se encontraba a 226 cm (24 cm por encima del inicial), debido a la muy baja permeabilidad de los materiales limosos atravesados. Así las cosas, el nivel medido en el sondeo parece corresponder bien al nivel del propio arroyo. También se tomaron medidas de temperatura y conductividad y una muestra de agua tanto en el sondeo como en el arroyo. El agua del sondeo presentaba una conductividad de 338  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una temperatura de 15,1  $^{\circ}\text{C}$ , mientras que la del arroyo proporcionó valores de 402  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y 16,8  $^{\circ}\text{C}$ . Los

datos hidroquímicos de las muestras se comentan en el capítulo de hidroquímica y se encuentran recogidos en el Anexo I.

El 11 de Junio, tras tres días de precipitaciones moderadas, se volvió a medir el nivel piezométrico encontrándose a 190 cm de profundidad (36 cm por encima del nivel medido el día de la perforación).

- SONDEO SANTUTXO:

El segundo punto elegido se encuentra en la depresión de Santutxo, en una pradera situada entre la carretera que se dirige a Santa Marina y la que sube hacia Beizama (X: 568625 Y: 4774400 Z: 457). Esta perforación se llevó también a cabo el 31 de Mayo de 2000 y se profundizó hasta 430 cm alcanzándose un nivel de agua a 4 m. No había cursos de agua en la depresión en ese momento. El perfil registrado es el siguiente:

0-30 cm: Matriz arenoso-limosa con algún canto. En la parte más baja aumenta el contenido en cantos.

30-100 cm: La matriz es más arenosa y el contenido en cantos se mantiene.

100-430 cm: La arena que conforma la matriz es de tamaño muy fino y siguen apareciendo cantos de pequeño tamaño (1 cm). A unos 195 cm de profundidad aparece algo de humedad y el color de la matriz adquiere tonos grisáceos. A 260 cm el tamaño de la arena aumenta ligeramente y a partir de ahí aumenta la humedad. El nivel saturado se encuentra a 400 cm. 15 minutos más tarde el nivel ha subido 20 cm.

No se procedió a la toma de medidas de temperatura y conductividad ni a la toma de muestras debido a que el agua presentaba gran cantidad de arcillas. En cualquier caso, se introdujo un tubo de PVC para poder medir las posibles fluctuaciones de nivel.

El 11 de Junio el nivel de agua se encuentra a 390 cm de profundidad (10 cm por encima del día de la perforación).

- SONDEO USARRAGA:

El tercer sondeo se realizó el 2 de Junio de 2000 en la depresión de Bidania a 100 m al Sur del caserío Usarraga (X: 568300 Y: 4776600 Z: 486) en una pradera cubierta de hierba alta y densa. Se llegó hasta 420 cm de profundidad y no se alcanzó nivel piezométrico claro alguno. La distancia en línea recta desde este punto hasta el Arroyo Bidania es de 200 m y la cota del arroyo es de 472 m. La descripción de su perfil desde la superficie es la siguiente:

0-30 cm: Limos arcillosos con gravas (1 cm de diámetro) esporádicas. Color marrón oscuro y presencia de materia orgánica.

30-45 cm: Limos con arenas finas y algo de grava. Color marrón claro.

45-100 cm: Durante los primeros 10 cm la matriz es arenoso-limosa con mucha grava (0,5-1 cm de diámetro). A partir de los 55 cm la matriz sigue siendo arenosa aunque el contenido en gravas es mucho mayor. Entre 60-70 cm se aprecia cierta humedad.

100-150 cm: Persiste la matriz arenosa con mucha grava. A 120 cm aparecen cantos de arenisca rojiza. Entre los 120 y 130 cm el contenido en agua es mucho mayor y parece estar saturado. Entre los 130 y 140 cm desaparecen las gravas apareciendo arena muy mojada. A 140 cm vuelven a aparecer pequeños cantos dispersos y la matriz es una arena muy fina y seca.

150-200 cm: Hasta los 170 cm la matriz se convierte en una arena de color gris y aparecen algunos cantos. A 170 cm empiezan a aparecer cantos de tamaño ligeramente superior a 1 cm siendo la matriz una alternancia entre arena media y fina de color marrón claro.

200-300 cm: El contenido en cantos comienza a disminuir hasta que a 220 cm solo aparece arena. Posteriormente vuelve a aparecer algo de grava y entre los 230 y 290 cm desaparece la arena y solo aparece grava. Al final vuelve a desaparecer la grava apareciendo una arena de tamaño medio de color marrón claro.

300-350 cm: Aunque durante los primeros 5 cm se ve algo de grava, se trata en general de una arena muy fina de color claro con muy pocos cantos.

350-420 cm: Persiste la matriz de arena fina con apariciones esporádicas de grava.

El 11 de Junio tampoco se encontró nivel piezométrico alguno en este sondeo.

#### - SONDEO BEONDEGI:

El cuarto sondeo relizado el 2 de Junio se ubicó hacia el extremo Sur de la depresión de Santutxo (X: 568300 Y: 4774100 Z: 458), en una pradera con un ligero aumento de pendiente hacia el Sur. La perforación no superó los 270 cm ya que se halló un nivel colgado de agua muy cerca de la superficie. A continuación se comentan las características del perfil:

0-30 cm: Suelo.

30-70 cm: Matriz arenosa de color marrón claro con cantos (>3cm). Aparecen puntos de color rojo vivo.

70-100 cm: La matriz arenosa se convierte en una arena muy fina de color gris. Aparece algún canto.

100-120 cm: Persiste la arena fina gris. No aparecen cantos. Los puntos rojos vuelven a aparecer. Parece estar saturado.

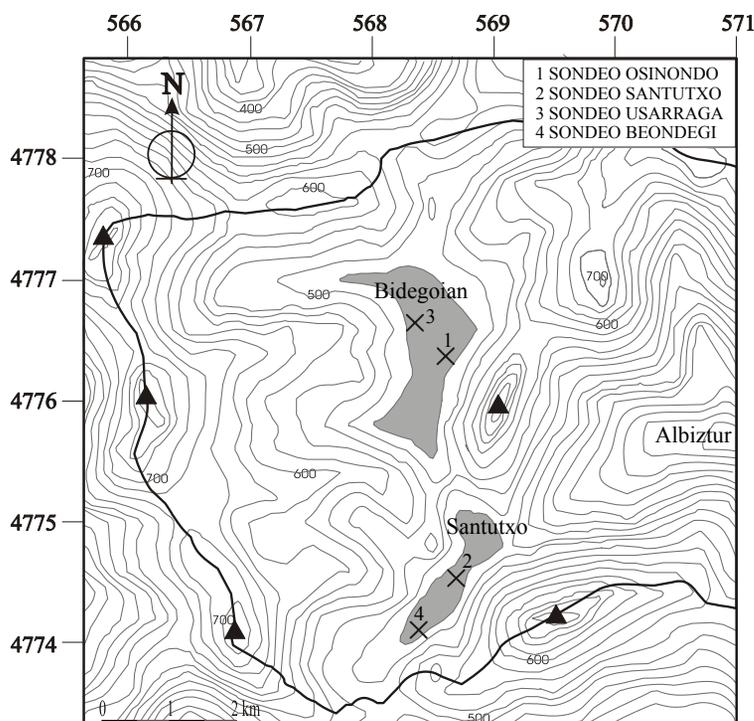
120-200 cm: Es igual que el tramo anterior pero no está saturado.

200-240 cm: Grava con arena. Vuelve a estar saturado.

240-270 cm: Arena de color marrón sin cantos.

Una vez introducido el tubo de PVC se mide el nivel que se encuentra a 90 cm de profundidad. Se trata de un nivel saturado colgado que presenta una conductividad de 62,6  $\mu\text{S}/\text{cm}$  y una temperatura de 14  $^{\circ}\text{C}$ . Los datos se encuentran recogidos en el Anexo I.

La medida de nivel tomada el día 11 de Junio muestra que el nivel se encuentra a 80 cm de profundidad (10 cm por encima del nivel medido el día de la perforación).



*Figura 3.5: Situación de los sondeos manuales realizados en las depresiones de Bidania y Santutxo.*

### 3.2.4.2. INFORMACIÓN GEOFÍSICA

Dentro del Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987), se realizó una campaña de investigación geofísica mediante sondeos eléctricos verticales (SEV) en las depresiones de Bidania y Albiztur. El método utilizado fue el dispositivo Schlumberger con líneas de emisión AB de 200 metros.

En la depresión de Bidania se realizaron 38 SEV que permitieron obtener 11 perfiles geoelectrónicos y en Albiztur se llevaron a cabo 6 SEV y se obtuvieron 3 perfiles geoelectrónicos. Tanto los perfiles realizados como las curvas de campo obtenidas se encuentran en el mencionado estudio. Debido a la inexistencia de sondeos mecánicos que permitieran relacionar los valores de resistividades

obtenidos con las litologías, la atribución litológica a los valores de resistividad se hizo en base a rangos de valores extrapolados partiendo de materiales de características *a priori* similares, de tal forma que se adoptaron las siguientes atribuciones:

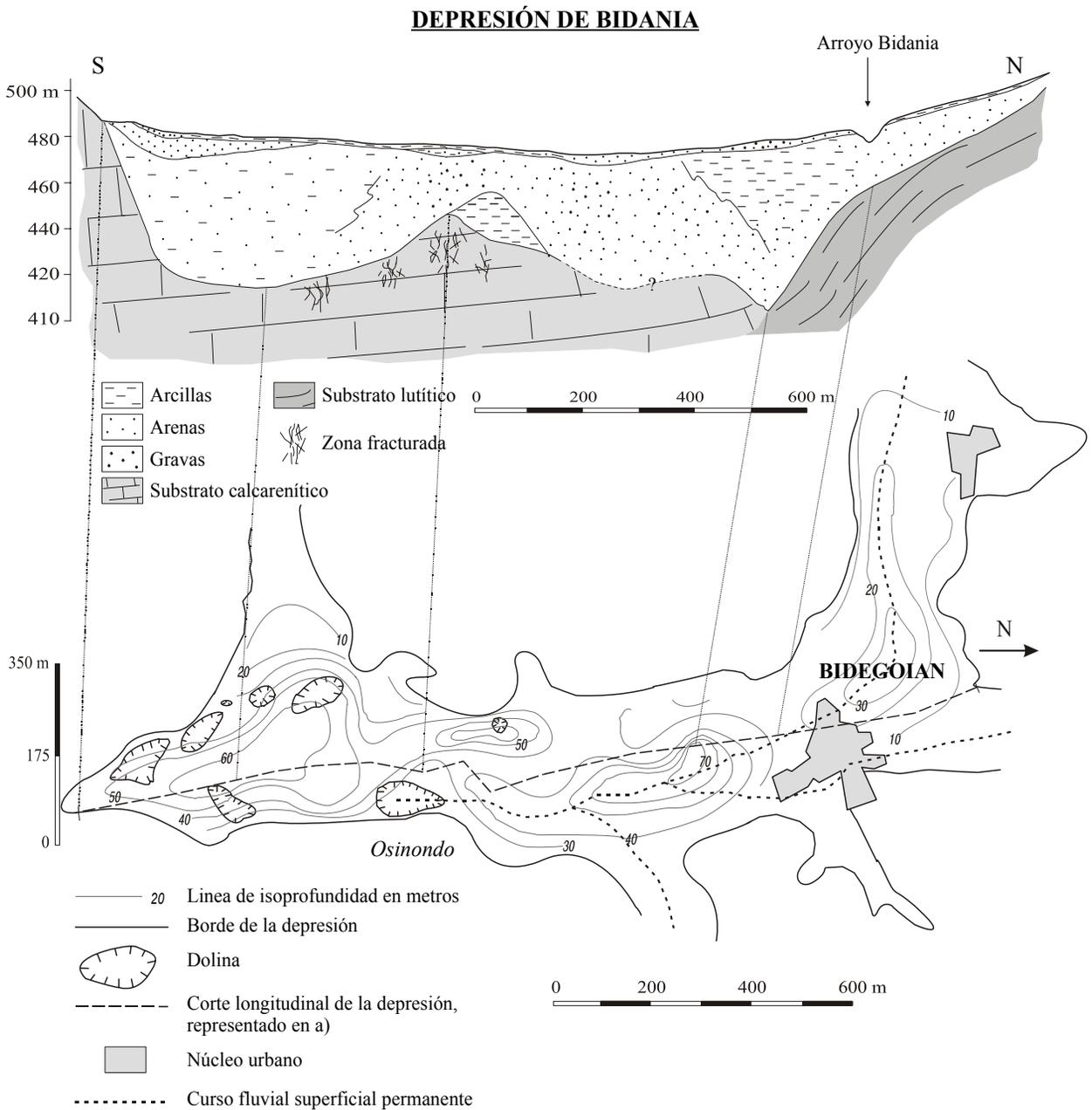
- Substrato rocoso; valores de resistividad superiores a 400 Ohm.m
- Materiales arcilloso-limosos: valores inferiores a 100 Ohm.m
- Materiales de granulometría gruesa (arenas y gravas): valores superiores a 100 Ohm.m

No hay que olvidar que la fracción fina disminuye a medida que los valores de resistividad aumentan.

De acuerdo con los valores de resistividades obtenidos mediante los SEV, se han realizado los perfiles longitudinales de ambas depresiones que se muestran en las figuras 3.6a y 3.6b. Las conclusiones deducidas de esta campaña se encuentran documentadas y explicadas de forma detallada en el citado Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental, aunque a continuación se hace un breve comentario de los aspectos más importantes desde el punto de vista hidrogeológico, algunos de los cuales se aprecian en las figuras 3.6a y 3.6b.

1) La depresión de Bidania se desarrolla en su mayor parte sobre calcarenitas urgonianas (>400 Ohm.m) aunque en la parte septentrional se encuentra sobre materiales detríticos representados por lutitas (<40 Ohm.m) con alguna intercalación de calizas o areniscas. El substrato es muy accidentado con numerosas depresiones de morfología cónica, atribuibles al importante desarrollo de la karstificación en esta zona, con formas de notable desarrollo vertical. Los materiales más resistivos (arenas y gravas) predominan en el sector central de la depresión mientras que los más arcillosos se reparten hacia el Norte y el Sur de la misma. La potencia máxima de estos materiales cuaternarios (70 m) se alcanza a unos 250 m al Sur del núcleo municipal de Bidegoian (figura 3.6a), punto que coincide con el contacto entre los materiales carbonatados y lutíticos del substrato.

De acuerdo con las profundidades obtenidas, el substrato rocoso presenta tres depresiones principales que alcanzan profundidades de entre 50 y 70 m por debajo del terreno. Curiosamente, sobre la depresión más profunda, la del Norte, no se ha desarrollado ninguna forma exokárstica.



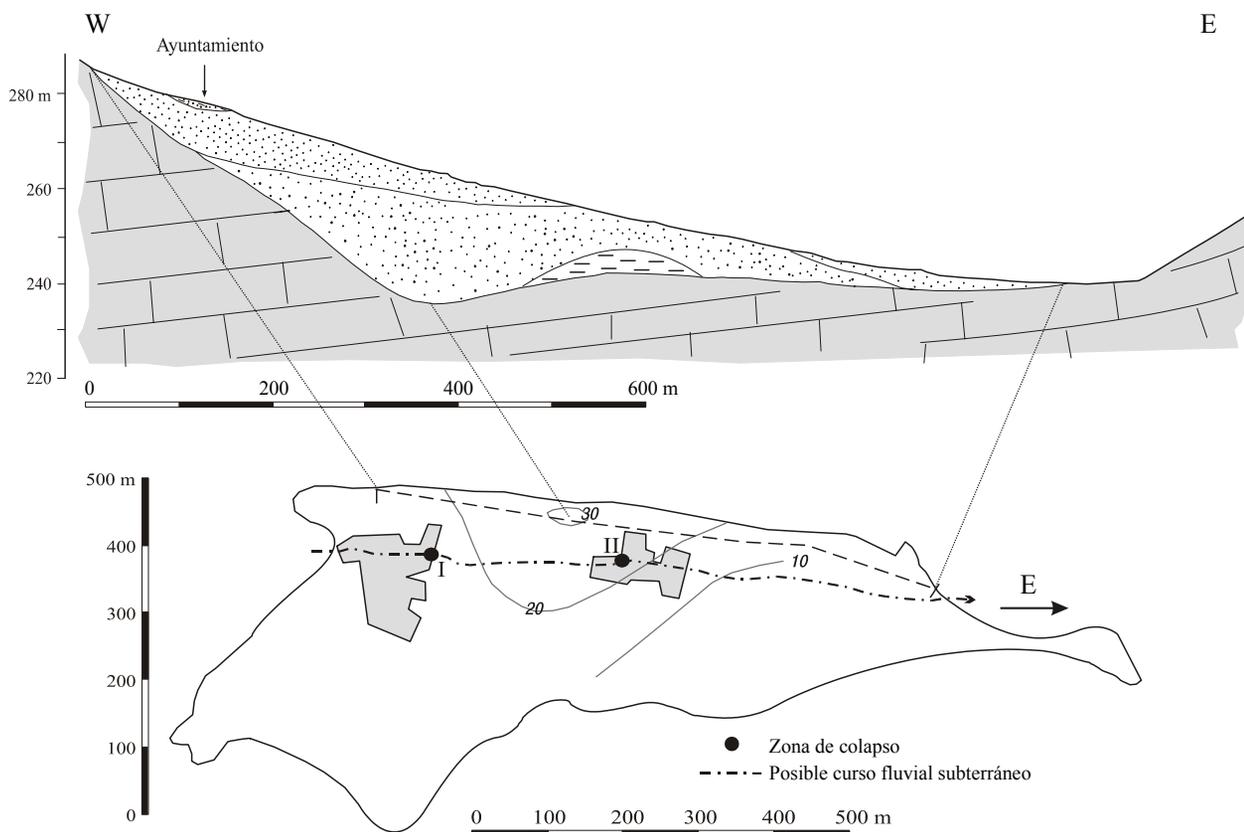
**Figura 3.6a:** Sección longitudinal del fondo de la depresión de Bidania (arriba) e isolíneas de profundidad del substrato (abajo) obtenidas a partir de la información geofísica existente.

Todas las dolinas de superficie existentes se encuentran en la mitad Sur y la mayor parte de ellas se sitúa al borde de la depresión más meridional y de mayor anchura, que es donde se localiza actualmente el sumidero (Osinondo) por el que el Arroyo Bidania se sume en su totalidad. Las dolinas de superficie en este sector parecen tener su origen en la concentración del flujo en la gran depresión del substrato; su localización de borde podría estar en relación con el aporte de agua subterránea desde

la masa rocosa carbonatada hacia esos conos subterráneos, atravesando parte de los depósitos cuaternarios. Estos tres grandes conos podrían actuar como importantes colectores de agua hacia el acuífero carbonatado inferior, agua procedente tanto de los propios materiales cuaternarios como, posiblemente, de las formaciones carbonatadas próximas. En el capítulo de Hidrogeología se retoma esta idea.

2) La depresión de Albiztur (figura 3.6b) se encuentra en su totalidad sobre las calizas y calcarenitas urgonianas y presenta una potencia de recubrimiento inferior con un máximo medido de 30 m.

### DEPRESIÓN DE ALBITZUR



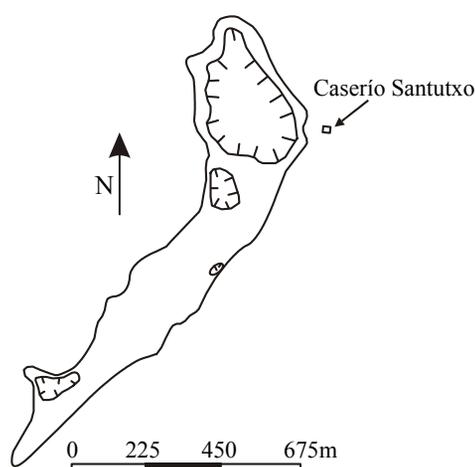
**Figura 3.6b:** Sección longitudinal de la depresión de Albiztur (arriba) e isólinas de profundidad del substrato (abajo) obtenidas a partir de la información geofísica existente. La leyenda es igual que la de la figura 3.6a.

Como muestra la figura 3.6b, la zona en la que el cuaternario alcanza en Albiztur la mayor potencia se sitúa junto al límite Norte de esta depresión, coincidiendo con un pequeño cono subterráneo desarrollado en las calizas urgonianas. Aunque la depresión de Albiztur no presenta en superficie ninguna dolina, debido a rellenos antrópicos para cultivo, existen razones para pensar en la

existencia de un curso subterráneo que atraviesa los materiales cuaternarios longitudinalmente en dirección WE. Esta afirmación se basa en el hecho de que en dos zonas concretas de este cuaternario (marcadas como I e II en la figura 3.6b) se han producido durante los últimos años numerosos colapsos del terreno.

El punto I de la figura está ubicado a pocos metros al Este de la iglesia y en este punto, según información local, tras algún colapso se ha llegado a ver incluso un pequeño curso fluvial discurriendo hacia el Este. A unos 250 m en esa misma dirección existía hasta hace poco tiempo un caserío (punto II), cuyas paredes mostraban numerosas grietas que, tras ser reparadas, no dejaban de aparecer. Curiosamente el nombre de este caserío era Errekalde, que en castellano significa “zona de riachuelo”. Parece lógico pensar que esas grietas se debían a una inestabilidad en el terreno producida por alguna oquedad cuyo origen podría ser una regata que pasara por debajo. El caserío Errekalde fue demolido a finales de 1996 y desde finales de 1999 existen en su lugar varios chalets.

3) En cuanto a la depresión de Santutxo, no existe información geofísica que permita dilucidar la morfología de su base. Sin embargo, existen varias dolinas de diferentes dimensiones cuya localización, al igual que en el caso de la depresión de Bidania, sigue un patrón definido (figura 3.6c).



**Figura 3.6 c: Localización de las dolinas en la depresión de Santutxo.**

En general, se puede afirmar que la gran mayoría de las dolinas observables en las tres depresiones se localizan en puntos muy concretos influenciadas probablemente por el régimen hidrogeológico que tiene lugar tanto por debajo, sobre todo, como sobre ellas. Los grandes conos subterráneos, del sustrato, de Bidania, Albiztur y Santutxo se localizan muy cerca de los bordes externos, cerca de las laderas calcáreas de los montes circundantes. Esta situación parece indicar que estos conos pueden servir de colectores del agua procedente de los materiales calcáreos circundantes.

Esto significaría que parte del agua infiltrada en los afloramientos carbonatados de los alrededores puede fluir lateralmente y percolar de forma concentrada hacia el medio subterráneo a través de esos colectores subterráneos dirigiéndose hacia la zona de descarga del Sistema Kárstico. Este aspecto se retoma a lo largo del capítulo 4.

### ***3.3. GEOLOGÍA ESTRUCTURAL***

La historia deformacional que ha afectado a este sector de la Cuenca Vasco-Cantábrica es muy complicada como lo demuestran los cortes estratigráficos I-I' y II-II' de la figura 3.2. De hecho, muchos de los caracteres estratigráficos observables parecen tener su origen en fenómenos tectosedimentarios tardi-hercínicos. No obstante, las diversas formaciones geológicas descritas en el apartado anterior tienen su origen estructural último en las fases finales de la Orogenia Alpina (Cenozoico). La influencia de esta *tectónica en evolución* se dejó sentir ya desde, al menos, tiempos jurásicos. En este apartado se analiza dicha evolución haciendo hincapié, sobre todo, en los fenómenos tectónicos sinsedimentarios por ser los de mayor incidencia en la zona.

#### ***3.3.1. EVOLUCIÓN TECTÓNICA***

##### ***3.3.1.1. ORIGEN TARDI-HERCÍNICO***

La deformación tensional de origen tardi-hercínico produce una fracturación con dos sistemas predominantes de dirección N20E y N110E. Este primer adelgazamiento de la corteza continental es el responsable de la aparición de la Falla de Azkoitia (al Sur de la zona de estudio), y del desarrollo de la Falla de Errezil (continuación hacia el Noroeste de la Falla de Leiza). La brecha tectónica intraformacional de más de 50 m de potencia y de edad aproximada Hettangiense ( Lías Inf.) que aparece al Este del área de estudio, pero fuera de ella, constituye también un testimonio de esta etapa de adelgazamiento. Debido a que estos accidentes tectónicos constituyen zonas de debilidad van a servir de base para las deformaciones posteriores, de acuerdo con el principio de la *economía tectónica* (MEGÍAS, 1988).

##### ***3.3.1.2. TECTÓNICA SINSEDIMENTARIA***

Desde el Lías-Dogger hasta el Aptiense se producen subsidencias diferenciales que provocan cambios litoestratigráficos y variaciones de potencia. Se producen también movimientos kimméricos, fenómenos de carácter más regional. Las directrices predominantes de estos rasgos fueron aproximadamente N-S, evidentes en el sector central de la zona de estudio (Albiztur y NE de Bidegoian).

La presencia de fenómenos sinsedimentarios se ha puesto también de manifiesto, si bien su origen no está claro aún. Aunque se han explicado como movimientos verticales dentro de un régimen general distensivo, incluyendo también movimientos diapíricos incipientes, actualmente se piensa (“Cartografía Geológica 1:10.000” E.V.E., 1988) que en algunos sectores intervinieron esfuerzos compresivos. Sin embargo, teniendo en cuenta otras estructuras de similares características descritas en otros sectores de la región, hay que decir que su origen es incierto, pudiendo ser debidas a regímenes distensivos, a movimientos halocinéticos, a esfuerzos compresivos etc., incluyendo la posible actuación de fallas en dirección.

### **3.3.1.3. TECTÓNICA POSTSEDIMENTARIA**

Los esfuerzos tectónicos del Ciclo Alpino originan estructuras de dirección predominantemente NW-SE, con vergencia N o NE, siendo la fase compresiva más importante que da origen a estas estructuras de edad post-Luteciense ( Eoceno Medio-Sup.). Frente a estos esfuerzos se individualiza un zócalo hercínico y una cobertera plegada con el Keuper actuando como nivel de despegue regional generalizado entre ambos. Dentro de la zona estudiada se pueden observar dos estructuras principales que se describen a continuación:

#### Corredor Errezil-Tolosa

Toma este nombre la franja, de dirección NW-SE, que se extiende desde Errezil, al Oeste, hasta Tolosa, al Este, mostrando una elevada deformación por ruptura. Se trata de la continuación de la Falla de Leiza (Norpirenaica) de importancia regional que atraviesa la zona de estudio por el Norte. La falla originada en las últimas etapas del Ciclo Hercínico se “reutiliza” haciéndose cada vez más vergente al N. Se trata de una falla profunda de plano muy verticalizado y traza bastante recta que parece responder a una ruptura en dirección. La importancia de la deformación producida se pone de manifiesto por la presencia de rocas muy brechificadas asociadas a este corredor.

#### Serie monoclinal de Urrestilla-Albiztur

Al Sur del corredor Errezil-Tolosa la estructura se presenta más regular, constituyendo un monoclinal con algunas estructuras menores asociadas, como el anticlinal de Urraki, situado hacia el Oeste, fuera ya de la zona de estudio, y el propio sinclinal del sector central de la zona (figura 3.2.). Esta serie se encuentra limitada al Sur por la Falla de Azkoitia, que la separa bruscamente del Complejo Supraurgoniano. Parece tratarse de una fractura muy verticalizada que responde a una etapa distensiva posterior a la compresión principal.

### 3.3.2. ANÁLISIS DE LA FRACTURACIÓN

A pesar de que se dispone de la información topográfica de una única cavidad (Leizeaundia) dentro del área de estudio, se ha realizado la comparación de la orientación de los conductos kársticos principales que conforman esta cueva con la orientación de la fracturación. Según se observa en la figura 3.11, esta cavidad muestra un conducto principal desarrollado a favor de dos direcciones preferenciales prácticamente perpendiculares que coinciden con las directrices estructurales del área de estudio y responden a N110E y N20E aproximadamente. Como se puede ver en la sección longitudinal de la figura, aparecen también fracturas verticales de menor entidad que cortan el conducto principal dando lugar a numerosos saltos de entre 6 y 14 m. Estas fracturas secundarias presentan una dirección próxima a N-S y dan lugar a estrechas gateras de difícil acceso.

Teniendo en cuenta la escasez de afloramientos propicios para la toma de medidas de fracturación, se escogieron 12 estaciones, una de las cuales se encuentran fuera de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur. Ésta está ubicada a 10 km al Oeste del área de estudio, en una zona en la que afloran las calcarenitas urgonianas que forman el acuífero kárstico y a la que corresponde el diagrama de rosas situado en la margen superior izquierda del recuadro de la figura 3.7.

En cada estación se tomaron de 7 a 36 medidas y en los casos en que el número de medidas fue demasiado bajo, la representación en el diagrama de rosas se realizó considerando conjuntamente los datos de varias estaciones. En la figura 3.7 se ha incluido en cada diagrama un valor de “n” que corresponde al número de medidas tomadas e incluidas en cada representación.

A pesar de la pluralidad en las direcciones y del escaso número de medidas, se pueden distinguir cuatro máximos principales que en el diagrama de rosas total de la figura se han denominado 1, 2, 3 y 4 respectivamente. El primero coincide con una dirección N110E; el segundo corresponde a una dirección N20E; el tercero engloba un grupo amplio de fracturas encaramadas al eje N-S y el cuarto se aproxima a N70-80E.

De acuerdo con estos máximos y con las direcciones preferenciales de la cueva de Leizeaundia (única información topográfica disponible de cavidades), parece existir una relación entre la orientación de los conductos kársticos y la orientación de la fracturación, ya que los tres primeros máximos de la fracturación coinciden con las direcciones principales de los conductos de Leizeaundia.

Por otra parte, la estratificación juega también un papel importante en el desarrollo de la karstificación, ya que el buzamiento de las capas limita su desarrollo. Como queda reflejado en la sección longitudinal de la figura 3.11, la morfología de la cueva es escalonada con saltos verticales que unen zonas de menor pendiente. Éstas coinciden con el buzamiento de las capas que en esta zona se aproxima a los 15-20°. De acuerdo con la nomenclatura de FORD y EWERS (1978) (WHITE, 1988) esta cavidad correspondería a una *Invasión Vadose Cave*.

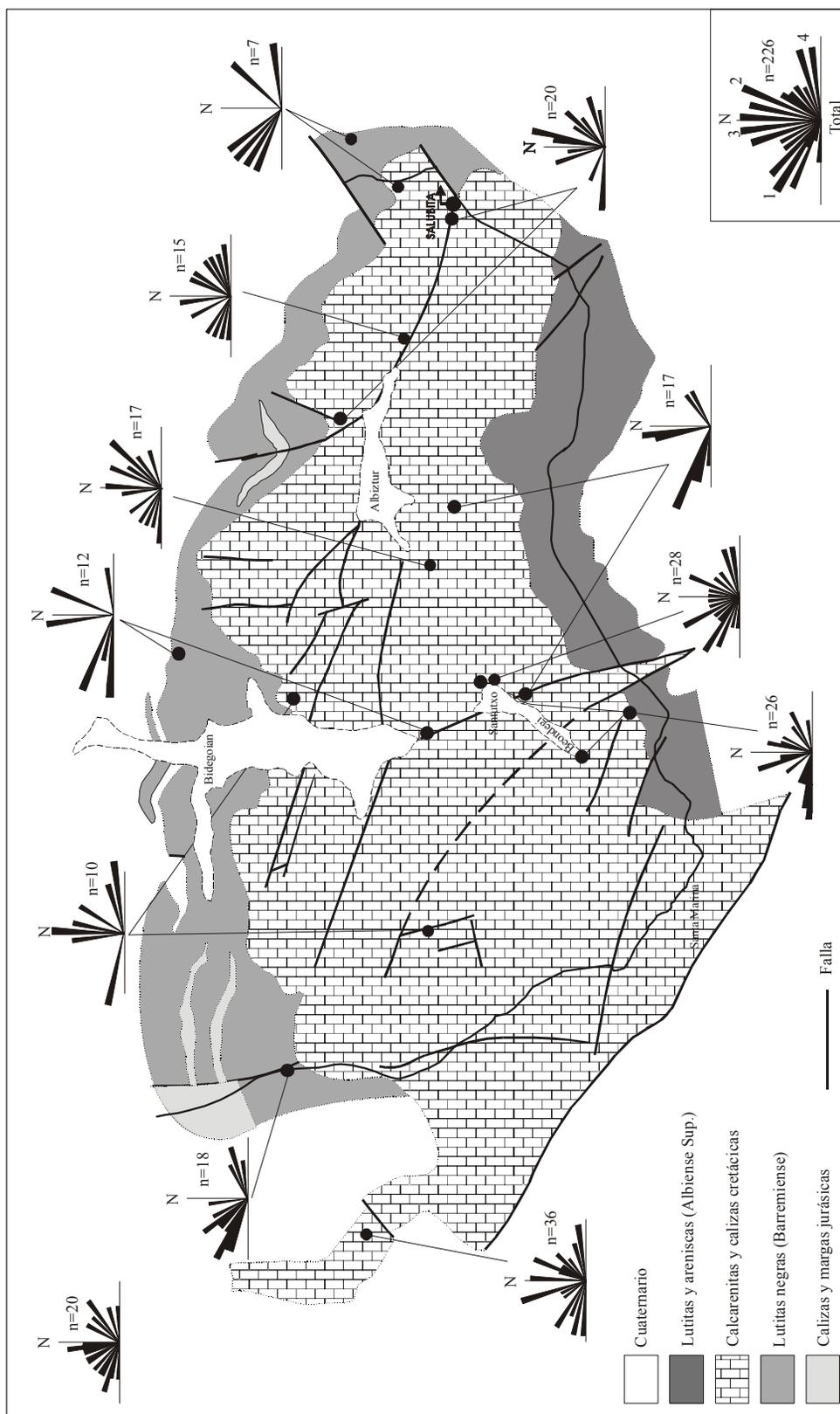


Figura 3.7: Orientación de la fracturación en torno a la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur.

### **3.4. GEOMORFOLOGÍA**

Es evidente el importante papel que el agua posee en el desarrollo del karst. Es el principal agente *moldeador* del material carbonatado que va a albergarlo durante un período de tiempo relativamente largo, hasta su salida por una zona de descarga. Por una parte, es el agua el que esculpe el medio pero, por otra, es el medio el que condiciona esa labor escultora del agua. Por otra parte, el agua desarrolla sus vías subterráneas y son precisamente éstas las que dan lugar a unas u otras características hidráulicas. Así, para la realización de un correcto estudio hidrogeológico, es necesario llevar a cabo un estudio geomorfológico del entorno que facilitará la interpretación de los datos hidrogeológicos.

#### **3.4.1. FORMAS DEL RELIEVE - DESARROLLO DE LA KARSTIFICACIÓN**

##### **3.4.1.1. DOLINAS Y OTRAS DEPRESIONES KÁRSTICAS**

La mayoría de las depresiones de la zona de estudio son elongadas y de dimensiones decamétricas, tanto en diámetro como en profundidad. La mayor parte de ellas es fácilmente observable en fotografía aérea y se encuentra en la mitad occidental de la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur. La localización de las formas kársticas comentadas en este apartado se ha incluido en la figura 3.8, en la cual se han ubicado también las cavidades halladas hasta el momento en la zona. Las dolinas más importantes en tamaño se concentran en dos áreas concretas de directrices concordantes con la geología estructural comentada en el apartado 3.3.:

- La primera de estas áreas es la depresión de Bidania, de dirección aproximada N-S situada a una cota cercana a los 480 m. Con una longitud de 2 km y una anchura media de 700 m, cubre una superficie de 1.4 km<sup>2</sup>. En su interior existen cinco dolinas de diámetro superior a 100 m y otras de diámetro inferior (figura 3.6a). Aunque estas depresiones funcionan como sumideros esporádicamente, solo una lo hace permanentemente, la situada junto al caserío Osinondo, de 12 m de profundidad, por donde desaparece el Arroyo Bidania. El caudal de entrada más bajo detectado durante el desarrollo de este estudio ha sido de 1 l/s (el 26 de Octubre de 1999), mientras que el más alto se observó el 27 de Noviembre de 1998 al infiltrarse un caudal próximo a 300 l/s. La conexión hidráulica entre este sumidero y el manantial de Salubita se ha puesto de manifiesto en varias ocasiones por medio de ensayos con trazadores (apartado 4.8.).

- La segunda área corresponde a la depresión de Santutxo o *cuenca cerrada de Beondegi* (denominada así en 1961 por el antropólogo Don José Miguel de BARANDIARAN) de dirección N40E. Se trata de una pequeña cuenca endorreica situada a una cota de 450 m cuya superficie es próxima a 0.3 km<sup>2</sup>. La dolina principal de este pequeño valle, de diámetro superior a 300 m y una profundidad de unos 40 m, se encuentra en el extremo septentrional del mismo, junto al caserío

Santutxo. En el extremo meridional del pequeño valle existe una zona de unos 400 m<sup>2</sup> de fondo plano y cubierta de arbolado que en períodos de fuertes lluvias funciona como importante zona de infiltración. El día 8 de Octubre de 1998 el caudal de infiltración era de 70 l/s. A lo largo de este valle aparecen otras dolinas de menor entidad que en aguas altas funcionan esporádicamente como sumideros con caudales de entrada inferiores a los 4 l/s.

De acuerdo con MILANOVIC (2000), estas dos depresiones concuerdan perfectamente con las características comunes de los **poljes**, de forma que pueden considerarse como tal. Desde un punto de vista hidrogeológico los poljes son el rasgo geomorfológico más prominente del karst. Su evolución suele estar frecuentemente asociada a procesos endógenos donde se encuentran en contacto rocas de diferente dureza con susceptibilidades distintas a la erosión. Bajo los materiales cuaternarios que rellenan la depresión de Bidania, por ejemplo, están en contacto los materiales lutíticos con los materiales calcareníticos urgonianos (figura 3.6a) de muy diferente comportamiento ante la erosión. El desarrollo de la mayoría de los poljes está controlado inicialmente por la tectónica aunque su formación está influenciada también por procesos exógenos. Las características comunes de los poljes, de acuerdo con el citado autor, son:

- Existencia de una cubierta de superficie plana compuesta por depósitos cuaternarios rodeada de una masa de roca carbonatada karstificada que se extiende por encima de la cota del polje.
- En numerosos casos presentan morfologías elongadas, donde el eje más largo marca las directrices estructurales de la roca carbonatada.
- A lo largo de su perímetro suele ser frecuente la aparición de manantiales, ponors (sumideros) y estavelle (apartado 4.4.).
- Normalmente aparecen cursos de agua temporales (los cursos de agua permanentes son raros) entre el manantial más importante y el sumidero, y suelen presentar variaciones de caudales importantes.
- En los depósitos cuaternarios son frecuentes los ponors aluviales.
- Durante los períodos de estiaje el nivel piezométrico suele permanecer a gran profundidad, por debajo del paleorelieve del polje.

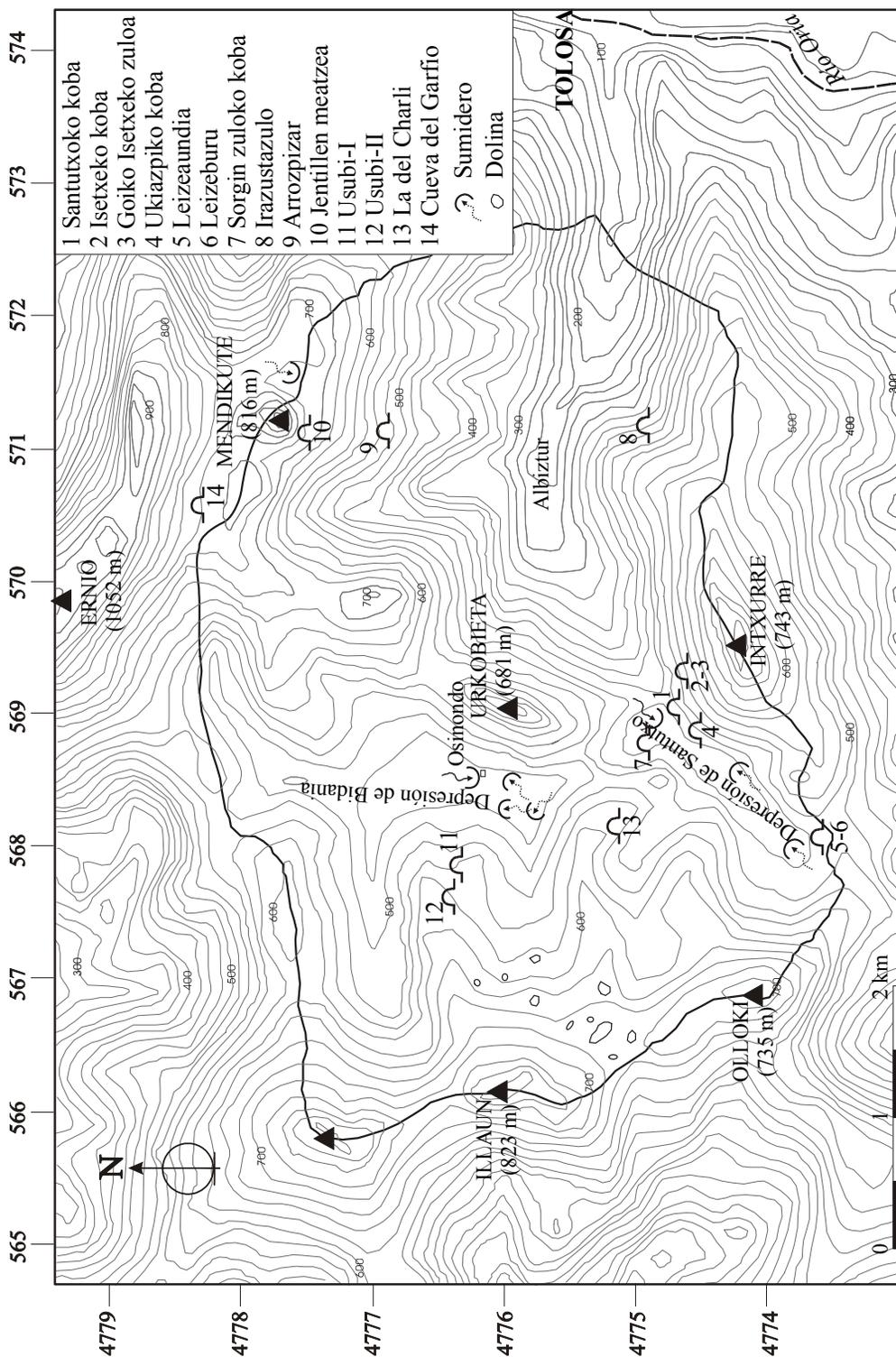


Figura 3.8. Localización geográfica de las principales formas kársticas de la zona de estudio.

Si el polje se encuentra rodeado de montañas se denomina *enclosed polje*, cuya principal característica es que el agua de precipitación sale del polje principalmente de forma subterránea. Por otra parte, si existen evidencias de la influencia superficial, se trata de un *upstream open polje*. Según estas especificaciones y las observaciones de campo, la depresión de Santutxo se adapta perfectamente a la descripción del *enclosed polje*, mientras que la de Bidania correspondería a un *upstream open polje*. Además, los poljes suelen inundarse cuando la capacidad de infiltración de los sumideros es menor que la cantidad de agua que les llega, como suele ocurrir tanto en algunos puntos de la depresión de Bidania como en la de Santutxo.

En el límite occidental de la cuenca, en torno al monte Illaun, al Oeste de Bidegoian, aparecen numerosas dolinas en cotas comprendidas entre los 550 y los 720 m que podrían considerarse como un tercer grupo. Son depresiones circulares de fondo plano, cuyo diámetro en ningún caso sobrepasa los 100 m y que no funcionan como sumideros.

En lo que se refiere a la mitad oriental de la cuenca, existen algunas dolinas jalonando la Falla de Errezil junto a la ladera Este del monte Mendikute, tanto al Norte como al Sur de la misma, a una cota de unos 690 m. Aunque ninguna posee un diámetro superior a 100 m, una de ellas es importante debido a su profundidad, próxima a los 10 m, y por la gran cantidad de agua que se infiltra tras períodos de fuertes lluvias. El día 20 de Diciembre de 1999 se observó un caudal de entrada de unos 60 l/s. Esta parece quedar fuera del límite de la cuenca de drenaje de la Regata Albiztur ya que tras varios ensayos con trazadores, no se ha podido demostrar conexión hidráulica alguna con la regata por lo que ha servido para fijar el límite Noreste de la cuenca en la propia Falla de Errezil.

#### **3.4.1.2. CAVIDADES**

La rápida respuesta del manantial de Salubita y su importante aumento de caudal tras períodos de fuertes lluvias junto a sus rápidos descensos, hizo suponer que el agua debía desplazarse desde la superficie, si no hasta el punto de descarga (tránsito), sí hasta la zona saturada (transferencia), principalmente a través de conductos bien desarrollados que permitieran que el agua fluyera a gran velocidad. Este comportamiento está muy extendido en diferentes acuíferos carbonatados del País Vasco. El cercano Macizo de Izarraitz, por ejemplo, guarda en su interior un gran número de simas verticales y/o casi verticales ya topografiadas, la mayoría de las cuales sobrepasa los 200 m de profundidad llegando incluso hasta los 480 m. La única cueva activa topografiada en la zona de Salubita llega a una profundidad de 300 m (figura 3.11). Por su parte, las cavidades de desarrollo horizontal que aparecen aquí son de pequeño tamaño y en su interior no existe curso de agua alguno.

Al igual que en otras zonas del País Vasco, ésta es una zona estrechamente ligada a supersticiones, misterios y leyendas unidas a genios y gentiles que en tiempos remotos habrían

habitado estas tierras. Según algunas de estas leyendas, muchas cuevas se encuentran unidas por vía subterránea a ciertos caseríos. Se creía, por ejemplo, que desde la cocina del caserío Aldabazar (situado en la ladera Sur del monte Intxurre) había una comunicación subterránea con la cueva Arrobigaña, hecho que no ha podido ser constatado puesto que en la actualidad no se conoce cueva alguna con ese nombre. También se creía en la existencia en una cueva en el monte Mendikute, llamada Jentillen meatzea (la mina de los gentiles) de la morada del genio de Mari (Ernio y su entorno, 1999); la ubicación de esta cueva se aprecia en la figura 3.8, junto con el resto de cavidades inventariadas.

En la tabla 3.1 se reflejan todas las cavidades encontradas hasta el momento en la zona de estudio y sus características más importantes. Como se puede observar, el nombre de las cavidades proviene de fuentes diferentes como son los propios habitantes de la zona, el Catálogo Espeleológico de Gipuzkoa (C.E.G.) realizado por la Sociedad de Ciencias Aranzadi, el libro escrito por Don José Miguel de BARANDIARAN en 1961 y que lleva por título “El Castro de Inchur”, y el Grupo Espeleológico OARGI de Tolosa. Durante la realización de este trabajo, han aparecido cuatro nuevas cavidades de las que no había referencia alguna, por lo que se han nombrado como Leizeburu, Irazustazulo, Usubi-I y Usubi-II.

FUENTE					X (UTM)	Y (UTM)	Z(m)	DESARROLLO (m)	
Moradores	S. C. Aranzadi	Barandiaran	OARGI	Muguerza				v	h
	Santutxo'ko Koba				569041	4774850	475	0	19
Isetxe'ko Kobia	Santutxo'ko Kobaxka	Kobalde			569255	4774845	465	0	28
Goiko-Isetxe'ko-Zuloa					569250	4774845	465	-	0
Ukiazpi'ko-Kobia	Santutxo'ko-Aizpe-Aundia	Beondei'ko-Kobia			568800	4774540	490	0	15
Leizeaundia	Santutxo'ko Beko Leizea				568755	4773850	540	300	250
				Leizeburu	568755	4773845	570	-	-
				Irazustazulo	571250	4775080	350	-	0
Arrozpizar	Txorrote				571100	4776980	570	25	100
Jentillen meatzea	Mendikuteko koba				571200	4777530	725	-	15
				Usubi-I	567255	4776375	585	-	>5
				Usubi-II	567250	4776390	595	-	0
	Sorgin zuloko koba				568850	4774800	445	-	>10
			La del Charli		568025	4775125	590	>20	0
			Cueva del Garfio		570450	4778450	740	>80	-

**Tabla 3.1: Conjunto de cavidades existentes en la zona de estudio. El guión hace referencia a la inexistencia de información (v: vertical; h: horizontal).**

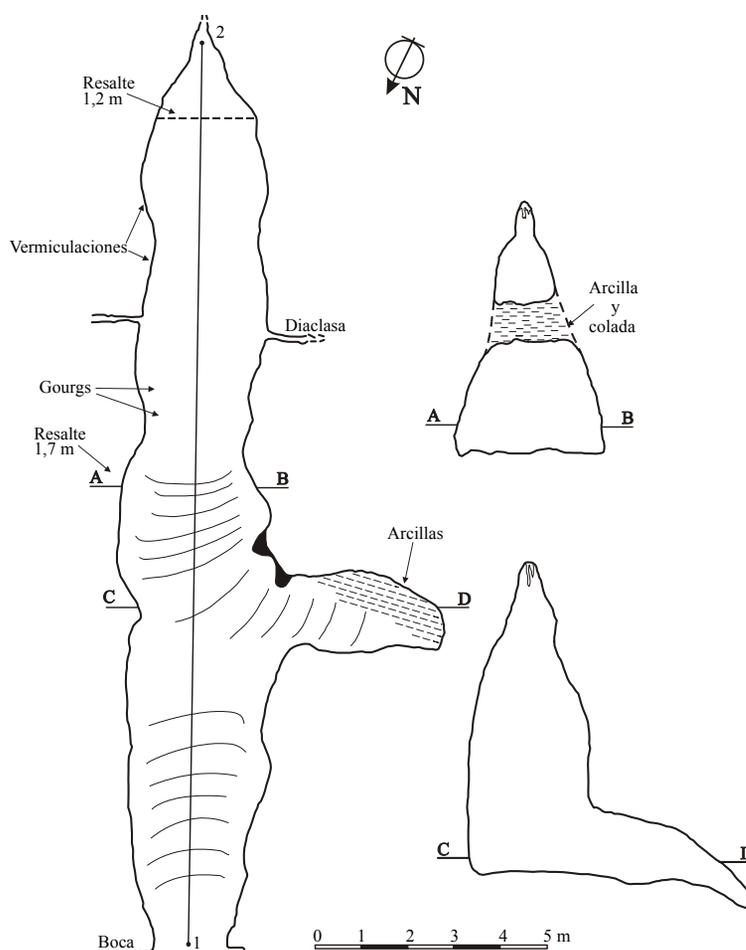
A partir de ahora, cada vez que se haga mención de alguna de las cavidades que aparecen en esta tabla, se va a dar prioridad a la toponimia original pero manteniendo las reglas gramaticales actuales del Euskera, puesto que éste es el idioma utilizado en la toponimia local. Así pues, los

nombres serán los siguientes: Santutxoko koba, Isetxeko koba, Goiko Isetxeko zuloa, Ukiazpiko koba, Leizeaundia, Leizeburu, Irazustazulo, Arrozpizar, Jentillen meatzea, Usubi-I, Usubi-II, Sorgin zuloko koba, La del Charli y Cueva del Garfio.

A continuación se describe cada cavidad en base a las observaciones de campo y a los datos existentes con anterioridad.

### Santutxoko koba

Esta pequeña cueva de desarrollo horizontal (19 m) se encuentra muy cerca del cruce de entrada a Beizama en la carretera que sube de Tolosa a Bidegoian, en la pared de la cantera de detrás de la venta de Santutxo. Aunque en Octubre de 1964 existían, según miembros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, pequeños gourgs activos y estalactitas y estalagmitas con fuerte goteo, en la actualidad no hay circulación de agua.

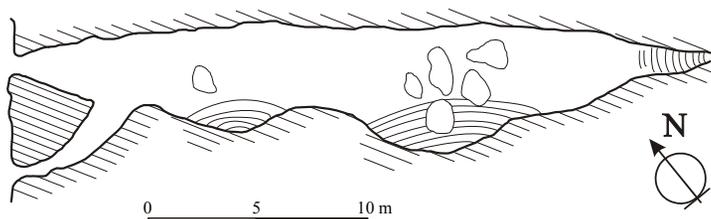


**Figura 3.9: Topografía detallada de Santutxoko koba.**

Existen perlas de caverna muy irregulares y se puede ver algunos caparazones de caracoles cubiertos por una pátina de calcita. Se ha desarrollado a favor de una fractura de dirección N140E que es cortada perpendicularmente por dos diaclasas existentes en su interior. Una de ellas da lugar a una pequeña gatera taponada por arcilla. La figura 3.9 muestra la topografía detallada de esta cavidad realizada en Diciembre de 1968 por miembros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi. Los puntos 1 y 2 marcados en la figura son los puntos de referencia a partir de los cuales se ha medido la longitud de la cavidad.

### **Isetxeko koba**

Se encuentra en la vertiente Norte del monte Intxurre, a unos 500 m al Sureste del caserío Isetse y a unos 100 m de distancia de la carretera que desciende hacia Tolosa, en el interior de un frondoso bosque de hayas. Se prolonga unos 28 m hacia el Sureste existiendo en su interior una chimenea que comunica con el exterior e ilumina tenuemente la sala. A través de los numerosos bloques y derrubios que hay en el suelo, se llega al punto más alejado de la entrada que tiene otra entrada la cual está taponada. La figura 3.10. muestra el croquis detallado que de la misma realizó Don José Miguel de BARANDIARAN en Octubre de 1958, durante las excavaciones arqueológicas llevadas a cabo en el monte Intxurre.



*Figura 3.10: Isetxeko koba.*

### **Goiko Isetxeko zuloa**

Se trata de una cavidad vertical, muy cercana a la anterior, de unos 5 m de diámetro que parece tener un desarrollo horizontal practicamente nulo a tenor de las paredes que se pueden observar a través de la maleza. Hoy en día se utiliza como depósito incontrolado de basura y está llena de todo tipo de desperdicios entre los cuales se puede percibir basura doméstica, todo tipo de electrodomésticos y colchones. La gran cantidad de zarza y maleza que rodea este lugar hace que pase desapercibida.

### **Ukiazpiko koba**

Se encuentra en la vertiente Noroeste del monte Intxurre en el pequeño valle de Beondegi, a unos 450 m al Suroeste del caserío Santutxo. La amplia boca, de 8 m de altura y 14 m de anchura, es fácilmente visible desde lejos. Los 15 m de desarrollo horizontal (hacia el Sureste) que presenta, sirvieron durante largos años como cobijo a los pastores y al ganado que antaño habitó estas tierras. De hecho, en uno de los lados existe una muralla casi derruida que ya no se emplea pero que en la antigüedad sirvió como redil a más de un rebaño de ovejas.

### **Leizeaundia**

Es una cavidad de grandes dimensiones que se encuentra no lejos del borde meridional del valle ciego de Beondegi. Se puede acceder a ella por medio de una pista forestal que en fuerte pendiente sale en dirección SE desde la carretera que une este valle con Santa Marina. La boca se encuentra a 540 m de altitud junto a una estrecha curva, desde donde se oye el ruido de la cascada de agua que en continuo entra por este sumidero. Este agua viene de la fuente Jangoain, al pie del monte Intxurre, y tras caer por una pared de 10 m en cascada, se infiltra hacia el interior de la cueva.

La boca de la cavidad se encuentra en el fondo de un espectacular embudo de unos 40 m de diámetro formado a favor de una falla vertical de dirección N120E. La base de esta depresión está cubierta por troncos y derrubios y también por ingentes cantidades de basura. Se ha encontrado de todo (bicicletas, animales muertos, electrodomésticos, restos de vidrio, escombros, uralita, alfombras etc.), lo que dificulta el acceso a su interior debido a la inestabilidad de la base.

Por otra parte, el agua arrastra parte importante de este material hacia la boca y podría propiciar su taponamiento. A pesar de que esta cavidad se ha formado a favor de una falla, su desarrollo está condicionado también por la estratificación, de manera que a medida que se accede al interior el techo de la cueva desciende paulatinamente. A unos 60 m de la boca el avance se complica debido a la aparición de un salto de unos 14 m. A partir de ahí y hasta el punto más bajo (-300 m) explorado, la cueva muestra un escalonamiento continuo con numerosos saltos de varios metros, por lo que el avance ha de hacerse con material espeleológico adecuado. En la figura 3.11 se muestra un esquema de la topografía de la cueva vista en planta (a) así como su sección longitudinal (b).

Notar, por una parte, que se han marcado varios signos de interrogación relacionados con gateras que debido a su pequeño tamaño no han podido ser exploradas. Por otra parte, los espeleólogos ponen de manifiesto la existencia de un sifón en el punto de menor cota (-300 m) y la presencia de marcas indicadoras de que el agua en ese punto puede llegar a oscilar decenas de metros. Es posible que este nivel de agua corresponda al nivel piezométrico del Sistema Kárstico de Salubita, aunque este hecho no ha sido corroborado dada la dificultad de acceder hasta él. En cualquier caso, se ha puesto de

manifiesto la conexión hidráulica entre esta cavidad y el manantial de Salubita mediante ensayos con trazadores, como se comenta en el capítulo referente a la hidrogeología (apartado 4.8.). Por otra parte, existe una relación clara entre la morfología de esta cavidad y las directrices estructurales dominantes en la zona (NW-SE y NE-SW).

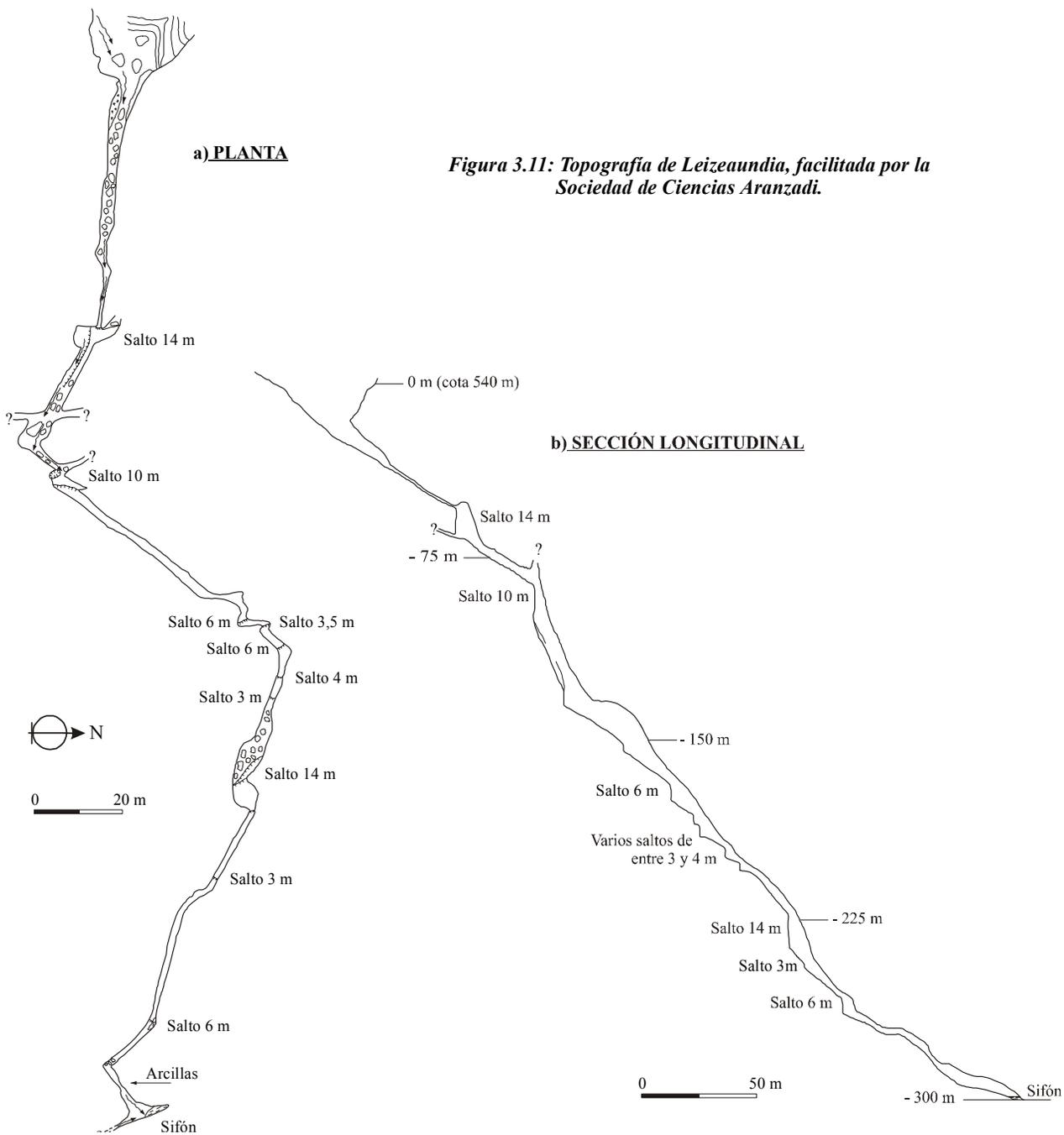


Figura 3.11: Topografía de Leizeaundia, facilitada por la Sociedad de Ciencias Aranzadi.

### **Leizeburu**

Siguiendo la pista forestal que conduce a Leizeaundia, existe otra cueva cuya morfología exterior es idéntica a la anterior. Es quizá algo inferior en tamaño pero su forma de embudo y su funcionamiento como sumidero permanente es igual. Se encuentra a cota superior a la anterior y desarrollada a favor de la misma falla antes mencionada. La topografía de Leizeaundia (figura 3.11) muestra que el segundo salto está unido a un conducto vertical que posiblemente se corresponda en superficie con Leizeburu.

### **Sorgin zuloko koba**

En el fondo de la gran dolina de Santutxo, a pocos metros del vertedero de residuos industriales, aparece la boca de entrada de esta cueva en medio de un denso pinar dominado por la maleza. La entrada, de 1 m de anchura, no llega a los 2 m de altura y avanza hacia el Este en ligera pendiente estrechándose poco a poco. Aunque existe cierta humedad y se observa cierto goteo intermitente, no existe ningún curso de agua importante.

### **Irazustazulo**

Al Sur de la depresión de Albiztur, junto al caserío Irazusta, muy cerca de la cantera de San Antón, existe una estrecha pista sin asfaltar de dirección N-S. Esta cavidad aparece a uno de los lados de esta pista pero es difícil de ver por su pequeño tamaño que no supera los 50 cm de diámetro. El agujero está rodeado de espeleotemas y numerosas recristalizaciones de calcita y existe una diferencia de temperatura importante entre el exterior y el interior de la misma. Aunque no se trata de una cavidad practicable, a través del agujero se pueden ver las paredes verticales que forman la cavidad y no existe desarrollo horizontal alguno.

### **Arrozpizar**

Esta cavidad aparece al fondo de una depresión en forma de embudo al Sur del monte Mendikute, junto al caserío Arrozpide Goikoa. Aunque normalmente en superficie no funciona como sumidero, períodos de fuertes lluvias hacen que se active. El tamaño del interior de su boca es de unos 3 m y alberga también gran cantidad de desperdicios. Al parecer, según varios vecinos de Albiztur, a mediados de los años cuarenta en esta misma cavidad se produjo un suicidio, lo que motivó la entrada a la cueva del grupo de rescate de aquella época para recuperar el cuerpo. Tras una entrada estrecha y muy inclinada se llega a una repisa a partir de la cual se desarrolla un embudo vertical que no se puede franquear salvo con la infraestructura adecuada. Llegados a este punto, debido a la imposibilidad de continuar, el cuerpo jamás fue recuperado.

### **Jentillen meatzea**

La entrada (3 x 2 m), situada en la ladera Sur del monte Mendikute sobre un claro que se abre en medio de un denso hayedo, muestra una cueva limpia casi horizontal de unos 15 m de longitud.

### **Usubi-I**

Al Oeste de la depresión de Bidania, a pocos metros al Suroeste del caserío Usubi, existe una abertura circular de 3 m de diámetro y de escarpadas paredes verticales. Se encuentra en medio de un pastizal por lo que está rodeado por una valla para que el ganado no pueda acceder a ella. Según observaciones de las gentes del lugar, en ocasiones se oye ruido de agua en el fondo de la sima. Hace varias décadas hubo incluso un intento de acceder a su interior, aunque tras bajar unos diez metros en vertical hubo que desistir, puesto que algunas rocas sueltas de la parte alta de la sima comenzaron a desplomarse.

### **Usubi-II**

Bajo un joven roble, a 100 m de la anterior junto a la carretera rural que une Bidegoian con el barrio de Elola, se abre una cueva de algo más de 1 m de anchura y 2 m de altura. Se introduce hacia el Suroeste en fuerte pendiente estrechándose hacia el fondo. Desgraciadamente se trata de otra cueva utilizada como vertedero de, sobre todo, escombros.

### **La del Charli**

Aunque su entrada no supera los 3 m de diámetro, según los componentes del Grupo Espeleológico OARGI de Tolosa, tras una bajada vertical y aérea de unos 10 m, la sima da paso a una enorme bóveda de unos 20 m de diámetro que se estrecha en su parte más baja siguiendo hacia abajo.

### **Cueva del Garfio**

Esta cavidad se encuentra fuera de los límites de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur, al Norte de la Falla de Errezil en las faldas del monte Ernio. Su inclusión en este apartado, se debe al hecho de que desde un punto de vista hidrogeológico, se trata de una importante cavidad que ha permitido verificar que las aguas subterráneas que discurren a través de ella no van a parar hacia el Sur (Salubita-Regata Albiztur) sino hacia el Este (Tolosa-Anoeta).

Se trata de una cueva cuya angosta e inclinada entrada da idea de la dificultad que representa avanzar a través de ella. Aunque no ha sido topografiada, miembros del Grupo Espeleológico OARGI de Tolosa han accedido en varias ocasiones a su interior comprobando la existencia de un curso de agua a unos 80 m de profundidad. Hasta ese punto el avance se ve dificultado por la inclinación (>45°) de la cueva y por la angostura del único conducto susceptible de ser explorado. A partir de los 80 m de

profundidad la cavidad se vuelve totalmente vertical y no ha seguido siendo explorada. Varias fotografías obtenidas en su interior muestran la existencia de numerosos bloques desprendidos de las paredes y pequeñas fracturas que cortan perpendicularmente el conducto vertical.

A excepción de Arrozpizar, desarrollada en el contacto entre los materiales calizos y margoso del Jurásico, el resto de las cavidades aparecen sobre las calizas y calcarenitas urgonianas. Además, únicamente dos de ellas (Leizeaundia y Leizeburu) presentan una circulación de agua permanente y visible mientras que Arrozpizar funciona como sumidero ocasionalmente.

### **3.4.1.3. EL LAPIAZ**

Tanto el agua de lluvia caída directamente sobre el afloramiento carbonatado como el agua que alcanza la superficie rocosa tras pasar a través del suelo, son susceptibles de originar formas de disolución que pueden ser incluso indicadoras del ambiente en el que se han formado. Sin embargo, estas formas superficiales cuyo conjunto se conoce genéricamente como *lapiaz* y cuyas formas son muy variables, dependen de varios factores para su formación.

BÖGLI estableció en 1960 (PLUHAR y FORD, 1970; JENNIN, 1985) tres grupos genéticos diferentes de lapiaz: (1) aquéllos sujetos únicamente a **condiciones hidráulicas específicas**, (2) aquellos estrechamente unidos a **zonas de debilidad** debido a lineaciones estructurales preexistentes y (3) los producidos por disolución de la roca masiva en **ausencia de línea estructural** alguna. Lo normal es que los tres grupos mencionados se mezclen y den lugar a formas mixtas. Por otra parte, la cantidad, el tipo y la distribución de la precipitación, el tipo de suelo (si existe), las características litológicas, la potencia de los estratos y la porosidad primaria condicionan directamente el desarrollo de un tipo de lapiaz u otro.

Aunque las formas de disolución superficiales están muy extendidas en la zona de estudio, el lapiaz es fácilmente observable sobre todo en las laderas situadas al Norte de Albiztur. La mayor parte de ellas coincide con fracturas y diaclasas de pequeño tamaño ligadas a las directrices estructurales regionales. En algunos cortes de carretera se ha podido observar, además, que estas formas de disolución superficial se continúan en profundidad originando una especie de chimeneas verticales de aproximadamente 1 m de diámetro. Se han observado también oquedades producidas por disolución perpendiculares a las formas de disolución principales pero que no siguen pautas concretas. Según PLUHAR y FORD (1970), es muy probable que se trate de formas en las que el control estructural y el control hidráulico son comparables. Este tipo de lapiaz, conocido como "*pit- and tunnel- karren*" por estos autores, es muy común en zonas de clima templado. Además, la existencia de una fina cubierta de suelo, favorece su desarrollo.

Aunque gran parte del lapiaz carece de recubrimiento alguno, parte del mismo está cubierto por una fina capa de suelo de potencia inferior a 40 cm, que puntualmente pasa el metro de potencia, si se encuentra rellenando algún hueco importante. Podría decirse que el suelo aparece en forma de parches. Esto dificulta enormemente la posibilidad de realizar una cartografía de suelos fiable (apartado 2.2.1.) puesto que no hay una continuidad de cubierta edafológica. Por otra parte, este hecho repercute también en la vulnerabilidad de las aguas subterráneas, debido a que, en principio, cuanto menor es la potencia del suelo más vulnerable será el medio subterráneo.

### **3.5. CONCLUSIONES**

Las rocas que afloran en el área de estudio están representadas principalmente por materiales carbonatados (calcarenitas, calizas y margas) aunque aparecen también materiales detríticos (lutitas y areniscas) abarcando edades que van desde el Trías hasta el Albiense Superior. Las calcarenitas y calizas urgonianas se encuentran en la parte central ocupando la mayor parte del área de estudio y constituyen el **acuífero kárstico**, *sensu stricto*, que forma parte de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur, siendo las lutitas y margas del Barremiense las que constituyen el substrato impermeable tanto al Norte como en la zona central. Al Sur, sin embargo el borde impermeable lo constituyen las lutitas y areniscas del Albiense Superior. Los depósitos más modernos representados por arcillas, arenas y gravas cuaternarias de origen aluvial se encuentran rellenando tres depresiones elongadas, dos de las cuales son poljes (depresiones de Bidania y Santutxo) que albergan numerosas dolinas.

La fracturación es el principal condicionante del desarrollo de la cavidad de Leizeaundia (N110E, N20E), sin olvidar la influencia del buzamiento de los estratos. Esto conduce a pensar que, probablemente, condiciona también el desarrollo del resto de las cavidades, aunque por el momento no es posible probarlo debido a que el resto de las cavidades no han sido exploradas y, consecuentemente, no han sido topografiadas.

Por otra parte, las depresiones elongadas de Bidania y Santutxo coinciden también con dos de los máximos estructurales que se han representado en la figura 3.7. La primera presenta una orientación N-S coincidiendo con el máximo 3 y la segunda muestra una orientación aproximada N20E coincidiendo con el máximo 2 (figura 3.7).

La información geofísica obtenida mediante los SEV realizados en la depresión de Bidania muestra la existencia de tres grandes depresiones (conos) en el substrato carbonatado (figura 3.6a) bajo los materiales detríticos cuaternarios. Casi la totalidad de las dolinas existentes en esta depresión se han desarrollado alrededor del cono situado en el extremo Sur, lo que permite deducir que el agua infiltrada a través de los sumideros situados en el fondo de las dolinas, junto con, probablemente, agua procedente de la formación carbonatada, es concentrada por ese gran cono subterráneo hacia el

acuífero kárstico inferior. Es posible que los otros dos conos subterráneos también cumplan esa función colectora hacia el acuífero kárstico de flujos de agua tanto verticales (lluvias sobre la depresión) como laterales (desde los materiales carbonatados).

La figura 3.8 refleja la situación de las principales formas kársticas de la zona de estudio, donde se puede comprobar que la mayor parte de ellas se encuentra en la mitad Oeste de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur, sobre las calcarenitas urgonianas, y distribuida muy cerca de las depresiones de Bidania y Santutxo. Según la información planimétrica, la superficie de la cuenca drenada por ambas depresiones es próxima a 14,1 km<sup>2</sup>.

#### **4.1. INTRODUCCIÓN**

En este apartado se realiza un análisis detallado del funcionamiento hidrogeológico de la **Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur** y, más en concreto, del **Sistema Kárstico de Salubita**. Ya se comentó en el capítulo 1 (apartado 1.4) que el enfoque seguido en esta investigación era un enfoque funcional, basado en la interpretación de las frecuentes observaciones de las respuestas naturales en los puntos de descarga, principalmente en el más importante, la surgencia de Salubita, tratando así de inferir el comportamiento espacial del sistema a partir del temporal.

Este enfoque *down-up* es de todo punto necesario en una área en la que no se cuenta prácticamente con ningún punto de observación que no sean las propias surgencias, y sumideros. Por tanto, metodológicamente, la presente investigación puede resultar una buena referencia de consideración conjunta de diversas técnicas en áreas kársticas de casi total ausencia de pozos. Se ha tratado de seguir un esquema racional, a partir de la conceptualización general del karst como medio hidrogeológico, de forma que las referencias bibliográficas, relativas a aspectos concretos, a lo largo del texto son escasas.

Aunque este trabajo de investigación dio comienzo en Octubre de 1996, no es hasta Enero de 1997 cuando se obtienen los primeros datos de caudales a partir del limnógrafo instalado aguas abajo del manantial de Salubita. Debido a este hecho, el balance hídrico completo se refiere a los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99. Cabe destacar, sin embargo, que durante el período 1985-90 hubo un limnógrafo ubicado en el mismo punto que el actual, del que se extrajo valiosa información, parte de la cual se encuentra reflejada en el Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987), y que ha servido de gran ayuda como base durante el desarrollo de este trabajo de investigación. Los caudales del año hidrológico 1986-87 han sido también analizados con el fin de compararlos con los caudales de los dos años hidrológicos citados.

El primer paso ha consistido en la realización del inventario detallado de los puntos de agua presentes en la zona de estudio (figura 4.1 y tabla 4.1) y en el análisis de su red de drenaje. Posteriormente se ha realizado la descomposición del hidrograma total, obtenido en la estación de aforos, en función de los datos de caudales existentes (E.V.E.-D.F.G., 1987) y a los contenidos en sulfatos; con esa descomposición se han definido los hidrogramas correspondientes al manantial de Salubita y a la Regata Albiztur. El contenido en sulfatos ha permitido también distinguir las componentes principales del hidrograma del manantial de Salubita (*flujo base* y *flujo rápido*). El hecho de que el manantial de Salubita esté compuesto por varios puntos de descarga cuya función varía a lo largo del año, ha servido como punto de partida para analizar su comportamiento como *estavelle*.

Aunque el tema hidroquímico se aborda en el capítulo 5, en el presente capítulo se ha incluido también una parte de él ya que ratifica algunos aspectos observados a partir del análisis de los caudales.

Por otra parte, los ensayos con trazadores muestran las conexiones hidráulicas dentro del Sistema Kárstico de Salubita, así como de éste con otros manantiales, aparte del principal Salubita, de menor importancia en cuanto a caudales; sirven para acotar los límites de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur y facilitan numerosos datos cuantitativos de gran importancia. El estudio de las series cronológicas (análisis de las curvas de recesión y Análisis Correlatorio y Espectral) evidencia la importante capacidad reguladora del sistema. Además, se analizan y comparan las variaciones de los niveles piezométricos en los sondeos (datos de 1985-86 y 1997-99) y se explica la relación entre la hidrología de la depresión de Bidania y el manantial.

Finalmente se realiza el balance hídrico, llevando a cabo el cálculo de la evapotranspiración mediante los métodos de Thornthwaite, Primault, Allen y Penman, tratando de mostrar las posibilidades de cada uno de ellos en las condiciones del área estudiada. Se efectúa también un cierto análisis de sensibilidad del balance hídrico, habida cuenta de las incertidumbres asociadas a las lluvias, a los caudales y a la delimitación de las áreas de recarga. Acaba el capítulo con un análisis de la relación precipitaciones-aportaciones a escala plurianual.

#### **4.1.1. ASIGNACIÓN DE PERMEABILIDADES**

El Mapa Hidrogeológico del País Vasco a escala 1:100000 (E.V.E., 1996) asigna diferentes grados de permeabilidad a los materiales que afloran en el País Vasco. Estas permeabilidades se encuentran divididas en cuatro rangos que oscilan entre permeabilidad alta, media, baja y muy baja. Según este mapa, a las calizas y calcarenitas urgonianas que configuran el Sistema Kárstico de Salubita les corresponde una permeabilidad alta, lo mismo que a las calizas jurásicas y del tránsito Jurásico terminal-Neocomiense situadas más al Norte, que son drenadas por el manantial de Igaran (figura 3.2).

Los depósitos cuaternarios de la depresión de Bidania aparecen también con una permeabilidad alta mientras que a las lutitas y margas barremienses les corresponde una permeabilidad baja. Esta misma fuente de información describe escuetamente el tipo de acuífero asociado a cada material. Así, quedan descritos el Sistema de Salubita y el de Igaran como acuíferos libres de tipología kárstica entre flujo difuso y kárstico *sensu stricto*.

#### 4.2. RED DE DRENAJE. INVENTARIO DE PUNTOS DE AGUA

Como muestra la figura 4.1, la disposición de los cauces fluviales superficiales que alimentan la Regata Albiztur y el manantial de Salubita, configuran un mosaico discontinuo de pequeñas regatas que, tarde o temprano, se ocultan a favor de los numerosos sumideros existentes en la zona.

En la tabla 4.1 se incluyen las características principales de los puntos de agua incluidos en la figura 4.1. Como muestra esta tabla los tres únicos manantiales (marcados con asterisco) que llegan a secarse por completo son Zelentxiki (5), Intxaurbe (6) y Urritzaga (11). Los datos hidroquímicos de los manantiales se comentan en el capítulo 5.

Las pequeñas regatas intermitentes se activan principalmente durante los meses invernales como consecuencia de períodos de fuertes lluvias, en los cuales se produce una escorrentía superficial temporal que tras un breve recorrido se infiltra hacia la red de conductos que configuran el Sistema Kárstico de Salubita. Además, la mayor parte de esos cursos intermitentes de aguas superficiales se encuentran en la mitad Oeste de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur, en las depresiones de Bidania y Santutxo.

MANANTIAL	COTA (m)	CAUDAL (l/s)	MATERIAL DRENADO	USO
SALUBITA	120	100-3600	Calcarenitas y calizas urgonianas	Sin uso
IGARAN	325	70-200	Calizas neocomienses	Abastecimiento Albiztur
ETXEBERRI	108	50-100	Calizas jurásicas	Abastecimiento Piscifactoría
ERROTALDE	130	1-30	Calcarenitas y calizas urgonianas	En desuso
ARTUTXE (1)	525	5-10	Calcarenitas y calizas urgonianas	Abastecimiento caseríos
MADARIAGA (2)	375	1-4	Calcarenitas y calizas urgonianas	Abastecimiento Albiztur
SORGAIN (3)	400	1-4	Calizas jurásicas	Sin uso
ARKASIN (4)	320	1-10	Calizas jurásicas	Abastecimiento Albiztur
ZELENTXIKI (5)*	700	0-1	Calizas y margas jurásicas	Fuente
INTXAURBE (6)*	700	0-3	Calizas y margas jurásicas	Fuente
ITURRIOTZ (7)	650	<1	Calcarenitas y calizas urgonianas	Fuente
URKIZU GOIKOA (8)	500	<1	Calcarenitas y calizas urgonianas	Fuente
ERRAUSTI (9)	300	<1	Suelo sobre calcarenitas y calizas urgonianas	Fuente
ATZIZAETA (10)	350	<1	Calcarenitas y calizas urgonianas	Fuente
URRITZAGA (11)*	620	0-1	Lutitas urgonianas	Fuente
JANGOAIN (12)	630	0.5-5	Areniscas supraurgonianas	Fuente
ELOLA (13)	640	<1	Calcarenitas y calizas urgonianas	Fuente
AOZTEGI (14)	590	1-3	Lutitas urgonianas	Abastecimiento caseríos
GOIAZ (15)	490	-	Lutitas urgonianas	-
ERROTAZAR (16)	118	<1	Calcarenitas y calizas urgonianas	Fuente
CANTERA (17)	75	<1	Calizas jurásicas	Fuente
LEGORRETA (18)	90	1-10	Calcarenitas y calizas urgonianas	Sin uso
OTZARAIN (19)	100	<0.5	Calizas jurásicas	Fuente

*Tabla 4.1: Inventario de puntos de agua.*

En lo referente al tipo de agua que se infiltra a favor de los sumideros intermitentes, es importante discernir entre los que se localizan en las dolinas de la depresión de Bidania, bajo la ladera Oeste de Urkobieta, y los que se sitúan en la zona más baja de la depresión de Santutxo, bajo la ladera

Este del monte Olloki. En el primer caso el agua proviene, en parte, de dos manantiales (6 y 14 en la figura 4.1) situados en las calizas jurásicas y en las lutitas cretácicas, respectivamente (figura 3.2).



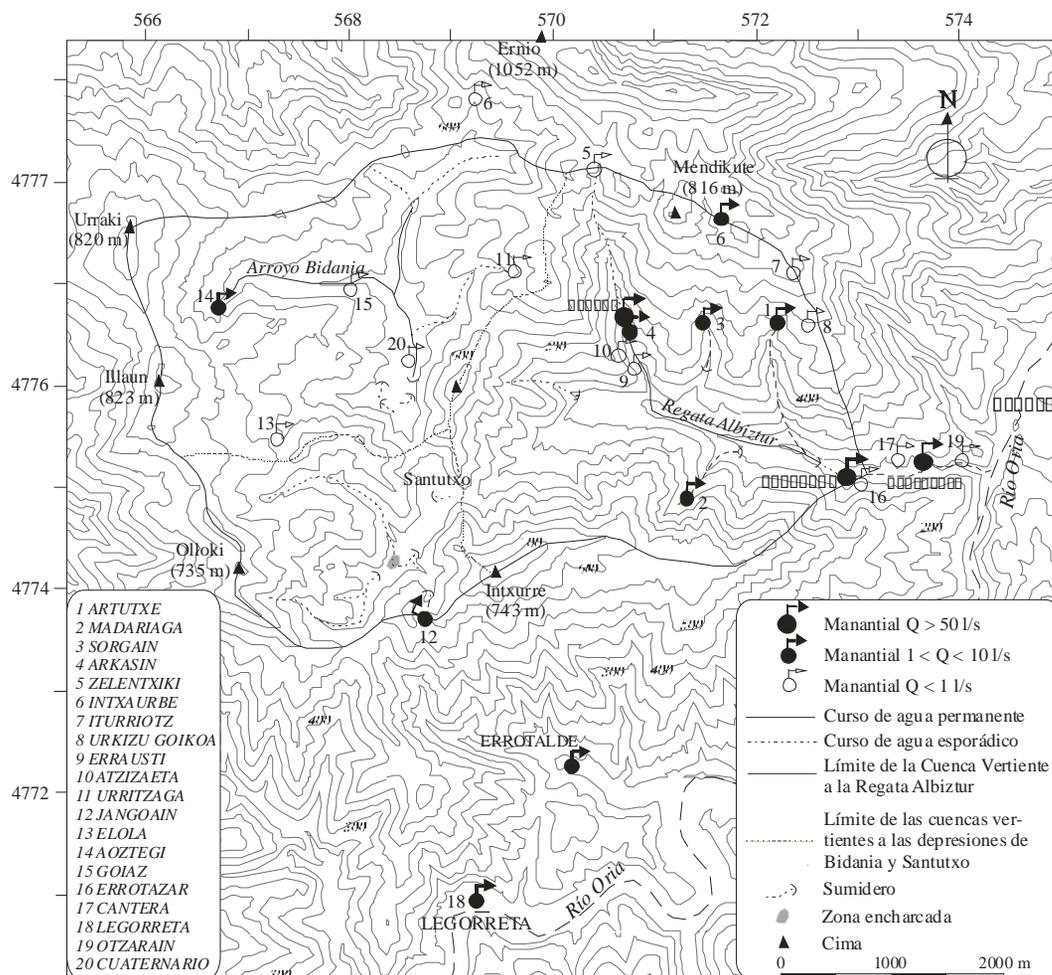
Además, los materiales cuaternarios que rellenan la depresión también aportan agua, de forma que las precipitaciones hacen que el agua se infiltre a través de los sumideros del fondo de las dolinas. En el segundo caso, por el contrario, el agua proviene de pequeños cursos de agua originados directamente de la precipitación gracias a la escorrentía superficial que se genera temporalmente.

Cuando la lluvia arrecia, entre Urkobieta y el extremo Oeste de la depresión de Albiztur se activa también otro pequeño curso fluvial, en los materiales carbonatados cretácicos, que desaparece a través de los depósitos cuaternarios de la depresión, poco antes de llegar al núcleo urbano. También se activa el arroyo situado aguas arriba del manantial de Igaran, drenando materiales jurásicos, que junto a éste alimenta la Regata Albiztur. En cuanto a los cursos permanentemente activos, todos ellos deben su origen a las aguas subterráneas, puesto que todos ellos son alimentados por manantiales localizados sobre diferentes materiales.

El cauce con mayor caudal ( $Q_{max}$  observado de unos 300 l/s) es el Arroyo Bidania, que en estiaje proviene principalmente del pequeño manantial de Aoztegi (14) situado al Noreste del monte Illaun en las lutitas del Barremiense (Cretácico Inf.) y del manantial de Intxaurbe (6) localizado al Noreste de la depresión, en la ladera Sur del monte Ernio. Aunque este último manantial suele quedar seco durante los meses de estiaje, varias decenas de metros aguas abajo el cauce presenta cierta cantidad de agua debido a los aportes de las praderas circundantes. El Arroyo Bidania se infiltra finalmente en el sumidero de Osinondo, cuya relación directa con el manantial de Salubita se ha demostrado en varias ocasiones mediante ensayos con trazadores (apartado 4.8).

Al Suroeste del monte Intxurre existe también un pequeño curso de agua permanente, alimentado por la fuente de Jangoain (12). Este aporte, difícilmente visible en la figura 4.1, alimenta permanentemente la cueva de Leizeaundia suministrándole un caudal que oscila entre 0.5 y 5 l/s. La unión de esta cueva con el manantial de Salubita ha sido también demostrada mediante ensayos con trazadores (apartado 4.8).

En estiaje, la Regata Albiztur tiene su origen en el manantial de Igaran, el cual drena las calizas oscuras del Jurásico terminal-Neocomiense y se sitúa en el contacto con las lutitas del Barremiense (figuras 3.2 y 4.1). Además, a lo largo de su cauce otros pequeños manantiales situados en su margen izquierda van aportándole sus aguas, como por ejemplo el manantial de Artutxe (1, en Urkizu) que se origina en el contacto entre las calizas urgonianas y las lutitas del Barremiense. El origen del manantial de Sorgain (3) es prácticamente igual al de Igaran, aunque su caudal es mucho menor y desaparece en el contacto con las calizas urgonianas, con lo que realiza en superficie un recorrido inferior a 800 m.



**Figura 4.1: Red de drenaje y ubicación de los puntos de agua.**

La Regata Albiztur recoge también, de forma subterránea, las aguas provenientes del manantial de Madariaga (2), situado en su margen derecha, en las calcarenitas urgonianas. La desaparición de la regata proveniente de Sorgain y de la proveniente de Madariaga no se produce de forma súbita, sino que se va produciendo paulatinamente a lo largo del cauce. Aunque la unión directa entre la Regata Albiztur y esos dos manantiales no ha sido probada, por su situación y similitud con los arroyos circundantes, su relación con la Regata Albiztur parece clara.

Para terminar, es conveniente incidir en el hecho de que en períodos de aguas medias y bajas la Regata Albiztur va perdiendo agua a lo largo del tramo situado entre Benta Zaharra y el manantial de Salubita, llegando a desaparecer en su totalidad en estiaje. Por este motivo, durante esos meses un tramo del río, de unos 30 m de longitud, justo por encima del manantial de Salubita, queda totalmente seco (figura 4.2 y apartado 4.4). Durante los meses de Octubre-Noviembre de 1999, la longitud del

tramo seco de la Regata Albiztur era superior a los 100 m, debido a la escasez de precipitaciones registradas al final del verano.

Cabe destacar que a pesar de que se considera el manantial de Salubita como una única surgencia, está constituido por cerca de 30 puntos de descarga situados a un lado y a otro de la Regata Albiztur. En la figura 4.2 se refleja detalladamente la situación de cada punto de descarga junto con la del trop plein en relación con la Regata Albiztur y con la estación de aforos situada aguas abajo del manantial.

En el Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E. y D.F.G.,1987) se sitúa el manantial de Salubita a una cota de 120 m. Sin embargo, en el marco de esta investigación, el 15 de Julio de 1997 se acotaron los puntos de descarga de la margen derecha de la regata mediante el uso de un teodolito, tomando como referencia el punto situado a menor cota (116 m).

A partir de ahí se midieron todos los puntos de descarga hasta llegar al punto más alto y alejado que corresponde a un trop plein de salida que se activa ocasionalmente tras períodos de lluvias muy fuertes. El trop plein es una zona de descarga que abarca, desde la base hasta su parte alta, 1.8 m aproximadamente. Este proceso de acotado dio como resultado que la diferencia de cota entre los dos puntos extremos de descarga (punto situado a menor cota y parte alta del trop plein) es de 7.8 m. Según el mapa topográfico a escala 1:10000 (Hoja-89, Tolosa) el punto más bajo de descarga se encuentra a una cota de unos 116 m aproximadamente, lo que significa que el trop plein se encuentra a una cota de entre 122 (en la base) y 124 m (en la parte alta). De todo esto se deduce que el manantial de Salubita no se encuentra a 120 m de altura s.n.m., sino, más bien, entre los 116 y los 124 m s.n.m. En la figura 4.2 se incluyen también las cotas de los puntos de descarga situados en la margen derecha de la regata.

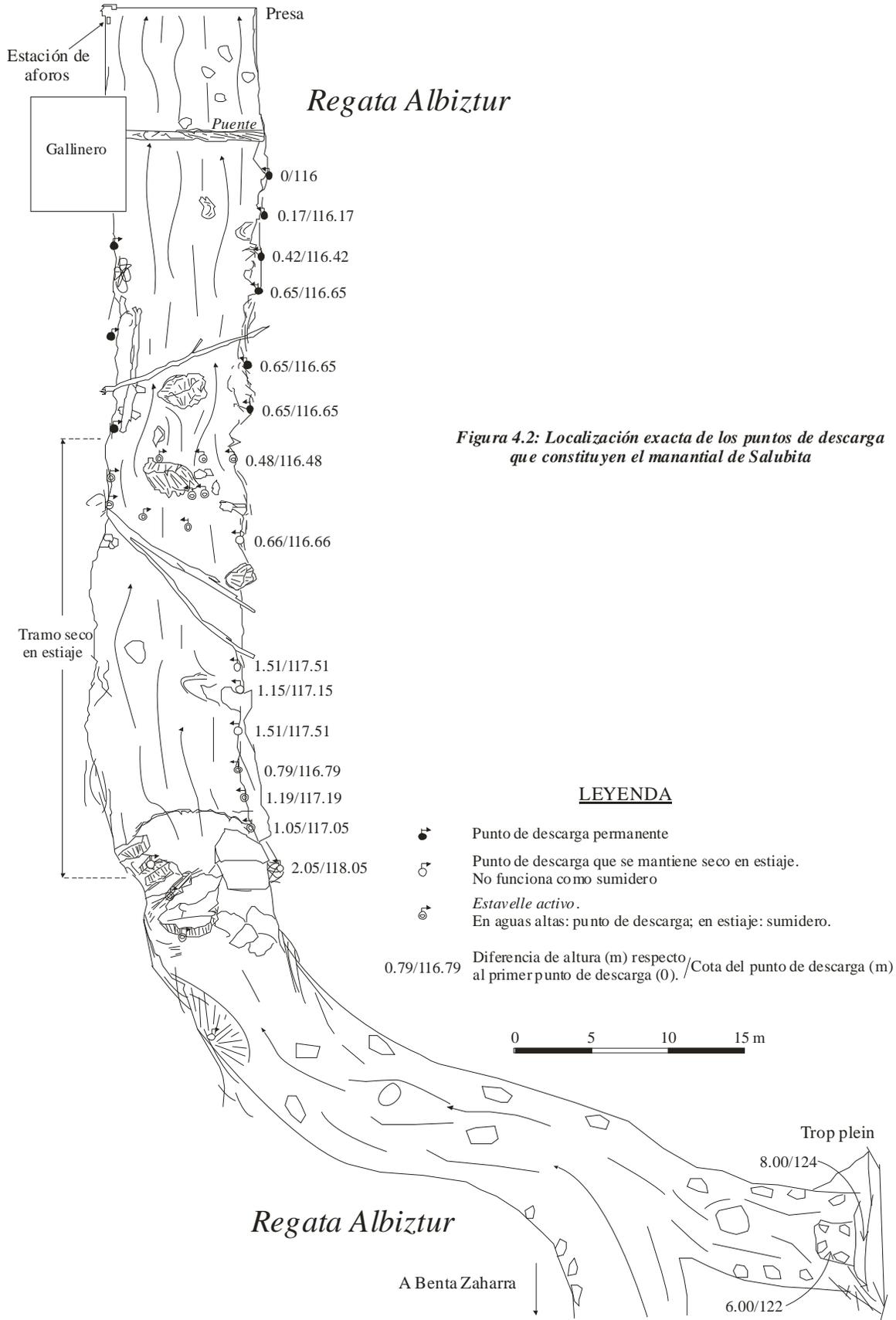


Figura 4.2: Localización exacta de los puntos de descarga que constituyen el manantial de Salubita

### **4.3. OBTENCIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALUBITA**

El limnógrafo situado en la presa del viejo molino ya abandonado conocido como Errotazar, ha facilitado un registro continuo de los caudales ( $Q_{AF}$ ) que han pasado a lo largo de los últimos años por esa estación de aforos de la Regata Albiztur. Este limnógrafo horizontal (marca SEBA) fue instalado en ese punto en Enero de 1997 por la Diputación Foral de Gipuzkoa a petición del Grupo de Hidrogeología de la U.P.V.-E.H.U., si bien el control de caudales se había realizado también a lo largo de los años 1985-1990. La propia Diputación de Gipuzkoa ha sido la encargada de la medida de caudales (molinete M-1, SEBA) para la realización de la curva de gastos. Los datos de caudales referentes a esta estación de aforos han sido facilitados por la propia Diputación a una escala temporal de 10 minutos.

El caudal medido corresponde a la suma del caudal del propio manantial de Salubita y del procedente de la Regata Albiztur (figura 4.3). Así pues, el primer paso en el tratamiento de los datos de la estación de aforos ha consistido en la separación del caudal proveniente de la regata para obtener el caudal (hidrograma) del propio manantial. El Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987) ha proporcionado la información necesaria para tal fin, ya que en su anejo 2, referente a la hidrología, existen numerosos datos de aforos realizados en dos puntos situados aguas arriba del manantial de Salubita (tabla 4.2). Estos dos puntos se han nombrado como Benta Zaharra ( $Q_{BZ}$ ) y Gain ( $Q_G$ ): el primero corresponde al caudal de la Regata Albiztur en Benta Zaharra, a unos 270 m aguas arriba del manantial, antes de que la regata comience a perder agua, y el segundo al caudal de la Regata Albiztur en un punto intermedio entre Benta Zaharra y el manantial (figura 4.3).

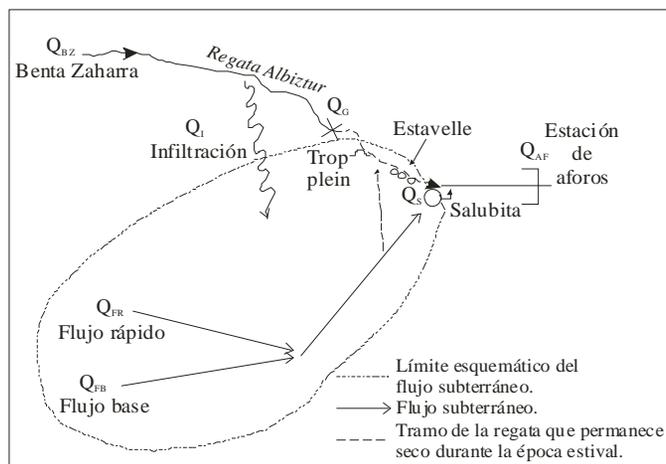
Tanto estos datos como las observaciones realizadas en el campo, muestran que en época de estiaje el agua de la regata va desapareciendo en el último tramo ( $Q_i$ , caudal infiltrado) quedando el cauce totalmente seco desde unos 30 m antes del manantial principal. En este momento, todo el caudal aforado proviene del manantial. En períodos de aguas altas, sin embargo, este tramo pasa a ser zona de descarga del acuífero (apartado 4.4.2). Esta última afirmación se ve claramente reflejada en las figuras 4.5 a 4.10, en las cuales se han plasmado las relaciones de  $Q_G$ ,  $Q_{BZ}$  y  $Q_i$  con  $Q_{AF}$ . El procedimiento seguido para la obtención del hidrograma de Salubita y para su posterior descomposición en componente rápida y de base se ha plasmado esquemáticamente en la figura 4.4.

Los datos reflejados en la tabla 4.2 corresponden a las medidas de caudales realizadas por la Diputación Foral de Gipuzkoa durante 1985 y 1986 en Benta Zaharra y en Gain, así como los caudales registrados en esos momentos en la estación de aforos. Se han incluido otras dos columnas

correspondientes al caudal infiltrado en la regata ( $Q_i$ ) y al caudal deducido para el manantial de Salubita ( $Q_s$ ). Los valores negativos de  $Q_i$  representan no solo momentos en que la infiltración es nula



sino que además hay aporte de agua por parte del acuífero. Por otra parte, los valores de la columna  $Q_S$  se han calculado restándole  $Q_{BZ}$  a  $Q_{AF}$ .



**Figura 4.3: Esquema de las componentes del flujo que pasan por la estación de aforos.**

La figura 4.4 representa esquemáticamente tanto la obtención del hidrograma de Salubita a partir de los datos de la tabla 4.2, como su posterior descomposición (*flujo base y flujo rápido*) a partir del contenido en sulfatos de las aguas, y la descomposición del hidrograma de la Regata Albiztur (apartados 4.3.1, 4.3.2 y 4.5).

Según la figura 4.5, cuando  $Q_{AF} < 200-225$  l/s Gain está seco, lo que significa que la Regata Albiztur se infiltra en algún lugar antes de ese punto tras pasar por Benta Zaharra. Cuando  $Q_{AF}$  se encuentra entre 200-225 l/s y 800 l/s el porcentaje de agua que pasa por Gain con respecto al caudal en la presa es inferior al 15% aproximadamente. En estos momentos la regata va perdiendo agua en el tramo entre Benta Zaharra y Gain pero no totalmente. Por último, cuando  $Q_{AF} \approx 800$  l/s se produce una rotura de pendiente a partir de la cual el porcentaje de  $Q_G$  con respecto a  $Q_{AF}$  se mantiene prácticamente constante (a excepción del punto  $Q_{AF}=3700$  l/s en la parte derecha de la figura). Es éste el momento en el que el acuífero comienza a aportar agua al río a través de su cauce (Gain incluido) y la cantidad de agua que en estos momentos pasa por Benta Zaharra es menor que la que pasa por Gain. A partir de ese momento ( $Q_{AF} > 800$  l/s) no hay infiltración de la regata al acuífero.

Fecha	Q <sub>BZ</sub> (l/s)	Q <sub>G</sub> (l/s)	Q <sub>I</sub> (l/s)	Q <sub>AF</sub> (l/s)	Q <sub>S</sub> (l/s)
21/10/1985	10	0	10	160	150
10/11/1985	27	0	27	201	174
20/11/1985	22	0	22	203	181
28/11/1985	23	0	23	225	202
03/12/1985	25	0	25	194	169
12/12/1985	90	74	16	614	598
22/12/1985	30	0	30	235	205
02/01/1986	101	20	81	926	845
09/01/1986	277	292	-15	2075	1798
10/01/1986	191	210	-19	1484	1293
23/01/1986	76	51	25	670	594
14/02/1986	249	260	-11	1625	1376
05/03/1986	76	58	18	525	449
12/03/1986	180	240	-60	1740	1560
19/03/1986	134	133	1	1150	1016
03/04/1986	134	130	4	800	666
11/04/1986	965	975	-10	3700	2735
24/04/1986	176	186	-10	1250	1074
02/05/1986	168	157	11	1550	1354
09/05/1986	110	94	16	800	690
12/05/1986		74,5		550	
16/05/1986	66	58	8	515	449
20/05/1986	53	38	15	470	417
26/05/1986	75	53	22	400	325
06/06/1986	169	155	14	1825	1656
09/06/1986	79	60	19	430	351
19/06/1986	28	23	5	325	297
26/06/1986	32	3,5	28,5	300	268
01/07/1986	27,5	2,5	25	275	247

Q<sub>AF</sub> (l/s): caudal en la presa (estación de afloros)

Q<sub>BZ</sub> (l/s): caudal en Benta Zaharra

Q<sub>G</sub> (l/s): caudal en Gain

Q<sub>I</sub> (l/s): caudal que se infiltra entre BZ y G

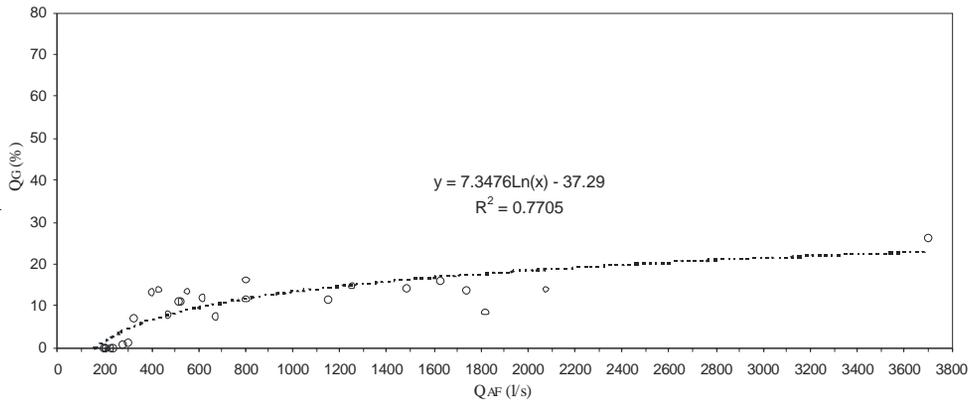
Q<sub>S</sub> (l/s): caudal drenado por Salubita ( Q<sub>FR</sub>+Q<sub>FB</sub>)

Q<sub>FR</sub> (l/s): caudal correspondiente al flujo rápido del acuífero

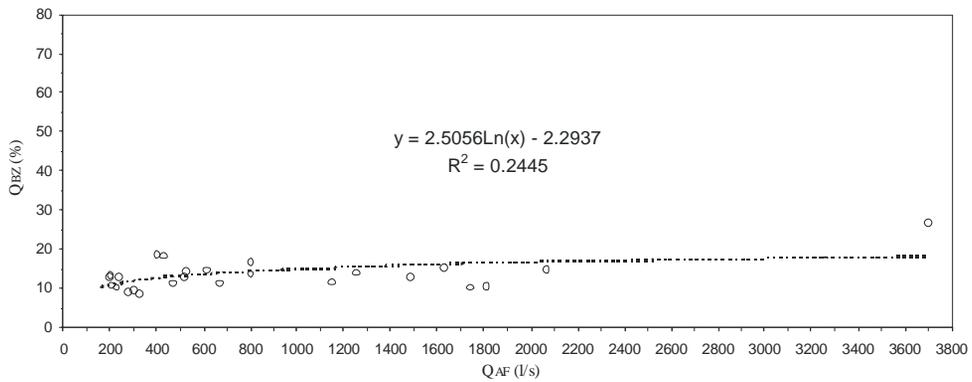
Q<sub>FB</sub> (l/s): caudal correspondiente al flujo base del acuífero

**Tabla 4.2: Datos de caudales reflejados en el Estudio Hidrogeológico del área de Tolosa Occidental (E.V.E.- D.F.G., 1987).**

Como se ha comentado en el párrafo anterior, la Regata Albiztur siempre lleva agua en Benta Zaharra cosa que se ve claramente en la figura 4.6. Aunque la proporción de Q<sub>BZ</sub> disminuye poco a poco ante valores de Q<sub>AF</sub> < 800 l/s, nunca llega a anularse. La figura muestra que existe un único punto de Q<sub>AF</sub> elevado (Q<sub>AF</sub> ≈ 3700 l/s) correspondiente a un Q<sub>BZ</sub> > 20%, al igual que en la figura 4.5. Esto se puede explicar por el hecho de que, como se verá más adelante, la surgencia de Salubita posee una capacidad limitada para descargar agua y ante períodos de precipitaciones muy fuertes, el caudal que en ese momento pasa por la presa corresponderá en buena parte al agua de la Regata Albiztur (Q<sub>BZ</sub>).

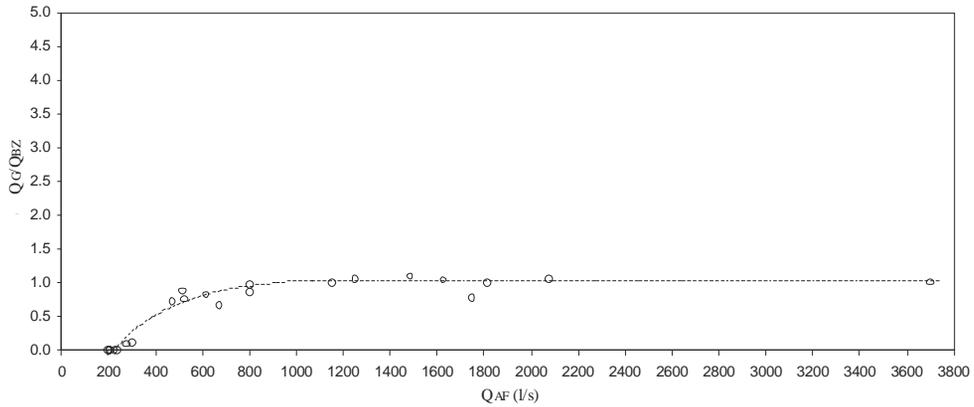


**Figura 4.5: Porcentaje del caudal que pasa por Gain ( $Q_G$  %) respecto al que pasa por la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).**



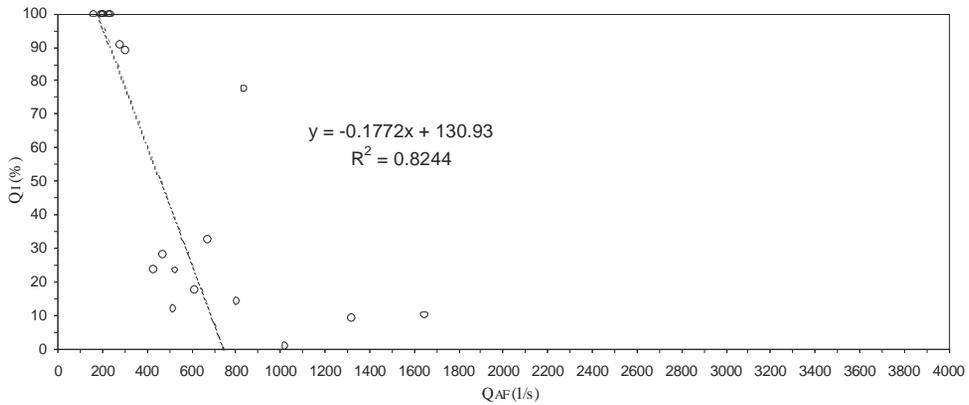
**Figura 4.6: Porcentaje del caudal que pasa por Benta Zaharra ( $Q_{BZ}$  %) respecto al que pasa por la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).**

De acuerdo con la figura 4.7, si  $Q_{AF} > 800$  l/s la relación  $Q_G/Q_{BZ}$  se mantiene próxima a 1, aunque es ligeramente superior. Esto significa que  $Q_{BZ} \leq Q_G$  lo que indica que durante esa situación el acuífero aporta agua a la regata a través de Gain o, por lo menos, no recibe agua de la regata. Cuando  $Q_{AF} < 800$  l/s la relación  $Q_G/Q_{BZ}$  va disminuyendo a medida que  $Q_{AF}$  va siendo menor ya que la regata va perdiendo agua antes de Gain. Una vez que  $Q_{AF} < 200-225$  l/s  $Q_G/Q_{BZ}=0$  ya que, como ya se ha comentado para la figura 4.5, Gain está seco ( $Q_G=0$ ).



**Figura 4.7: Relación  $Q_G/Q_{BZ}$  con respecto a  $Q_{AF}$ .**

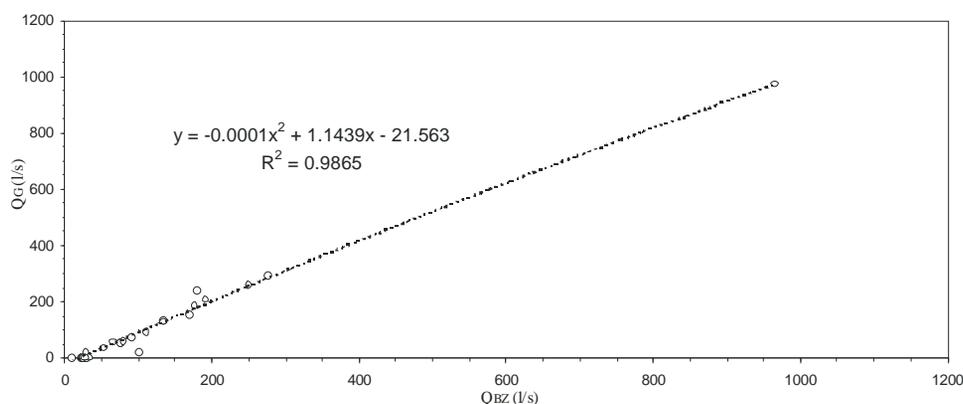
En la figura 4.8 se reitera, excepto para cuatro casos, el hecho de que para  $Q_{AF} < 200-225$  l/s se infiltra el 100% del agua que pasa por Benta Zaharra, cuando  $200$  l/s  $< Q_{AF} < 800$  l/s el caudal infiltrado va siendo menor a medida que  $Q_{AF}$  aumenta, y una vez que  $Q_{AF} > 800$  l/s no se infiltra absolutamente nada, puesto que, en todo caso, la regata se comporta como efluente.



**Figura 4.8: Relación entre el porcentaje de caudal infiltrado ( $Q_I$  %) en la regata (respecto al  $Q_{BZ}$ ) y el caudal en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).**

La figura 4.9 muestra que aunque  $Q_G = 0$ , el caudal en Benta Zaharra nunca desaparece siendo su valor más bajo próximo a 25-30 l/s. Los datos de la tabla 4.2 han servido, además, para obtener la función polinómica reflejada en la figura 4.10a ( $y=7E-05x^2+1.0078x-37.521$ ) que relaciona los caudales medidos en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) con los calculados para el manantial de Salubita *sensu stricto* ( $Q_S$ ) (tabla 4.2), de forma que aplicando directamente esa función sobre el hidrograma registrado en la presa, a partir de los datos medios diarios, se obtiene el hidrograma de Salubita.

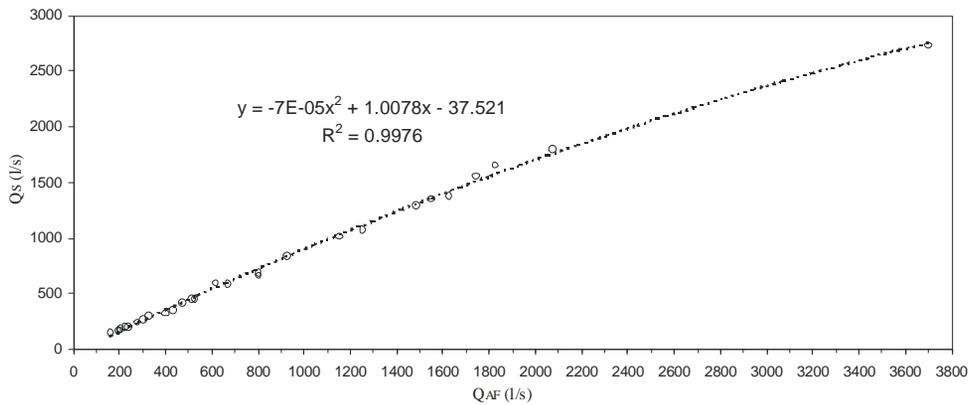
Siguiendo el procedimiento de la figura 4.4, para poder deducir los caudales de Salubita, a los datos de  $Q_{AF}$  reflejados en la tabla 4.2 se les han restado los caudales de la Regata Albiztur en Benta Zaharra ( $Q_{BZ}$ ), de tal forma que el hidrograma deducido para Salubita corresponde a los caudales procedentes del propio acuífero, una vez eliminados los caudales de infiltración desde la regata.



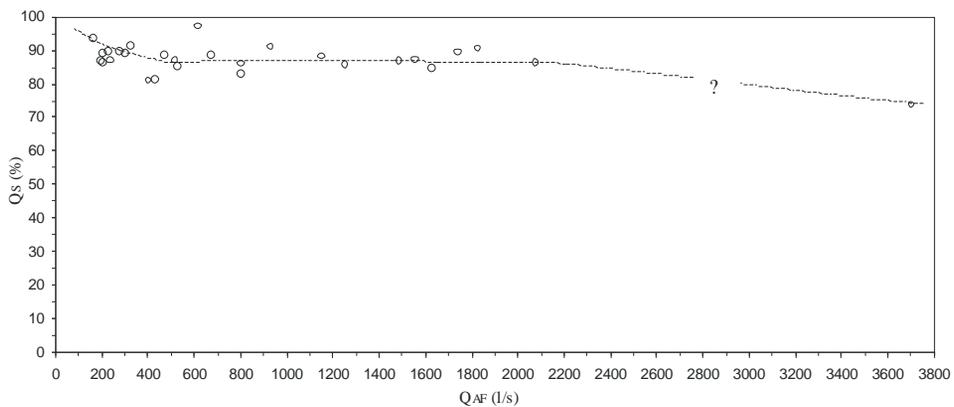
**Figura 4.9: Relación entre el caudal en Benta Zaharra ( $Q_{BZ}$ ) y el caudal en Gain ( $Q_G$ ).**

La figura 4.10b refleja la importancia de los caudales del manantial en la estación de aforos. Según se muestra en la imagen, entre el 80 y el 100 % de los caudales registrados en la estación de aforos proviene del manantial de Salubita. Ese porcentaje parece disminuir ligeramente en situaciones de caudales muy altos en la estación de aforos, aunque sólo hay una medida en esa situación, debido probablemente a que, puntualmente, en momentos de fuerte crecida, los caudales fluyentes por la propia regata puedan ser, comparativamente, importantes.

En la figura 4.11 se compara precisamente el hidrograma observado en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) con el hidrograma deducido para Salubita ( $Q_S$ ), por medio de la función polinómica de la figura 4.10a, para los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99. Los datos utilizados para la obtención de estas gráficas han sido los caudales medios diarios. En los tres años hidrológicos se ve que aunque en períodos de fuertes lluvias  $Q_{AF}$  alcanza varios  $m^3/s$  (puntualmente incluso los  $12 m^3/s$ , Octubre de 1998),  $Q_S$  se mantiene siempre con puntas próximas a los 3500-4000 l/s, lo que indicaría que, en términos de caudales medios diarios, el acuífero de Salubita posee una capacidad limitada de descarga, condicionada probablemente por la morfología y la distribución espacial de los conductos activos.

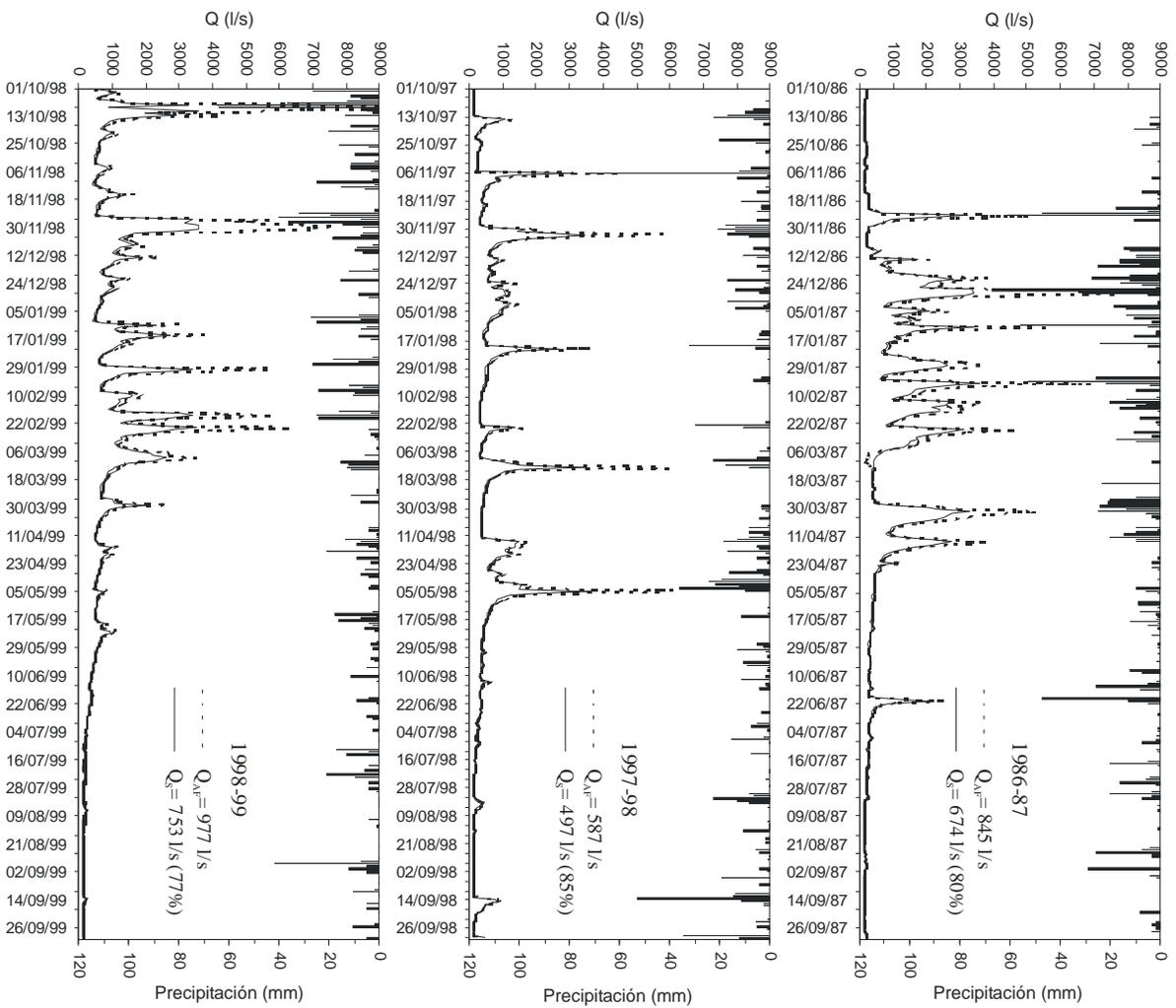


**Figura 4.10a:** Relación entre los caudales medidos en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) y los calculados para la surgencia de Salubita ( $Q_S$ ).



**Figura 4.10b:** Porcentaje del caudal de la surgencia ( $Q_S$  %) con respecto al caudal en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).

Debido a que la estación de Erdoizta se puso en funcionamiento a partir de 1990, las precipitaciones diarias del período 1986-87 incluidas en la figura 4.11 corresponden a las registradas en la estación de Berastegi. Si bien para los otros años hidrológicos (1997-98 y 1998-99) se han utilizado los datos de precipitación de la estación de Erdoizta, en esta estación no hay registro de datos para el período comprendido entre el 29 de Marzo y el 21 de Mayo de 1999, por lo que para ese período se han utilizado los datos de la estación de Arriaran.



*Figura 4.11: Comparación del hidrograma de la estación de aforos (Q<sub>AF</sub>) y el deducido para Salubria (Q<sub>S</sub>) y su relación con la precipitación (1986-87: estación de Bernastegi; 1997-98 y 1998-99: estación de Erdorzia), para tres años hidrológicos.*

Los caudales medios anuales obtenidos para Salubita durante los años hidrológicos considerados son 674 l/s (1986-87), 497 l/s (1997-98) y 753 l/s (1998-99), lo que supone aproximadamente un 80% ( $Q_{AF}=845$  l/s), un 85% ( $Q_{AF}=587$  l/s) y un 77% ( $Q_{AF}=977$  l/s) respectivamente de los caudales en la estación de aforos. Según esto, la influencia del acuífero en la regata (estación de aforos) es mayor en los años de menor aporte total (1997-98), y es menor en los años de mayor aporte total (1998-99). De ahí se deduce una mayor regulación de caudales en el acuífero que en la Regata Albiztur (Tabla 4.3).

AÑO HIDROLÓGICO	$Q_{AF}$ (l/s)	$Q_S$ (l/s)	$Q_{BZ}$ (l/s)	$Q_S$ (%)	$Q_{BZ}$ (%)	P (mm)
1986-87	845	674	171	80	20	1393
1997-98	587	497	90	85	15	1268
1998-99	977	753	224	77	23	1488

**Tabla 4.3: Caudales medios anuales en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ), en la surgencia de Salubita ( $Q_S$ ) y en la Regata Albiztur ( $Q_{BZ}$ ).**

Los valores de precipitación reflejados en la tabla para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99 corresponden a la precipitación anual registrada en la estación de Erdoizta. Para el año hidrológico 1986-87, sin embargo, únicamente se dispone del dato de la precipitación en la estación de Berastegi. En cualquier caso, según la tabla 2.2 (apartado 2.3) la precipitación anual de la estación de Berastegi es, habitualmente, del orden de un 10% superior a la registrada en Erdoizta, de donde se deduce que si en Berastegi la precipitación fue de 1548 mm en 1986-87, la precipitación en Erdoizta fue inferior, del orden de 1393 mm, valor incluido en la tabla.

Con el fin de establecer la fiabilidad de los caudales deducidos para Salubita a partir de los datos aforados (tabla 4.2), se ha llevado también a cabo la separación del hidrograma de la estación de aforos mediante un balance de masa a partir del contenido en sulfatos de muestras tomadas en el manantial ( $Q_S$ ), en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) y en Gain ( $Q_G$ ). Para tal fin se han utilizado los datos de 66 muestras en cada punto (tabla 4.4). Así, admitiendo que  $Q_{AF} = Q_S + Q_G \rightarrow 100 = x + (100 - x)$  y estableciendo la ecuación del balance de masa se obtiene que,

$$100 \cdot (SO_4^{2-})_{AF} = x \cdot (SO_4^{2-})_S + (100 - x) \cdot (SO_4^{2-})_G$$

$$x = \frac{100 \cdot [(SO_4^{2-})_G - (SO_4^{2-})_{AF}]}{[(SO_4^{2-})_G - (SO_4^{2-})_S]}$$

donde,

$(SO_4^{2-})_{AF}$ : concentración de sulfatos en la estación de aforos.

$(SO_4^{2-})_G$ : concentración de sulfatos en Gain.

$(SO_4^{2-})_S$ : concentración de sulfatos en el manantial Salubita.

x: porcentaje del agua del manantial en la estación de aforos.

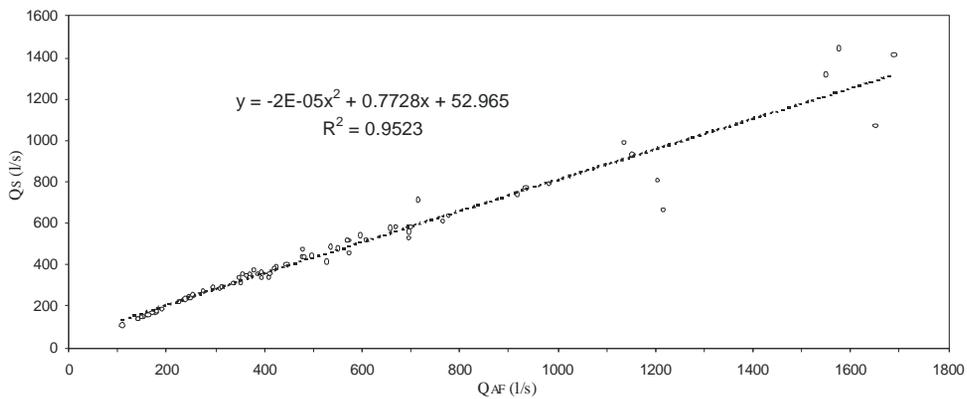
Mediante la ecuación se han obtenido los porcentajes de los caudales del manantial de Salubita en la estación de aforos, visibles en la tabla 4.4, junto a las concentraciones de sulfatos utilizadas. Ello ha permitido el establecimiento de una función (figura 4.12) que relaciona los caudales de la estación de aforos con los del manantial.

	SALUBITA	PRESA	GAIN	Q <sub>S</sub> (%)	Q <sub>AF</sub> (l/s)	Q <sub>S</sub> (l/s)
12/06/97	16.36	18.50	38.89	90.5	445.6	403.3
17/06/97	16.23	19.01	44.34	90.1	352.1	317.2
24/06/97	23.43	23.26	67.62	100.0	225.4	225.4
01/07/97	21.46	21.72	77.03	99.5	189.9	189.0
07/07/97	21.82	19.55	42.36	100.0	355.1	355.1
15/07/97	24.91	23.90	67.85	100.0	246.3	246.3
04/08/97	19.06	17.51	50.07	100.0	253.4	253.4
13/08/97	20.90	22.01	60.46	97.2	176.9	171.9
19/08/97	22.48	22.62	65.22	99.7	158.9	158.4
25/10/97	20.55	21.87	63.96	97.0	362.5	351.5
01/11/97	25.11	24.28	67.53	100.0	273.3	273.3
17/11/97	17.85	23.31	51.40	83.7	408.2	341.8
23/11/97	18.80	24.83	60.30	85.5	394.4	337.1
01/12/97	10.50	11.53	16.81	83.7	1688.9	1414.4
09/12/97	13.64	15.77	31.26	87.9	657.7	578.1
15/12/97	14.84	14.71	25.10	100.0	713.9	713.9
22/12/97	14.17	18.41	35.81	80.4	572.7	460.7
29/12/97	13.45	15.74	25.39	80.8	981.9	793.4
12/01/98	16.57	19.70	41.28	87.3	550.9	481.1
17/01/98	17.18	20.23	52.39	91.4	536.0	489.7
26/01/98	14.37	16.49	31.44	87.6	668.2	585.5
09/02/98	13.38	16.26	49.51	92.0	386.5	355.7
16/02/98	14.75	17.22	48.63	92.7	337.3	312.7
23/02/98	12.96	18.60	50.85	85.1	1549.1	1318.5
02/03/98	14.58	17.75	41.23	88.1	410.5	361.7
08/03/98	17.23	19.35	48.46	93.2	308.1	287.1
16/03/98	18.24	20.89	31.40	79.9	765.4	611.7
24/03/98	20.69	22.91	51.15	92.7	477.1	442.2
30/03/98	22.44	25.64	66.02	92.7	393.8	364.9
06/04/98	22.80	24.73	72.80	96.1	369.5	355.2
14/04/98	13.84	15.08	28.54	91.6	1575.3	1443.2
20/04/98	16.54	18.42	26.31	80.7	917.9	740.6
11/05/98	17.16	21.55	35.77	76.4	694.8	531.1
18/05/98	21.50	25.31	57.82	89.5	496.2	444.2
25/05/98	23.21	27.12	72.10	92.0	424.2	390.3
22/06/98	33.40	33.82	99.68	99.4	377.8	375.4
28/06/98	36.08	36.87	131.46	99.2	295.3	292.8
05/07/98	25.39	28.04	88.20	95.8	248.9	238.4
26/07/98	32.31	31.10	125.15	100.0	179.3	179.3
03/08/98	31.41	39.23	122.10	91.4	419.8	383.6
09/08/98	33.75	32.31	127.25	100.0	169.8	169.8
04/09/98	33.50	32.53	133.29	100.0	142.2	142.2
20/10/98	18.77	22.02	44.44	87.3	1136.2	992.4
03/11/98	18.98	26.35	61.47	82.6	935.7	773.3
10/11/98	21.48	19.69	48.83	100.0	479.2	479.2
24/11/98	18.36	23.94	44.72	78.8	527.1	415.4
14/12/98	14.25	16.56	21.24	67.0	1204.1	806.6
22/12/98	14.98	17.41	27.57	80.7	1152.7	930.1
28/12/98	16.38	19.66	34.96	82.3	777.5	640.1
04/01/99	18.52	20.81	42.65	90.5	571.5	517.4
24/01/99	17.92	20.89	35.91	83.5	698.1	582.9
01/02/99	14.66	18.21	22.54	54.9	1216.3	668.0
08/02/99	14.84	22.44	36.52	65.0	1650.3	1071.9

**Tabla 4.4: Concentraciones de sulfatos de las muestras (Salubita, presa y Gain) utilizadas para descomponer el hidrograma de la estación de aforos y porcentajes obtenidos de los caudales del manantial de Salubita en la estación de aforos.**

27/04/99	16.05	19.80	43.14	86.1	607.6	523.4
07/05/99	17.52	20.48	51.01	91.2	596.6	544.0
17/05/99	19.15	23.83	69.01	90.6	569.6	516.2
25/05/99	16.87	18.30	24.28	80.7	695.3	561.0
04/06/99	20.02	23.69	61.12	91.1	481.0	438.1
14/06/99	24.20	25.66	83.27	97.5	348.4	339.7
25/06/99	23.70	27.91	93.12	93.9	312.6	293.6
02/07/99	23.85	24.12	94.77	99.6	238.3	237.4
29/07/99	32.11	28.75	120.57	100.0	150.9	150.9
14/08/99	31.20	33.93	124.07	97.1	162.6	157.9
28/08/99	35.02	32.79	137.27	100.0	147.9	147.9
18/09/99	34.84	36.71	156.31	98.5	141.3	139.1
13/10/99	39.54	38.80	128.86	100.0	109.1	109.1

**Tabla 4.4 (continuación): Concentraciones de sulfatos de las muestras (Salubita, presa y Gain) utilizadas para descomponer el hidrograma de la estación de aforos y porcentajes obtenidos de los caudales del manantial de Salubita en la estación de aforos.**



**Figura 4.12: Relación entre los caudales de la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) y los de Salubita ( $Q_S$ ), deducidos a partir del contenido en sulfatos.**

Mediante la función de la figura 4.12 se han obtenido los caudales medios anuales para el manantial de Salubita que han sido de 662 l/s para 1986-87 (78.3% de  $Q_{AF}$ ), 490 l/s para 1997-98 (83.5% de  $Q_{AF}$ ) y 753 l/s para 1998-99 (77% de  $Q_{AF}$ ).

La descomposición del hidrograma de la estación de aforos (Regata Albiztur) en función del contenido en sulfatos, aporta unos caudales medios anuales para el manantial de Salubita muy parecidos a los obtenidos mediante los datos de aforo (datos de la figura 4.11). Esas diferencias son de un 1.5% inferior para 1986-87 y de un 1.8% inferior para 1997-98. Para 1998-99 no hay diferencia. Evidentemente (figura 4.12) cuanto mayores son los caudales en la estación de aforos (a partir de 1000 l/s), mayores son los posibles errores que se pueden producir en la descomposición del hidrograma, ya que los contenidos en sulfatos poseen un rango mayor de variabilidad. Además, el caudal máximo en

la estación de aforos cuyo contenido en sulfatos ha sido determinado corresponde a un caudal de 1688.9 l/s, así que a mayores caudales en la estación de aforos la incertidumbre en la descomposición del hidrograma es mayor.

Los cálculos de los apartados 4.3.1 y 4.3.2 se basan en el hidrograma de Salubita obtenido a partir de los datos de la tabla 4.2, ya que éstos son datos directos de caudales, para los cuales existen varios puntos de  $Q_{AF}$  entre 1600 y 2000 l/s llegando, incluso, hasta los 3700 l/s. Quiere esto decir que la separación del hidrograma a partir de los datos de aforo parece ser, en nuestro caso, el método idóneo para la separación del hidrograma de la estación de aforos.

#### **4.3.1. DESCOMPOSICIÓN DEL HIDROGRAMA DE SALUBITA**

Evidentemente, el agua descargada a través del manantial no tiene un único origen sino que, al contrario, posee, por lo menos, dos orígenes muy diferentes de manera que las aguas correspondientes tienen una diferente presencia temporal en la zona de descarga. Por un lado, está la componente de flujo lento que se correspondería con el agua que llega hasta el manantial después de un tiempo más o menos prolongado de estancia en el acuífero (en cualquiera de sus partes); es el flujo base propio del acuífero. A este agua se le suma el agua de origen externo que produce una rápida respuesta en el manantial. Así pues, el caudal de Salubita ( $Q_S$ ) posee dos componentes principales que responden al **flujo base** ( $Q_{FB}$ ) del acuífero y al **flujo rápido** ( $Q_{FR}$ ) cuyo efecto se hace notar claramente en el manantial en los momentos de fuertes precipitaciones. Se trata ahora de descomponer el hidrograma deducido para Salubita en estos dos componentes, siguiendo el esquema de la figura 4.4.

Para esta nueva descomposición se ha utilizado la información hidroquímica referente al contenido en  $SO_4^{2-}$ . El por qué de esta elección se comenta en el capítulo de Hidroquímica (capítulo 5), pero se adelanta aquí el hecho de que en la zona de estudio es el sulfato el elemento que mejor sirve al objetivo ahora planteado. Se cuenta con análisis de numerosas muestras de agua tomadas en dos puntos que corresponden al manantial de Salubita y al sumidero permanente de Osinondo situado en Bidegoian (depresión de Bidania) que se ha tomado como referencia del flujo rápido (FR) hacia el acuífero. Ha sido necesario conocer también el contenido en  $SO_4^{2-}$  del flujo base. Existen numerosas muestras tomadas en el propio manantial en época de aguas bajas (no se han considerado aquí las muestras de aguas muy bajas por las razones que se comentan en el apartado 4.5.), momento en el que se ha supuesto, por lógica, que el único componente presente es el flujo base (FB); en estas muestras las concentraciones de  $SO_4^{2-}$  en el manantial fluctúan, sobre todo, entre 17 y 18 mg/l, por lo que para el FB se ha tomado un valor intermedio de 17.5 mg/l. La tabla 4.5 muestra los datos utilizados para este cálculo, incluido el caudal en el manantial ( $Q_S$ ) en cada momento, calculado a partir de la función

de la figura 4.10a. El número de muestras utilizadas para este cálculo ha sido de 63 (21 por cada punto).

De esta forma, admitiendo que  $Q_S = Q_{FR} + Q_{FB} \rightarrow 100 = x + (100 - x)$  y estableciendo la ecuación del balance de masa se obtiene que,

$$100.(SO_4^{2-})_S = x.(SO_4^{2-})_{FR} + (100 - x).(SO_4^{2-})_{FB}$$

$$x = \frac{100.[(SO_4^{2-})_{FB} - (SO_4^{2-})_S]}{[(SO_4^{2-})_{FB} - (SO_4^{2-})_{FR}]}$$

donde,

$(SO_4^{2-})_S$ : concentración de sulfatos en el manantial.

$(SO_4^{2-})_{FR}$ : concentración de sulfatos en el sumidero permanente de Osinondo (depresión de Bidania).

$(SO_4^{2-})_{FB}$ : concentración de sulfatos en el manantial en estiaje medio (17.5 mg/l).

x: porcentaje de flujo rápido en el manantial.

A partir de esta simple ecuación, se han obtenido los porcentajes y datos de caudales que se muestran en la tabla 4.6.

	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)			Qs (l/s)
	Salubita	FB	FR	
12/06/97 09:55	16.36	17.5	9.5	398.8
17/06/97 10:15	16.23	17.5	9.5	313.8
25/10/97 12:00	20.55	17.5	13.63	308.3
01/11/97 11:45	25.11	17.5	14.93	255.3
07/11/97 11:00	11.64	17.5	10.82	1177.1
17/11/97 11:00	17.85	17.5	12.31	361.0
23/11/97 12:35	18.8	17.5	14.28	342.8
01/12/97 11:45	10.24	17.5	8.81	1453.5
09/12/97 11:25	13.64	17.5	10.99	567.3
15/12/97 11:25	14.84	17.5	10.48	640.0
17/01/98 13:45	17.18	17.5	13.48	482.6
23/02/98 09:45	12.96	17.5	9.37	1640.5
08/03/98 11:00	17.23	17.5	13.42	265.5
06/04/98 09:25	22.8	17.5	15.48	320.4
20/04/98 09:55	16.54	17.5	13.95	838.3
11/05/98 09:35	17.16	17.5	16	633.7
14/12/98 11:50	14.25	17.5	11.24	1073.6
02/03/99 11:55	15.28	17.5	9.18	1035.3
09/03/99 11:00	11.2	17.5	9.83	2106.5
17/03/99 11:50	13.76	17.5	11.28	778.1
24/03/99 10:50	13.88	17.5	11.3	640.0

**Tabla 4.5: Datos de concentración en sulfatos utilizados para la descomposición del hidrograma de Salubita en sus componentes de flujo rápido (FR) y flujo base (FB).**

Este cálculo ha facilitado valores negativos de FR% para cinco de los casos considerados ( $[SO_4^{2-}]_S > [SO_4^{2-}]_{FB}$ ), que corresponden a períodos de aguas mas bajas en los cuales el quimismo del

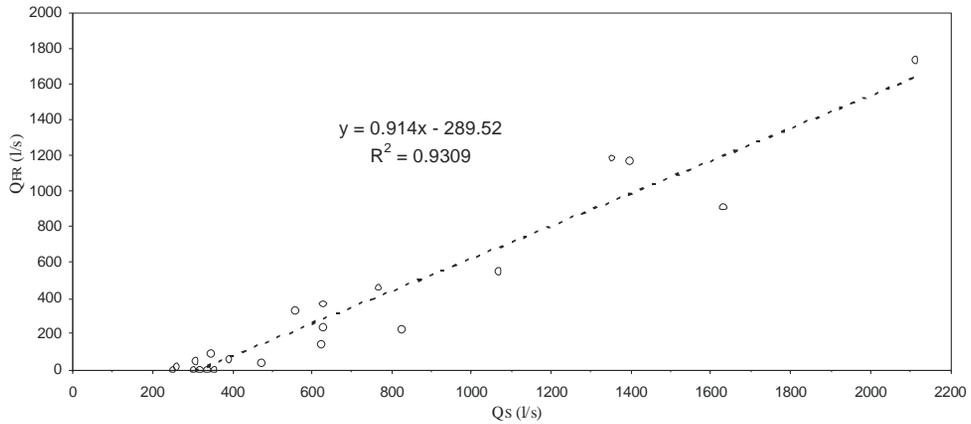
manantial de Salubita está condicionado por los caudales infiltrados por la Regata Albiztur, de alto contenido en sulfatos. A estos casos se les ha dado un valor de FR% igual a 0. A partir de ahí, se ha obtenido una nueva función que correlaciona el caudal del flujo rápido con el caudal del manantial (figura 4.12 (cont)), de donde se han deducido los caudales del flujo base del manantial durante los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99 (figura 4.13). Según la figura 4.12 (cont.) con  $Q_S < 320$ -350 l/s no hay componente apreciable de flujo rápido en la surgencia.

Qs (l/s)	FR%	FB%	FR (l/s)	FB (l/s)
398.8	14.3	85.7	56.8	342.0
313.8	15.9	84.1	49.8	264.0
308.3	0.0	100.0	0.0	308.3
255.3	0.0	100.0	0.0	255.3
1177.1	87.7	12.3	1032.6	144.5
361.0	0.0	100.0	0.0	361.0
342.8	0.0	100.0	0.0	342.8
1453.5	83.5	16.5	1214.3	239.2
567.3	59.3	40.7	336.4	230.9
640.0	37.9	62.1	242.5	397.5
482.6	8.0	92.0	38.4	444.2
1640.5	55.8	44.2	916.1	724.4
265.5	6.6	93.4	17.6	247.9
320.4	0.0	100.0	0.0	320.4
838.3	27.0	73.0	226.7	611.6
633.7	22.7	77.3	143.6	490.1
1073.6	51.9	48.1	557.4	516.2
1035.3	26.7	73.3	276.2	759.1
2106.5	82.1	17.9	1730.3	376.3
778.1	60.1	39.9	467.9	310.2
640.0	58.4	41.6	373.7	266.3

**Tabla 4.6: Porcentajes de los caudales del flujo rápido (FR) y del flujo base (FB) en Salubita y los caudales correspondientes.**

De la información obtenida se deduce que el caudal medio anual del flujo base para el año hidrológico 1986-87 es 286 l/s lo que supone un 42 % del caudal del manantial (674 l/s), para 1997-98 es 287 l/s lo que supone un 58% del caudal del manantial ( $Q_S=497$  l/s) y para 1998-99 es 309 l/s lo que es igual a un 41% del caudal del manantial ( $Q_S=753$  l/s). En los tres casos se observa (figura 4.13) que el caudal base se mantiene durante los meses húmedos en torno a un valor de 350-380 l/s, para disminuir en las recesiones de estiaje. Según esta descomposición las lluvias fuertes implican un cierto aumento del caudal base en el caudal de crecida, es decir, un cierto efecto pistón (*piston flow*) que, como se comenta en el apartado 4.5, se verifica también con la información hidroquímica. Por otra parte, se pone también de manifiesto que el agua que sale a través del manantial en períodos de fuertes crecidas corresponde principalmente al flujo rápido.

Un reparto similar entre flujo rápido (54%) y flujo base (46%), para un año hidrológico concreto, fue encontrado por ATKINSON (1977) en la descarga del manantial Cheddar en Inglaterra (calizas del Carbonífero, 39 km<sup>2</sup> de recarga, y precipitación de 1080 mm/año).



**Figura 4.12 (cont):** Relación entre el caudal del flujo rápido ( $Q_{FR}$ ) y el caudal del manantial ( $Q_S$ ).

AÑO HIDROLÓGICO	$Q_S$ (l/s)	$Q_{FB}$ (l/s)	$Q_{FB}$ (%)	$Q_{FR}$ (l/s)	$Q_{FR}$ (%)	P (mm)
1986-87	674	286	42	388	58	1393
1997-98	497	287	58	210	42	1268
1998-99	753	309	41	444	59	1488

**Tabla 4.7:** Porcentajes de las componentes del flujo rápido ( $Q_{FR}$ ) y base ( $Q_{FB}$ ) en el manantial de Salubita y sus caudales medios anuales correspondientes.

Los valores de la tabla 4.7 ponen de manifiesto que el caudal medio anual del flujo base es muy similar para los tres años considerados siendo la componente del flujo rápido la que varía considerablemente. Evidentemente, cuanto mayor es la precipitación mayor es la componente del flujo rápido notándose un tenue aumento también en el flujo base. Estas observaciones evidencian que la precipitación repercute principalmente sobre la componente del flujo rápido del manantial manteniéndose el flujo base en torno a 290-310 l/s, media anual, lo que refleja la capacidad reguladora del acuífero.

La comparación de los datos obtenidos en la descomposición de los hidrogramas ha de hacerse teniendo en cuenta que los tres años hidrológicos considerados reflejan condiciones climáticas diferentes en relación a la *situación climatológica* correspondiente a cada año con respecto a la precipitación media anual calculada para un período de varios años (apartado 2.3).

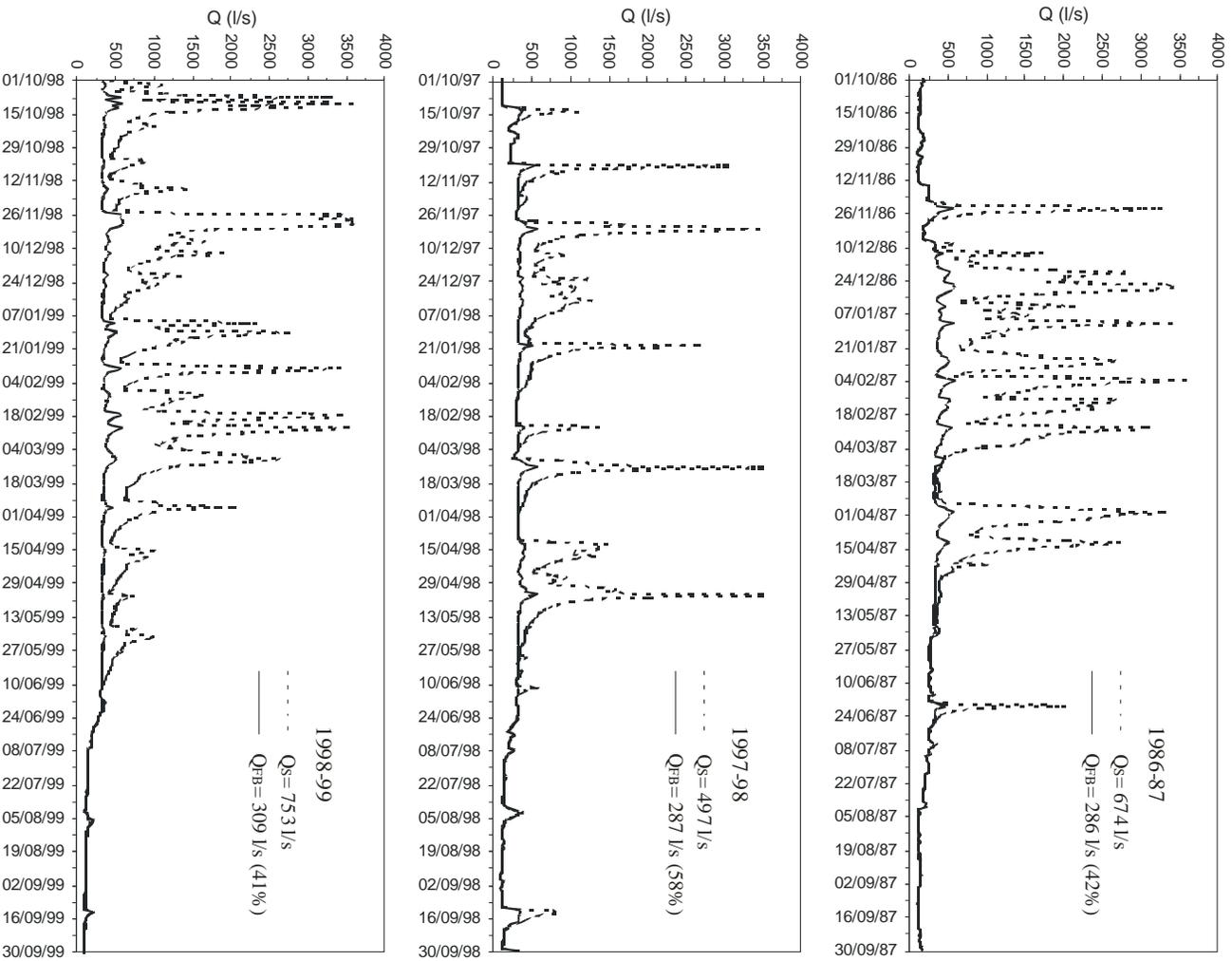


Figura 4.13: Comparación del hidrograma de la componente del flujo base ( $Q_{FB}$ ) y el deducido para Salubita ( $Q_S$ ). Las precipitaciones no han sido incluidas aquí por estar ya reflejadas en la figura 4.11.

De acuerdo con los datos de la tabla 2.1, la precipitación anual media de la estación de Erdoizta es de 1390 mm, de donde se deduce que el año hidrológico 1986-87 fue un año ligeramente húmedo en el que la precipitación fue un 0.2% superior (1393 mm) a la media. El año más seco, con una precipitación de un 8.7% inferior (1268 mm) a la media, fue el año hidrológico 1997-98. El año más húmedo de los tres fue 1998-99, en el que se registró una precipitación de 1488 mm, es decir, un 7.5% superior a la media. Los tres años considerados representan tres situaciones claramente diferentes ya que 1986-87 fue un período ligeramente húmedo mientras que 1997-98 fue un año seco caracterizado por precipitaciones aisladas (figuras 4.11 y 4.13) y 1998-99 fue un año húmedo dominado por continuas precipitaciones (figuras 4.11 y 4.13).

A la vista de los datos de la tabla 4.7, se aprecia que en el año más seco la participación del caudal base en el caudal total de la surgencia aumenta, comparativamente (%), a la vez que disminuye la participación del flujo rápido. De hecho, en ese año (1997-98) es mayor el caudal de flujo base (287 l/s) que el de flujo rápido (210 l/s); no así en los años húmedos.

### **4.3.2. ORIGEN DEL FLUJO RÁPIDO**

Una vez realizados todos los cálculos para la separación de las aguas que manan hacia el exterior del acuífero, se hace palpable la posibilidad de calcular también la superficie necesaria para producir, en un momento dado, un volumen de flujo rápido determinado. Para ello se cuenta ya con los hidrogramas estimados tanto del manantial como del flujo rápido. La forma de realizar este cálculo es simple y no hay que olvidar que se trata de una mera aproximación y que el objetivo es ver si llevando a cabo el cálculo en diferentes momentos se obtienen valores similares y de justificación física en la zona de estudio.

En primer lugar se ha tratado de elegir momentos en los cuales el acuífero y el epikarst estén bastante llenos y la ETR sea mínima, condiciones más favorables para la infiltración rápida de toda la precipitación caída, de forma que se pueda admitir que prácticamente la totalidad del agua de precipitación en esos momentos discurre concentradamente hacia la zona saturada, como flujo rápido, sin evaporarse ni quedar retenida en el epikarst, o en cualquier otra parte del acuífero. En vista de la rápida respuesta del manantial ante la precipitación, suponemos que ese flujo rápido se ve favorecido en esos momentos por la función hidrológica del epikarst, concentrando el flujo en conductos verticales bien relacionados con la red transmisiva hacia la surgencia. Consecuentemente, la superficie calculada será, aproximadamente, la correspondiente a la ocupada por el epikarst activo.

Se han elegido ocho picos de caudal a lo largo del año hidrológico sobre todo, lógicamente, en los períodos intermedios de los meses más lluviosos, producidos como consecuencia de las fuertes

lluvias registradas horas antes. Al caudal del manantial ( $Q_s$ ) se le ha restado el caudal del flujo base ( $Q_{FB}$ ), dato que multiplicado por el tiempo considerado ha facilitado el volumen de flujo rápido para cada evento. El registro de la precipitación ha proporcionado la información de entrada requerida. La tabla 4.8 muestra los datos de superficie ( $km^2$ ) obtenidos, los cuales varían entre 10.7 y 14.3 y cuya media es de  $12.6 km^2$ .

	VolS ( $hm^3$ )	VolFR ( $hm^3$ )	P (mm)	$km^2$
Dic-97	0.8052	0.6219	50	12.4
Ene-98	0.5819	0.4125	33.4	12.3
Mar-98	0.49	0.3910	33	11.8
Oct-98	0.44	0.3404	25	13.8
Nov-98	1.8497	1.5096	140	10.7
Ene-99	0.6818	0.5372	45	11.9
Ene-99	0.6937	0.5230	38	13.7
Mar-99	1.5736	1.1617	80	14.3
				12.6

**Tabla 4.8: Datos de volúmenes y precipitación utilizados para el cálculo de la superficie necesaria para la generación del flujo rápido. VolS: volumen drenado por Salubita; VolFR: volumen correspondiente al flujo rápido; P: precipitación del evento lluvioso considerado;  $km^2$ : superficie necesaria para justificar VolFR.**

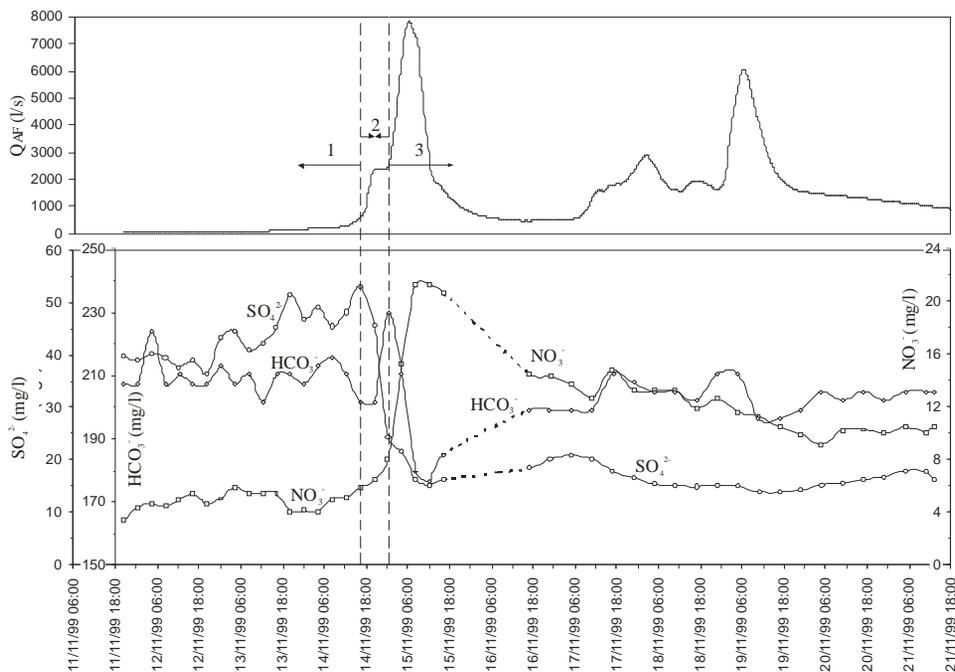
Dado que, como se ha comentado, el acuífero parece tener una capacidad de descarga limitada, es posible que parte del agua de flujo rápido consecuente con una precipitación vaya quedando retenida en los bloques anexos y sea liberada posteriormente de forma más lenta hacia los conductos (*inversión de gradiente*). Si esto es realmente así, parte del agua que entra al acuífero en forma de flujo rápido, podría salir de forma más lenta formando parte de la cola de la decrecida, pasando desapercibida en este tratamiento. Esto significa que el cálculo aquí realizado es un cálculo por defecto, de manera que la superficie necesaria para producir ese volumen de flujo rápido podría ser algo superior a esos  $12.6 km^2$  calculados.

En el mapa topográfico a escala 1:10000 se ha planimetrado la totalidad del área de estudio (figura 3.2), incluida la zona que queda al Norte de la Falla de Errezil, ya que aunque se ha tomado esta falla como límite Norte (apartado 4.8) de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur es posible que en aguas altas se produzca escorrentía superficial al Norte de la falla que pueda entrar al sistema. De estas medidas se ha obtenido un valor de  $14.1 km^2$  para la superficie de las cuencas vertientes a las depresiones de Bidania y Santutxo. De acuerdo con las formas exokársticas (apartado 3.4.1.1) desarrolladas en estas dos depresiones y con los datos hidroquímicos presentados en la figura 4.14, parece directa la relación entre estas dos zonas y el flujo rápido. Así, se asume que el flujo rápido proviene principalmente de estas dos áreas, en las que el epikarst debe ser hidrológicamente más activo.

A pesar de que los aspectos dedicados a la evolución hidroquímica en momentos puntuales se tratan con más detalle en el apartado 4.9 (Análisis de quimiogramas), ésta evolución proporciona cierta información acerca del flujo rápido, por lo que una parte de ella se ha incluido en este apartado. La figura 4.14 muestra el primer pico de caudal del año hidrológico 1999-2000 y los días posteriores al mismo, así como las variaciones hidroquímicas de los sulfatos, nitratos y bicarbonatos en el manantial de Salubita para muestras tomadas cada cuatro horas. Los valores de precipitación diaria correspondientes a ese intervalo de tiempo no han sido incluidos en el gráfico, aunque se incluyen en la tabla 4.9. Estos datos de precipitación corresponden al registro de la estación de Erdoizta,

Fecha	P (mm)
11/11/99	0
12/11/99	8
13/11/99	12
14/11/99	56
15/11/99	12
16/11/99	8
17/11/99	27*
18/11/99	21*
19/11/99	26*
20/11/99	6*
21/11/99	6

**Tabla 4.9: Datos de precipitación diaria en relación con el pico de caudal de la figura 4.14. El asterisco hace referencia a la precipitación caída en forma de nieve.**



**Figura 4.14: Primer pico de caudal del año hidrológico 1999-2000 registrado en la estación de aforos y variaciones en la concentración de sulfatos, nitratos y bicarbonatos en el manantial de Salubita.**

En la figura 4.14 se pueden distinguir tres tramos claros que están condicionados por la participación del flujo rápido en la surgencia: *tramo 1*) hasta el 14/11/99 a las 16:15 caracterizado por la ausencia de flujo rápido ( $Q_{FR}$ ) y caudal de la surgencia controlado íntegramente por el flujo base ( $Q_{FB}$ ) produciéndose la total infiltración de la Regata Albiztur ( $Q_I$ ) al sistema; *tramo 2*) desde el 14/11/99 a las 16:15 hasta el 15/11/99 a las 00:15 (intervalo de 8 horas) en el que el flujo rápido aun es nulo pero la regata ha dejado de infiltrarse ( $Q_I=0$ ); y *tramo 3*) a partir del 15/11/99 a las 00:15 caracterizado por el dominio del flujo rápido.

Tramo 1) El alto contenido en sulfatos (35-50 mg/l) en el agua del manantial está justificado por el hecho de que durante este período de tiempo los caudales son muy bajos ( $Q_{AF}=63-627$  l/s) y la infiltración del agua de la regata, de alto contenido en sulfatos, controla el quimismo de la surgencia. Aunque a partir del día 12 hay un ligero ascenso del caudal, el caudal de la surgencia proviene totalmente del flujo base ( $Q_{FB}$ ), incluido el caudal de infiltración de la regata, y aun no hay influencia alguna del flujo rápido. El día 14/11/99, de importantes lluvias (tabla 4.8), a las 16:15 se alcanza un caudal de 627 l/s en la estación de aforos notándose una dilución brusca en los sulfatos.

Tramo 2) La disminución de la concentración en sulfatos (de 53.18 mg/l a 24.21 mg/l) está directamente unida al hecho de que el aporte de agua de la regata al acuífero es nulo ya que ha dejado de infiltrarse ( $Q_I=0$ ). Durante estas 8 horas (hasta el 15/11/99 a las 00:15 en que se alcanzan los 2485 l/s) la presencia del flujo rápido en la surgencia sigue siendo prácticamente nula, puesto que no se detecta dilución en los elementos marcadores internos del acuífero, como es aquí el caso de los bicarbonatos. Fundamentalmente el agua de descarga procede del flujo base del acuífero.

Tramo 3) A partir del 15/11/99 a las 00:15 ( $Q_{AF}=2485$  l/s) se produce un brusco aumento de la concentración en nitratos (de 7.9 mg/l a 21.3 mg/l) que marcaría ya la presencia e importancia del flujo rápido en la surgencia, momento en el que se produce también una importante dilución de los bicarbonatos (de 229.7 mg/l a 176.5 mg/l).

Los nitratos son marcadores externos cuyo origen parece estar en las depresiones situadas al Oeste de la zona de estudio (principalmente en la de Bidania), habida cuenta que en esta zona el uso del suelo está en gran parte ligado a la agricultura. Justo antes del primer aumento de caudal importante del año en la surgencia, los conductos están lo suficientemente vacíos como para permitir que el flujo rápido ( $Q_{FR}$ ) llegue a través de ellos hasta la surgencia arrastrando consigo los nitratos retenidos en el suelo y provocando la dilución del marcador interno del acuífero (bicarbonatos). El flujo rápido sigue presente en la surgencia durante varios días como lo demuestra la lenta disminución de la concentración en nitratos.

Debido a las precipitaciones registradas los días 17, 18 y 19 (en forma de nieve), cuatro días más tarde del primer pico de caudal comentado ( $Q_{AF\text{máximo}}=7857$  l/s) se produce un nuevo aumento del caudal en la estación de aforos ( $Q_{AF\text{máximo}}=6032$  l/s) cuyo efecto en la hidroquímica pasa desapercibido. En este momento los conductos están llenos de agua, por lo que el flujo rápido correspondiente empuja el agua situada en las partes más bajas del acuífero a modo de **flujo pistón** (*piston flow*) sin que el quimismo varíe sustancialmente en el punto de descarga.

La comparación de la evolución temporal de los sulfatos en los manantiales de Salubita e Igaran y en la regata y en la estación de aforos (presa), proporciona también una valiosa información referente a la presencia del flujo rápido. Lógicamente, la presencia del flujo rápido produce una dilución generalizada de los sulfatos en las aguas que proceden de los dos manantiales, de la regata y de la estación de aforos (presa). La figura 4.15 muestra esta evolución así como los caudales registrados en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) y las precipitaciones registradas (Erdoizta) durante el período 1997-2000, haciendo referencia a los períodos en los que la precipitación se ha producido en gran parte en forma de nieve.

La dilución originada por el flujo rápido hace que en los cuatro puntos de aguas (Salubita, Igaran, regata y presa) mencionados las concentraciones en  $SO_4^{2-}$  disminuyan produciendo una homogeneización generalizada. Los momentos puntuales en los que de forma más evidente se produce esa homogeneización se han marcado en la figura 4.15, aunque prácticamente en todas las crecidas controladas se produce este hecho, con concentraciones de sulfatos de 10-17 mg/l en Salubita y 10-23 mg/l en Igaran.

Existen algunos momentos (20/04/98 y 21/11/99) en los que se produce una dilución generalizada en los cuatro puntos que, aunque no producen una homogeneización importante, podrían indicar influencia del flujo rápido. Como se ve en la figura, todos los episodios nivales producen momentos de una mayor o menor homogeneización del contenido en sulfatos en las aguas, aunque no todos estos momentos son producidos por la nieve. En el período comprendido entre el 05/01/99 y el 21/03/99, en que gran parte de la precipitación se produce en forma de nieve, la variación en los sulfatos es muy pequeña (20-36 mg/l en Igaran y 13-17 en Salubita) mientras que en los momentos en los que la precipitación cae en forma de lluvia (del 25/10/98 hasta el 11/12/98), las fluctuaciones son mayores (55-23 mg/l en Igaran y 19-10 mg/l en Salubita).

Por otra parte, teniendo en cuenta que el año 1997-98 fue relativamente seco y que el 1998-99 se caracterizó por ser realmente húmedo, la figura 4.15 muestra una evolución similar en la concentración de sulfatos para ambos años. Al iniciarse el año hidrológico con las primeras lluvias, esa concentración disminuye notablemente, fluctuando moderadamente hasta el final de la época más

húmeda (Abril), a partir de ahí las concentraciones van aumentando para disminuir otra vez ante las primeras precipitaciones del año hidrológico siguiente.

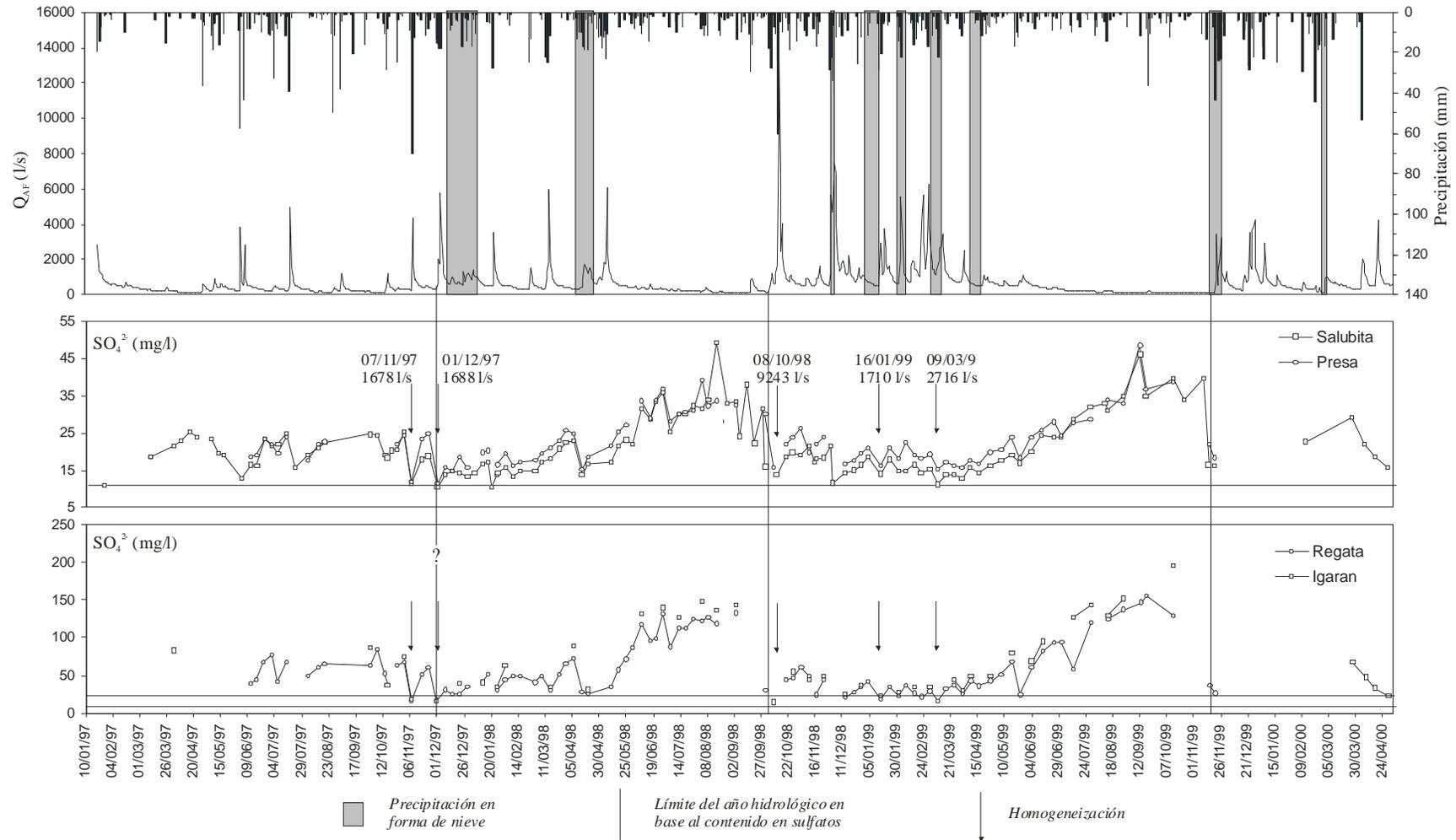
Según lo comentado, los sulfatos podrían utilizarse como indicadores del comienzo y final del año hidrológico concreto, no ya a partir de la estricta evolución de caudales sino basado en la hidroquímica, de forma que daría pie al establecimiento del *año hidrológico hidroquímico*. De esta forma, el comienzo del año hidrológico 1998-99 se podría establecer en torno al 30 de Septiembre de 1998 y el comienzo del año hidrológico 1999-00 en torno al 15 de Noviembre de 1999.

A tenor de los datos representados en la figura 4.15 el comienzo del año hidrológico 1997-98 sería más complicado de determinar, ya que el año hidrológico anterior (1996-97) fue realmente húmedo registrándose el 37% de la precipitación entre Junio y Septiembre, y la concentración en sulfatos no parece seguir el patrón general antes comentado.

#### **4.4. LOS ESTAVELLE**

Un **estavelle** es un punto localizado en la superficie del terreno, o en una cueva, que dependiendo de las condiciones hidrológicas e hidrogeológicas puede funcionar en ocasiones como manantial y en ocasiones como sumidero (definición basada en BONACCI, 1987 y TRIMMEL, 1968). Según ambos autores los estavelle aparecen exclusivamente en zonas kársticas, donde frecuentemente las bocas de algunas cuevas funcionan como tal formando parte del sistema de drenaje kárstico. En la literatura se describen diferentes tipos de estavelle aunque hasta el momento no parece existir una sistemática bien definida. GOLDSCHIEDER et al. (1999) proponen una clasificación basada en los ejemplos y datos recogidos en la literatura.

La mayoría de los estavelle descritos en la bibliografía, en épocas de estiaje funcionan como sumideros y en períodos de aguas altas como manantiales. Esa variación depende directamente de la carga hidráulica y de las condiciones del terreno (MILANOVIC, 2000). Consecuentemente se utilizan los conceptos *activo* si el estavelle funciona como manantial en aguas altas o *pasivo* si lo hace como sumidero en aguas altas. En ocasiones, pueden verse estavelle de este tipo también en algunas zonas de alimentación de sistemas kársticos. En los Alpes Dináricos, por ejemplo, se han descrito estavelle en poljes. En épocas de fuertes lluvias suele ocurrir de forma habitual que sumideros situados en poljes comiencen a descargar agua ya que temporalmente se encuentran por debajo del nivel piezométrico. En estos casos es habitual ver alrededor del sumidero grandes cantidades de agua en forma de grandes charcos.



**Figura 4.15:** Evolución temporal de los sulfatos en Salubita, Igaran, regata y estación de aforos y su relación con la precipitación y los caudales en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).

#### 4.4.1. LOS ESTAVELLE DE SALUBITA

Como se ha puesto ya de manifiesto (apartado 4.2), el llamado manantial de Salubita está constituido en realidad por varios puntos de descarga, algunos de los cuales, dependiendo de las condiciones hidrogeológicas, pueden funcionar también como sumideros; por lo tanto, responden al concepto de *estavelle activo*. En total se han contabilizado treinta puntos de descarga (figura 4.2) de los cuales únicamente los ocho situados a menor cota funcionan permanentemente como tales puntos de descarga (manantial de Salubita *sensu stricto*). El situado a mayor cota es un trop plein que llega a desbordar solo en períodos de intensas precipitaciones cuando el caudal en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) sobrepasa los 1600 l/s aproximadamente, según observaciones de campo realizadas *in situ*. El resto de las pequeñas bocas, situadas a un lado y otro de la Regata Albiztur y en su lecho, funcionan intermitentemente como estavelle según el momento hidrológico o lo hacen en forma de manantiales en épocas de crecida, permaneciendo secos el resto del año. (figuras 4.2 y 4.16).

La figura 4.16 muestra de forma esquemática las situaciones en las que han sido observados los estavelle. A excepción de cinco (figura 4.2), la mayoría de las bocas situadas entre el trop plein y los puntos más bajos, de descarga permanente, responden al mismo funcionamiento dependiendo de las condiciones hidrológicas de cada momento, de forma que pueden diferenciarse seis situaciones distintas:

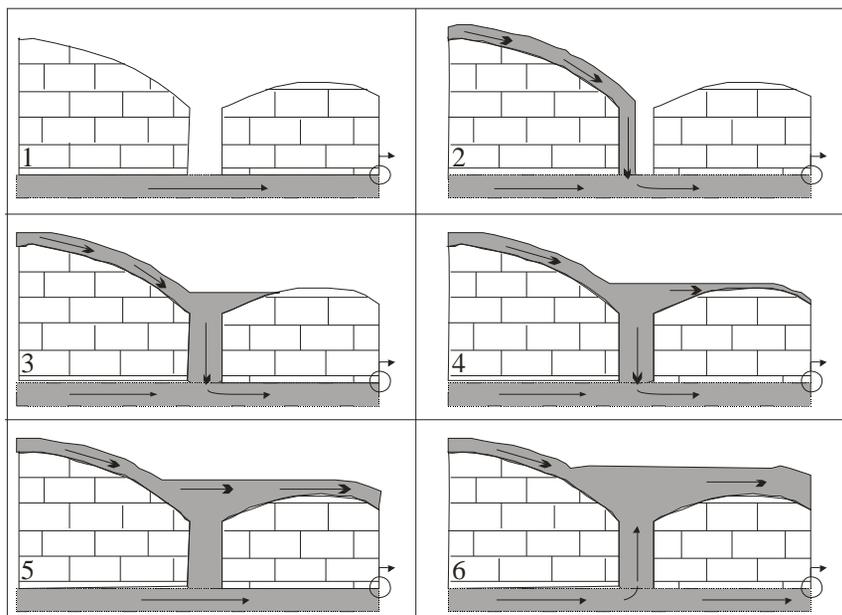


Figura 4.16: Situaciones de los estavelle dependiendo de las condiciones hidrogeológicas.

(1) La ausencia de lluvia origina, en estiaje, que la Regata Albiztur desaparezca paulatinamente a lo largo del lecho de la regata hasta desaparecer por completo a unos 30 m (en ocasiones incluso a una distancia superior a 100 m) aguas arriba de las bocas, por lo que éstas se encuentra secas y ni engullen ni aportan agua.

(2) Las primeras precipitaciones del año hidrológico aumentan ligeramente el caudal de la regata haciendo que el agua de ésta desaparezca totalmente a través de las bocas.

(3) A medida que perduran las lluvias el nivel piezométrico comienza a subir dentro de las bocas y a pesar de que la regata sigue infiltrándose totalmente, se crea un pequeño remanso en el cauce de la misma. Estas situaciones se dan con caudales en la estación de aforos inferiores a 200-225 l/s, según lo visto en el apartado 4.3.

(4) El aumento del nivel en las bocas junto con el aumento del caudal en la regata originan el desbordamiento del remanso de forma que el agua comienza a fluir en el cauce de la regata, aguas abajo de las bocas, aunque la regata sigue perdiendo agua en esos puntos.

(5) Cuando el nivel piezométrico alcanza la altura del lecho de la regata, ésta pasa por encima del nivel subterráneo sin infiltrarse. En esta situación el nivel piezométrico no ha desbordado aun y el estavelle no ha comenzado a aportar agua. Estas dos últimas situaciones se dan cuando los caudales en la estación de aforos oscilan entre 200-225 l/s y 800 l/s.

(6) Finalmente, aproximadamente un día después de un intenso período de lluvia, el nivel piezométrico aumenta de tal forma que los estavelle comienzan a funcionar como puntos de descarga adicional aportando agua a la regata. Esto ocurre con caudales en la estación de aforos superiores a 800 l/s según lo comentado en el apartado 4.3.

#### ***4.5. LA REGATA ALBIZTUR. INFLUENCIA EN EL MANANTIAL DE SALUBITA***

Del mismo modo que en el caso del flujo rápido (apartado 4.3.2) también aquí se ha realizado una aproximación con el fin de calcular la superficie necesaria para producir un volumen de agua específico; en este caso, el volumen de flujo rápido de la Regata Albiztur. El marco general del procedimiento seguido es el establecido en la figura 4.4. Se han elegido los mismos picos que para el cálculo anterior (tabla 4.8). En ellos, al volumen de agua en la estación de aforos (VolAF) se le ha restado el correspondiente al manantial de Salubita (VolS) y siguiendo las mismas pautas que en el caso anterior se ha obtenido una superficie aproximada de unos 6.2 km<sup>2</sup> (tabla 4.10).

De la planimetría realizada sobre el mapa topográfico a escala 1:10000 se desprende que el área comprendida entre la Regata Albiztur y las estribaciones del monte Erniozabal (al Norte de la Falla de Errezil) parece ser la zona principal de la que se abastece la regata, donde se incluye el manantial de Igaran, puesto que la superficie planimetrada ahí es de 6.1 km<sup>2</sup> (figura 3.2).

	VolS (hm3)	VolAF (hm3)	VolAF-VolS	pp (mm)	km <sup>2</sup>
Dic-97	0.8052	1.1107	0.3054	50	6.1
Ene-98	0.5819	0.7203	0.1385	33.4	4.1
Mar-98	0.49	0.7604	0.2704	33	8.2
Oct-98	0.44	0.5878	0.1477	25	5.9
Nov-98	1.8497	3.1732	1.3235	140	9.4
Ene-99	0.6818	1.0239	0.3421	45	7.6
Ene-99	0.6937	0.8690	0.1753	38	4.6
Mar-99	1.5736	1.8977	0.3241	80	4
					6.2

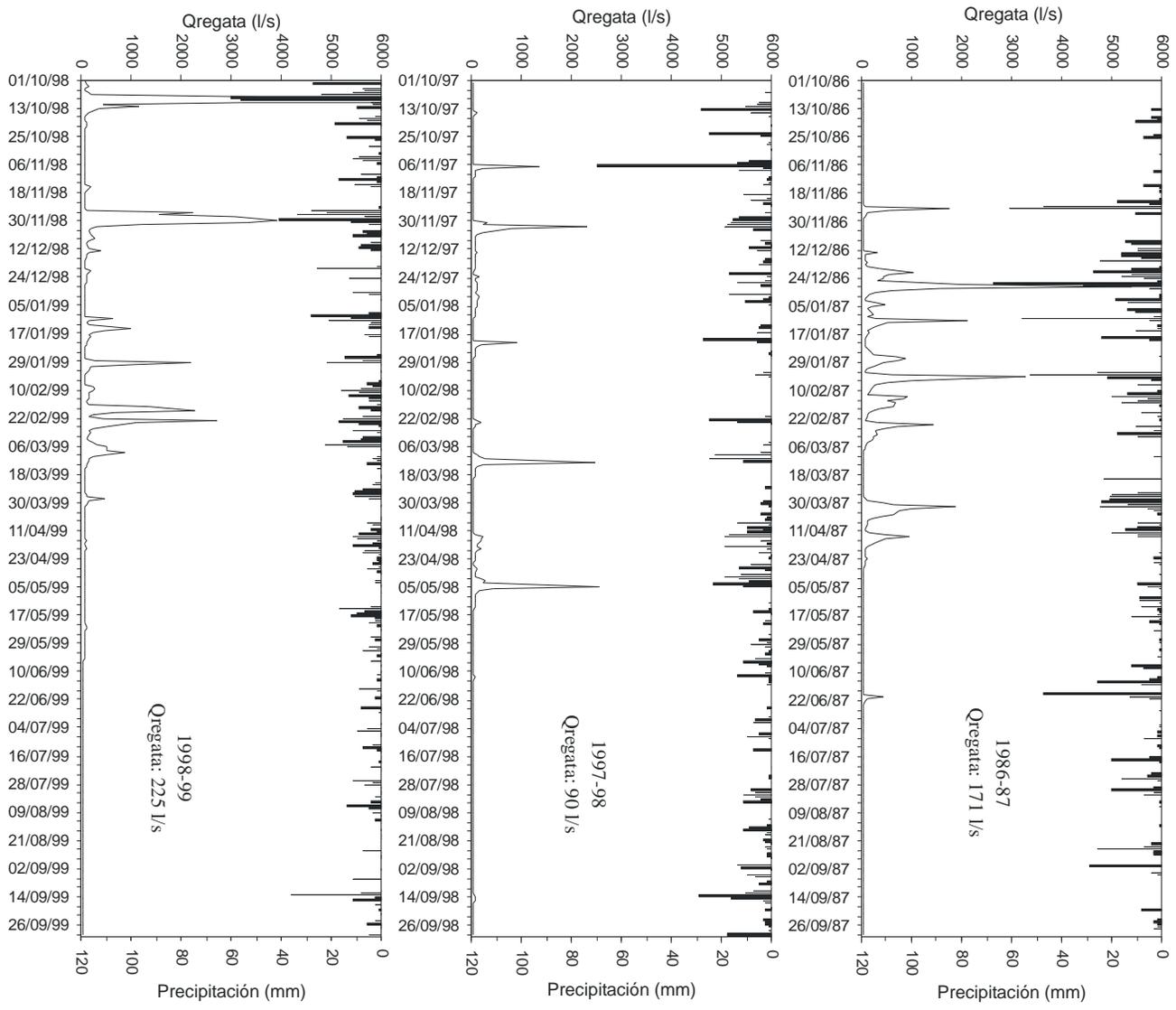
**Tabla 4.10: Datos de volúmenes y precipitación utilizados para el cálculo de la superficie necesaria para la generación del flujo rápido en la Regata Albiztur (Benta Zaharra) (VolAF-VolS). VolS: volumen drenado por Salubita; VolAF: volumen correspondiente al flujo que pasa por la estación de aforos; P: precipitación del evento lluvioso considerado; km<sup>2</sup>: superficie necesaria para justificar VolAF-VolS.**

La figura 4.17 muestra los hidrogramas de la Regata Albiztur en Benta Zaharra para los años 1986-87, 1997-98 y 1998-99 para los cuales el caudal mínimo ronda los 30 l/s. La obtención de estos tres hidrogramas se ha llevado a cabo restando los caudales obtenidos para Salubita (Q<sub>S</sub>) a los caudales registrados en la estación de aforos (Q<sub>AF</sub>). El origen de la regata, una vez restados los caudales de Salubita, se encuentra en el manantial de Igaran y en otros cursos de agua y pequeños manantiales de menor importancia. La respuesta de la regata ante las precipitaciones es mucho más rápida en comparación con la respuesta generada en el manantial de Salubita (figura 4.11) y también su recuperación. Aunque la mayor parte de los caudales máximos de los picos se encuentran entre 2000-3000 l/s, el 8 Octubre de 1998 se alcanzan los 5900 l/s y el 29 de Noviembre de ese mismo año se alcanzan los 3900 l/s.

En la figura 4.18 se incluyen, por un lado, los caudales de la regata en Benta Zaharra (Q<sub>R</sub>=Q<sub>BZ</sub>) con respecto a los caudales en la estación de aforos (Q<sub>AF</sub>), y, por otro lado, el porcentaje que el caudal de la regata supone respecto al caudal registrado en la estación de aforos. Los datos utilizados son los caudales medios diarios tomados de la figura 4.11 para Q<sub>AF</sub>, y de la figura 4.17 para Q<sub>regata</sub>. Según el primer gráfico, referente a los caudales de la regata, se ve que a medida que el caudal aumenta en la estación de aforos, éste aumenta también en la regata según la ecuación de la figura.

En lo referente a los porcentajes del caudal de la regata en la estación de aforos, se observa que para  $Q_{AF} < 700$  l/s ( $Q_i > 0$ ), a medida que  $Q_{AF}$  aumenta la presencia, porcentual, del agua de la regata en  $Q_{AF}$  va disminuyendo.





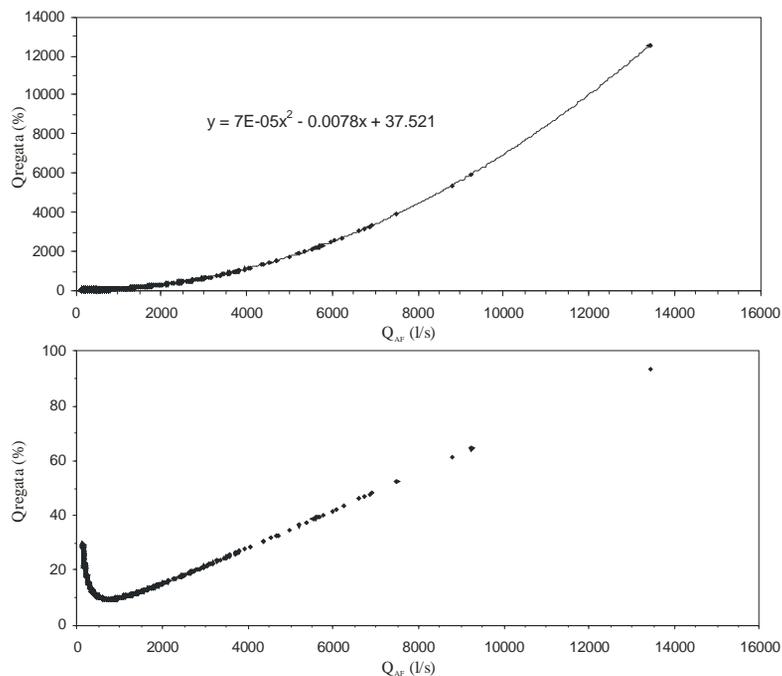
**Figura 4.17 : Hidrogramas estimados para la Regata Albiztur en Benta Zaharra para los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99.**

En este caso el aumento de  $Q_{AF}$  se debe al aumento de caudal en el manantial de Salubita. Cuando  $Q_{AF}$  se encuentra entre 700- 800 l/s ( $Q_I=0$ ), la presencia del agua de la regata es mínima (9-10%) y una vez que  $Q_{AF} > 800$  l/s a medida que  $Q_{AF}$  aumenta la presencia del agua de la regata en la presa va aumentando de forma que en algún pico aislado (Octubre de 1998), y momentáneamente, el porcentaje de caudal de la regata en  $Q_{AF}$  puede llegar al 90%.

Así, la figura 4.18 muestra en los gráficos dos campos de diferente comportamiento: a) una zona ( $Q_{AF} < 700-800$  l/s) en la que los porcentajes del agua de la regata en  $Q_{AF}$  **disminuyen** a medida que  $Q_{AF}$  aumenta, y b) la parte ( $Q_{AF} > 700-800$  l/s) en la que ocurre lo contrario, es decir, los porcentajes del agua de la regata en  $Q_{AF}$  **aumentan** a medida que  $Q_{AF}$  aumenta.

En época de estiaje las aguas que constituyen la Regata Albiztur provienen casi en su totalidad del manantial de Igaran (figuras 3.2 y 4.1), situado sobre calizas del Jurásico terminal a unos 2300 m de distancia al NW de Salubita; cuando las precipitaciones arrecian hay aportes de otros pequeños manantiales y cursos de agua.

Siguiendo la metodología utilizada en la descomposición del caudal del manantial de Salubita en sus dos componentes principales (*flujo rápido* y *flujo base*), se ha realizado la descomposición de la Regata Albiztur con el fin de obtener el hidrograma del manantial de Igaran.



**Figura 4.18:** Relación de los caudales de la Regata Albiztur en Benta Zaharra con los caudales registrados en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).

El caudal de la regata ( $Q_R$ ) es la suma del caudal del manantial de Igaran ( $Q_{Ig}$ ) y de otros cursos de agua de menor importancia ( $Q_H$ ), es decir que  $Q_R = Q_{Ig} + Q_H$  o, lo que es lo mismo, en términos de balance de masa:

$$100.(SO_4^{2-})_R = x.(SO_4^{2-})_{Ig} + (100 - x).(SO_4^{2-})_H$$

de donde se obtiene que

$$x = \frac{100.[(SO_4^{2-})_R - (SO_4^{2-})_H]}{[(SO_4^{2-})_{Ig} - (SO_4^{2-})_H]}$$

donde:

$(SO_4^{2-})_R$ : concentración de sulfatos en la regata, aguas arriba del manantial de Salubita.

$(SO_4^{2-})_{Ig}$ : concentración de sulfatos en el manantial de Igaran.

$(SO_4^{2-})_H$ : concentración de sulfatos en los cursos de agua de menor importancia (10 mg/l en aguas altas y 17 mg/l en estiaje).

x: porcentaje de caudal procedente del manantial de Igaran en el agua de la regata.

Para poder obtener el valor de x es necesario poseer los datos de las concentraciones en sulfatos del manantial de Igaran, de la regata y de los cursos de agua secundarios. Durante el desarrollo de este trabajo se han tomado algunos datos aislados de pequeñas fuentes o manantiales que alimentan la regata (Anexo I), de forma que sus valores de concentraciones en sulfatos han servido como referencia de los valores de la concentración de sulfatos en los cursos de agua secundarios a los que se ha adjudicado un valor de 10 mg/l en período de aguas altas y de 17 mg/l en estiaje. Del manantial de Igaran y de la Regata Albiztur existen numerosos datos de concentración en sulfatos tomados en diferentes condiciones.

En la tabla 4.11 se muestran los datos (un total de 36 para cada punto) de concentraciones de sulfatos utilizados para la descomposición del hidrograma de la regata, así como los caudales registrados en la estación de aforos en cada momento y el caudal deducido para el manantial de Salubita. El caudal de la regata ( $Q_R$ ) se ha obtenido restando  $Q_S$  a  $Q_{AF}$ . Aplicando la ecuación del balance de masa precedente se obtienen los porcentajes de agua del manantial de Igaran presente en la regata en esos momentos y de ahí sus caudales, reflejados también en la tabla 4.11.

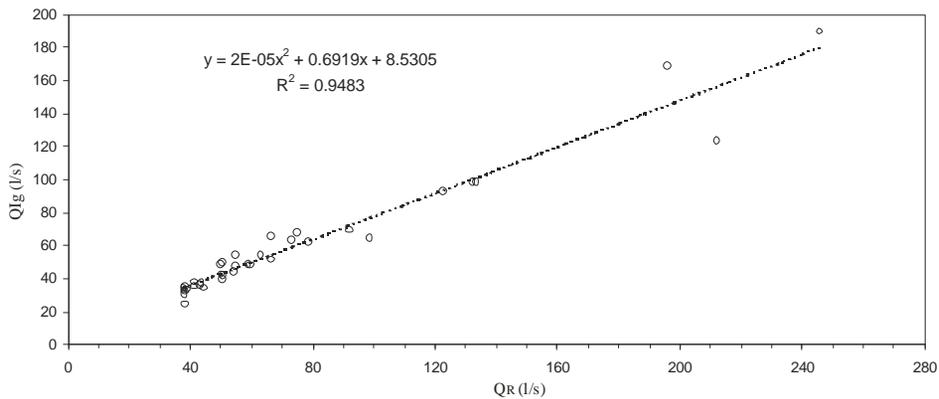
Los caudales de Igaran obtenidos mediante estos cálculos han permitido establecer una relación polinómica entre los caudales de la regata ( $Q_R$ ) y los de Igaran ( $Q_{Ig}$ ) que responde a la ecuación de la figura 4.19.

	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)			Q (l/s)			Q <sub>Ig</sub> (%) en Q <sub>R</sub> (l/s)	Q <sub>Ig</sub> (l/s)
	Regata	Igaran	H	Q <sub>AF</sub>	Q <sub>S</sub>	Q <sub>R</sub>		
30/09/1997	63.29	87.47	17	163.3	125.2	38.1	65.7	25
16/10/1997	37.35	37.31	10	488.4	438	50.4	100	50.5
01/11/1997	67.53	75.95	10	296.7	255.3	41.4	87.2	36.1
07/11/1997	17.29	18.45	10	1559.8	1364.1	195.7	86.3	168.8
22/12/1997	35.81	39.53	10	553.7	499	54.7	87.4	47.8
12/01/1998	41.28	41.12	10	553.7	499	54.7	100	54.7
26/01/1998	31.44	34.63	10	659.9	597	62.9	87	54.7
23/02/1998	50.85	62.77	10	1780.6	1535	245.6	77.4	190.1
16/03/1998	31.4	34.5	10	769.4	696.4	73	87.3	63.7
06/04/1998	72.8	89.29	10	369.4	325.2	44.2	79.2	35
20/04/1998	26.31	31.44	10	939	847.1	91.9	76.1	69.9
11/05/1998	35.77	29.37	10	700.1	633.7	66.4	100	66.4
08/06/1998	117.59	132.73	17	351.7	308.3	43.4	86.9	37.8
28/06/1998	131.46	139.97	17	296.7	255.3	41.4	93.1	38.5
13/07/1998	113.21	126.87	17	193	154.4	38.6	87.6	33.8
03/08/1998	122.1	148.06	17	488.4	438	50.4	80.2	40.4
17/08/1998	118.77	135.77	17	163.3	125.2	38.1	85.7	32.7
04/09/1998	133.29	142.6	17	140.9	103.1	37.8	92.6	35
26/10/1998	47	55.37	10	621.1	561.4	59.7	81.6	48.7
10/11/1998	48.83	45.33	10	475	425.4	49.6	100	49.6
14/12/1998	21.24	24.99	10	1218.5	1086.6	131.9	75	98.9
28/12/1998	34.96	37.38	10	787.1	712.4	74.7	91.2	68.1
16/01/1999	17.9	23.51	10	1635.4	1423.4	212	58.5	124
01/02/1999	22.54	26.94	10	1226.3	1093.1	133.2	74	98.6
16/02/1999	26.41	34.97	10	990.2	891.8	98.4	65.7	64.7
02/03/1999	29.29	35.23	10	1157.6	1035.3	122.3	76.5	93.5
24/03/1999	37.13	44.65	10	700.1	633.7	66.4	78.3	52
01/04/1999	25.87	29.75	10	823.4	744.8	78.6	80.4	63.1
09/04/1999	43.21	50.3	10	541.9	488	53.9	82.4	44.4
27/04/1999	43.14	49.62	10	608.5	549.8	58.7	83.6	49.1
17/05/1999	69.01	80.34	10	491.8	441.2	50.6	83.9	42.5
04/06/1999	61.12	69.31	10	481.7	431.7	50	86.2	43.1
14/06/1999	83.27	95.66	17	345.9	302.7	43.2	84.2	36.4
29/07/1999	120.57	143.37	17	151.5	113.6	37.9	82	31.1
14/08/1999	124.07	130.1	17	161.8	123.7	38.1	94.7	36.1
28/08/1999	137.27	151.95	17	147.9	110	37.9	89.1	33.8

**Tabla 4.11: Datos de concentración en sulfatos utilizados para la descomposición del hidrograma de la Regata Albiztur en Benta Zaharra.**

De la relación que se muestra en la figura 4.19 se han obtenido los hidrogramas de Igaran (Q<sub>Ig</sub>) para los tres años hidrológicos que se muestran en la figura 4.20 junto con los hidrogramas de Salubita (Q<sub>S</sub>) y los que provienen de los otros cursos de agua (Q<sub>H</sub>). Se trata, también aquí, de una aproximación, ya que como se ve en la tabla 4.11 episodios de muy altos caudales en la estación de aforos no han sido químicamente controlados (Q<sub>AF</sub> hasta 1780 l/s).

En la tabla 4.12 se muestran los datos generales obtenidos para los tres años hidrológicos, donde se aprecia que, en general, y a nivel anual, el 80.6% del caudal medido en la estación de aforos (Q<sub>AF</sub>) proviene de Salubita (Q<sub>S</sub>), un 15.2% proviene de Igaran (Q<sub>Ig</sub>) y un 4.2% de pequeños manantiales circundantes (Q<sub>H</sub>).



**Figura 4.19:** Relación entre los caudales de Igaran ( $Q_{Ig}$ ) y los caudales de la regata ( $Q_R$ ).

La tabla 4.12 muestra que para el año más seco (1997-98) la presencia de  $Q_{Ig}$  (12.2%) y  $Q_H$  (3.2%) en  $Q_{AF}$  es mínima mientras para  $Q_S$  se alcanza la máxima (84.6%). En 1986-87 (año ligeramente húmedo) y 1998-99 (año húmedo) aumentan los porcentajes de  $Q_{Ig}$  y  $Q_H$  y disminuyen los de  $Q_S$ . Teniendo en cuenta las precipitaciones de la tabla y los caudales medios obtenidos para Igaran, se ha hecho también una estimación de la superficie mínima necesaria (admitiendo  $ETR=0$ ) para originar el volumen de agua proveniente de ese manantial obteniéndose una superficie de entre 1.8 y 3.7  $km^2$ .

	Q (l/s)					Km <sup>2</sup> Igaran	% en $Q_{AF}$		
	P (mm)	$Q_{AF}$	$Q_S$	$Q_{Ig}$	$Q_H$		$Q_S$	$Q_{Ig}$	$Q_H$
1986-87	1393	845	674	131	40	2.9	80.3	15.6	4.1
1997-98	1268	587	497	72	18	1.8	84.6	12.2	3.2
1998-99	1488	977	753	177	47	3.7	77	18.1	4.9
							80.6	15.2	4.2

**Tabla 4.12:** Relación de los caudales que se suman en la estación de aforos.

Aunque los porcentajes visibles en las tres columnas de la parte derecha de la tabla 4.12 son válidos como media para los años hidrológicos considerados, la presencia de cada tipo de agua en  $Q_{AF}$  no se mantiene constante a lo largo del año variando de acuerdo con las precipitaciones y los caudales en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ). La figura 4.21 muestra la presencia (%) de cada tipo de agua en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) de acuerdo con los caudales ( $Q_{AF}$ ) registrados en ese punto. Los datos utilizados son los caudales medios diarios tomados de la figura 4.20.

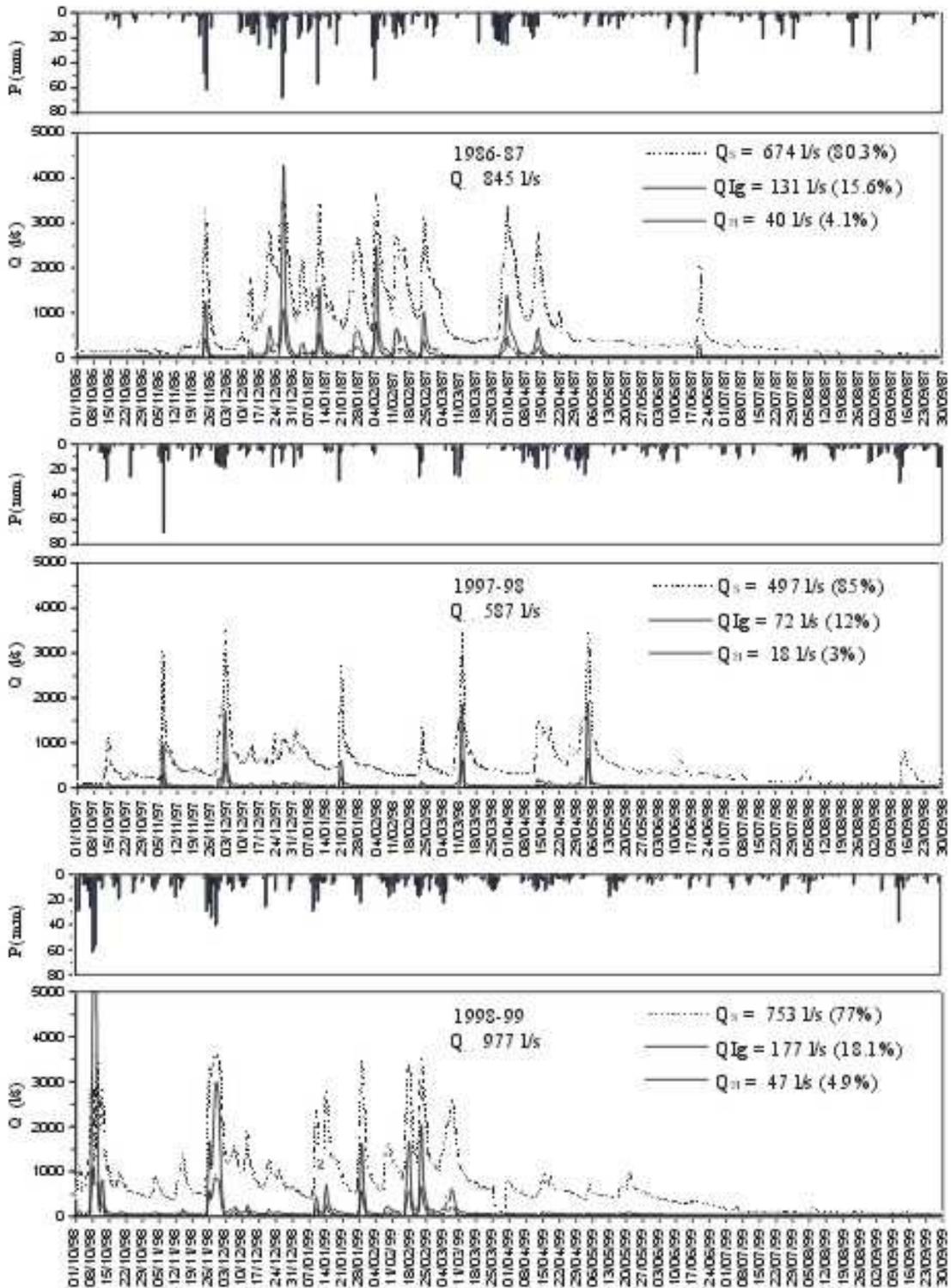
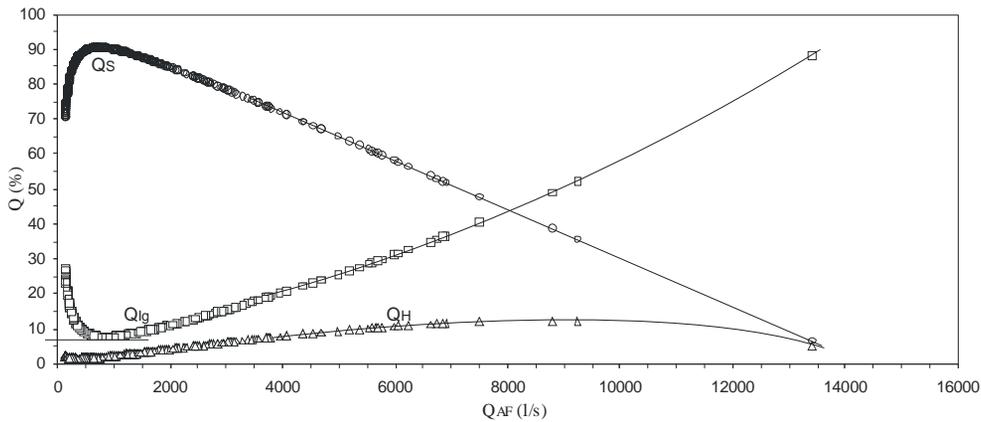


Figura 4.20: Comparación de los hidrogramas de Salubita ( $Q_s$ ), Igaran ( $Q_{Ig}$ ) y del resto del agua que llega a la regata ( $Q_H$ ) deducido a partir de las concentraciones en sulfatos.



**Figura 4.21: Detalle de la variación de los porcentajes de los caudales ( $Q_s$ ,  $Q_{I_g}$  y  $Q_H$ ) que componen el caudal de agua que pasa por la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).**

La figura 4.21 pone de manifiesto la existencia de cuatro dominios que se muestran en la tabla 4.13 y que, según los caudales de  $Q_{AF}$ , son: 1)  $Q_{AF} < 700$  l/s, 2)  $700$  l/s  $< Q_{AF} < 800$  l/s, 3)  $800$  l/s  $< Q_{AF} < 7000$  l/s y 4)  $Q_{AF} > 7000$  l/s.

$Q_{AF}$ l/s	1) $< 700$	2) $700 - 800$	3) $800 - 7000$	4) $> 7000$
$Q_s$ %	70 - 90	90	90 - 50	$< 50$
$Q_{I_g}$ %	27 - 8	8	8 - 40	$> 40$
$Q_H$ %	3 - 2	2	2 - 10	$< 10$

**Tabla 4.13: Presencia de cada tipo de agua ( $Q_s$ ,  $Q_{I_g}$  y  $Q_H$ ) según el caudal de la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ).**

1) En el primer tramo ( $Q_{AF} < 700$  l/s) el agua de la regata se infiltra, y a medida que  $Q_{AF}$  aumenta, la presencia de  $Q_s$  también aumenta hasta llegar a un máximo del 90% mientras que  $Q_{I_g}$  va disminuyendo hasta un 8% y  $Q_H$  también disminuye ligeramente hasta el 2%. 2) En el segundo tramo ( $700$  l/s  $< Q_{AF} < 800$  l/s), momento en el que no se infiltra, de forma significativa al menos, agua de la regata, los porcentajes de las tres componentes se mantienen prácticamente constantes ( $Q_s \approx 90\%$ ,  $Q_{I_g} \approx 8\%$  y  $Q_H \approx 2\%$ ).

3) A partir de  $800$  l/s (tercer tramo) la presencia de las tres componentes en  $Q_{AF}$  comienza a evolucionar de forma opuesta, de manera que a medida que los caudales aumentan en  $Q_{AF}$  la presencia de  $Q_s$  va siendo menor (hasta un 50%) aumentando la de  $Q_{I_g}$  (hasta un 40%) y también la de  $Q_H$  (hasta un 10 %). 4) Finalmente, una vez que  $Q_{AF}$  supera los  $7000$  l/s, la presencia de  $Q_s$  es inferior al 50% y cuando  $Q_{AF} \geq 9000$  l/s la mayor parte del agua proviene del manantial de Igaran ( $Q_{I_g}$ ), o de zonas próximas cuyas aguas presentan un quimismo similar al de ese manantial. Entre  $7000$  y  $9000$  l/s en

$Q_{AF}$ , el porcentaje de  $Q_H$  se mantiene constante en el 10-11% disminuyendo algo a partir de que  $Q_{AF}$  sobrepasa los 9000 l/s.

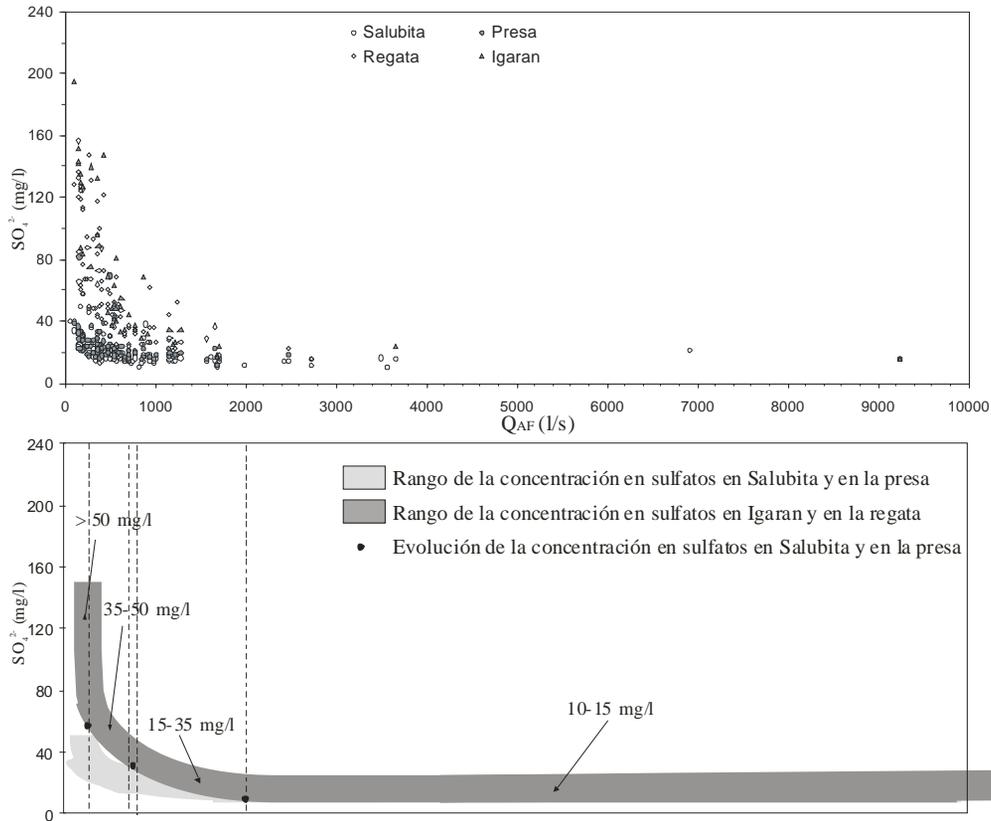


La figura 4.22 muestra la evolución de la concentración en sulfatos en los manantiales de Salubita e Igaran, en la regata y en la presa (estación de aforos) en función de los caudales de esta última. Se ve una estrecha relación entre las concentraciones en la regata e Igaran, por un lado, y Salubita y la presa, por otro, lo cual es obvio a la vista de lo anteriormente expuesto. Cuando  $Q_{AF} > 2000$  l/s las concentraciones en sulfatos en los cuatro puntos comienzan a homogeneizarse, oscilando entre 10 y 23 mg/l (10-15 mg/l más frecuentemente) debido a la dilución producida por el flujo rápido originado tras períodos lluviosos (figura 4.15).

El rango difiere una vez que  $Q_{AF} < 2000$  l/s, momento caracterizado por un cambio de pendiente (punto de inflexión) en la evolución de ambos grupos (Igaran-regata; Salubita-presa) de puntos. A partir de ese momento la concentración aumenta hasta aproximadamente 35 mg/l en Igaran y la regata a medida que los caudales disminuyen. En Salubita y la presa también aumentan las concentraciones pero muy ligeramente. Entre los 700-800 l/s se produce otro cambio de pendiente a partir del cual las concentraciones aumentan en Igaran y en la regata hasta alcanzar los 50 mg/l ( $Q_{AF} \approx 200-220$  l/s) y lo mismo ocurre en Salubita y la presa donde las concentraciones aumentan hasta unos 18 mg/l. Ese aumento de concentración en Salubita coincide con el momento en el que la regata comienza a infiltrarse ( $Q_{AF} = 700-800$  l/s) afectando al contenido en sulfatos del manantial.

Cuando  $Q_{AF} < 200-220$  l/s la regata se infiltra en su totalidad, hecho que se deja notar también en Salubita por aumentar bruscamente el contenido en sulfatos, de forma que a partir de ese momento el contenido en sulfatos del manantial de Salubita está totalmente controlado por el contenido en sulfatos de la regata y del manantial de Igaran. Las variaciones en la concentración de Igaran-regata y Salubita-presa muestran una tendencia similar, aunque la pendiente es siempre menor en Salubita-presa, y aumenta una vez que  $Q_{AF} = 700-800$  l/s y sigue esa evolución ascendente a medida que  $Q_{AF}$  disminuye. Queda clara así la influencia que la Regata Albiztur, controlada por Igaran, ejerce en Salubita, sobre todo en estiaje ( $Q_{AF} \leq 200-220$  l/s).

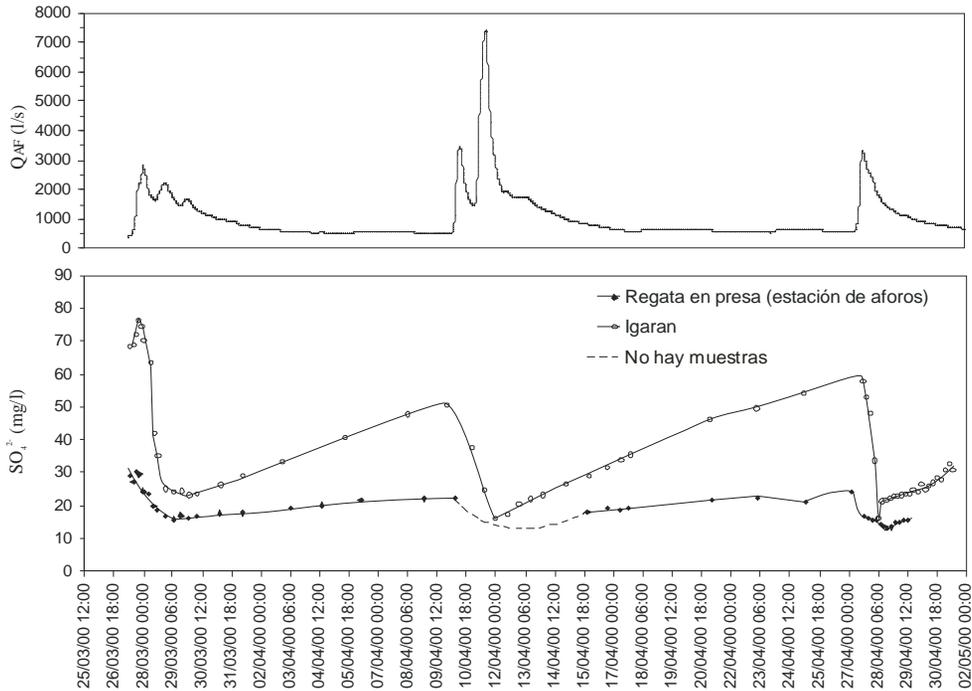
Las figuras 4.22 y 4.15 ponen de manifiesto la estrecha relación existente entre el manantial de Igaran y las aguas de la Regata Albiztur aguas arriba del manantial de Salubita. Las concentraciones de sulfatos en ambas son muy parecidas aunque en la regata es ligeramente inferior, debido a pequeños aportes de agua de origen diverso, y su evolución es paralela controlada por el manantial de Igaran.



**Figura 4.22: Concentración de sulfatos en la regata, en Salubita, en Igaran y en la presa y su evolución con respecto al caudal en la presa  $Q_{AF}$ .**

Aguas abajo del manantial de Salubita, en la estación de aforos, la regata adquiere una concentración en sulfatos menor, influenciada por el manantial de Salubita, de forma que según muestra la figura 4.23 las diferencias en mg/l entre el manantial de Igaran y las aguas de la regata, aguas abajo del manantial de Salubita, es del orden de 9-10 mg/l en aguas altas y 27-28 mg/l en estiaje. En cualquier caso la influencia del manantial de Igaran sigue siendo visible.

Como se puede observar, los valores iniciales de la figura (próximos al 27/03/00) presentan en la regata (presa) concentraciones próximas a 30 mg/l para caudales en la estación de aforos ( $Q_{AF}$ ) de unos 500 l/s. En este momento se está infiltrando parte de la regata proveniente de Igaran cuyas concentraciones son del orden de 70-75 mg/l. Es decir, las concentraciones de Igaran se manifiestan, debido a la infiltración de la regata, en la presa (regata aguas debajo de Salubita). Cuando  $Q_{AF} > 700-800$  l/s, la regata deja de infiltrarse y la concentración de sulfatos en la presa disminuye hasta que la regata vuelve a infiltrarse, momento en el que  $Q_{AF}$  vuelve a ser inferior a 700-800 l/s.



**Figura 4.23: Evolución del contenido en sulfatos en el manantial de Igaran y en las aguas de la Regata Albiztur aguas abajo del manantial de Salubita (en la presa), para un corto período de tiempo frecuentemente muestreado.**

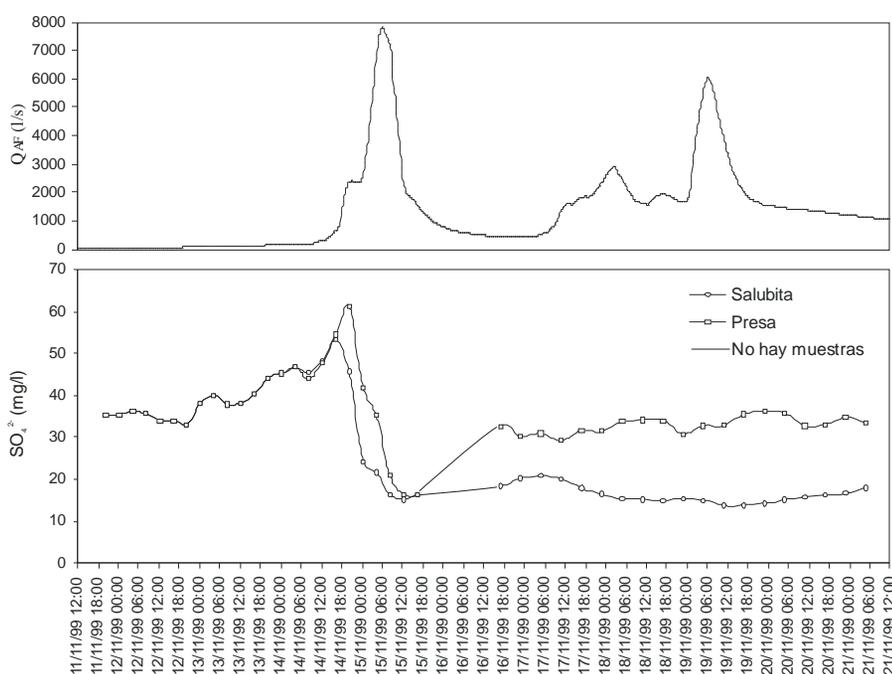
Hasta el momento se ha puesto de manifiesto en varias ocasiones la influencia que la regata ejerce en las aguas del manantial de Salubita. La figura 4.24 muestra una vez más esta relación en función de la concentración en sulfatos en la surgencia de Salubita y en la regata a la altura de la estación de aforos (presa) medida en la primera crecida del año hidrológico 1999-00.

En la primera parte de la figura, hasta el 14/11/99 a las 06:00 ( $Q_{AF} < 200-220$  l/s), la evolución es idéntica tanto para la surgencia como para la presa, ya que la totalidad del agua que pasa por la presa proviene de la surgencia puesto que la regata se infiltra aguas arriba de ésta. Cuando  $Q_{AF}$  oscila entre 200-220 y 700-800 l/s parte del agua que llega a la presa lo hace por la regata ya que una parte no se infiltra y de ahí que existan, hasta el 14/11/99 a las 18:00, ligeras diferencias entre ambos tipos de agua.

A partir del momento en que los caudales sobrepasan los 700-800 l/s en la presa, la influencia de la regata proveniente de Igaran se hace patente con un aumento de los sulfatos en la presa. En ese momento en la surgencia de Salubita disminuyen los sulfatos debido al nulo efecto en ella de las aguas de la regata, como fue ya comentado para la figura 4.14. La presencia del flujo rápido ocasiona una

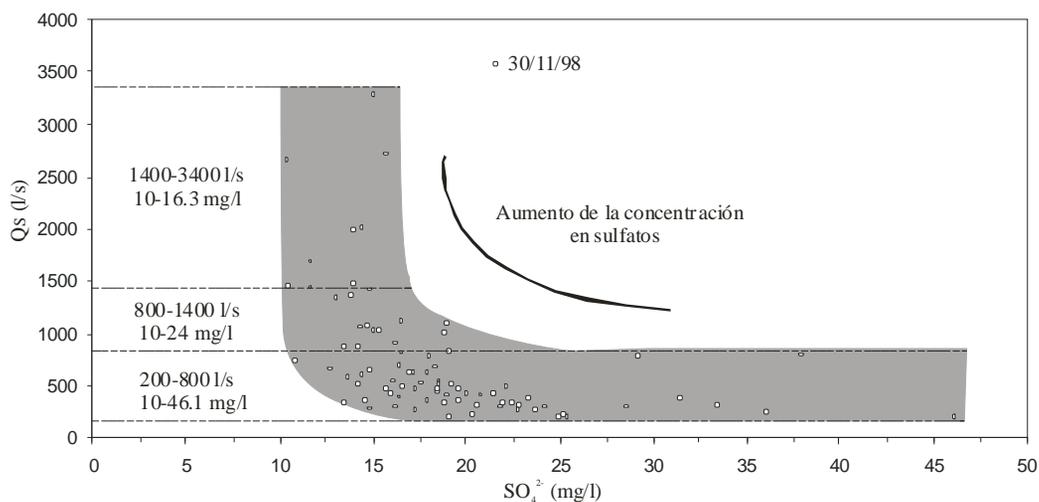
dilución en ambas aguas, antes en la regata (14/11/99 a las 20:00) que en el manantial (15/11/99 a las 00:15, según lo comentado para la figura 4.14).

A medida que disminuye la presencia del flujo rápido la surgencia de Salubita presenta las concentraciones propias del Sistema Kárstico de Salubita (12-22 mg/l) y la regata a la altura de la presa muestra las concentraciones (29-37 mg/l) debidas a la mezcla del agua procedente de la regata (Igaran) y la de la surgencia de Salubita. Estos períodos de control hidroquímico detallado se comentan de forma más completa posteriormente (apartado 4.9), en el marco de los análisis de quimiogramas como trazados naturales.



**Figura 4.24: Evolución del contenido en sulfatos en el manantial de Salubita y en la regata, aguas abajo del mismo (en la presa), para un corto período de tiempo frecuentemente muestreado.**

Se ha tratado de buscar una función que relacione los caudales de Salubita con la concentración en  $SO_4^{2-}$  de las muestras tomadas semanalmente en el manantial. Para intentar evitar la notable influencia de las aguas de la Regata Albiztur (infiltración en el cauce) sobre las aguas del manantial de Salubita en la época de estiaje (en estos momentos las aguas de la regata presentan altos contenidos en  $SO_4^{2-}$  procedentes del manantial de Igaran), no se han considerado los valores de  $Q_S < 200$  l/s (total infiltración de la regata). Como consecuencia, se ha obtenido una relación (figura 4.25) entre el caudal y los sulfatos en la surgencia de Salubita, para lo cual se han utilizado 84 datos.



**Figura 4.25: Relación entre los caudales ( $Q_s$ ) y la concentración de sulfatos en la surgencia de Salubita.**

La figura 4.25 muestra que, a pesar de no haber considerado los caudales inferiores a 200 l/s, para un caudal en la surgencia de entre 200 y 800 l/s existe una clara influencia del agua de la regata (>27 mg/l) debido a la infiltración, no total en estos momentos, de la misma. Evidentemente, a medida que el caudal disminuye el contenido en sulfatos aumenta. Además, el grupo de muestras ocupa tres rangos claros en relación con los caudales en la surgencia de Salubita y con la concentración en sulfatos de las aguas. El primero, y de mayor variabilidad en la concentración en sulfatos (10-46.1 mg/l), comprende los caudales entre 200 y 800 l/s. El segundo (11-24 mg/l) abarca los caudales situados entre 800 y 1400 l/s; y el tercero, de menor variabilidad en sulfatos (10-16.3 mg/l), iría de 1400 a 3400 l/s.

#### **4.6. HIDROLOGÍA DE LA DEPRESIÓN DE BIDANIA. INFLUENCIA EN EL MANANTIAL DE SALUBITA**

De los cálculos realizados y comentados en el apartado 4.3.2 dedicado al origen del flujo rápido, se obtuvo una superficie media responsable del origen de ese flujo de unos 12.6 km<sup>2</sup> que, a tenor de los datos hidroquímicos, ya se ha asumido como la correspondiente a las cuencas vertientes a las depresiones de Santutxo y Bidania (14.1 km<sup>2</sup> según planimetría). Debido a la existencia de un único sumidero permanente en toda este área (sumidero de Osinondo en la depresión de Bidania), en Febrero de 1998 se instaló un limnógrafo (SEBA, horizontal) sobre un pequeño puente situado a unos 300 m de distancia aguas arriba del sumidero. El objetivo era controlar las variaciones de nivel del Arroyo Bidania que desaparece en este punto, compararlas con las de la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur y, una vez calculados los caudales en ambos puntos, establecer su relación.

La tarea de campo principal consistió en la realización de la curva de gastos que relacionara los niveles registrados por el limnígrafo con los caudales del Arroyo Bidania. Se llevaron a cabo nueve medidas (tabla 4.14) del caudal con molinete y según la altura de la regleta en cada momento se obtuvo la curva de gastos que se presenta en la figura 4.26.

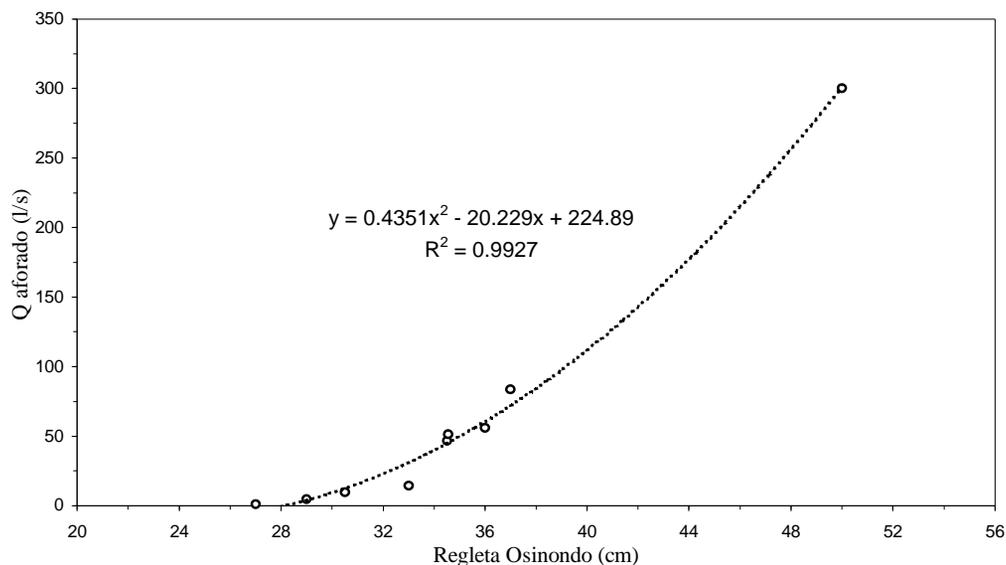
	Altura regleta (cm)	Qaforado (l/s)
28/03/98	33	14.5
01/05/98	50	300
07/07/98	30.5	9.7
01/0499	37	83.7
05/0499	34.5	46.7
09/04/99	34.55	51.4
07/05/99	36	56.1
25/06/99	29	4.7
28/08/99	27	1

**Tabla 4.14: Datos de las medidas de las alturas de la regleta y los caudales aforados en Osinondo según los cuales se realizó la curva de gastos.**

El caudal máximo (01/05/98) se estimó *de visu* en unos 300 l/s ya que no fue posible realizar la medida con el molinete por la fuerte corriente de la regata. El caudal mínimo aforado, por su parte, fue de 1 l/s. Aunque en estiaje el Arroyo Bidania lleva muy poca agua, con un caudal de aproximadamente 1 l/s el 26 de Octubre de 1999, durante el desarrollo de este trabajo en ningún momento ha llegado a secarse por completo. Cabe reseñar que aunque el mayor caudal aforado fue de unos 300 l/s se han observado momentos puntuales en los que ese valor se ha sobrepasado con creces. Sin embargo, la irregularidad del cauce del arroyo y la fuerte corriente imposibilitaron las labores de aforo. En estos casos de caudales altos se ha aplicado la ecuación de la figura 4.26 a los niveles registrados, aunque hay que ser consciente de que la curva de gastos es incierta para esos caudales, habida cuenta de que solo se ha contado con un único valor, y, además, por estimación visual.

El limnígrafo registró el nivel del río desde Febrero hasta Octubre de 1998. Sin embargo, en varias ocasiones debido a la fuerte corriente o al impacto contra el tubo del flotador de ramas o troncos que ésta arrastra en épocas de crecida, el limnígrafo dejó de funcionar durante algunas semanas mientras se reparaban los daños. Por este motivo el registro no es continuo.

En las figuras 4.27 a 4.29 se comparan las alturas de la lámina de agua registradas en el Arroyo Bidania con las registradas en la estación de aforos de la Regata Albiztur (presa). La observación detallada de estos limnigramas ha mostrado que las puntas de las crecidas se alcanzan en el sumidero entre 0.75 y 7.5 (promedio de 5.5) horas antes que en la presa, es decir, se producen prácticamente al mismo tiempo. De esta observación se deduce que los picos registrados en la presa no son una consecuencia del aumento de los caudales en Osinondo, sino que ambas crecidas suceden como consecuencia de un mismo evento (precipitaciones).



**Figura 4.26: Curva de gastos del Arroyo Bidania (sumidero de Osinondo).**

Por otra parte, se observa también que los picos son, en general, unimodales, a excepción de aquellos producidos como consecuencia de precipitaciones en forma de nieve o intermitencia de varios días. Esto significa que el aumento de caudal registrado en el sumidero de Osinondo experimenta una amortiguación al alcanzar la zona saturada y llega a la presa, a través del manantial de Salubita, con cierto retardo pasando desapercibido en el limnigrama de la presa. Ese retardo se ha estimado en unas 20-50 horas, a tenor de los datos obtenidos de los ensayos con trazadores (apartado 4.8).

La unimodalidad de los picos de caudales registrados en la presa radica en que el retardo existente entre el pico de crecida producido por la escorrentía rápida en la propia regata y el producido por el aumento de caudal en el manantial de Salubita no es lo suficientemente importante como para producir dos picos, de forma que su suma produce un único pico.

Además, los limnigramas muestran que la crecida es más rápida en la presa, como consecuencia, probablemente, de las aguas de escorrentía (sub)superficial que llegan rápidamente a la regata debido a las importantes pendientes en esta zona. La decrecida, sin embargo, es más lenta en la presa lo que indica una mayor regulación del agua que pasa por la misma, dominada, sobre todo, por las aguas provenientes del manantial de Salubita.

En la figura 4.27 se ha plasmado el período comprendido entre el 16 de Febrero y el 11 de Marzo de 1998, en el que se registraron tres crecidas. Las tres muestran una estrecha relación entre la evolución de los niveles de ambos puntos. Aunque en los gráficos de las figuras 4.27 a 4.29 no se han

incluido las precipitaciones por cuestiones de escala, éstas se comentan en el texto y todas ellas se refieren a los valores acumulados diarios de la estación de Erdoizta.

El primer pico importante se produce en el sumidero de Osinondo entre los días 22 y 23 de Febrero de 1998, como consecuencia de las lluvias caídas durante esos dos días (30 mm el día 22 y 11 mm el día 23). El nivel mínimo (32 cm a las 11:55 del 22/02/98) asciende hasta un máximo de 66 cm (a las 01:55 del 23/02/98) en aproximadamente 14 horas. En la presa de la Regata Albiztur el nivel mínimo (20 cm el 22/02/98 a las 21:15) asciende hasta los 44 cm (a las 06:15 del 23/02/98) en 9 horas, aproximadamente. En este caso, el inicio de la crecida se ha registrado en el sumidero 9.3 horas antes que en la presa, mientras que el punto máximo de crecida se ha registrado en el sumidero 4.3 horas antes que en la presa. Se observa que aunque la crecida comienza a producirse antes en Osinondo que en la presa, es en esta última donde el nivel aumenta con mayor rapidez.

El día 9 de Marzo del mismo año se producen nuevas precipitaciones (23 mm) que producen un nuevo aumento de nivel en Osinondo y en la presa entre los días 9 y 10. Esta crecida posee una singularidad cuyo origen se encuentra, probablemente, en la distribución de las lluvias a lo largo del día 9. Ese rasgo singular radica en que la crecida produce un pico bimodal, cuyo valor máximo se alcanza justo a las 10 horas de haberse alcanzado el máximo en el primer pico tanto en Osinondo como en la presa. El nivel en el sumidero de Osinondo se encuentra a 34 cm a las 00:10 del 09/03/98, momento en el que comienza a ascender hasta alcanzar los 59 cm a las 10:10 del mismo día, es decir, 10 horas más tarde. En la presa el aumento de nivel comienza a detectarse a partir de las 08:00 del 09/03/98, momento en el que el nivel se encuentra a 20 cm alcanzando un máximo de 40 cm a las 17:00 del mismo día, es decir, 9 horas más tarde. La influencia de las precipitaciones se notó en el sumidero 7.8 horas antes que en la presa, alcanzándose el punto máximo en el sumidero 6.8 horas antes que en la presa.

La última crecida registrada durante este período de control tiene su origen en las precipitaciones (26 mm) caídas durante los días 11 y 12 de Marzo que producen también un pico de crecida bimodal en el sumidero y en la presa. El 11/03/98 a las 06:10 el nivel en Osinondo (41 cm) comienza a aumentar hasta que 8 horas más tarde alcanza un máximo de 68 cm (a las 14:10 del 11/03/98). En la presa el nivel se encuentra a 27 cm (a las 12:50 del 11/03/98) cuando se detecta la respuesta de la regata que en 8 horas llega a un máximo de 52 cm (a las 20:50 del 11/03/98). La respuesta a las precipitaciones se produjo en Osinondo 6.6 horas antes que en la presa y el punto máximo de la crecida se detectó 6.8 horas antes que en la presa. Al igual que en el caso anterior, el nivel máximo del segundo pico se alcanzó en ambos puntos de control, justo 10 horas después de haberse alcanzado el máximo del primer pico.

La figura 4.28 comprende el período que va desde el final de Marzo hasta el inicio de Mayo de 1998. Este período se caracteriza por la presencia de precipitaciones en forma de nieve sobre todo entre los días 11 y 17 de Abril, responsables de los irregulares aumentos de niveles registrados en los dos puntos de medida (Osinondo y presa). El deshielo de las nieves caídas entre los días 11 y 17 (9 mm, 13 mm, 19 mm y 17 mm durante los días 11, 12, 13 y 17 respectivamente) hace que el nivel comience a ascender al mismo tiempo (12/04/98 a las 01:00) tanto en Osinondo (desde los 35 cm) como en la presa (desde los 21 cm).

Posteriormente se producen seis pequeños picos perfectamente identificables en los limnigramas de los dos puntos controlados que coinciden en el tiempo. El primer pico alcanza su máximo tras 25 horas de haberse iniciado la crecida (a las 02:00 del 13/04/98 con 51 cm en Osinondo y 35 cm en la presa), el segundo lo hace 19 horas después del primer máximo, el tercero 30 horas después del segundo, el cuarto 24 horas después del tercero, el quinto 36 horas después del cuarto y el sexto 22 horas después del quinto.

La distancia temporal entre los máximos de estos pequeños picos oscila entre 19 y 36 horas proporcionando un promedio de unas 26 horas, es decir, de aproximadamente un día. Se pone de manifiesto así la influencia de la insolación en el deshielo y, consecuentemente, también en los caudales, de forma que cada pico correspondería al caudal producido por el máximo deshielo originado durante un día. Lógicamente estos picos no son idénticos puesto que existen otros aspectos que condicionan su forma, tales como que durante el deshielo se produzcan precipitaciones o que la nubosidad varíe. En cualquier caso, se constata que en estos casos no existe apenas retardo entre los picos de crecida registrados en Osinondo y los de la presa, no habiendo entre ellos relación directa causa-efecto.

Entre el 25 de Abril y el 3 de Mayo se registran nuevas precipitaciones, en forma de lluvia, (16 mm, 19 mm, 24 mm, 22 mm y 12 mm los días 26, 29 y 30 de Abril y 1 y 2 de Mayo respectivamente) que producen nuevas crecidas. Se trata de pequeños picos cuyos máximos se alcanzan en Osinondo 7, 7.5, 7.5 y 5.5 horas antes que en la presa.

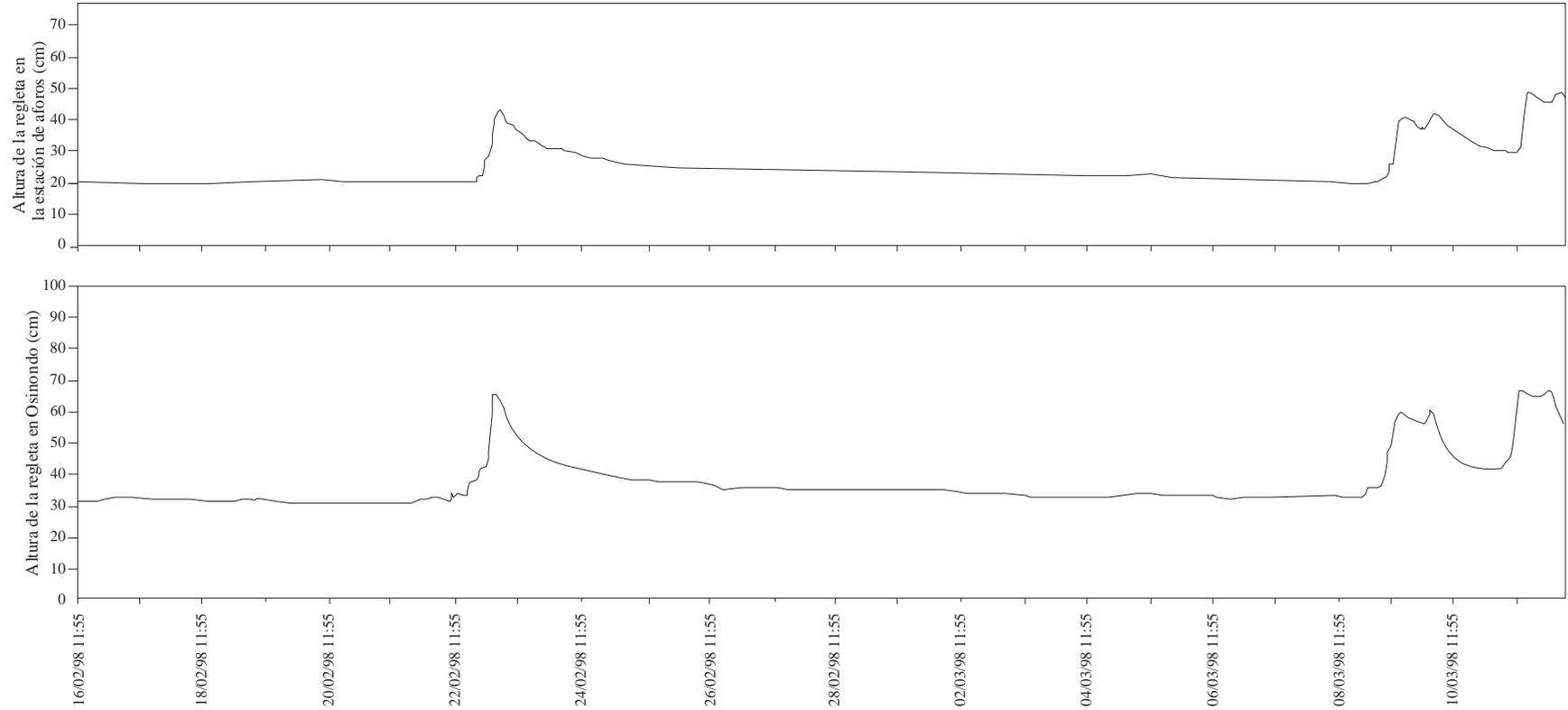
Finalmente, los días 3 y 4 de Mayo se producen nuevas precipitaciones de 36 y 10 mm por lo que los niveles vuelven a subir. El 03/05/98 a las 10:40 se produce el aumento de nivel en Osinondo a partir de los 49 cm y se alcanzan los 88 cm 14.1 horas después, a las 00:50 del día 4. En la presa el nivel comienza a ascender 4.2 horas más tarde que en Osinondo, a las 15:00 del día 3 y unas 14 horas más tarde (a las 05:00 del día 4) se alcanza el máximo (64 cm). Como se puede ver en el limnigrama de Osinondo de la figura 4.28, el día 4 de Mayo el nivel desciende bruscamente recuperándose unas 14 horas más tarde. Este descenso parece deberse a un bombeo realizado aguas arriba del sumidero,

habida cuenta que se trata de una época del año en la que las praderas se riegan con estiércol. De todas formas, este bombeo de unas 12-14 horas de duración no afecta en absoluto al limnigrama de la presa.

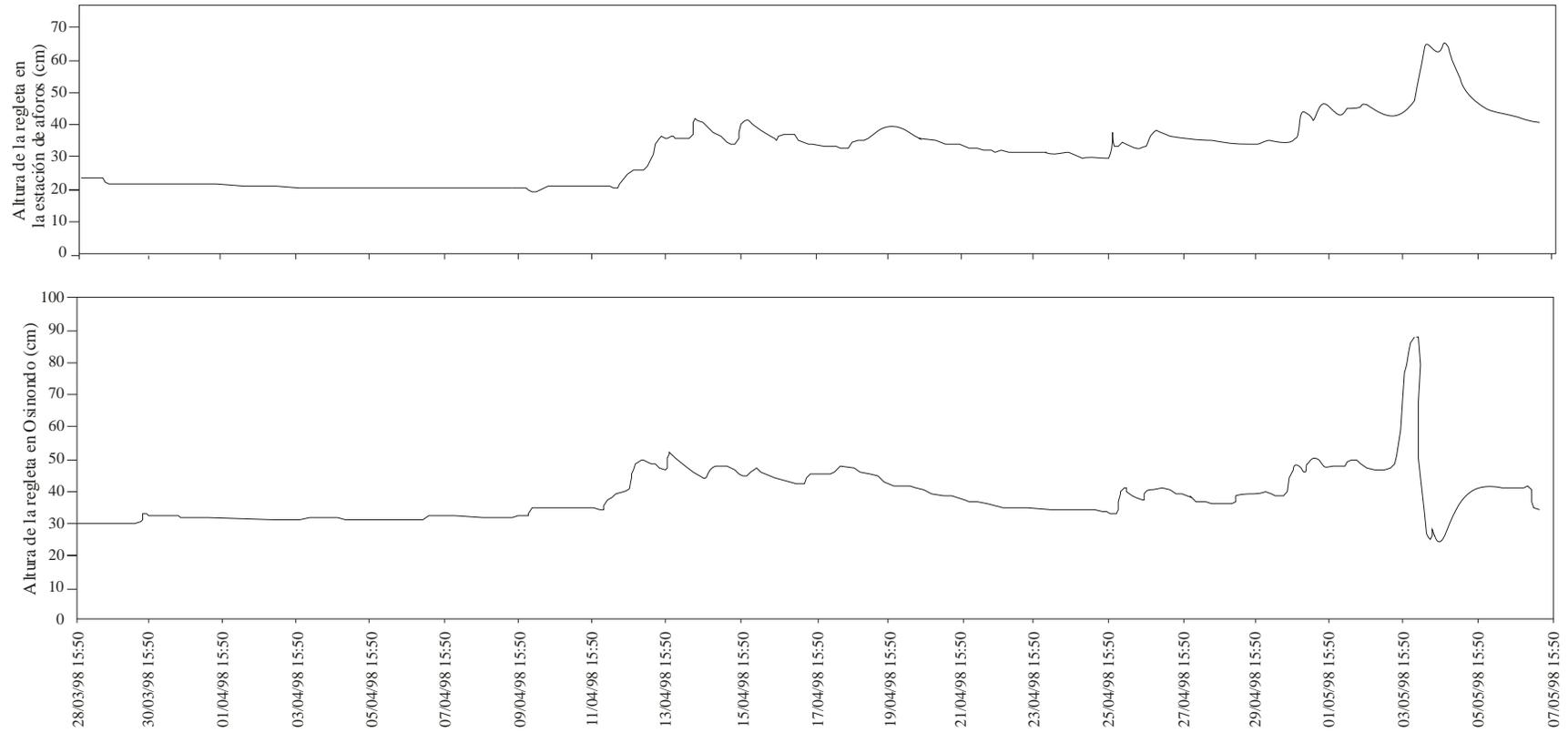
Por último, la figura 4.29 corresponde al período más largo, que va desde finales del mes de Mayo hasta principios del mes de Octubre de 1998, en el que a pesar de que las crecidas son en general de menor importancia en comparación con los limnigramas anteriores, el retardo entre los máximos de los picos de Osinondo y de la presa se sigue manteniendo.

El máximo de la primera crecida observable en la figura se produce 6 horas antes en el sumidero que en la presa, respondiendo a las precipitaciones caídas el día 11 de Junio (12 mm). Entre los días 1 y 2 de Agosto vuelve a llover (35.8 mm), produciéndose un aumento de nivel en Osinondo desde los 30 hasta los 42 cm, y en la presa desde los 20 a los 27 cm. En este caso el máximo de la crecida se alcanzó en la presa 7 horas más tarde que en el sumidero. A partir de ese momento no es hasta mediados de Septiembre cuando se producen las primeras lluvias importantes (93 mm entre los días 11 y 14), aunque entre medio se producen pequeños picos, tanto en la presa como en Osinondo.

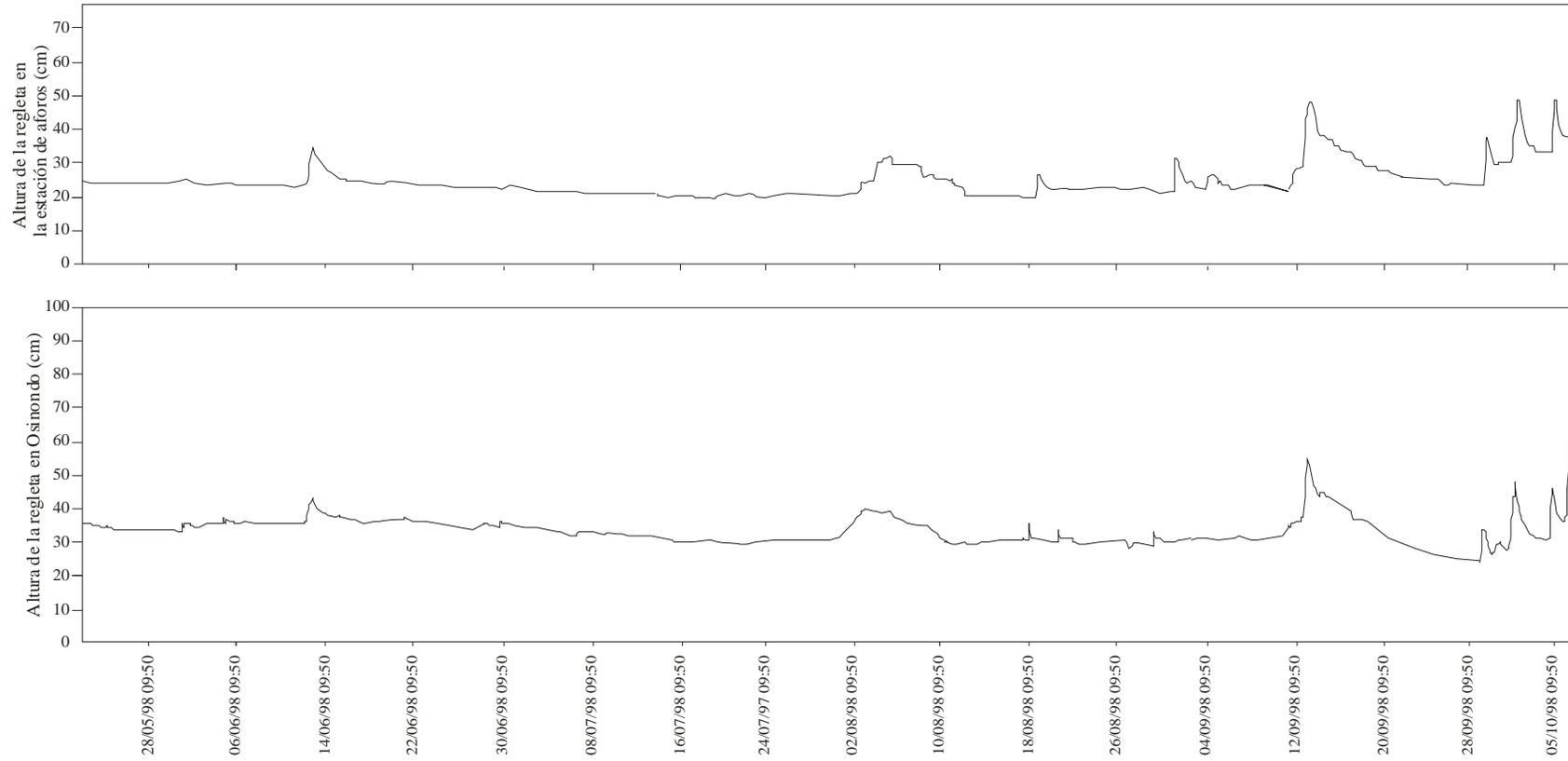
Así, el nivel sube en Osinondo desde los 35 cm (13/9/98 02:15) hasta los 55 cm (13/9/98 14:15) en 12 horas y en la presa desde los 16 cm (13/9/98 03:00) hasta los 35 cm (13/9/98 17:30) mostrando un retardo de 3.2 horas entre los máximos de Osinondo y la presa. El 30/09/98 (47 mm entre los días 29 y 30), el 03/10/98 (27 mm el día 2) y el 06/10/98 (33 mm entre los días 4 y 6) se producen tres nuevas crecidas que se caracterizan por producir un retardo entre los picos de Osinondo y la presa de 5.75, 0.75 y 2.1 horas respectivamente. El día 8 de Octubre, cuando el nivel se encontraba a 63 cm el aparato de Osinondo dejó de funcionar por el impacto de un tronco que se llevó el tubo que contenía el flotador. Horas más tarde, como consecuencia de las intensas lluvias registradas entre los días 7 y 9 (166 mm) el nivel había subido en la presa hasta los 85 cm (09/10/98 12:30).



**Figura 4.27:** Evolución de niveles de la lámina de agua en el sumidero de Osinondo y en la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur entre el 16/02/98 y el 11/03/98.



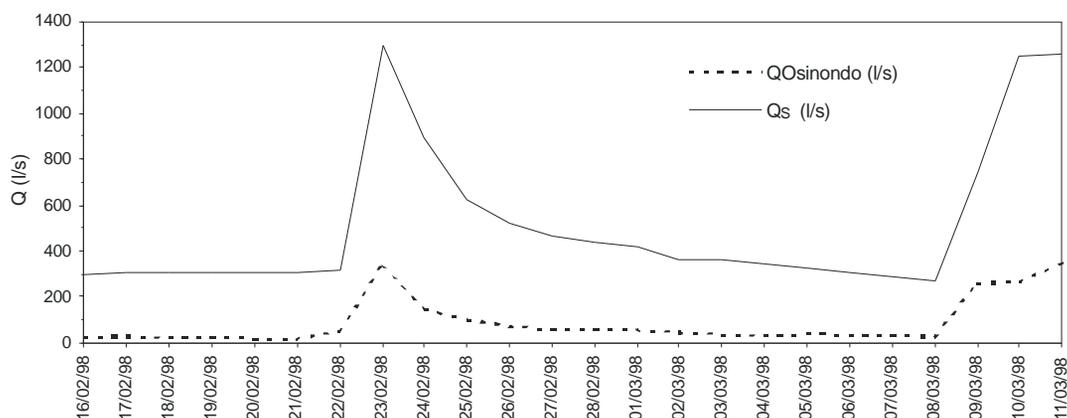
**Figura 4.28:** Evolución de niveles de la lámina de agua en el sumidero de Osinondo y en la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur entre el 29/03/98 y el 07/05/98.



**Figura 4.29:** Evolución de niveles de lámina de agua en Osinondo y en la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur entre el 25/05/98 y el 07/10/98.

En las figuras 4.30 a 4.32 se comparan los caudales medios diarios del Arroyo Bidania (Osinondo) con los caudales anteriormente deducidos (apartado 4.3) para el manantial de Salubita, a partir de los caudales registrados en la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur.

Como ya se ha comentado, los picos registrados en la presa no son una consecuencia del aumento de los caudales registrados en el sumidero de Osinondo, sino que ambas crecidas suceden como consecuencia de un mismo evento y la crecida registrada en Osinondo llega realmente, tránsito, al manantial con un retardo de unas 30-50 horas, y amortiguada. Quiere esto decir que para calcular el porcentaje de agua proveniente de Osinondo presente en el manantial hay que tener en cuenta ese retardo. Para hacer este cálculo se han utilizado los valores de los caudales medios diarios de Osinondo (deducidos a partir de la función de la figura 4.26) y los caudales medios diarios del manantial de Salubita, y los porcentajes se han calculado para un retardo de un día (24 horas) y para un retardo de dos días (48 horas) obteniéndose porcentajes prácticamente iguales.

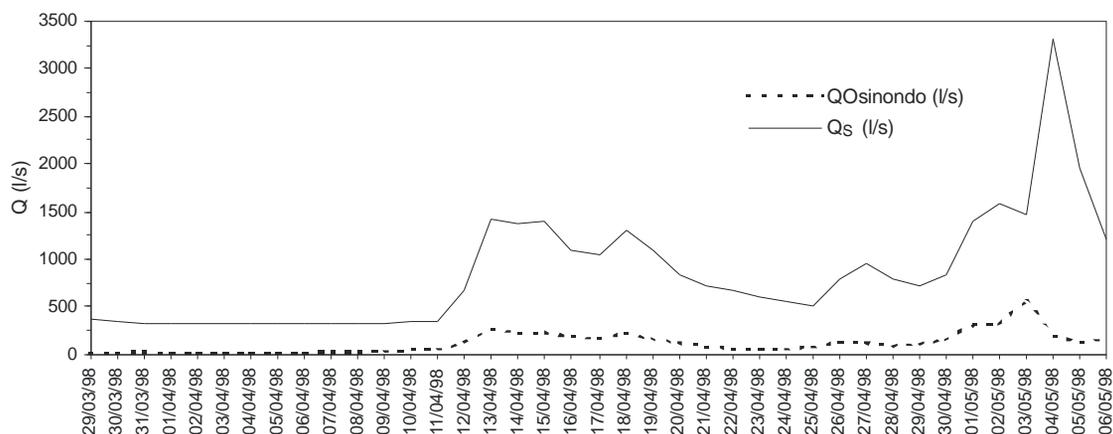


**Figura 4.30: Caudales medios diarios deducidos para Osinondo y para la surgencia de Salubita ( $Q_s$ ) entre el 16/02/98 y el 11/03/98.**

Del período comprendido entre el 16 de Febrero y el 11 de Marzo de 1998 (figura 4.30), se desprende que en períodos de aguas medias, el agua proveniente del sumidero se encuentra presente en la surgencia en porcentajes que oscilan entre el 5 y el 16%. En aguas altas ese rango aumenta siendo la presencia del agua del sumidero en la surgencia de entre un 4 y un 37%. En cualquier caso, el agua procedente de Osinondo presente en el manantial supone siempre una cantidad inferior al 37%.

Entre el 29 de Marzo y el 6 de Mayo de 1998 (figura 4.31), en los momentos de aguas medias, las aguas provenientes del sumidero de Osinondo se encuentran presentes en la surgencia en

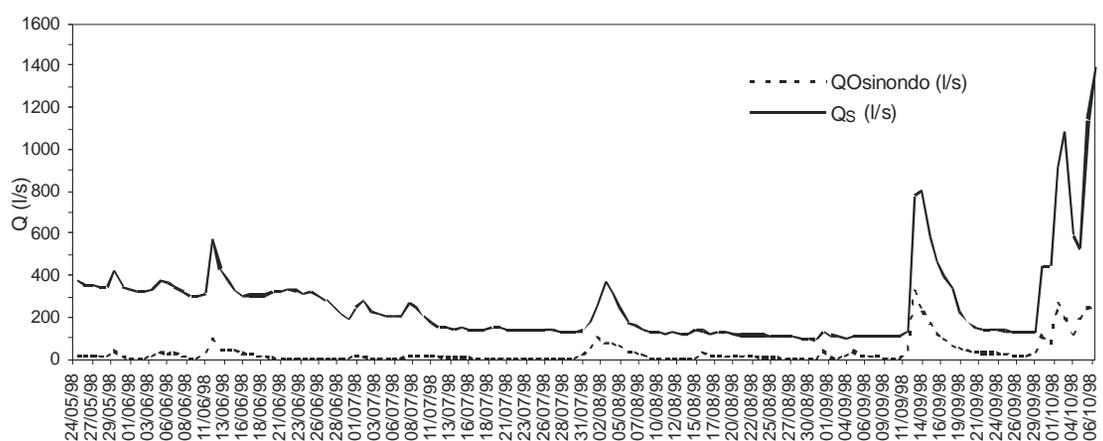
porcentajes que oscilan entre el 2 y el 14%, mientras que en aguas altas su presencia es de entre un 10 y un 21%.



**Figura 4.31: Caudales medios diarios deducidos para Osinondo y para la surgencia de Salubita ( $Q_s$ ) entre el 29/03/98 y el 06/05/98.**

En este caso, el caudal máximo se alcanza en la surgencia el 4 de Mayo con unos 3300 l/s, mientras que el día anterior el caudal medio diario en el sumidero es de unos 570 l/s, lo que muestra que del caudal que sale el día 4 por el manantial, aproximadamente el 17% proviene del sumidero de Osinondo.

En el último período, entre el 25 de Mayo y el 7 de Octubre de 1998 (figura 4.32), se constata que durante el período de estiaje las aguas procedentes de Osinondo suponen un 1-2% del agua de la surgencia. Durante los momentos de aguas medias esa presencia varía entre un 2 y un 37% y en aguas altas (14/09/98) llega incluso al 40% aproximadamente.



**Figura 4.32: Caudales medios diarios deducidos para Osinondo y para la surgencia de Salubita ( $Q_s$ ) entre el 25/05/98 y el 07/10/98.**

Las observaciones realizadas en este apartado ponen de manifiesto que aunque el sumidero de Osinondo posee conexión directa con la surgencia de Salubita, la presencia de este agua en el manantial supone una cantidad media total para los tres períodos considerados del orden del 11-13%, en términos de caudales medios diarios, pudiendo llegar en ciertos momentos muy puntuales hasta cantidades que rondan el 30-40%. Esto significa que el agua que sale por la surgencia proviene principalmente de otras zonas, ya sea de la propia depresión de Bidania o de otras zonas del acuífero. Esta cuestión se retoma en los siguientes capítulos, aunque ya fue también comentada en el apartado 4.3.2.

#### **4.7. ANÁLISIS DE LA PIEZOMETRÍA**

El uso de observaciones de niveles, y su evolución espacial y temporal, en piezómetros en la investigación hidrogeológica de áreas kársticas, como una técnica de gran interés, ha sido puesta de manifiesto por numerosos autores (MILANOVIC, 1981; BONACCI, 1987, 1995), sobre todo para el karst dinárico. En nuestra área de estudio lamentablemente son muy pocos los datos de niveles disponibles, pero, en cualquier caso, se ha tratado de utilizar alguna de las metodologías propuestas por esos autores, BONACCI (op. cit) fundamentalmente.

A tenor de lo comentado en el apartado 3.2.3.2, los sondeos realizados a mediados de los años ochenta (figuras 3.4a y 3.4b) cerca del manantial de Salubita (figura 3.3) atravesaron básicamente las calizas bioclásticas urgonianas que, en general, se presentan muy compactas con escaso desarrollo de procesos kársticos. El único sondeo de testigo continuo (Albiztur-IV) y el único también situado en la margen izquierda de la Regata Albiztur, muestra una importante presencia de intercalaciones terrígenas en el paquete calizo. Los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II permitieron el control del nivel piezométrico entre los años 1985 y 1986. En el sondeo Albiztur-III no se llevó a cabo control de nivel piezométrico alguno y Albiztur-IV ha permitido llevar a cabo medidas del nivel entre 1997 y 1999.

Aunque en los apartados 4.7.1 y 4.7.2 se realiza un análisis detallado de los datos de niveles piezométricos observados en los sondeos, la figura 4.33 muestra la posición de los cuatro sondeos con respecto al manantial de Salubita así como la descripción de las columnas estratigráficas, las fluctuaciones de los niveles piezométricos observados y los aportes de agua a lo largo de los sondeos. La figura pone de manifiesto la estrecha relación entre los máximos y mínimos de los niveles piezométricos con ciertas zonas de fracturación y/o karstificación. Además, se evidencia la presencia de fracturación y karstificación tanto por encima del nivel piezométrico como por debajo aunque la mayor parte de las zonas karstificadas que se encuentran por debajo se encuentran rellenas de arcilla.

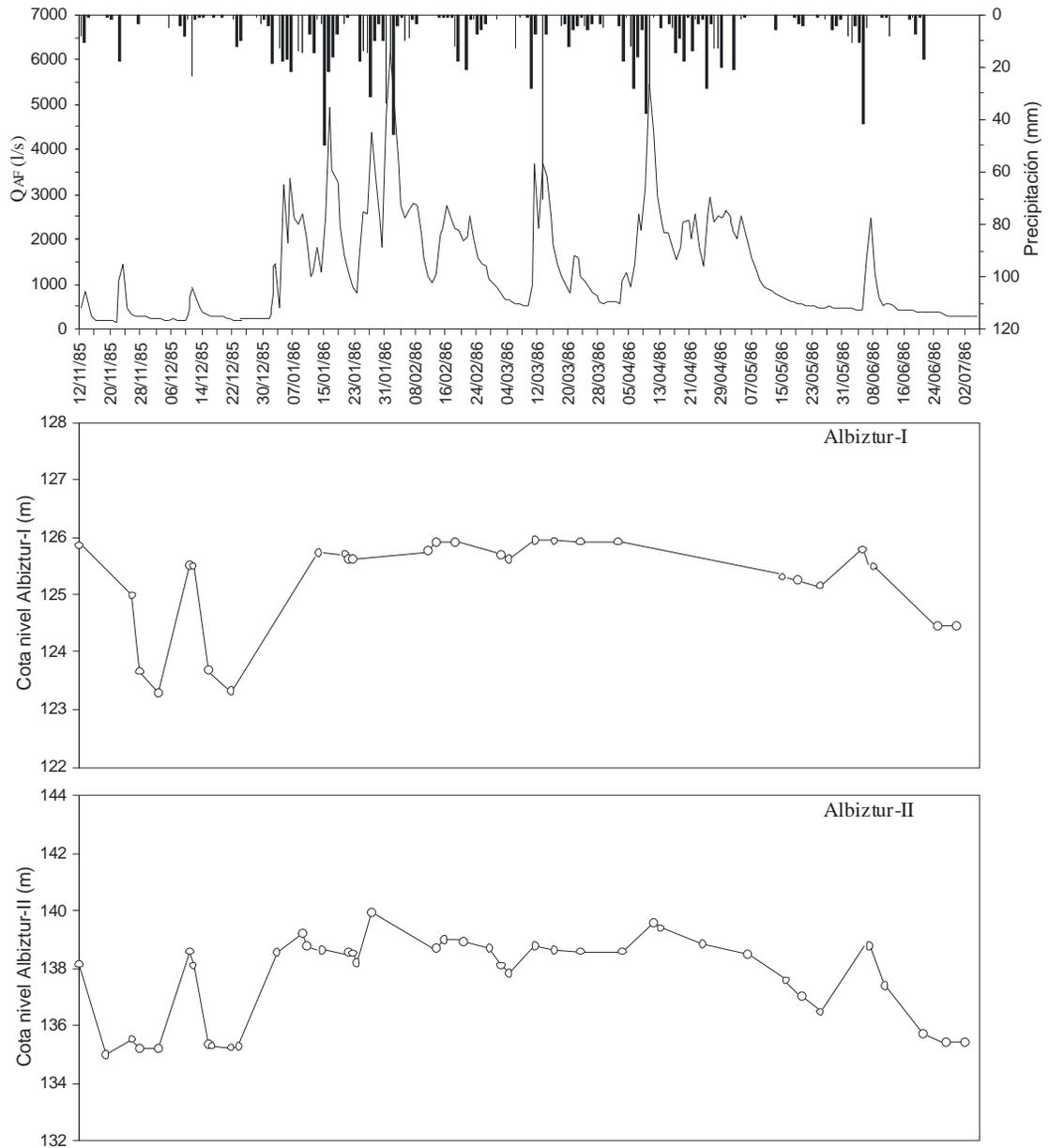
#### **4.7.1. PERÍODO 1985-86**

Entre Noviembre de 1985 y Julio de 1986 se tomaron un total de 28 medidas del nivel piezométrico en dos de los sondeos incluidos en la figura 4.33, y concretamente en los denominados Albiztur-I y Albiztur-II, cuya cota es de 170 m y 165 m respectivamente, según el Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E. y D.F.G.,1987). Aún quedaban por perforar los sondeos Albiztur-III (Marzo de 1987) y Albiztur-IV (Junio de 1988). La figura 4.34 muestra la evolución del nivel piezométrico en ambos sondeos y su relación con el caudal en la estación de aforos de la Regata Albiztur y con las precipitaciones registradas en la estación de Berastegi.

El nivel piezométrico evoluciona de forma prácticamente paralela en los dos pozos. Se observa, además, que una vez que el caudal supera los 1000 l/s el nivel piezométrico en el sondeo Albiztur-I se mantiene en torno a los 125.9 m de cota, y en el sondeo Albiztur-II cuando el caudal supera los 1400 l/s el nivel piezométrico permanece prácticamente constante a una cota de unos 139 m, aunque puntualmente llega hasta los 139.9 m (3371 l/s en la estación de aforos). En lo referente al nivel más bajo, en Albiztur-I el nivel se mantiene siempre por encima de los 123.3 m (46.7 m de profundidad) y en Albiztur-II por encima de los 134.9 m (30 m de profundidad), a pesar de que el caudal en la presa disminuya por debajo de los 200 l/s.

De todo esto se deduce que en aguas altas la diferencia de niveles en ambos pozos es de 13-14 m, aproximadamente, y que en estiaje es de 11-12 m. La fluctuación observada en los niveles de Albiztur-I es de 2.6 m, y en Albiztur-II de 5.0 m. Sabiendo que la distancia entre el sondeo Albiztur-I y la surgencia es de 305 m y tomando como referencia de cota del manantial 120 m, el gradiente hidráulico en aguas altas entre este punto y la surgencia es de 0.0193 y en aguas bajas 0.0108. Del mismo modo, puesto que la distancia entre el sondeo Albiztur-II y el manantial es de 460 m, el gradiente hidráulico en aguas altas entre el sondeo Albiztur-II y la surgencia es de 0.0432 y en aguas bajas 0.0323.

En la tabla 4.15 se han incluido los valores numéricos correspondientes a las variaciones de los niveles piezométricos. Estos datos pertenecen al Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987) y los datos referentes al sondeo Albiztur-I han sido incluidos íntegramente tal y como se encuentran en el citado estudio. En este estudio, sin embargo, existe un error en la tabla que contiene los datos correspondientes al sondeo Albiztur-II ya que son exactamente iguales a los correspondientes a Albiztur-I. Por este motivo los datos del sondeo Albiztur-II reflejados en la tabla 4.15 se han obtenido a partir de uno de los gráficos incluido en aquel estudio.



**Figura 4.34:** Evolución del nivel piezométrico en los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II en comparación con los caudales registrados en la estación de aforos y la precipitación registrada en la estación de Berastegi.

	PROF. NIVEL (m)		COTA NIVEL (m)		Q <sub>AF</sub> (l/s)
	Albiztur I	Albiztur II	Albiztur I	Albiztur II	
12/11/85	44.1	26.8	125.8	138.1	479.5
19/11/85		30		134.9	166.4
26/11/85	45	29.4	124.9	135.5	300
28/11/85	46.3	29.7	123.6	135.2	270
03/12/85	46.7	29.7	123.3	135.2	216.8
11/12/85	44.5	26.4	125.5	138.6	909
12/12/85	44.5	26.8	125.5	138.1	705
16/12/85	46.3	29.6	123.6	135.3	278.3
17/12/85		29.6		135.3	272.2
22/12/85	46.7	29.7	123.3	135.2	199
24/12/85		29.7		135.3	450.6
03/01/86		26.4		138.5	1.808
10/01/86		25.8		139.2	1.655
11/01/86		26.2		138.8	1.266
14/01/86	44.3		125.7		1285
15/01/86		26.3		138.6	2.622
21/01/86	44.3		125.7		1266
22/01/86	44.4	26.4	125.6	138.5	960
23/01/86	44.4	26.4	125.6	138.5	814
24/01/86		26.8		138.2	3743
28/01/86		25		139.9	2782
12/02/86	44.2		125.7		1038
14/02/86	44.1	26	125.9	138.7	2088
16/02/86		26		139	1392
19/02/86	44.1		125.9		2199
21/02/86		26		138.9	668.2
28/02/86		26.3		138.7	984.4
03/03/86	44.3	26.9	125.6	138.1	668
05/03/86	44.4	27.1	125.6	137.8	604
12/03/86	44	26.2	125.9	138.8	2246
17/03/86	44.1	26.3	125.9	138.6	1443
24/03/86	44.1	26.4	125.9	138.6	1068
03/04/86	44.1		125.9		1046
04/04/86		26.4		138.6	2128
12/04/86		25.4		139.6	2571
14/04/86		25.6		139.4	1388
25/04/86		26.1		138.8	1583
07/05/86		26.5		138.5	554.7
16/05/86	44.7		125.3		459
17/05/86		27.4		137.6	462.7
20/05/86	44.7		125.2		565
21/05/86		27.9		137	449.8
26/05/86	44.8	28.5	125.1	136.5	248.2
06/06/86	44.2		125.7		402.5
08/06/86		26.2		138.8	369.2
09/06/86	44.5		125.4		381.6
12/06/86		27.6		137.4	377.2
22/06/86		29.2		135.7	286.7
26/06/86	45.5		124.4		292.5
28/06/86		29.5		135.4	292
01/07/86	45.5		124.4		292
03/07/86		29.5		135.4	292

**Tabla 4.15: Datos de profundidad y cota de los niveles piezométricos en los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II y caudales en la estación de aforos.**

Parece lógica la evolución de los niveles registrada en los pozos. A medida que el nivel de la zona saturada asciende se pueden ir activando diferentes conductos, o zonas más transmisivas, relacionados con los puntos de descarga, de forma que el nivel piezométrico puede alcanzar la casi-estabilización a la cota de esas zonas más transmisivas, que pudieran estar en relación con el trop plein de Salubita. Notar que en este momento la cota del nivel en el sondeo Albiztur-I es de 125.9 m y en Albiztur-II es de 139 m, y el trop plein se encuentra a una cota de 123-124 m. Por otra parte, con los datos existentes y a la vista del descenso de niveles observados en la recesión de Mayo de 1986, más acusado en Albiztur-II, se puede deducir que en el sector en el que este pozo se ubica la transmisividad es mayor, o bien, el coeficiente de almacenamiento menor que en el sector del Albiztur-I.

#### **4.7.2. PERÍODO 1997-99**

Entre Marzo y Diciembre de 1999 se realiza un cierto control del nivel piezométrico en los sondeos Albiztur-II y, sobre todo, Albiztur-IV. Los sondeos Albiztur-I y Albiztur-III no han podido ser utilizados en este estudio debido a que se encuentran tapados por rellenos. De todas formas, en el sondeo Albiztur-III (cota 220 m), perforado en Marzo de 1987, inmediatamente después de la perforación se midió el nivel a 67 m de profundidad, lo que sitúa la cota piezométrica en 153 m. Sabiendo que la distancia entre este sondeo y el manantial es de unos 800 m, esto da un gradiente respecto al manantial de Salubita de 0.0412.

Las 25 medidas realizadas en Albiztur-II (tabla 4.16) pusieron de manifiesto que el nivel se mantenía prácticamente constante en torno a 18.3 m de profundidad a pesar de que los caudales en el manantial variaran. La tabla 4.16 muestra los valores obtenidos durante esta campaña, que nada tienen que ver con la evolución registrada durante el período 1985-86. La cota del nivel en este pozo se mantiene en todo momento a unos 7 m por encima de la cota máxima obtenida para ese nivel en el período 1985-86. Esta anomalía indica que las condiciones del sondeo no son las óptimas y que se encuentra en mal estado, por lo que estos datos de niveles no se han utilizado en este estudio.

Los niveles medidos en el sondeo Albiztur-IV (cota 165 m), situado a 250 m del manantial de Salubita (cota 120 m), por su parte, y los gradientes hidráulicos para cada momento se presentan en la tabla 4.17 y la evolución gráfica de los niveles aparece representada en la figura 4.35.

Según la tabla 4.17, la cota más alta alcanzada por el nivel piezométrico en el sondeo es de 129.64 m (35.36 m de profundidad) que corresponde precisamente al mayor caudal (1549 l/s) registrado en la estación de aforos. De la misma forma, la cota más baja registrada (123.61 m), correspondiente a una profundidad de 41.39 m, coincide con el caudal más bajo registrado en la

estación de aforos (109 l/s). La diferencia entre los niveles máximo y mínimo es de 6.03 y, según la tabla 4.17, el gradiente hidráulico oscila entre 0.039 (aguas altas) y 0.014 (aguas bajas). Esta fluctuación es mayor que la observada en los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II, siendo, además, evidente que en el Albiztur-IV no hay estabilización de nivel a ninguna cota.

	PROF. (m)	COTA (m)	Q <sub>AF</sub> (l/s)
11/03/97	18.20	146.80	248.5
18/03/97	19.25	145.75	192.3
25/03/97	18.27	146.73	443.3
01/04/97	18.27	146.73	198.3
11/04/97	18.50	146.50	156
16/04/97	18.77	146.23	156.8
23/04/97	18.92	146.08	157.4
29/04/97	18.26	146.74	498
06/05/97	18.29	146.71	196.3
08/05/97	18.28	146.72	955.1
11/05/97	18.28	146.72	465.3
14/05/97	18.28	146.72	650
15/05/97	18.28	146.72	612.7
16/05/97	18.28	146.72	501.4
17/05/97	18.28	146.72	466.9
03/06/97	18.28	146.72	737
12/06/97	18.28	146.72	445.6
17/06/97	18.28	146.72	352.1
24/06/97	18.31	146.69	225.4
01/07/97	18.28	146.72	189.9
07/07/97	18.28	146.72	355.1
15/07/97	18.28	146.72	246.3
04/08/97	18.28	146.72	253.4
15/12/97	18.28	146.72	713.9
23/02/98	18.28	146.72	1549.1

**Tabla 4.16: Medida de profundidad y cota del nivel piezométrico en el sondeo Albiztur-II y caudales en la estación de aforos.**

La figura 4.36 muestra gráficamente la evolución de la cota del nivel piezométrico en los tres sondeos considerados con respecto a las variaciones del caudal en la estación de aforos. La escala de los dos ejes es igual para los tres gráficos, lo que a simple vista da idea de las diferencias de cota de nivel existentes en cada sondeo con respecto a los otros dos. Para cualquier caudal en la estación de aforos la cota del nivel piezométrico del sondeo Albiztur-II se mantiene siempre por encima de los otros dos sondeos mientras que la cota más baja es siempre la del sondeo Albiztur-I. Para un caudal en la estación de aforos de 1000 l/s, por ejemplo, la cota del nivel en el sondeo Albiztur-I se encontraría a unos 125.7 m, en Albiztur-II a unos 138.5 m y en Albiztur-IV a unos 127.4 m.

Los gráficos de los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II evidencian una clara ruptura de pendiente, de manera que las fluctuaciones de nivel son mucho mayores para variaciones de caudal

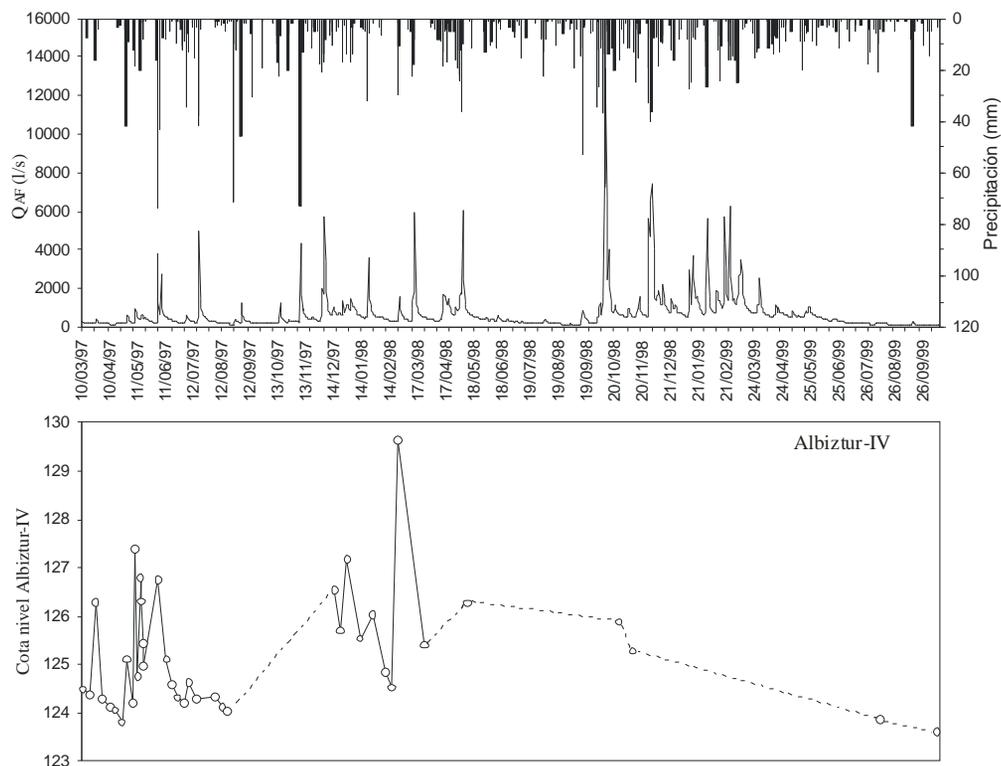
por debajo de  $Q_{AF}=300$  l/s en Albiztur-I, y por debajo de  $Q_{AF}=500-600$  l/s en Albiztur-II. Estos umbrales de  $Q_{AF}$  corresponden a un nivel de unos 125.5 m en Albiztur-I y de 138.5 m en Albiztur-II.

Como muestra la figura 4.36, en el sondeo Albiztur-IV no hay diferencia alguna en aguas bajas o aguas altas puesto que las variaciones de nivel se producen de forma lineal de acuerdo con el caudal en la estación de aforos.

	PROF. NIVEL (m)	COTA NIVEL (m)		
	ALBIZTUR-IV	ALBIZTUR-IV	Q <sub>AF</sub> (l/s)	i
11/03/97	40.52	124.48	248.5	0.018
18/03/97	40.62	124.38	192.3	0.018
25/03/97	38.71	126.29	443.3	0.025
01/04/97	40.72	124.28	198.3	0.017
11/04/97	40.88	124.12	156	0.016
16/04/97	40.95	124.05	156.8	0.016
23/04/97	41.20	123.80	157.4	0.015
29/04/97	39.89	125.11	498	0.020
06/05/97	40.80	124.20	196.3	0.017
08/05/97	37.61	127.39	955.1	0.030
11/05/97	40.25	124.75	465.3	0.019
14/05/97	38.21	126.79	650	0.027
15/05/97	38.7	126.30	612.7	0.025
16/05/97	39.56	125.44	501.4	0.022
17/05/97	40.04	124.96	466.9	0.020
03/06/97	38.25	126.75	737	0.027
12/06/97	39.89	125.11	445.6	0.020
17/06/97	40.42	124.58	352.1	0.018
24/06/97	40.69	124.31	225.4	0.017
01/07/97	40.8	124.20	189.9	0.017
07/07/97	40.36	124.64	355.1	0.019
15/07/97	40.71	124.29	246.3	0.017
04/08/97	40.68	124.32	253.4	0.017
13/08/97	40.89	124.11	176.9	0.016
19/08/97	40.97	124.03	158.9	0.016
15/12/97	38.46	126.54	713.9	0.026
22/12/97	39.30	125.70	572.7	0.023
29/12/97	37.83	127.17	981.9	0.029
12/01/98	39.46	125.54	550.9	0.022
26/01/98	38.98	126.02	668.2	0.024
09/02/98	40.16	124.84	386.5	0.019
16/02/98	40.48	124.52	337.3	0.018
23/02/98	35.36	129.64	1549.1	0.039
11/05/98	38.73	126.27	694.8	0.025
26/10/98	39.12	125.88	621.1	0.024
10/11/98	39.72	125.28	479.2	0.021
11/08/99	41.13	123.87	172.4	0.015
13/10/99	41.39	123.61	109.1	0.014
23/12/99	38	127	969.5	0.028

**Tabla 4.17: Datos de los niveles piezométricos medidos en el Sondeo Albiztur-I, gradiente hidráulico y caudales en la estación de aforos.**

La interpretación que BONACCI (1987, 1995) hace de la evolución de los niveles piezométricos es en comparación con la evolución de la descarga en el manantial principal del sistema kárstico, y con un paso horario, o cercano, de manera que interpreta episodios concretos de crecida-decrecida deduciendo una serie de parámetros de interés hidrogeológico. Lamentablemente, no es éste nuestro caso, ya que los datos disponibles de niveles son temporalmente dispersos y espacialmente muy limitados; a pesar de ello, se intenta aquí dar una explicación a lo observado en la figura 4.36 en el contexto que esa dispersión de datos permite.



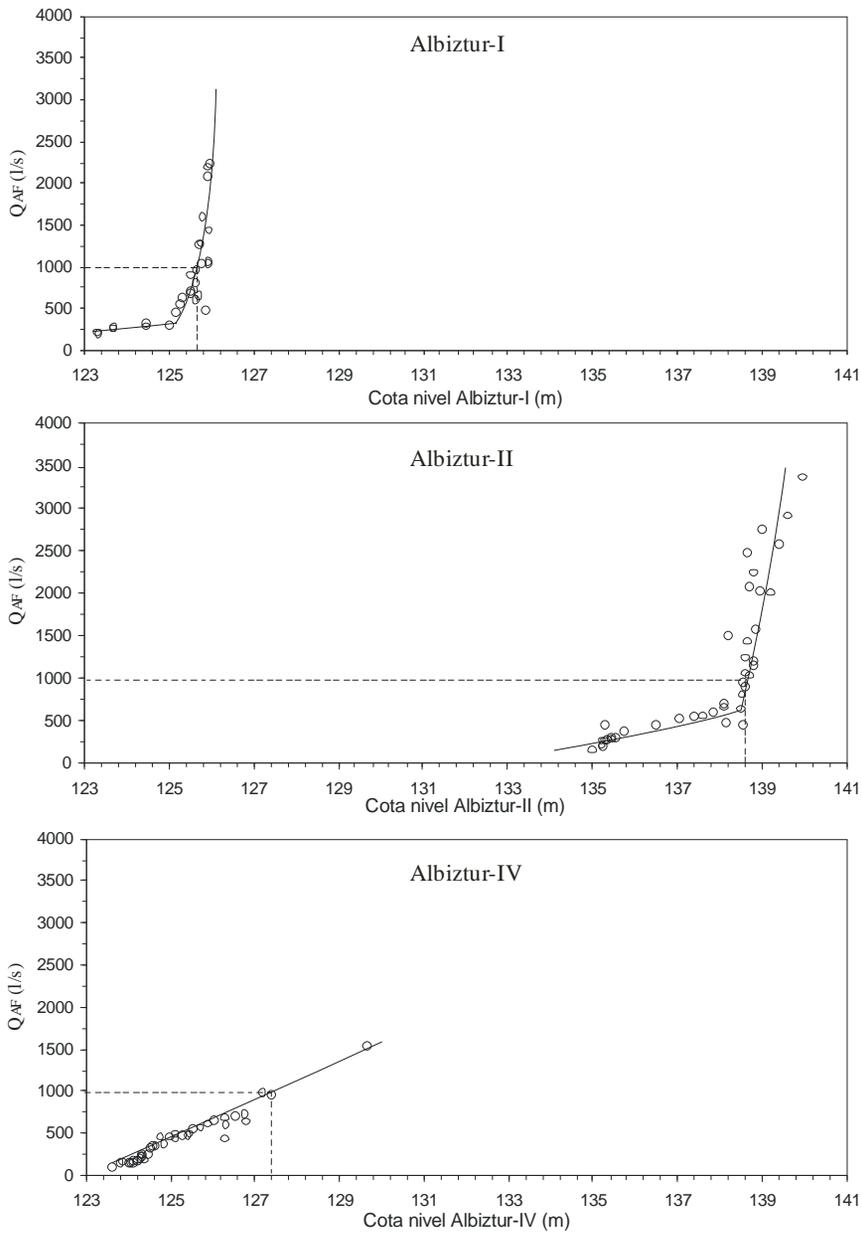
**Figura 4.35: Evolución del nivel piezométrico en el sondeo Albiztur-IV en comparación con los caudales registrados en la estación de aforos y las precipitaciones registradas en la estación de Erdoizta.**

La primera parte de las gráficas de Albiztur-I y Albiztur-II, es decir, por debajo de los umbrales de nivel antes citados (125.5 m para el primer sondeo; 138.5 m para el segundo), reflejan fuertes variaciones de nivel para caudales bajos. Además, de la figura 4.34 parece deducirse que esas fluctuaciones pueden ser rápidas en momentos de precipitaciones.

Estas observaciones pueden ser resultado de causas diferentes: flujo en carga en los sectores circundantes a los sondeos (de hecho, como se observa en las columnas de las figuras 3.4a, 3.4b y 4.33, los escasos aportes de agua a estos dos sondeos se dan a cotas inferiores a la cota del nivel estático luego observado); baja permeabilidad de los bloques perforados en su parte baja, al menos, en contraste con una mayor permeabilidad en su parte alta, hacia la superficie del terreno (esto posibilitaría la entrada rápida, vertical, de agua en momentos de precipitaciones, localmente concentrada, que ocasionaría un “*filling*” del sondeo, en palabras de MILANOVIC (1981), sin que la generalidad del acuífero hubiera sido todavía afectada lo suficiente como para originar un fuerte incremento de los caudales en el manantial).

A partir de los umbrales de nivel mencionados las gráficas de los dos sondeos reflejan (figura 4.36) una situación de casi permanencia de niveles piezométricos a pesar de las notables

variaciones de caudal registradas en el manantial. Esta permanencia de niveles se da, precisamente, coincidiendo con los máximos niveles observados (figura 4.34). Tanto MILANOVIC (1981) como BONACCI (1987, 1995) relacionan este hecho con la presencia, a la cota de estabilización del nivel, de zonas altamente transmisivas, bien por conductos, en sentido estricto, bien por fisuras suficientemente ensanchadas, que permitan un flujo rápido del agua, con superficie libre, y con pérdidas de carga insignificantes, hacia el punto de descarga del sistema.



**Figura 4.36: Evolución de la cota del nivel piezométrico en los sondeos Albiztur-I, Albiztur-II y Albiztur-IV respecto a las variaciones del caudal en la estación de aforos.**

A la vista de la figura 4.34, la posible zona altamente transmisiva en el sector del sondeo Albiztur-I (cota aproximada de 125.5 m) parece ser más eficaz en el mantenimiento del nivel que la correspondiente al Albiztur-II (138.5 m), ya que en este último caso se observan picos aislados por encima del nivel medio de estabilización, correspondientes a momentos de fuertes precipitaciones, lo que indica que en esos momentos la capacidad de desagüe de los caudales que alcanzan el sector del pozo no está debidamente asegurada. El mantenimiento de los niveles en ambos sondeos dura prácticamente todo el período húmedo, hasta primeros de Mayo, a pesar de las recesiones intermedias observadas. Una vez en la recesión final, por debajo ya de la zona transmisiva, el descenso de nivel es más rápido en Albiztur-II, lo que indicaría, comparativamente, mayor transmisividad o menor coeficiente de almacenamiento que en el sector Albiztur-I.

Teniendo en cuenta la información disponible de las columnas litológicas perforadas (figuras 3.4a, 3.4b y 4.33) no se aprecia presencia de conductos en las cotas asignadas a las zonas altamente transmisivas, sino, en todo caso, “calizas grises muy fracturadas y karstificadas con rellenos” en Albiztur-II y “calizas grises” en Albiztur-I. En consecuencia, la alta transmisividad debe de estar asociada a esa fracturación y karstificación.

En el caso de Albiztur-IV la relación del nivel con el caudal es claramente lineal, con fuertes variaciones de nivel en cualquier rango de caudales. Esto hace pensar en lo antes citado, para la primera parte de las gráficas de los otros dos sondeos, sobre un flujo en carga en ese sector, aunque aquí no parece haber ninguna zona altamente transmisiva localizada que sirva para la regulación temporal de los niveles. La rápida conexión entre este pozo y la surgencia de Saubita ha sido puesta de manifiesto en varios ensayos de trazadores (apartados 4.8.9 y 4.8.11).

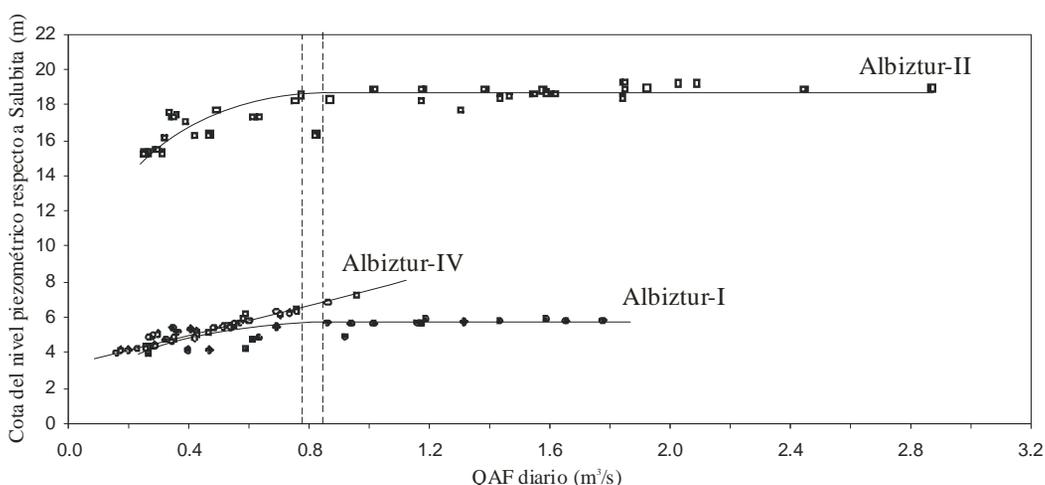
Siendo los datos de nivel disponibles temporalmente dispersos, se ha tratado de suavizar la serie de observaciones, para cada sondeo, mediante medias móviles de tres en tres datos, y considerando el caudal medio del día de las observaciones en lugar del caudal puntual del momento de la observación. Así, se pretende tener en cuenta el desfase de las respuestas entre sondeo y manantial (no son respuestas simultáneas), y eliminar la influencia que algunos valores puntuales de nivel puedan tener en la serie.

El resultado se observa en la figura 4.36 (cont.) en la que las cotas de nivel de Albiztur-I, II y IV, se han representado como diferencia respecto al nivel fijo del manantial de Salubita (120 m). Las envolventes de los puntos ganan ahora en claridad, manteniéndose la doble pendiente en Albiztur-I y II, y la pendiente única en Albiztur-IV. En las dos primeras, el paso del dominio de fuerte variación del nivel (caudales bajos) al dominio de permanencia del nivel se ve aquí que ocurre

en un umbral de caudal en la estación de aforos de unos 800 l/s. Este caudal, como se expuso en el apartado 4.3,

corresponde al límite a partir de cual ( $Q_{AF}>800$  l/s) la Regata Albiztur deja totalmente de alimentar el acuífero ( $Q_I=0$  l/s), mientras que con caudales inferiores ( $Q_{AF}<800$  l/s) la Regata Albiztur aporta agua al acuífero ( $Q_I>0$  l/s).

Tomando en consideración la situación de los sondeos Albiztur-I y II, muy próximos al cauce de la regata (figura 3.3), y con niveles por debajo del cauce (37-39 m por debajo en Albiztur-I; 22-27 m por debajo en Albiztur-II), cabe esperar que las pérdidas de caudal desde la regata puedan explicar, en parte al menos, las importantes variaciones de nivel (no tanto de caudal en la estación de aforos) observadas en ambos sondeos en el dominio de los bajos-medios caudales. Una alta permeabilidad en las cercanías del cauce favorecería la respuesta de los niveles, tal y como anteriormente se indicaba como posibilidad.



**Figura 4.36 (cont.):** Medias móviles de las cotas, respecto a la cota del manantial de Salubita, de los sondeos Albiztur-I, II y IV y su relación con el caudal en la estación de aforos.

#### 4.8. ENSAYOS CON TRAZADORES

Al inicio de este estudio existía ya cierta información obtenida a partir de ensayos con trazadores realizados en esta Unidad. El primero de ellos fue llevado a cabo en Diciembre de 1975 por miembros de la Sociedad de Ciencias Aranzadi mediante la inyección de fluoresceína en la cueva de Leizeaundia (apartado 3.4.1.2) y probándose la conexión de ésta con el manantial de Salubita (conocido en aquel entonces como Otzaraingorrena) a partir de fluocaptore. Años más tarde se realizan los dos primeros ensayos cuantitativos (Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental, E.V.E.-D.F.G. 1987) en Abril y Noviembre de 1986 en los cuales se inyecta cloruro de litio (LiCl) en el sumidero de Osinondo (depresión de Bidania) y se comprueba la conexión de este sumidero con el manantial de Salubita. En ambos casos las muestras se tomaron a intervalos de dos

horas con un tomamuestras automático propiedad de la Diputación Foral de Gipuzkoa y las determinaciones analíticas se llevaron a cabo mediante un Espectrofotómetro de Absorción Atómica en los laboratorios de Metralab en Sondika (Bizkaia) siendo el límite de detección de 0.005 mg/l.

A partir de 1997, en el seno ya del presente estudio, el Grupo de Hidrogeología de la U.P.V.-E.H.U. realiza un total de nueve ensayos (apartado 4.8.4 a 4.8.13) en los que utiliza como trazadores fluoresceína, cloruro de litio (LiCl), naftionato sódico, cloruro de estroncio ( $\text{SrCl}_2$ ) y bromuro potásico y sódico (KBr y NaBr) cuyas características se comentan en el apartado 4.8.1. La toma de muestras se llevó a cabo con tomamuestras automáticos (SIGMA-900), aunque en algún caso debido al elevado número de manantiales a controlar fue necesario tomar las muestras también a mano. El protocolo de muestreo se comenta detalladamente para cada caso.

Todas las muestras fueron analizadas en el Departamento de Química Analítica de la U.P.V.-E.H.U. La determinación del litio y estroncio se realizó mediante Espectroscopía de Absorción Atómica siendo el límite de detección del litio 0.002 mg/l y del estroncio 0.003 mg/l. En ambos casos el equipo de Absorción Atómica utilizado fue el modelo 560 de Perkin-Elmer. La detección de la fluoresceína y naftionato sódico se llevó a cabo mediante Detección Fluorimétrica con un espectrofluorímetro *Shimadzu* RF-540 conectado a un registrador *Shimadzu* DR-3 siendo el límite de detección de la fluoresceína de 0.03  $\mu\text{g/l}$  y del naftionato 0.01 mg/l. En el único caso en el que se utilizó bromuro su detección se realizó mediante Electroforesis Capilar siendo su límite de detección de 0.18 mg/l.

#### **4.8.1. PRINCIPALES CARACTERÍSTICAS DE LOS TRAZADORES UTILIZADOS**

Los aspectos que se comentan a continuación tanto sobre las características de los trazadores utilizados como de su toxicología han sido consultados en KÄSS (1992). No se hace mención aquí a los numerosos autores que este autor cita; las correspondientes referencias se recogen en ese libro.

##### **4.8.1.1. FLUORESCÉINA SÓDICA (URANINA)**

Aunque en la nomenclatura anglo-americana se conoce como “fluoresceína”, se trata de un compuesto que responde a la fórmula  $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5\text{Na}_2$  y cuya solubilidad en agua es superior a los 600 g/l (20°C). Es ampliamente utilizado en medicina, cosmética, productos de limpieza y baño e incluso en el agua de calefacción (25 g por metro cúbico de agua en Alemania). En la literatura aparece bajo diferentes nombres como Sicomet o Acid Yellow 73. Es el trazador más extensamente utilizado en hidrogeología. Aunque su detección en laboratorio se basa en la fluorescencia, se comercializa en forma de un polvo rojo oscuro no fluorescente constituido por diminutos cristales

alargados. La fluorescencia se produce al disolver la fluoresceína sódica en agua y disociarse los  
cationes de sodio

( $2\text{Na}^+$ ) de los aniones de uranina ( $\text{C}_{20}\text{H}_{10}\text{O}_5^{2-}$ ), momento en el que el agua se vuelve de un color amarillo-verdoso intenso. Son precisamente los aniones los que producen la fluorescencia. No se disuelve ni en benzol, ni en gasolina y es muy poco soluble en isopropanol, butanol y acetona. Su solubilidad en alcohol etílico es únicamente de 10 g/l a temperatura ambiente.

Debido a que se degrada con la luz, al tomar las muestras es conveniente protegerlas contra la luz del sol. En Alemania, por ejemplo, para el muestreo suelen utilizarse frecuentemente frascos de vidrio (120 ml) de color oscuro para aislar la muestra de la luz aunque, si al mismo tiempo se utilizan otros trazadores este tipo de recipiente puede no ser el más acertado (apartado 4.8.1.2). Siguiendo la metodología de muestreo del Grupo de Hidrogeología de la U.P.V.-E.H.U., las muestras se han tomado en frascos de polipropileno de 120 ml de capacidad que han sido almacenados y mantenidos a oscuras.

La existencia en el medio de agentes oxidantes potentes puede originar la degradación de la uranina. El ozono también es capaz de destruirla en su totalidad y su disolución en agua es fotodegradable. En lugares donde primordialmente se producen reacciones en medio ácido (zonas pantanosas por ejemplo) la uranina atrae la parte catiónica no fluorescente por lo que la fluorescencia no se produce y el ensayo puede fracasar. No interacciona con otros trazadores por lo que su utilización en ensayos multitrazado no presenta problemas de este tipo.

En lo que se refiere a su toxicidad, desde finales del siglo pasado se han realizado numerosas pruebas toxicológicas tanto en ratas, ratones y conejos como en truchas y carpas que ponen de manifiesto la inexistencia de peligro alguno que este compuesto representa para el medio, al menos en las concentraciones en las que se utiliza (máximo  $< 0.05$  mg/l). El  $\text{LD}_{50}$  (mg/kg) suministrado por vía oral se sitúa para ratones y ratas entre 4740 y 6721 mientras que suministrado por vía intravenosa oscila entre 300 y 1000. Para las truchas el  $\text{LC}_{50}$  (mg/l) es de 1372 para una exposición de 96 horas y para las carpas es superior a 752 para una exposición de 24 horas. En 1930 QUEDNAU sometió a diversos organismos (larvas de libélulas, pulgas y caracoles) a una concentración de fluoresceína sódica de 1.2 mg/l comprobando que no supone efecto nocivo alguno. No existe información sobre plantas.

Cabe señalar aquí que la FLUORESCÉINA *sensu stricto* responde a la fórmula  $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$  y su solubilidad en agua es muy baja (0.05 g/l a  $20^\circ\text{C}$ ) siendo su fluorescencia prácticamente imperceptible. Su solubilidad en alcohol y éter es muy buena y al mezclarla con álcalis su fluorescencia y su solubilidad en agua aumentan considerablemente. El 9 de Octubre de 1977 KNOP realiza la primera inyección de fluoresceína ( $\text{C}_{20}\text{H}_{12}\text{O}_5$ ) de la historia como trazador en el río Donau

(Alemania) obteniendo un resultado positivo. En el presente trabajo se ha utilizado la fluoresceína sódica (uranina).

#### **4.8.1.2. LITIO**

El cloruro de litio (LiCl) es la sal que ha sido utilizada en este estudio como portadora del litio. Se trata de la sal más extensamente utilizada en los ensayos con trazadores, en el País Vasco al menos, principalmente debido a su bajo coste en comparación con otras sales, a que su disolución es incolora y, en nuestro caso, a que en la zona de estudio las aguas de los manantiales poseen concentraciones de litio inferiores al límite de detección (0.002 mg/l).

El LiCl, polvo de color blanco, posee una solubilidad de 832 g/l (20°C) y su disolución en agua produce una reacción exotérmica que hace que la disolución llegue casi a ebullición. Por este motivo, es conveniente no utilizar recipientes de plástico para preparar la disolución puesto que las altas temperaturas podrían deformarlos. Estos hechos ponen de manifiesto la conveniencia de preparar la disolución en laboratorio, varios días antes de la inyección, y mantenerla en reposo. La primera inyección de LiCl la llevaron a cabo VORTMANN y TIMEUS en St.Kanzian (Eslovenia) en 1907.

La mayor parte de los recipientes de vidrio contienen litio en diversas proporciones, más cuanto más oscuro es el recipiente, por lo que si la medida de la muestra no se realiza en una semana, la concentración se puede disparar. Debido a que el litio suele utilizarse frecuentemente en ensayos multitrazado junto con la fluoresceína sódica, es necesario considerar esta posible afección si se utilizan recipientes de vidrio oscuros para la toma de muestras.

Desde el punto de vista toxicológico, la dosis letal (LD<sub>50</sub>) para las ratas, por vía oral, es de 526 mg/kg de LiCl. La toma de 20 mg/kg de litio cada día produciría la muerte a un perro en 14-20 semanas. Para los peces, una concentración de LiCl de 2-3.5 g/l es letal. Durante el desarrollo de este estudio se ha comprobado que altas concentraciones de LiCl (500000 mg/l aproximadamente, disolución) al contacto con la piel producen enrojecimiento y escozor por lo que para la preparación de la disolución es recomendable proteger la piel mediante guantes y mascarilla. Paradójicamente, el carbonato de litio se utiliza con éxito en medicina contra perturbaciones maniaco-depresivas en tratamientos de larga duración, mediante la administración de dosis diarias de 0.5 g.

#### **4.8.1.3. ESTRONCIO**

Aunque comúnmente es el cloruro de estroncio (SrCl<sub>2</sub>) la sal que se utiliza como portadora del estroncio en los ensayos con trazadores, existe una variedad hidratada (SrCl<sub>2</sub>·6H<sub>2</sub>O) de esta sal que también se comercializa. Por eso al utilizar el estroncio como trazador es necesario conocer con exactitud la fórmula química de la sal que se utiliza, sobre todo para poder calcular de forma fiable la tasa de restitución del trazador. La disolución en agua de esta sal blanca provoca una reacción

endotérmica que hace disminuir su temperatura hasta casi los 0°C. Del mismo modo que en el caso del LiCl, conviene preparar la disolución en laboratorio y mantenerla en reposo durante algunos días hasta el momento de la inyección. El primer ensayo de trazado con SrCl<sub>2</sub> lo realizó TIMEUS el 20 de Mayo de 1910 al Sur de Gröz (Alemania).

Las aguas que manan a través del manantial de Salubita (calizas y calcarenitas urgonianas) poseen una concentración de fondo en estroncio de 0.13-0.18 mg/l mientras que la concentración en el manantial de Igaran (calizas jurásicas) es de 0.09-0.34 mg/l. Estas concentraciones de fondo relativamente altas observadas también en otros manantiales kársticos del País Vasco podrían producir cierta confusión a la hora de interpretar los datos de concentraciones obtenidos tras un ensayo con estroncio, ya que el límite de detección de éste es de 0.003 mg/l.

Toxicológicamente, los iones de estroncio resultan letales para las truchas en concentraciones de 10000 mg/l sometidas a una exposición de 24 horas.

#### **4.8.1.4. BROMURO**

En este estudio se han empleado bromuro sódico (NaBr) y bromuro potásico (KBr) conjuntamente aunque normalmente se suelen utilizar por separado. El primero posee una solubilidad de 850 g/l (10°C) que hace que sea el bromuro más utilizado prácticamente a la par que el KBr. El bromuro (Br<sup>-</sup>) es estable ante la actividad microbiológica y no suele quedar adsorbido en el terreno.

#### **4.8.1.5. NAFTIONATO SÓDICO**

El Naftionato sódico es un polvo rosa-grisáceo que responde a la fórmula C<sub>10</sub>H<sub>8</sub>O<sub>3</sub>NSNa y cuyos nombres químicos son 4-Aminonaftalina-1-sulfonácido y Sal Sódica aunque suele nombrarse también como Naftioácido sódico y 1-Naftilamina-4-sulfoácido sódico. Posee una solubilidad de 240 g/l y su intensidad fluorescente llega únicamente a un 1/14 de la de la uranina. Debido a que sus límites de detección son superiores a los de la uranina, durante ensayos con trazado es conveniente introducir una cantidad veinte veces superior a la de ésta. Para pHs comprendidos entre 4 y 9 su intensidad de fluorescencia es prácticamente constante aunque al disminuir el pH la intensidad disminuye rápidamente y al aumentar el pH su intensidad aumenta lentamente.

La principal ventaja de esta sustancia para ensayos con trazadores es su invisibilidad en las concentraciones en las que se utiliza para estos fines. Este trazador es apropiado para ser utilizado junto a fluoresceína sódica, eosina y/o rodamina ya que puede ser analizado sin que exista ningún

tipo de interacción con los otros tres componentes. Los medios orgánicos sí pueden producir perturbaciones en su concentración. En la industria química el Naftionato sódico representa un

producto intermedio a partir de la síntesis de otros colorantes. Concentraciones inferiores a 1000 mg/l no son detectables organolépticamente.

#### **4.8.2. DICIEMBRE DE 1975**

La Sociedad de Ciencias Aranzadi, según el Informe del Manantial de Otzaraingorrena (Sección de Espeleología de la Sociedad de Ciencias Aranzadi, Julio de 1981, nº de archivador 26, nº de orden 671), llevó a cabo una coloración en este Sistema Kárstico de Salubita el 13 de Diciembre de 1975, por medio de la inyección de fluoresceína en la cueva de Leizeaundia (apartado 3.4.1.2) situada a 2 kilómetros al Sureste del municipio de Bidegoian (figura 4.51) y a una cota de 540 m. El objetivo era saber a donde se dirigían las aguas que penetraban al interior de esta cueva.

Los miembros de la Sociedad llegaron a la conclusión de que la sustancia inyectada salió a través del manantial de Otzaraingorrena, también conocido como Azketa, cuyas coordenadas, según el Catálogo Espeleológico de Gipuzkoa son X: 572347 Y: 4774090 Z: 100, punto situado sobre los materiales detríticos del Albiense Superior que afloran al Sur de las calcarenitas urgonianas, donde no existe manantial alguno. Desgraciadamente no existen datos cuantitativos de esta coloración.

Posteriormente ha quedado demostrado (trazado de Noviembre de 1998) que la cueva de Leizeaundia está en conexión con el manantial de Salubita (X: 572581 Y: 4775185 Z: 120) y que una pequeña parte del agua aparece al Sur, en Legorreta (apartado 4.8.7).

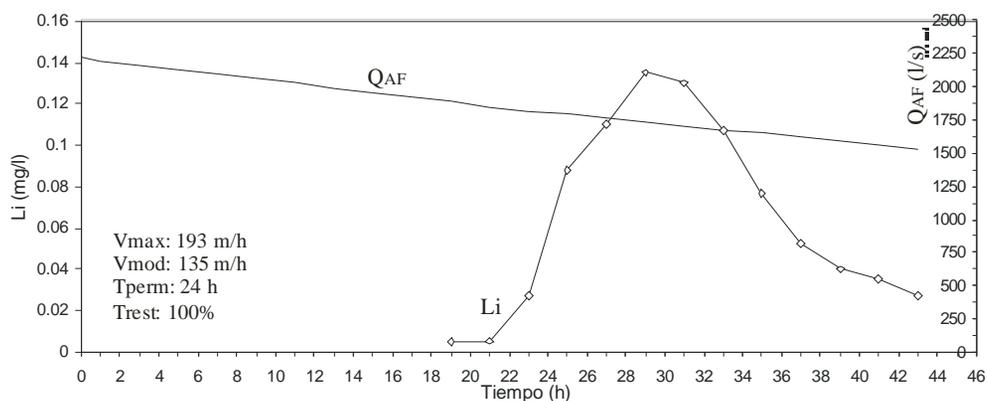
Queda claro que las coordenadas reflejadas en el Catálogo Espeleológico de Gipuzkoa referentes al manantial de Otzaraingorrena son erróneas. Por otra parte, cabe la posibilidad de que los tres nombres (Otzaraingorrena, Azketa y Salubita), correspondan al mismo manantial.

#### **4.8.3. ABRIL DE 1986**

El primer ensayo cuantitativo realizado en el Sistema Kárstico de Salubita fue llevado a cabo entre los días 15 y 17 (Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental, E.V.E.-D.F.G. 1987) coincidiendo con un período de aguas altas, sin que se produjeran lluvias de importancia a lo largo del ensayo. Se utilizaron 50 kg de cloruro de litio (LiCl), preparados en una disolución que se vertió de forma puntual a las 13:00 del 15 de Abril de 1986, al sumidero más importante de la depresión de Bidania (cota 471), situado junto al caserío Osinondo. En el momento de la inyección el caudal del arroyo infiltrado en el sumidero era de unos 300 l/s mientras que el caudal que pasaba por la presa (cota aproximada 120 m) era de 1900 l/s (unos 1625 l/s en Salubita). La distancia en línea recta entre el sumidero y el manantial es de 4050 m con una diferencia de cotas de 351 m. Se tomaron

muestras

a intervalos de dos horas mediante un tomamuestras automático cedido por la Diputación Foral de Gipuzkoa.



**Figura 4.37: Evolución de la concentración de litio y de los caudales medios diarios en la presa a lo largo del ensayo realizado en Abril de 1986. Vmax: velocidad máxima; Vmod: velocidad modal; Tperm.: tiempo de permanencia del trazador en la surgencia; Trest.: tasa de restitución. El origen del eje de tiempo corresponde al momento de la inyección. Esta nomenclatura se mantiene para el resto de las figuras.**

Como se puede apreciar en la figura 4.37 el litio comenzó a detectarse a las 21 horas de haber realizado la inyección y la máxima concentración (0.135 mg/l) se alcanzó 9 horas más tarde. En ese momento el caudal del sumidero era de unos 200 l/s y el de la presa de unos 1600 l/s (unos 1396 l/s en Salubita). Aunque el tiempo de permanencia del trazador en este ensayo se consideró de 30 horas en aquel Estudio (1987), debido a que no se detectó el fin del paso de la nube de trazador nosotros consideramos, según la figura 4.37, que su tiempo de permanencia en la surgencia pudo ser algo menor, del orden de 24 horas.

Teniendo en cuenta las concentraciones de litio y los caudales expulsados durante el ensayo, dedujeron que prácticamente la totalidad del litio inyectado (8.14 kg) salió por la surgencia sin haberse producido retención, apreciable al menos, en el seno del acuífero.

Los cálculos realizados con los datos obtenidos en este ensayo, muestran altas velocidades de flujo (193 m/h de velocidad máxima y 135 m/h de velocidad modal), que indican un régimen de circulación turbulento. El acentuado pico que se observa en la figura, indica que esta circulación se produce a través de un dren o conducto principal que une directamente el sumidero con la surgencia.

No obstante, el período de muestreo en este ensayo fue relativamente corto, tomándose muestras del manantial únicamente durante unas 30 horas, lo que impidió ver la forma de la cola de

la curva de concentración. Aunque la mayor cantidad de masa del trazador inyectado salió durante ese espacio de tiempo, posteriormente podría haber salido algún otro pico de menor importancia indicativo de la existencia de flujos más lentos, como correspondería a un sistema kárstico jerarquizado. En cualquier caso, hubiera sido conveniente que, una vez registrado el punto máximo de concentración, se hubiera seguido tomando muestras hasta que la cola de la concentración hubiera sido registrada en su totalidad. El tiempo de permanencia (24 h) no es exacto debido a la falta de muestras en el último tramo.

Este ensayo evidencia alta velocidad de flujo en la conexión Osinondo-Salubita, en unas condiciones de aguas altas, pero no modificado durante el ensayo, como lo evidencia la continua decrecida del hidrograma. El tránsito entre la entrada y la salida es de 21 horas para las partículas más rápidas. La forma de la nube de paso, con prácticamente recuperación total del trazador, evidencia un flujo rápido por conducto con escasa dispersión longitudinal.

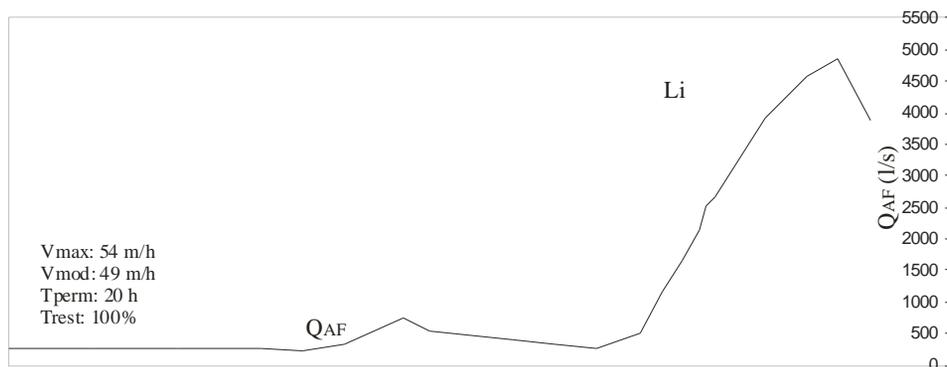
#### **4.8.4. NOVIEMBRE DE 1986**

Este ensayo se realizó en el mismo sumidero que el anterior entre los días 20 y 24 de Noviembre (Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental, E.V.E.-D.F.G. 1987), coincidiendo con un período de estiaje, si bien las condiciones meteorológicas se modificaron notablemente al poco de realizada la inyección. También en este caso se tomaron muestras a intervalos de dos horas mediante un tomamuestras automático cedido por la Diputación Foral de Gipuzkoa. La figura 4.38 muestra la evolución de la concentración del litio y del caudal en la presa a lo largo del ensayo.

Al igual que en el caso anterior, se utilizaron 50 kg de LiCl, que se inyectó en el sumidero a las 11:30 del día 20 de Noviembre de 1986. En ese momento el caudal del arroyo infiltrado en el sumidero era de unos 6 l/s y en la presa de 240 l/s (200 l/s en Salubita). Este último se mantuvo prácticamente constante durante las 40 horas siguientes, al cabo de las cuales se produjeron lluvias (18 mm registrados en la estación de Berastegi el día 21) que provocaron un aumento del caudal de hasta 700 l/s en la presa (644 l/s en Salubita) 45 horas más tarde del inicio del ensayo. Posteriormente, el caudal volvió a descender progresivamente hasta los 370 l/s en la presa (326 l/s en Salubita). A partir de este momento se produjeron nuevas e intensas lluvias (47 mm y 61 mm registrados en la estación de Berastegi los días 23 y 24) y el caudal se incrementó progresivamente hasta alcanzar los 4700 l/s en la presa (3153 l/s en Salubita) a las 98 horas.

La concentración de litio comenzó a aumentar claramente a las 75 horas de la inyección, coincidiendo con el acusado incremento de caudal. La concentración máxima (0.12 mg/l) se alcanzó a las 83 horas de la inyección, 8 horas después de la primera manifestación del litio. Aunque en el

Estudio (E.V.E.-D.F.G., 1987) se afirma que también en este caso se restituyó la totalidad del litio inyectado, durante el período muestreado se recuperó un 56%. Así, la figura muestra que se dejó de muestrear demasiado pronto de manera que gran parte del final de la curva de concentración no fue caracterizado y quedaba aún por salir una parte importante del trazador.



**Figura 4.38:** Evolución de la concentración de litio y de los caudales medios diarios en la presa durante el mes de noviembre de 1986. El origen del tiempo coincide con el instante de la inyección.

A tenor de la curva observable en la figura 4.38, las fuertes lluvias registradas aceleraron la velocidad de circulación del trazador que, de haberse mantenido las condiciones iniciales, hubiese tardado un tiempo mayor en manifestarse. Así pues, las velocidades calculadas en este ensayo no son propias de una situación de estiaje normal, sino más altas, correspondientes a una situación de mayor complejidad hidrológica. En cualquier caso, los datos cuantitativos obtenidos de este ensayo según el Estudio citado son los reflejados en la figura 4.38, es decir, una velocidad máxima de 54 m/h, una velocidad modal de 49 m/h y un tiempo de permanencia del trazador en la surgencia de 20 horas.

Para este ensayo dedujeron también que prácticamente la totalidad del litio inyectado salió por la surgencia. Sin embargo, según nuestros cálculos basados en la figura 4.38, la tasa de restitución para el intervalo de muestreo fue del orden del 56%, aunque es lógico pensar, a la vista de los ensayos con trazadores realizados por el Grupo de Hidrogeología de la U.P.V./E.H.U. entre los años 1997 y 2000, que el resto del trazador no tardaría en salir.

La baja tasa de recuperación, debida al corto intervalo de tiempo en el que se muestreó (unas 10 horas) pone en entredicho la fiabilidad de las conclusiones que se puedan sacar de este ensayo. Además, el primer punto de la gráfica reflejado en la figura, representa una concentración de 0.04 mg/l de litio y si tenemos en cuenta que la concentración natural de litio de las aguas del manantial

de Salubita según este trabajo de investigación son inferiores a 0.01 mg/l, podemos deducir que la primera manifestación de litio se ha producido antes que las 75 horas citadas, la cual no ha sido

registrada ya que no se han tomado muestras durante ese intervalo de tiempo. Así, tanto el tiempo de permanencia como las velocidades calculadas habrían sido algo mayores.

Este ensayo es bastante menos fiable que el primero, por las razones expuestas. El primer pico de caudal observado ( $Q_p \approx 700$  l/s) no aporta trazador, lo que implica que corresponde a flujos rápidos infiltrados relativamente cerca de la surgencia, incluida la propia infiltración de la regata, y que no empujan el agua trazada, la cual sale más tarde, coincidiendo con la llegada de los flujos de infiltración rápida procedentes de la depresión de Bidania o de sus proximidades.

Evidentemente, aunque los dos trazados llevados a cabo en 1986 facilitan información acerca de la conexión Osinondo-Salubita no son completos, en la medida que los muestreos no fueron lo suficientemente exhaustivos, sobre todo el segundo dadas las condiciones hidrológicas, dando lugar a dudas en la interpretación de los resultados.

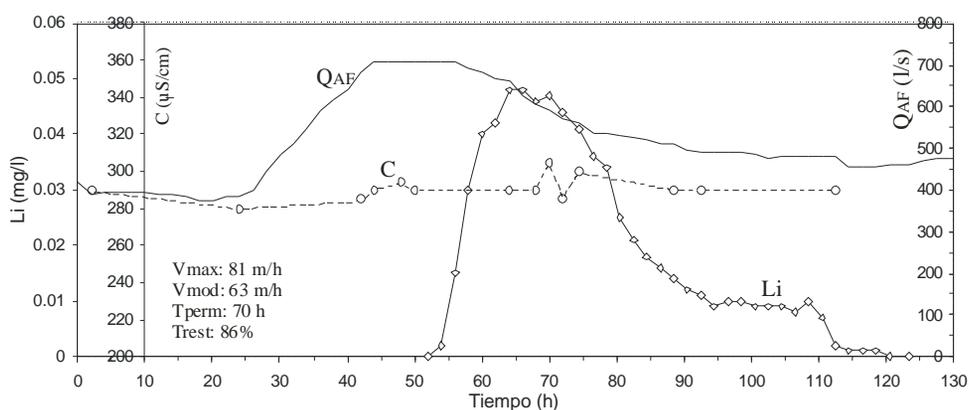
#### **4.8.5. MAYO DE 1997**

Este fue el primer ensayo realizado por el Grupo de Hidrogeología de la U.P.V.-E.H.U. en el marco de este trabajo de investigación. Para poder llevarlo a cabo con suficientes garantías de éxito, se contó con los datos de los dos ensayos anteriores, que sirvieron como punto de partida para planificar los ensayos que se realizaron posteriormente. Durante este primer ensayo del Grupo se tomaron también datos de pH, temperatura y conductividad in situ, en los puntos de control, por la información de interés que pudieran aportar en torno a las características del sistema. Los tres grupos de datos se mantuvieron prácticamente constantes a lo largo del ensayo a pesar del ligero aumento de caudal registrado a partir de las 24 horas desde la inyección. En cualquier caso, los datos de conductividad, junto con los de concentración del trazador y los de caudales, se reflejan en la figura 4.39.

El trazador utilizado una vez más fue litio, para lo cual se preparó cuidadosamente una disolución de LiCl en el laboratorio. 25 kg de LiCl fueron mezclados en 50 l de agua. Una vez preparada la salmuera, se dejó reposar durante dos días y se introdujo en bidones de 20 l para poder transportarlos más fácilmente. A las 16:40 del 12 de Mayo de 1997 se vertió la disolución de LiCl en el mismo sumidero en el que se realizaron los dos ensayos de 1986. La toma de muestras se realizó automáticamente en el período comprendido entre el 12 y el 18 de Mayo de 1997 en el manantial de Salubita, a intervalos de dos horas. Se tomaron también datos y muestras a mano en los manantiales próximos (Etxeberri, Otzarain e Igaran; figura 4.51) por si parte del trazador pudiera liberarse por alguno de ellos.

La disolución fue inyectada de forma puntual en un momento de aguas medias. En ese instante el caudal del arroyo infiltrado en el sumidero era de unos 50 l/s mientras que el caudal en la presa era de unos 366 l/s (322 l/s en el manantial de Salubita). El 13 de Mayo se produjeron precipitaciones (16 mm) que modificaron ligeramente las condiciones del medio. Transcurridas 50 horas desde la inyección se empezó a detectar litio (Vmax: 81 m/h), momento en el cual el caudal de la regata en la presa era de unos 650 l/s (588 l/s en Salubita) y el del sumidero próximo a 90 l/s. La concentración máxima (0.048 mg/l) se obtuvo 14 horas más tarde (Vmod: 63 m/h), es decir, a las 64 horas de la inyección. Se restituyó el 86% del trazador inyectado.

En la figura 4.39 se presenta la evolución gráfica de la concentración de litio y del caudal en la presa junto con los valores de los parámetros hidráulicos representativos del trazado.



**Figura 4.39: Evolución de la concentración del litio, de la conductividad eléctrica y de los caudales en la presa (Mayo de 1997).**

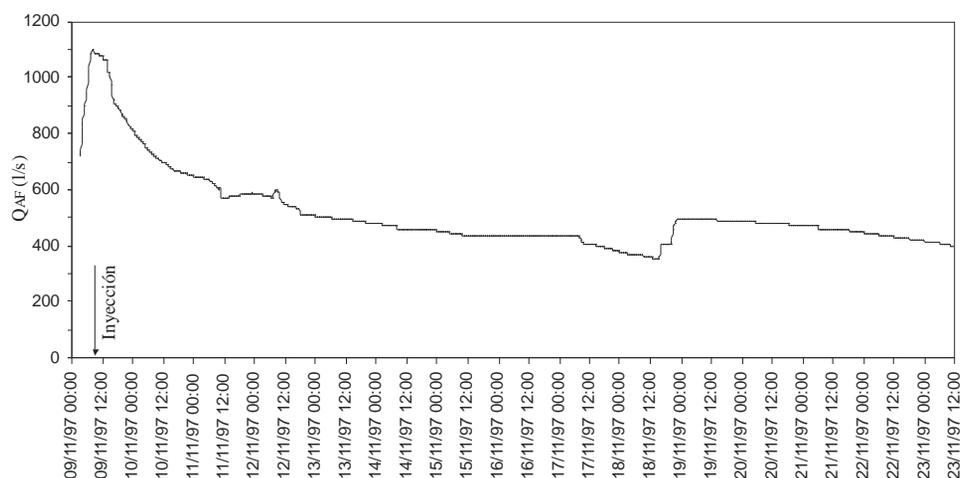
En la figura se observa una dispersión longitudinal más evidente que en los ensayos anteriores, con una cola de trazador que se prolonga durante bastantes horas lo que se traduce en un tiempo de permanencia de 70 horas. Esta mayor dispersión es consecuencia de los bajos caudales, y gradientes, puestos en juego en esos momentos, a pesar de la crecida registrada. Las lluvias caídas, poco intensas, provocan el empuje del trazador en el conducto, si bien la salida de éste es posterior al pico de crecida (10-12 horas), lo que se justifica por la llegada a la surgencia de aguas previamente existentes en los conductos (apenas varía la conductividad eléctrica) antes de la propia llegada del trazador, que a su vez es empujado “desde arriba” a la vista de la rapidez de su crecida.

#### 4.8.6. NOVIEMBRE DE 1997

El día 9 a las 11:00 se inyecta una salmuera de LiCl (21 kg) en el sumidero conocido como Beondegi a unos 450 m de cota, situado a menos de un kilómetro al Noroeste de Leizeaundia (figura

4.51) y a 4500 m de distancia al manantial de Salubita, en la depresión de Santutxo. Este sumidero se activa esporádicamente, funcionando como tal únicamente en períodos de aguas altas.

Tras las copiosas lluvias (70 mm) del día 6 de Noviembre se activó nuevamente, momento que se aprovechó para realizar el ensayo. En el instante de la inyección el caudal que entraba por el sumidero era inferior a 1 l/s mientras que el que pasaba por la presa era de unos 1000 l/s (unos 900 l/s en Salubita). 24 horas más tarde el sumidero había dejado ya de ser activo y en la presa el caudal había descendido hasta los 800 l/s (unos 724 l/s en Salubita).



**Figura 4.40: Hidrograma registrado en la estación de aforos (presa) entre el 09/11/97 a las 00:00 y el 23/11/97 a las 12:00.**

A pesar de que se tomaron muestras en Salubita cada dos horas mediante un tomamuestras automático y manualmente en otros dos manantiales (Otzarain y Etxeberri; figura 4.51) durante dos semanas, el trazador no fue recuperado en ninguno de ellos. No obstante se muestra el hidrograma registrado en la presa (figura 4.40) para plasmar la situación hidrológica en el momento del ensayo.

Teniendo en cuenta los datos obtenidos del ensayo realizado en Mayo de 1997, y sin olvidar las diferencias entre ambos, se realizó un somero cálculo para estimar la concentración máxima que se obtendría en el caso de que el litio hubiera llegado al manantial. Se obtuvo un valor de 0.012 mg/l, que aunque muy bajo hubiera podido ser detectado, teniendo en cuenta la frecuencia del muestreo y el límite de detección de la técnica utilizada en el laboratorio. Debido a que el sumidero dejó de ser activo 24 horas después del comienzo del ensayo y puesto que en el momento de la inyección el caudal era muy bajo (1 l/s), parece lógico pensar que esa corriente no fue suficiente como para empujar el trazador hasta un dren en conexión directa y rápida con el manantial o, también, que el sector de la inyección, en cualquier caso, está mal relacionado con la red transmisiva rápida del acuífero.

#### **4.8.7. NOVIEMBRE DE 1998**

En este ensayo multitrazado se inyectaron LiCl, KBr y NaBr, SrCl<sub>2</sub> y fluoresceína. La disolución de LiCl (25 kg) y la de bromuro (25 kg NaBr + 25 kg KBr) se inyectaron en el sumidero situado junto al caserío Osinondo (Bidegoian), a las 13:20 del 27 de Noviembre, momento en el que el caudal de entrada era superior a los 300 l/s. Posteriormente se inyectó el SrCl<sub>2</sub> a las 14:00 en un sumidero localizado en la depresión de Santutxo, a unos 600 m del sumidero de Beondegi, momento en el que el caudal de infiltración era superior a los 5 l/s. Por último, la fluoresceína (2 kg) fue inyectada a las 14:20 del mismo día en la cueva conocida como Leizeaundia (cota 540), a 4000 m del manantial de Salubita, donde se infiltraba un caudal aproximado de unos 5 l/s.

En el momento de la inyección en Osinondo (13:20) el caudal en la presa era de unos 3410 l/s (2585 l/s en el manantial) que en aproximadamente 11 horas alcanzó los 10309 l/s en la presa disminuyendo otra vez hasta los 2964 l/s (a las 00:00 del día 29) y volviendo a aumentar hasta los 10960 l/s (a las 21:00 del día 29). Esta evolución ascendente y descendente del hidrograma (figura 4.41) se debe a las abundantes precipitaciones caídas entre los días 25, 26, 27, 28 y 29 de Noviembre que fueron de 29 mm, 22 mm, 34 mm, 7 mm y 41 mm respectivamente.

La toma de muestras se realizó en el período comprendido entre el 28 de Noviembre a las 12:00 y el 9 de Diciembre a las 11:15 con tomamuestras automáticos, a intervalos de dos horas en el manantial de Salubita y en Legorreta y Errotalde, al Sur de la Unidad, próximos a la Falla de Azkoitia. Se tomaron, también, muestras manuales en Etxeberri, Otzarain (pequeña fuente a unos 300 m al Este del manantial de Etxeberri) y Madariaga (figura 4.51, para ubicación).

El bromuro, el litio y el estroncio no fueron detectados ni en Salubita ni en ningún otro manantial de los que estuvieron bajo control durante la realización de este ensayo. En vista de las cantidades utilizadas (36 kg de Br<sup>-</sup>, 4 kg de Li y 20 kg de Sr<sup>2+</sup>) y en comparación con las diluciones registradas en los picos de concentración máxima de litio en los ensayos anteriores, los picos de concentración de los tres trazadores hubieran tenido que ser detectados a su paso por el manantial, si hubieran salido dentro del período de muestreo.

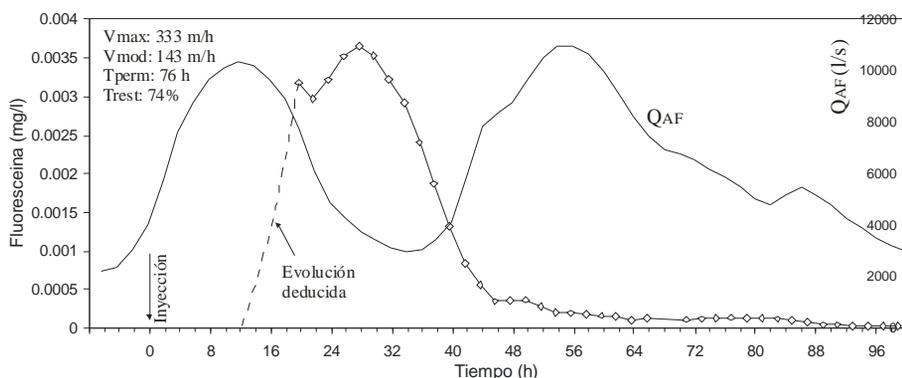
Sin embargo, la primera muestra se tomó en el manantial de Salubita a las 12:00 del día 28, es decir, a las 21.3 horas de la inyección del bromuro y del litio en Osinondo y a las 22 horas de haber inyectado el estroncio en Santutxo. En el ensayo de Abril de 1986 (figura 4.37) el pico de trazador sale por el manantial de Salubita a las 30 horas de la inyección en Osinondo cuando el caudal en la presa es próximo a 1600 l/s. Por otra parte, según el quimiograma de la figura 4.14, el

pico de los nitratos que provienen de la depresión de Bidania (Osinondo) se produce en Salubita a las 20-22 horas (7780 l/s en la presa) del inicio del aumento de caudal.

Teniendo en cuenta que los caudales durante este ensayo sobrepasaron puntualmente los 10000 l/s en la presa, parece claro que los trazadores inyectados en el sumidero de Osinondo (litio y bromuro) salieron por el manantial antes de las 12:00 del día 28, es decir, antes de que se empezara a muestrear en Salubita. Esto proporcionaría velocidades modales superiores a los 184 m/h, lo que no es en ningún modo descabellado. Para el trazador inyectado en Santutxo (estroncio) la explicación puede ser la misma que la dada para el ensayo de Noviembre de 1997 efectuado en un sumidero muy próximo (apartado 4.8.6).

Una vez analizadas las muestras en el laboratorio, se observó que la primera muestra tomada por el tomamuestras automático instalado en el manantial de Salubita presentaba ya altas concentraciones (0.003186 mg/l) de fluoresceína tras 21.6 horas desde la inyección en Leizeaundia (figura 4.41). El momento de llegada de la fluoresceína al manantial no se detectó, de donde se dedujo que la velocidad máxima había de ser superior a 204 m/h. El máximo de la curva de concentración sí facilita información sobre la velocidad modal que es cercana a los 143 m/h. En este instante, transcurridas 28 horas desde la inyección, momento en el cual la concentración era máxima (0.00365 mg/l), el caudal en la presa era de 2900 l/s (2296 l/s en la surgencia). La tasa de restitución de este trazador controlada en este manantial fue de un 41%, sin olvidar que la primera parte de la curva de concentración del trazador no fue registrada.

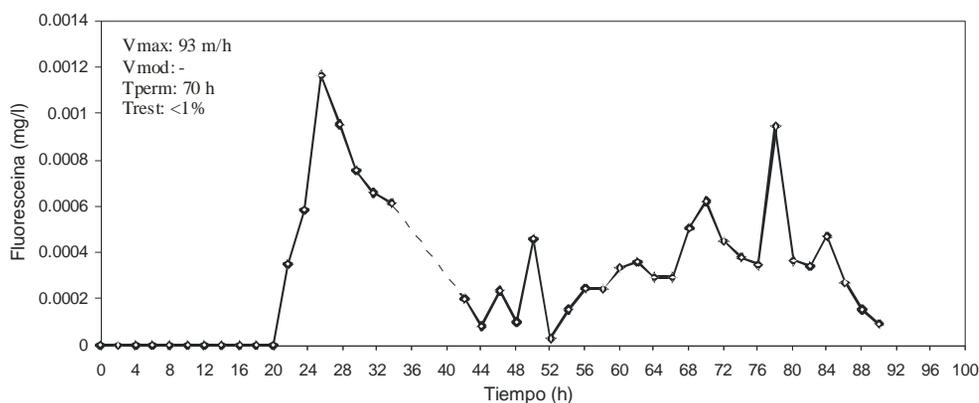
Por otra parte, teniendo en cuenta la evolución de los picos de trazados de los ensayos precedentes, se ha deducido el inicio de la curva (figura 4.41) del pico de trazador (entre las horas 12 y 21.6) de la cual se ha obtenido una velocidad máxima que rondaría los 333 m/h. Esto permite también deducir un tiempo de permanencia de unas 76 horas y una tasa de restitución próxima al 74%.



**Figura 4.41: Evolución de la concentración de fluoresceína y de los caudales en la presa. Noviembre de 1998.**

Las bajas concentraciones registradas evidencian una muy fuerte dilución, lo que se justificaría por el hecho de que los mayores aportes a la surgencia de Salubita en períodos de muy

altas aguas no proceden de este sector de borde del sistema acuífero carbonatado; esto justificaría también la larga cola observada. Por otra parte, la alta velocidad evidencia la buena conexión de la cueva con la red de drenaje rápido hacia la surgencia.



**Figura 4.42: Evolución de la curva de concentración de fluoresceína en Errotalde. Noviembre de 1998.**

Durante este ensayo, la fluoresceína, aunque en muy bajas cantidades (tasa de restitución inferior al 1%), permitió verificar la conexión de Leizeaundia con el arroyo Basabe a su paso por Errotalde, a una cota de 150 m y a 2000 m de distancia al Sur de la cueva, en el término municipal de Legorreta, sobre la Falla de Azkoitia (figura 4.51). Durante el transcurso del ensayo el caudal del arroyo se mantuvo próximo a 20 l/s apareciendo el trazador por primera vez a las 21.6 horas de la inyección (Vmax: 93 m/h).

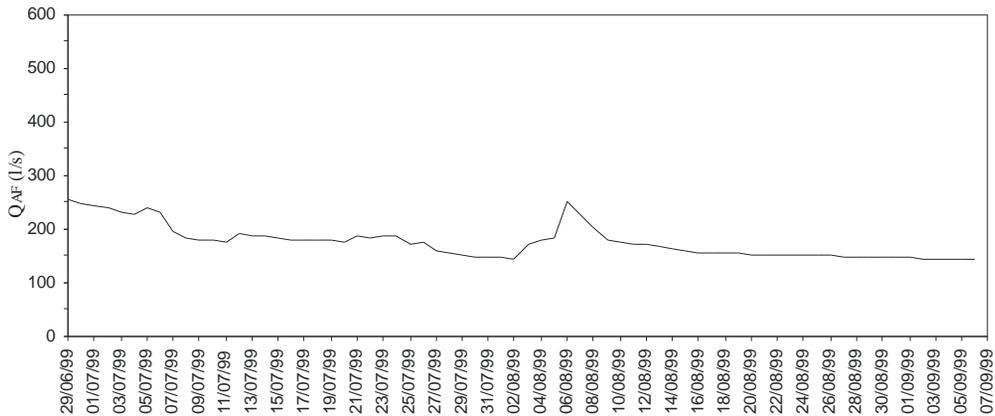
La plurimodalidad de la nube de paso del trazador (figura 4.42) y su notable dispersión lateral evidencian un flujo complejo, en relación con un medio muy fracturado, en la parte final al menos, que posibilite diversidad de caminos de llegada a la surgencia. Todo esto permite la permanencia del trazador en el arroyo durante 70 horas aproximadamente. Vista la dispersión de la nube de paso y la escasísima restitución observada, no se ha calculado la velocidad modal. Queda la duda del papel hidrológico que puedan tener las fallas ahí presentes (figura 4.51), si bien, en cualquier caso, la “fuga” de caudales del Sistema Kárstico de Salubita hacia este sector parece ser despreciable.

#### **4.8.8. JUNIO DE 1999**

El 29 de Junio se realiza un nuevo ensayo con trazadores, en el que se utilizan LiCl y fluoresceína. Es un momento en que los caudales en Salubita están muy bajos (figura 4.43) y se pretende obtener información del comportamiento del Sistema durante este período de estiaje.

A las 12:45 se inyectan 25 kg de LiCl disueltos en 50 l de agua en Osinondo, momento en el que el Arroyo Bidania arrastra un caudal de 2 l/s. Media hora más tarde, a las 13:15, se inyectan en Leizeaundia 500 g de fluoresceína ante un caudal de entrada de 0.5 l/s. Ver situación en figura 4.51.

Se tomaron muestras automáticamente cada seis horas en el manantial de Salubita durante un período superior a dos meses que empezó a las 19:00 del día de la inyección y concluyó el 6 de Septiembre. En ensayos anteriores había sido ya verificada la conexión hidráulica de Osinondo con Salubita y de Leizeaundia con Salubita. En los momentos en los que se produjeron las inyecciones el caudal en la presa era de unos 252 l/s (212 l/s en Salubita) y su evolución posterior fue descendente. El 6 de Agosto se produjo un ligero aumento del caudal debido a la lluvia (15 mm) caída ese mismo día. Los trazadores no fueron detectados.



**Figura 4.43: Hidrograma registrado en la presa ( $Q_{AF}$ ) entre el 29 de Junio y el 7 de Septiembre de 1999.**

Se deduce que en situaciones de aguas muy bajas, como era el caso en este ensayo, las condiciones hidrológicas de las conexiones Osinondo-Salubita y Leizeaundia-Salubita no permitían el flujo rápido de los trazadores. Estos deben encontrar, aguas abajo, en los conductos aguas procedentes de la matriz rocosa, sin que, con los bajos gradientes imperantes, se pueda producir empuje efectivo alguno. Se puede pensar que en estas situaciones de aguas bajas, los aportes puntuales, de escasa entidad, en uno u otro sector del acuífero no llega a afectar las condiciones de descarga en la surgencia. La prolongada dilución de los trazadores justificaría su no detección en la surgencia a pesar del prolongado muestreo.

#### **4.8.9. AGOSTO DE 1999**

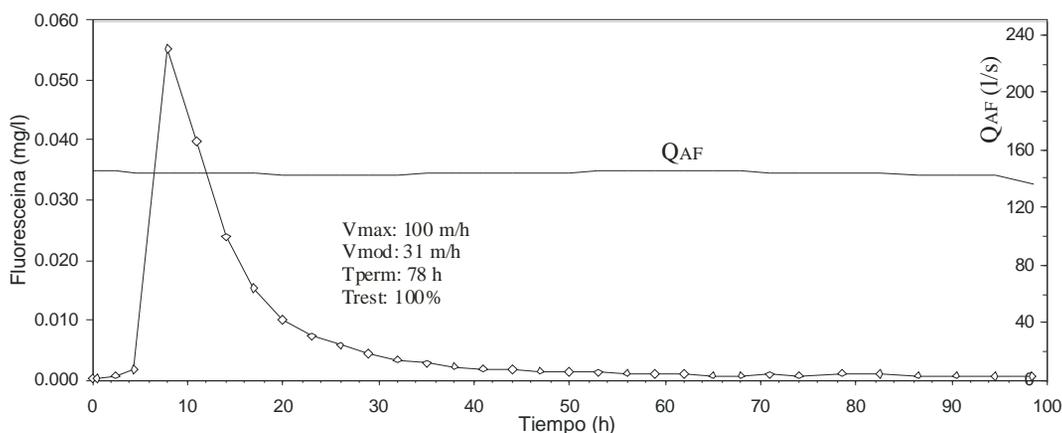
Si bien los ensayos con trazadores llevados a cabo hasta la fecha habían sido realizados a favor de sumideros naturales existentes en la zona de estudio, en este caso se procede a la inyección

puntual del trazador (fluoresceína) en un pozo, concretamente en el sondeo Albiztur-IV situado a 250 m al Oeste de Salubita (figura 4.51).

La disolución de fluoresceína (200 g disueltos en 6 l de agua) se inyecta en el pozo a las 11:00 del día 11 de Agosto, cuando el caudal en la presa era de 172 l/s (134 l/s en manantial de Salubita), que prácticamente se mantuvo a lo largo del ensayo (figura 4.44). Ese caudal refleja unas condiciones de aguas realmente bajas, no siempre alcanzables en los estiajes anuales. Una vez introducido el trazador se inyectaron 10 l de agua para que ésta empujara hacia abajo cualquier porción del trazador que pudiera haber quedado adherida en las paredes del pozo.

En el momento de la inyección el nivel piezométrico en el pozo se encontraba a una cota de 123.8 m, lo que indica un gradiente hidráulico (i) de 0.0152 considerando que la cota de la surgencia es de 120 m. Teniendo en cuenta que este ensayo se localiza dentro del período de muestreo del ensayo anterior (Junio de 1999), este bajo gradiente pone de manifiesto también las condiciones hidrológicas de aquel ensayo.

Antes de la inyección del trazador se había colocado en la surgencia de Salubita un tomamuestras automático tomando muestras cada 30 minutos. 2.5 horas más tarde de la inyección se detecta la primera aparición de fluoresceína en el manantial (0.00076 mg/l), que proporciona una velocidad máxima de 100 m/h. A las 8 horas desde la inyección se detecta la concentración máxima (0.0552 mg/l) que arroja una velocidad modal de unos 31 m/h. La figura 4.44 muestra la evolución de la curva de concentración obtenida en comparación con la variación del caudal en la presa, y los parámetros obtenidos.



**Figura 4.44: Evolución de la concentración de fluoresceína en Salubita y del caudal en la presa. Agosto de 1999.**

La rápida y concentrada salida del trazador por el manantial de Salubita, en las condiciones hidrológicas de realización del ensayo, aguas muy bajas, evidencian una muy buena conexión entre el sondeo Albiztur-IV y el manantial, que permite que se recupere la totalidad (100%) del trazador inyectado. De hecho en la columna del sondeo (figuras 3.4b y 4.33) se observa la existencia de varios tramos fracturados. Es de suponer que algunos de ellos estén muy bien relacionados con la surgencia. La súbita aparición ahora del trazador en Salubita sólo se justificaría por esa conexión directa con el manantial, mientras que la larga cola (tiempo de permanencia próximo a las 78 horas) reflejaría las propias condiciones de aguas muy bajas.

#### **4.8.10. NOVIEMBRE DE 1999**

Los trazados precedentes se realizaron en su totalidad sobre materiales urgonianos. Quedaba aún por descubrir la relación de los materiales jurásicos localizados al Norte de la zona de estudio con el manantial de Salubita. Gracias a la ayuda del grupo espeleológico OARGI de Tolosa se localizaron dos lugares susceptibles de ser utilizados como puntos de inyección de trazadores, situados al Norte de la Falla de Errezil (figura 4.51).

El primer punto (Mendikute) es una depresión situada en la base de la ladera Este del monte del mismo nombre a 690 m de altitud y a 2800 m de distancia de la surgencia de Salubita, donde desaparece un riachuelo cuyo caudal en estiaje suele ser inferior a 1 l/s. En épocas de crecida este riachuelo aumenta su caudal llegando a alcanzar unos 20 l/s y desapareciendo en una honda depresión situada unos 100 m al Sur de la anterior. En ese punto se inyectó a las 13:10 del día 28 de Noviembre una disolución de 30 kg de LiCl disueltos en 58 l de agua. En ese momento el caudal del riachuelo era de aproximadamente 0.3 l/s.

El segundo punto es una cueva conocida como “La Cueva del Garfio” (apartado 3.4.1.2) que se encuentra en la ladera Sur del monte Ernio (figura 4.51) a 740 m de altitud. Esta cavidad casi vertical guarda en su interior un pequeño riachuelo que aparece por primera vez a unos 80 m bajo la superficie (cota 660 m). Debido a su difícil acceso y a la necesidad de material específico para el descenso en el interior de la cueva, los propios espeleólogos se encargaron de introducir 2 kg de fluoresceína hasta el riachuelo y verterlo allí. La inyección se produjo a las 14:15 del 28 de Noviembre momento en el que, según los espeleólogos, el caudal del riachuelo era del orden de 4 l/s.

Durante este ensayo se tomaron muestras mediante tomamuestras automáticos en el manantial de Salubita y en el manantial de Etxeberri (figura 4.51), mientras que se tomaron muestras manuales en Igaran, Otzarain, en dos manantiales del barrio de Urkizu (figura 3.2), en dos manantiales de Tolosa, en el arroyo proveniente de Hernialde, en el arroyo Alkiza y en dos

manantiales de Anoeta (figura 4.51). La toma de muestras se prolongó hasta el 20 de Diciembre de 1999.

El litio no fue detectado en ninguno de los puntos sometidos a control durante este período de tiempo. Cabe la duda razonable del camino que pueda seguir el agua infiltrada en el sumidero de Mendikute: bien hacia el Sur, con posible salida en Salubita o Regata Albiztur, a través de los materiales carbonatados, o bien hacia el Este, con salida en los manantiales por los que, como se comenta a continuación, salió el trazador inyectado en la Cueva del Garfio. En cualquier caso, la comunicación del sumidero no parece ser buena con las redes rápidas del flujo.

La fluoresceína, sin embargo, sí apareció proporcionando información realmente valiosa de la que hasta el momento no se tenía la más mínima idea. Ésta se detectó en dos manantiales situados uno en Tolosa, a una cota de 60 m y el otro en Anoeta, a una cota de 95 m, y apareció también en el Arroyo Hernialde a una cota de 130 m. En Anoeta y Hernialde comenzó a detectarse a los 6 días de haber sido inyectado mientras que en Tolosa lo hizo al noveno día.

Las figuras 4.45, 4.46 y 4.47 muestran las curvas de trazador obtenidas para cada manantial, así como los valores de los principales parámetros deducidos. Aunque los caudales en los puntos donde se tomaron las muestras fueron inferiores al caudal de la presa de la Regata Albiztur, su evolución en el tiempo fue similar, a tenor de las observaciones de visu realizadas durante el período de muestreo. Por eso, en la primera figura se incluye también la evolución de caudales en la estación de aforos de la Regata Albiztur como referencia, ya que no se tomaron medidas de caudales en los otros tres puntos. En total se recuperó un 65% del trazador inyectado tomando como caudales medios 80 l/s en Anoeta, 60 l/s en Hernialde y 10 l/s en Tolosa. De todas formas, este porcentaje es una mera aproximación habida cuenta del desconocimiento de la evolución exacta de caudales en los puntos considerados; a falta de otros datos damos por buena esa aproximación.

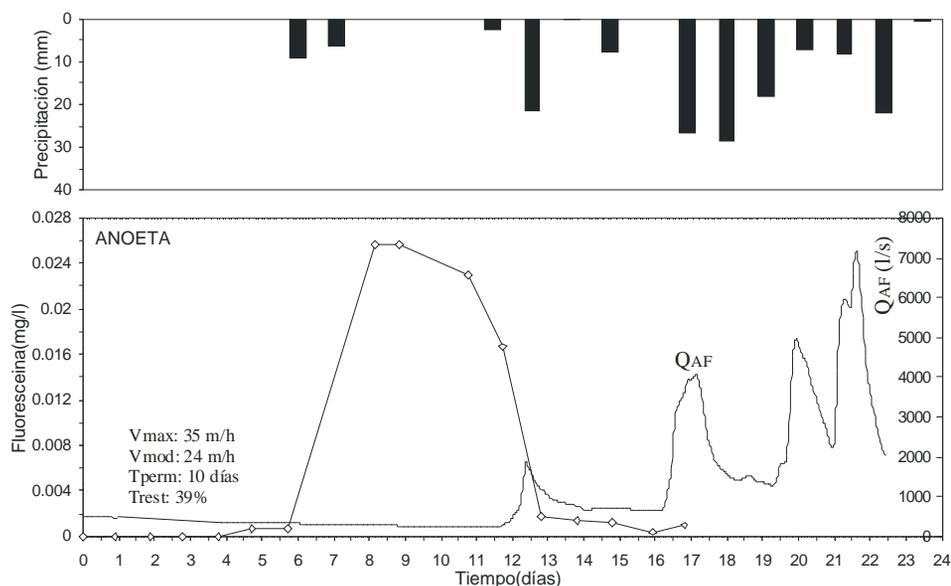
Las distancias entre la Cueva del Garfio y los puntos de muestreo son de 5125 m al manantial de Anoeta; de 5000 m al de Tolosa y también de 5000 m al arroyo Hernialde.

Como muestra la figura 4.45, durante los primeros 12 días del ensayo el caudal en la presa de la Regata Albiztur se mantiene por debajo de 500 l/s, lo que indica unas condiciones hidrológicas de aguas media-bajas que se pueden generalizar a la zona trazada en este ensayo. Durante este espacio de tiempo, la parte de trazador expulsada por los manantiales de Anoeta y Tolosa ha salido casi en su totalidad. En Anoeta la primera aparición de trazador se produce prácticamente a los 6 días de la inyección (velocidad máxima de 35 m/h) alcanzándose la concentración máxima (0.0256 mg/l) 2.8 días más tarde, lo que arroja una velocidad modal de 24 m/h. En este caso, el trazador

permanece en la surgencia durante aproximadamente 10 días, restituyéndose el 39% del trazador inyectado en la Cueva del Garfio.

En Tolosa (figura 4.47) el trazador comienza a aparecer a los 9 días de la inyección (velocidad máxima de 23 m/h) alcanzándose la concentración máxima (0.0073 mg/l) 2.8 días más tarde, lo que proporciona una velocidad modal de unos 18 m/h. El trazador permaneció en esta surgencia aproximadamente durante un día más que en Anoeta, aunque en menores concentraciones, y se restituyó menos del 2% del trazador inyectado.

Transcurridas 12-13 horas desde la inyección, se producen las primeras lluvias importantes (21 mm) que provocan un aumento de caudal alcanzándose un máximo de 1900 l/s en la presa de la Regata Albiztur. Admitiendo que ese aumento de caudal se ha dejado notar también en los manantiales de Anoeta y Tolosa, aunque en diferente cantidad, el brusco descenso en la concentración observable para el día 12.5-13 en ambos manantiales podría ser debido a la dilución producida por ese aumento de caudal originado por la llegada a las surgencias de aguas infiltradas cerca de las surgencias. En estos dos manantiales las curvas de concentración son unimodales aunque no tan puntiagudas como las observadas en ensayos precedentes en el manantial de Salubita

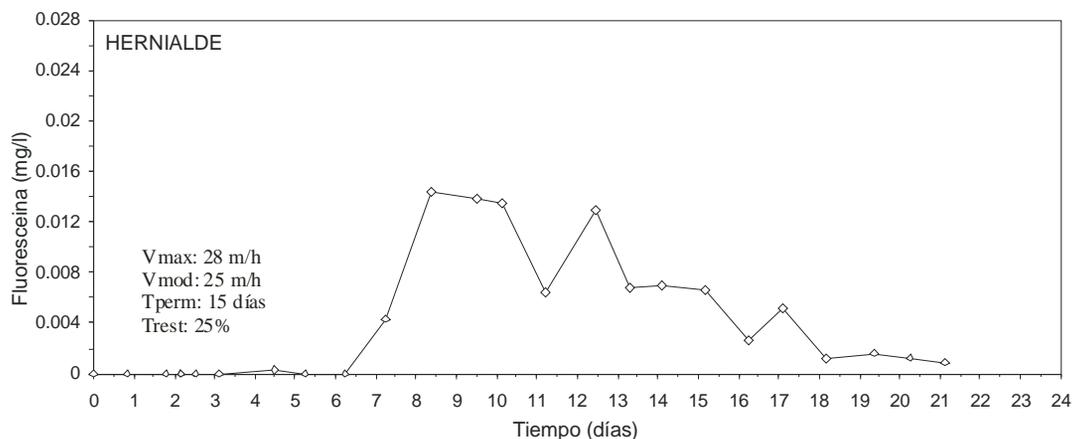


**Figura 4.45:** Curva del trazador obtenida en el manantial de Anoeta, evolución de caudales medios diarios en la presa de la Regata Albiztur y precipitaciones registradas en la estación de Erdoizta durante este período. Noviembre de 1999.

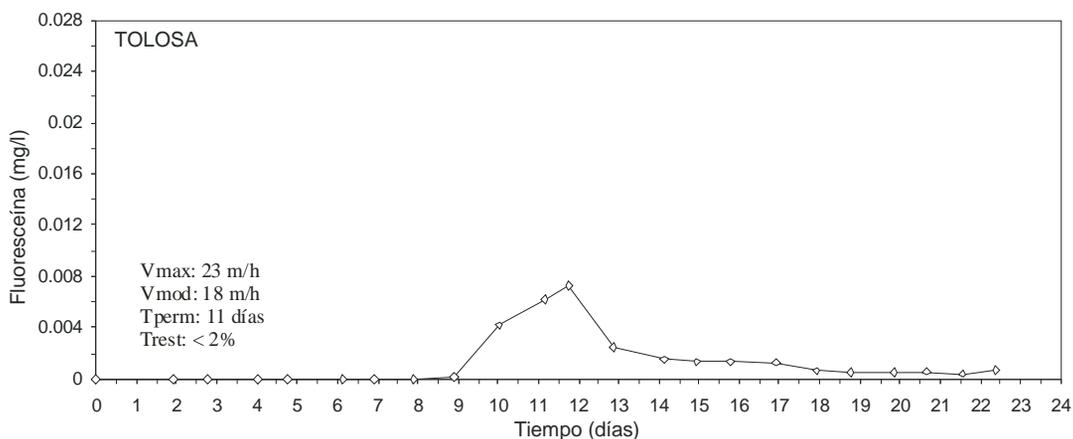
En Hernialde (figura 4.46) el trazador comienza a aparecer a los 7.3 días de la inyección (velocidad máxima de 28 m/h) y la concentración máxima se alcanza a los 8.4 días, de donde se deduce una velocidad modal de 25 m/h. El trazador permanece en el arroyo durante aproximadamente 15 días recuperándose cerca de un 25% del trazador inyectado. La curva, en este caso, es plurimodal existiendo dos pequeños picos (día 12 y día 17) posteriores al pico principal,

que coinciden con las dos primeras crecidas en el caudal. Esta relación del caudal con la concentración

del trazador podría deberse a que el aumento de caudal arrastra consigo el trazador, efecto de empuje, produciendo un aumento en la concentración.



**Figura 4.46:** Evolución de la concentración de fluoresceína en el arroyo HERNIALDE. Noviembre de 1999.



**Figura 4.47:** Curva del trazador recogida en el manantial de Tolosa. Noviembre de 1999.

La plurimodalidad de HERNIALDE y su mayor dispersión lateral en comparación con los manantiales de Anoeta y Tolosa evidencian un flujo complejo, en relación con un medio fracturado, que posibilite varios caminos de llegada a la surgencia. Las curvas de paso del trazador no son claramente puntiagudas en ninguno de los tres casos, y la dispersión longitudinal es evidente, sobre todo en HERNIALDE, con tiempos de paso del orden de 10-15 días. De todo ello se deduce que la conexión Cueva del Garfio-surgencias no es buena, al menos en las condiciones hidrológicas imperantes a lo largo del ensayo.

A la vista de los resultados de este ensayo, existe una cierta comprobación práctica de que la Falla de Errezil (figuras 3.2 y 4.51) sea una barrera al flujo subterráneo, que separa flujos hacia el

Este, río Oria en Tolosa, al Norte del accidente, y flujos hacia el Sur, Salubita-Regata Albiztur, al Sur del accidente. Siendo así, esta importante falla serviría como límite de las unidades Hidrogeológicas Albiztur y Ernio (E.V.E., 1996). Según esto, el flujo del sumidero de Mendikute, situado justo en la parte Norte de la falla, cabe esperar que sea hacia el río Oria en Tolosa, si bien el ensayo realizado ha sido negativo, probablemente por una escasa conexión entre ese sector y la red de drenaje rápida. La figura 3.2 muestra dos cortes de dirección SW-NE y W-E que seccionan la Falla de Errezil poniendo en evidencia su importancia como posible límite de aguas subterráneas. Este accidente pone en contacto rocas de edad jurásica (al Norte) con los materiales cretácicos (al Sur) a favor de un nivel de despegue constituido por arcillas abigarradas, yesos y ofitas de facies Keuper que afloran al Noroeste de Urkizu.

#### **4.8.11. DICIEMBRE DE 1999**

El sondeo Albiztur-IV fue el lugar elegido para la inyección de un nuevo trazador. En este caso se utilizó Naftionato Sódico, ampliamente utilizado en Alemania. El 23 de Diciembre a las 11:55 se introdujo una disolución consistente en 5 kg de naftionato sódico diluidos en 10 l de agua. Posteriormente se vertieron al interior del sondeo 10 l de agua, al igual que se hizo en la inyección realizada en Agosto de 1999 en ese mismo sondeo. En el momento de la inyección el nivel piezométrico se encontraba a una cota de 127 m que proporciona un gradiente hidráulico de 0.028, tomando 120 m como cota de la surgencia.

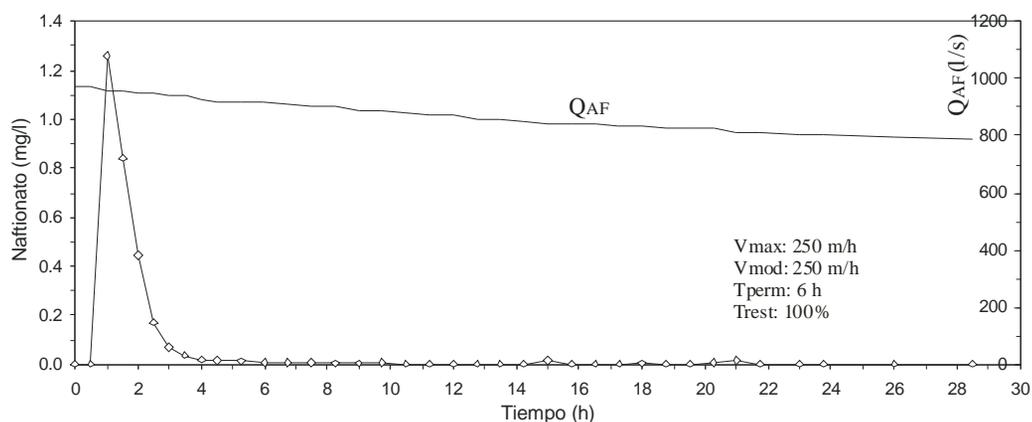
Un tomamuestras automático instalado en la presa, situada justo aguas abajo de la surgencia de Salubita, fue el encargado de recoger las muestras cada 30 minutos a partir de las 12:00 de ese mismo día. Entre los días 14 y 19 de este mismo mes se había registrado en Erdoizta una precipitación total de 110 mm que produjo un aumento de caudal en la presa y una posterior recesión que desde el día 20 se prolongó hasta una semana más tarde. En este contexto, en el momento de la inyección el caudal en la presa era de 968 l/s (872 l/s en el manantial) e iba descendiendo. La figura 4.48 plasma la curva de concentración del naftionato así como la evolución de caudales en la presa.

La primera aparición del trazador coincide con la concentración máxima del mismo y se produce una hora después de la inyección, lo que proporciona una velocidad tanto máxima como modal de 250 m/h. El tiempo de permanencia del trazador en la surgencia es de 6 horas y se recupera la totalidad del trazador.

Valen aquí los comentarios realizados para el ensayo anteriormente llevado a cabo en este sondeo (apartado 4.8.9) en lo referente a la necesaria buena, y directa, conexión entre el sondeo y la

surgencia-regata. Así, la curva de paso del trazador en ambos ensayos es claramente puntiaguda, unimodal, de aparición más rápida, lógicamente, en esta situación de aguas altas ( $i=0.028$ ;

$V_{max}=250$  m/h) y también con menos cola en esta situación, lo que refleja una escasa dispersión longitudinal debida al flujo rápido por conducto.



**Figura 4.48: Evolución de la concentración del Naftionato Sódico y de los caudales en la presa aguas abajo del manantial de Salubita. Diciembre de 1999.**

#### 4.8.12. MARZO DE 2000

Al inicio de la primavera se realizó un nuevo trazado sobre materiales jurásicos, esta vez al Sur de la Falla de Errezil. La cueva-sumidero de Arrozpizar (apartado 3.4.1.2) situada a una cota de 570 m en la ladera Sur del monte Mendikute (figura 4.51), junto al caserío Arrozpide Goikoa y a una distancia de Salubita de 2250 m, fue el lugar propicio para ello.

El 27 de Marzo a las 12:00 se inyectó 1 kg de fluoresceína siendo el caudal de entrada de 0.5 l/s y el caudal en la presa de la Regata Albiztur de 453 l/s (403 l/s en el manantial de Salubita). Un tomamuestras automático muestreó la Regata Albiztur a su paso por la presa, a 2250 m de la cueva, y un segundo aparato lo hizo en el manantial de Igaran, a 500 m de distancia de Arrozpizar y localizado sobre las calizas con sérpulas del tránsito Malm-Neocomiense (Jurásico-Cretácico). Ambos tomaron muestras cada tres horas comenzando a las 13:45 del día 27. El manantial de Etxeberri, situado entre los kilómetros 1 y 2 de la carretera que une Tolosa con Albiztur, en las calizas bioclásticas del Malm, a 2875 m de distancia de Arrozpizar, se muestreó a mano a paso diario. El muestreo se dio por finalizado el día 10 de Abril.

Durante las tres semanas anteriores al día 27 en el que se inyectó el trazador no se produjeron precipitaciones. Sin embargo, durante los días 27 y 28 se produjeron precipitaciones principalmente en forma de nieve que alcanzaron los 54 mm el primer día y los 22 mm el segundo. Esto hizo que las condiciones iniciales de la inyección se modificaran, alcanzándose un caudal de 2728 l/s en la presa a las 13.7 horas de haberse producido la inyección. El hidrograma de la

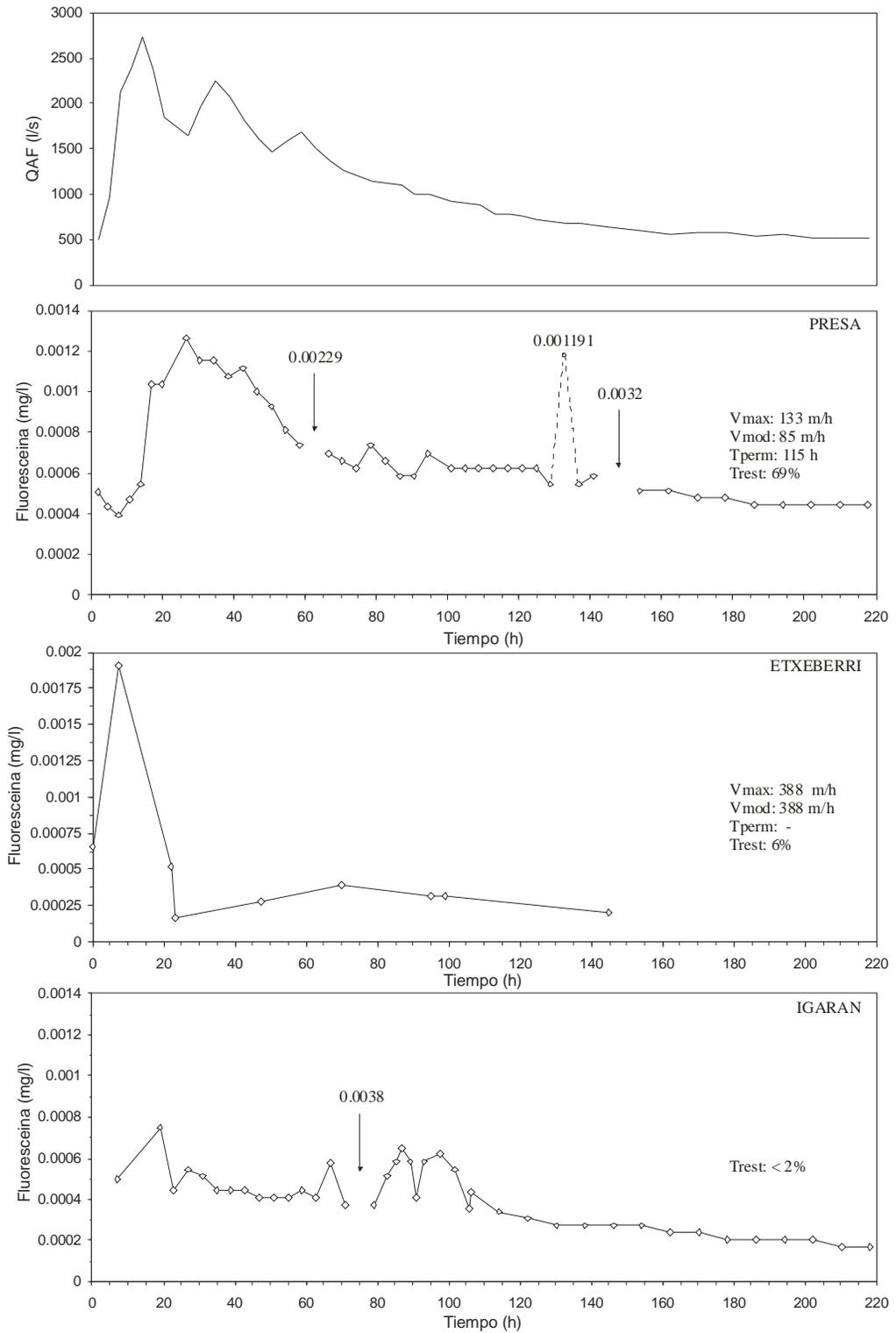
figura 4.49 muestra esa primera crecida y otros dos picos de caudal posteriores. Los caudales se mantienen en la presa por encima de los 1000 l/s hasta el día 31 de Marzo, momento a partir del cual descienden manteniéndose en todo caso entre los 1000 y los 500 l/s.

La fluoresceína se detectó en los tres puntos muestreados (figura 4.49) aunque la mayor parte del trazador (69%) se restituyó en la presa de la Regata Albiztur, aguas abajo del manantial de Salubita. En función de las observaciones del caudal realizadas durante el período de muestreo, se estimó un caudal medio en Igaran de 170 l/s, siendo la tasa de restitución en ese punto inferior al 2%. Del mismo modo, tomando un caudal medio para Etxeberri de 200 l/s, resultó una tasa de restitución del 6%. La tasa de restitución calculada en la presa incluye también la de Igaran ya que este manantial da lugar a la Regata Albiztur que pasa por la presa. Como consecuencia, la suma total proporciona una tasa de restitución del orden del 75%.

Debido a la forma de la curva de concentración obtenida en Igaran, y a las muy bajas concentraciones de trazador aquí observadas, los parámetros hidráulicos se han calculado únicamente para las curvas obtenidas en la presa y Etxeberri. Para Igaran se ha estimado únicamente la tasa de restitución (<2%). A la vista de las curvas se deduce un flujo muy rápido a Etxeberri, a donde el trazador, en pequeña proporción, llega antes ( $V_{max}$ : 388 m/h;  $V_{mod}$ : 388 m/h) que a la presa, por donde claramente pasa la mayor parte de la masa inyectada.

La presencia en Igaran se mantiene varios días con carácter descendente pero sin una descarga concentrada clara, evidenciándose una conexión compleja entre el sumidero y esta surgencia. La conexión directa es más notoria con la presa ( $V_{max}$  = 133 m/h;  $V_{mod}$  = 85 m/h) como lo muestra la forma de la curva, apreciándose el efecto de empuje de las lluvias del inicio del ensayo. En esta última curva aparecen tres picos anómalos de concentraciones altas (0.00229 mg/l, 0.001191 mg/l, 0.0032 mg/l) en comparación con la evolución de la curva de concentración, que se reflejan en la figura 4.49. Teniendo en cuenta la alta frecuencia de muestreo y puesto que se trata de tres puntos aislados, podrían deberse a una contaminación de los recipientes durante la toma de muestras. Esos tres puntos no se han considerado en el cálculo de la tasa de restitución. Lo mismo se puede afirmar para el pico anómalo (0.0038 mg/l) que aparece en la curva de concentración de Igaran.

Teniendo en cuenta el ensayo realizado en Noviembre de 1999 (apartado 4.8.10) sobre materiales de edad jurásica en el que se obtuvieron velocidades máximas de flujo de 23-35 m/h, la velocidad máxima obtenida ahora en Etxeberri resulta, cuando menos, exagerada (388 m/h). No hay que olvidar que la frecuencia de muestreo en este punto fue baja (diaria), lo que se traduce en un inexacto control de la nube de paso del trazador.



**Figura 4.49:** Evolución de la concentración de la fluoresceína en los tres puntos muestreados (presa, Etxeberri e Igaran) y de los caudales en la presa de la Regata Albiztur. Marzo de 2000.

La inexistencia de muestras próximas en el tiempo al valor máximo de concentración imposibilita la corroboración de la validez de ese dato que, puesto que las muestras se tomaron a mano, podría corresponder a un valor anómalo debido, quizás, a la contaminación del recipiente al tomar la muestra.

Por otra parte, existen dos fallas de dirección NE-SW, perpendiculares a la dirección Arrozpizar-Etxeberri (figura 4.51), cerca del manantial de Salubita, que en principio parecen constituir dos barreras para el flujo proveniente de Arrozpizar que, aunque no imposibiliten totalmente el paso del agua produzcan al menos un retardo en la llegada al manantial. Por estas razones los resultados obtenidos en Etxeberri son dudosos aunque, a falta de otros datos, se han tomado como buenos, sin olvidar su singularidad.

En cualquier caso, ha quedado patente la conexión hidráulica de los materiales jurásicos del Sur de la falla de Errezil con la Regata Albiztur.

#### ***4.8.13. ABRIL DE 2000***

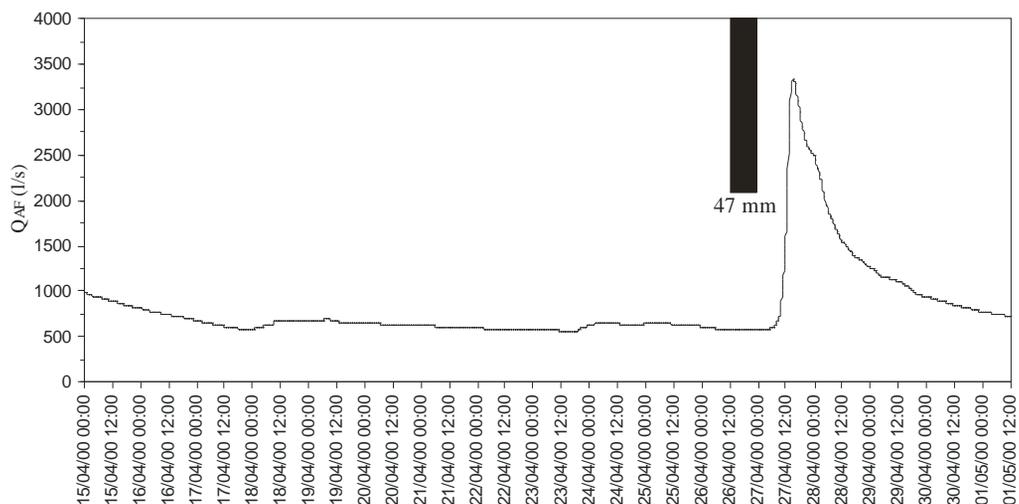
Habida cuenta de las bajas concentraciones obtenidas en el ensayo anterior, se optó por realizar un nuevo trazado inyectando en Arrozpizar una mayor cantidad de fluoresceína. El 15 de Abril a las 11:00 se inyectaron 2 kg de fluoresceína, el doble que en el caso anterior. El caudal de entrada seguía siendo de aproximadamente 0.5 l/s mientras que el caudal en la presa de Salubita era de 900 l/s (813 l/s en Salubita). A partir de ese momento el caudal sigue disminuyendo de manera que unas 26 horas después de la inyección el caudal en la presa es de unos 625 l/s manteniéndose prácticamente constante hasta el día 27 a las 11:00, momento en el que el caudal aumenta repentinamente hasta los 3300 l/s aproximadamente como consecuencia de las precipitaciones comenzadas a caer ese mismo día (47 mm en Erdoizta). La figura 4.50 muestra el hidrograma registrado durante ese período en la estación de aforos de la Regata Albiztur.

Durante este trazado se controlaron un total de 6 manantiales entre los cuales se encontraban los tres del ensayo anterior y se colocaron varios fluocaptos a lo largo de la Regata Albiztur. En Igaran y la presa de la Regata Albiztur se muestreó cada tres horas mediante tomamuestras automáticos a partir de las 11:45 del día 15. En los otros puntos de muestreo (Arkasin, Etxeberri, Otzarain y Sorgain) se tomaron dos muestras diarias. A pesar de que el muestreo se prolongó hasta el 1 de Mayo, el trazador no fue detectado en ninguno de los puntos de observación.

A la vista del resultado negativo de este ensayo, y considerando que los caudales en las surgencias en el instante de esta inyección eran superiores a los del ensayo, positivo, anterior (Marzo de 2000), cabe pensar que en este último caso, las precipitaciones caídas inmediatamente

después de la inyección (figura 4.49) empujaron el trazador, cosa que no ocurre en el ensayo de  
Abril de 2000

(figura 4.50) en el que las primeras precipitaciones ocurren 11 días después. En consecuencia, no sólo importan las condiciones hidrológicas antecedentes sino también las inmediatamente posteriores a la inyección.



**Figura 4.50: Hidrograma de la presa de la Regata Albiztur entre el 15 de Abril y el 1 de Mayo de 2000.**

#### **4.8.14. COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

La figura 4.51 representa la localización de los ensayos con trazadores comentados así como la relación entre los sumideros y los manantiales citados.

La tabla 4.18 incluye de forma resumida los datos cuantitativos que caracterizan los ensayos realizados hasta el momento en la zona de estudio. Junto a los valores de cada ensayo se ha incluido un esquema sintético del hidrograma y de la nube de paso del trazador (en los casos en que existe), con el fin de enmarcar los datos de la tabla en su contexto hidrológico.

Como se puede ver, los trazados en los que la tasa de restitución ha sido cero coinciden con caudales de entrada en los puntos de inyección inferiores a 2 l/s, a pesar de que algunas de las situaciones correspondientes pueden ser consideradas como de aguas medias-altas, tomando los caudales de la presa como referencia. Esa escasez de agua a la entrada de los sumideros no resultó suficiente como para empujar el trazador hasta la red de drenaje rápido, en aguas bajas probablemente por falta de gradiente suficiente o de buena conexión con la red transmisiva, y en aguas medias-altas por ser prioritarios los flujos rápidos procedentes de la red kárstica desde otros sectores diferentes a los ensayados. En cualquier caso, esto origina una notable y prolongada dilución del trazador dentro del medio que hace imposible su detección en un posterior momento de

Llegada del mismo a la surgencia, bien en un momento de recesión, bien empujado por eventos de fuertes precipitaciones. Hay que insistir, como se ha hecho para cada ensayo, en el largo período de control habitualmente realizado.

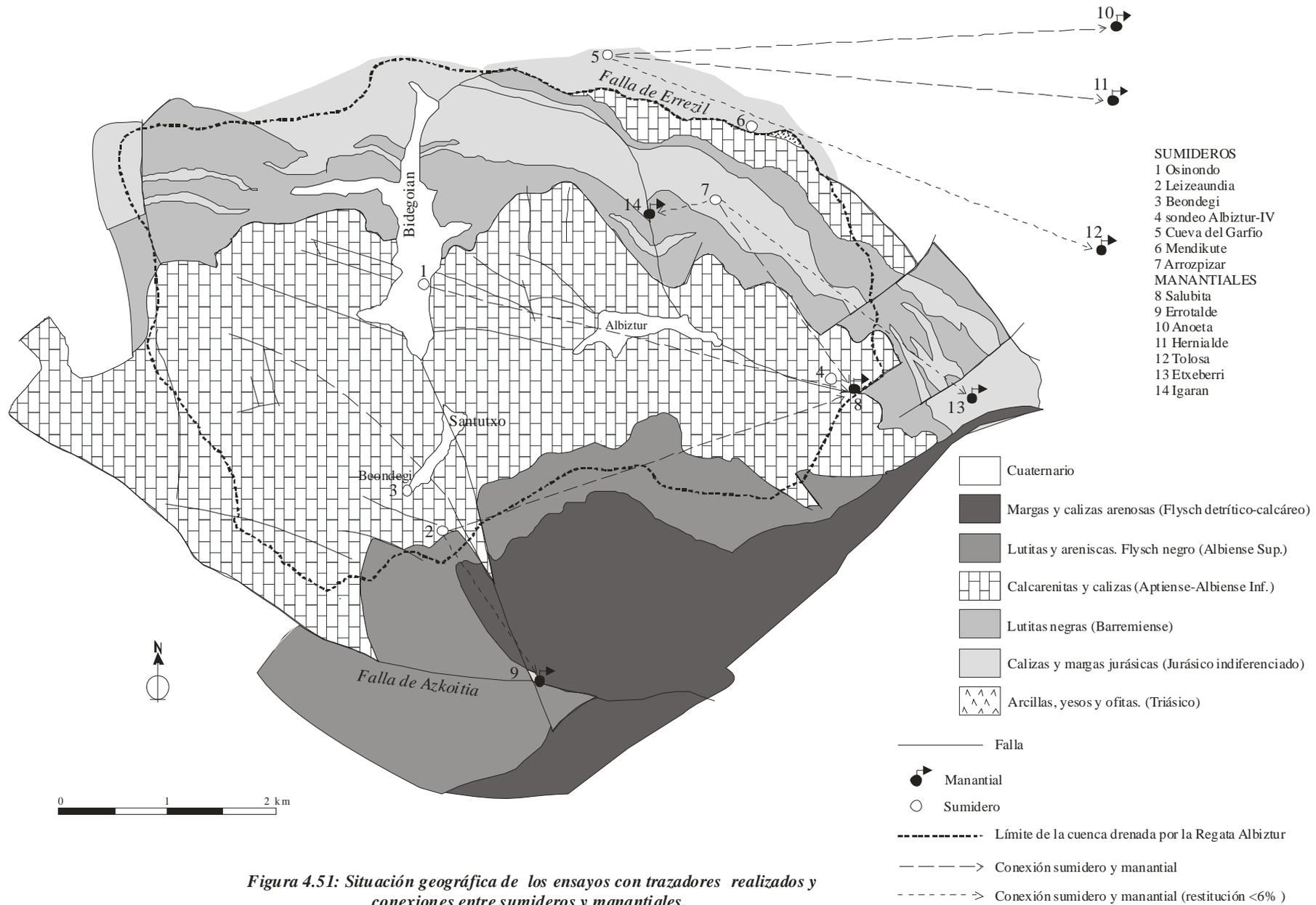
Todos los trazados con punto de inyección en Osinondo han proporcionado tasas de restitución superiores al 84 % y velocidades máximas de entre 54 y 193 m/h. La excepción es el ensayo de Junio de 1999 en una situación de aguas muy bajas. En el resto, incluso con caudales de inyección pequeños (6 l/s), el trazador se recuperó bien debido a fuertes lluvias posteriores a la inyección. En el trazado de Noviembre de 1998 es más que probable, y lógico a la vista de los grandes caudales en juego, que el trazador inyectado en Osinondo saliera por Salubita antes del comienzo del muestreo, lo que nos daría una velocidad del orden de 250-300 m/h como velocidad máxima.

También ha dado una buena restitución (74%) el ensayo de Noviembre de 1998 con inyección en Leizeaundia y salida en Salubita, si bien, todo hay que decirlo, este ensayo se efectuó en condiciones de aguas muy altas. Las altas tasas de recuperación, junto con la ausencia de cola prolongada, hacen pensar en un flujo por conductos, sin, o despreciable, inversión de gradiente desde el conducto a los bloques anexos.

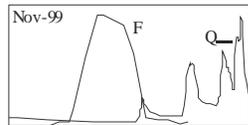
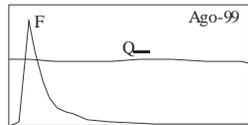
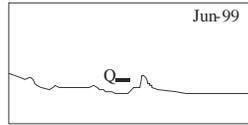
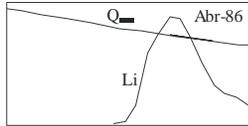
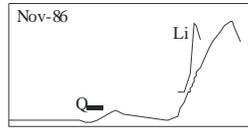
En un sentido general, se puede advertir que los ensayos han dado mucho mejor resultado en los materiales cretácicos que en los jurásicos. Eso es observable en las altas tasas de restitución (>74%), en la rapidez de paso (horas), en la unimodalidad de las curvas de paso y, en consecuencia, en la menor dispersión longitudinal, pero también transversal (una entrada-una salida), de los ensayos realizados en las calizas y calcarenitas urgonianas. Esto indica un buen desarrollo de la red kárstica activa en estos materiales que conduce a un único punto de descarga (Salubita), si bien algunas zonas concretas, como la depresión de Santutxo, no estarían tan bien relacionadas con esa red, a la vista de los resultados ahí obtenidos (sumidero nº 3 en figura 4.51 y tabla 4.18). Comparativamente, en los materiales jurásicos parece ser la fracturación, más que la karstificación, la causante del flujo, como lo atestigua la plurimodalidad de las nubes de paso, su dispersión transversal y la escasa tasa de recuperación.

En la figura 4.53 se refleja muy esquemáticamente, a la luz de la información suministrada, sobre todo, por los trazadores, la posición que, en relación con la red kárstica más transmisiva (en los materiales carbonatados) hacia la surgencia, ocupan las depresiones de Bidania y Santutxo, y los puntos en los que se ha inyectado. Se señala también la situación de los sondeos y la posible influencia del epikarst. Con la información disponible no queda claro el papel individualizado que

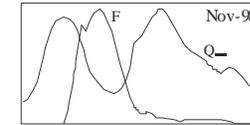
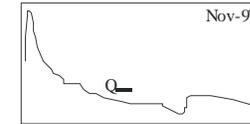
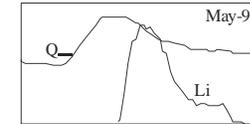
juegan las grandes fracturas y el eje sinclinal (figura 3.2). Lamentablemente los datos espeleológicos son muy escasos.



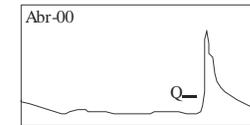
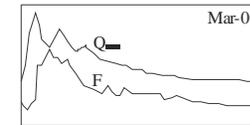
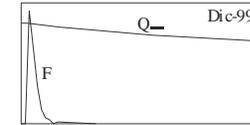
**Figura 4.51: Situación geográfica de los ensayos con trazadores realizados y conexiones entre sumideros y manantiales.**



Fecha	Dic-75	Abr-86	Nov-86	May-97	Nov-97	Nov-98				
<b>Sumidero</b>	2	1	1	1	3	2	1	3		
Cota-sumidero (m)	540	471	471	471	450	540	471	450		
Qsumidero (l/s)	-	300	6	50	< 1	5	> 300 l/s	5		
<b>Manantial</b>	8	8	8	8	8	8	9	8	8	
Cota-manantial (m)	120	120	120	120	120	120	150	120	120	
Qmanantial (l/s)	-	1625	200	322	900	2585	20	2585	2585	
Trazador/kg	F/?	CLi/50	CLi/50	CLi/25	CLi/21	F/2	CLi/25, Br/50	Cl <sub>2</sub> Sr/25		
Distancia (m)	4000	4050	4050	4050	4500	4000	2000	4050	4500	
Detección	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	No	No	
Vmáxima (m/h)	?	193	54	81	-	333	93	-	-	
Vmodal (m/h)	?	135	49	63	-	143	-	?>184	-	
Tiempo de perm. (h)	?	24	20	70	-	76	70	-	-	
Tasa de restit. (%)	?	100	100	86	0	74	< 1%	?	?	



Jun-99		Ago-99	Nov-99				Dic-99	Mar-00			Abr-00
1	2	4	5			6	4	7			7
471	540	123.8	660			690	127	570			570
2	0.5	-	4			0.3	-	0.5			0.5
8		8	10	11	12	8	8	8	13	14	8
120		120	95	130	60	120	120	120	110	390	120
212		134	80	60	10	80	872	403	200	170	813
CLi/25	F/0.5	F/0.2	F/2			CLi/30	N/5	F/1			F/2
4050	4000	250	5125	5000	5000	2800	250	2250	2875	500	2250
No	Sí	Sí	Sí	Sí	Sí	No	Sí	Sí	Sí	Sí	No
-	100	35	28	23	-	250	133	388	-	-	-
-	31	24	25	18	-	250	85	388	-	-	-
-	78	10 d	15 d	11 d	-	6	115	-	-	-	-
0	100	39	25	<2	0	100	69	6	<2	0	0



**Sumideros:** 1 Osinondo, 2 Leizeaundia, 3 Beondegi, 4 sondeo Albiztur-IV, 5 Cueva del Garfio, 6 Mendik ute, 7 Arrozpizar

**Manantiales:** 8 Salubita, 9 Errotalde, 10 Anoeta, 11 Hernialde, 12 Tolosa, 13 Exeberri, 14 Igaran  
Trazadores: F flu oresceína, N naftion ato sódico, Br KBr+NaBr

Las columnas marcadas **en negrita** hacen referencia a las inyecciones realizadas en materiales de edad jurásica, mientras que en el resto se han realizado en materiales de edad cretácica.

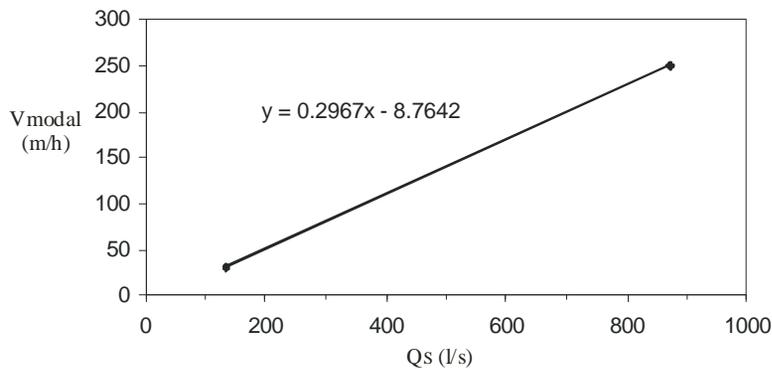
Tabla 4.18: Resumen de los datos cuantitativos que caracterizan los ensayos con trazadores realizados en la Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur.

Mención especial merece el vertedero de Santutxo, situado en la depresión del mismo nombre, ya comentado en el apartado 2.2.2. Aunque no ha sido posible inyectar trazador alguno en sus proximidades más inmediatas, a la vista de los resultados de los ensayos efectuados con inyecciones en otros puntos de esa depresión, se deduce una no buena relación directa de ese sector con la red transmisiva rápida hacia Salubita, al menos sin posibilidad de mantener la marca del trazador hasta la propia surgencia, lo que implica que aunque la relación con la red transmisiva fuera buena la dilución a la que el trazador está sometido es muy grande, por una comparativamente mucha mayor importancia en esa red de los aportes procedentes de otras áreas (epikarst, depresión de Bidegoian). Este aspecto se retoma en el capítulo de hidroquímica.

Aunque los trazados son una técnica fundamental en la investigación de los terrenos kársticos en el País Vasco (MORALES et al., 1997, MUGUERZA et al., 1999; ANTIGÜEDAD et al., *in print*;) se comprueba en estos ensayos que es necesaria su repetición en diferentes condiciones hidrológicas, tanto en lo referente a las condiciones del momento, consecuencia de las antecedentes y fáciles de conocer, como a las condiciones inmediatamente posteriores al ensayo, de casi imposible pronóstico. Los resultados de los ensayos realizados son de una amplia variedad, que clarifican aspectos importantes pero crean también dudas razonables; ahí reside su interés y su dilema. En cualquier caso, en los ensayos aquí realizados se ha dado una gran importancia a la frecuencia y tiempo de muestreo, lo que ha ayudado en gran manera en la interpretación de los resultados positivos y en la razonabilidad de las dudas derivadas de los negativos.

Los dos ensayos llevados a cabo en el sondeo Albiztur-IV presentan velocidades máximas de 100 y 250 m/h en aguas bajas y medias-altas respectivamente. La conexión entre este punto y el manantial de Salubita es clara y se produce probablemente a través de un conducto directo a las proximidades de la surgencia que hace que la tasa de restitución sea del 100 % y la curva nítidamente unimodal y súbita. En la figura 4.52 se relaciona el caudal en Salubita con la velocidad modal del trazador, solo para los dos ensayos realizados en el sondeo Albiztur-IV (Agosto y Diciembre de 1999), ya que son los dos únicos ensayos con prácticamente recuperación total, prácticamente también permanencia de caudal en la surgencia y con inyección directa al medio saturado. La recta obtenida sirve, al menos, para relacionar ambos parámetros en unas condiciones de muy buena relación directa entre la zona saturada y el punto de descarga, eliminando la influencia ejercida por el paso del trazador a través de la zona vadosa.

Por último resulta de enorme interés hidrogeológico el hecho de que las inyecciones realizadas al Norte de la Falla de Errezil no posean conexión hidráulica alguna, apreciable al menos, con el manantial de Salubita, ni con la Regata Albiztur (los flujos se dirigen hacia el río Oria, en el Este), por lo que esa estructura tectónica parece constituir el límite Norte del Sistema Kárstico de Salubita. Por otra parte, hacia el Sur, sí se ha evidenciado algún aporte hacia el sector de Legorrsi bien, como se ha indicado para el ensayo de Noviembre de 1998, esos aportes son despreciables, por lo cual el límite Sur del Sistema Kárstico se puede establecer en el contacto entre los materiales carbonatados urgonianos y los lutíticos del Albiense Superior (figuras 3.2 y 4.51), en coincidencia prácticamente con la divisoria de aguas en ese borde.



**Figura 4.52: Relación entre la velocidad modal del trazador y el caudal del manantial de Salubita, según los datos obtenidos de los trazados realizados en el sondeo Albiztur-IV en Agosto y Diciembre de 1999.**

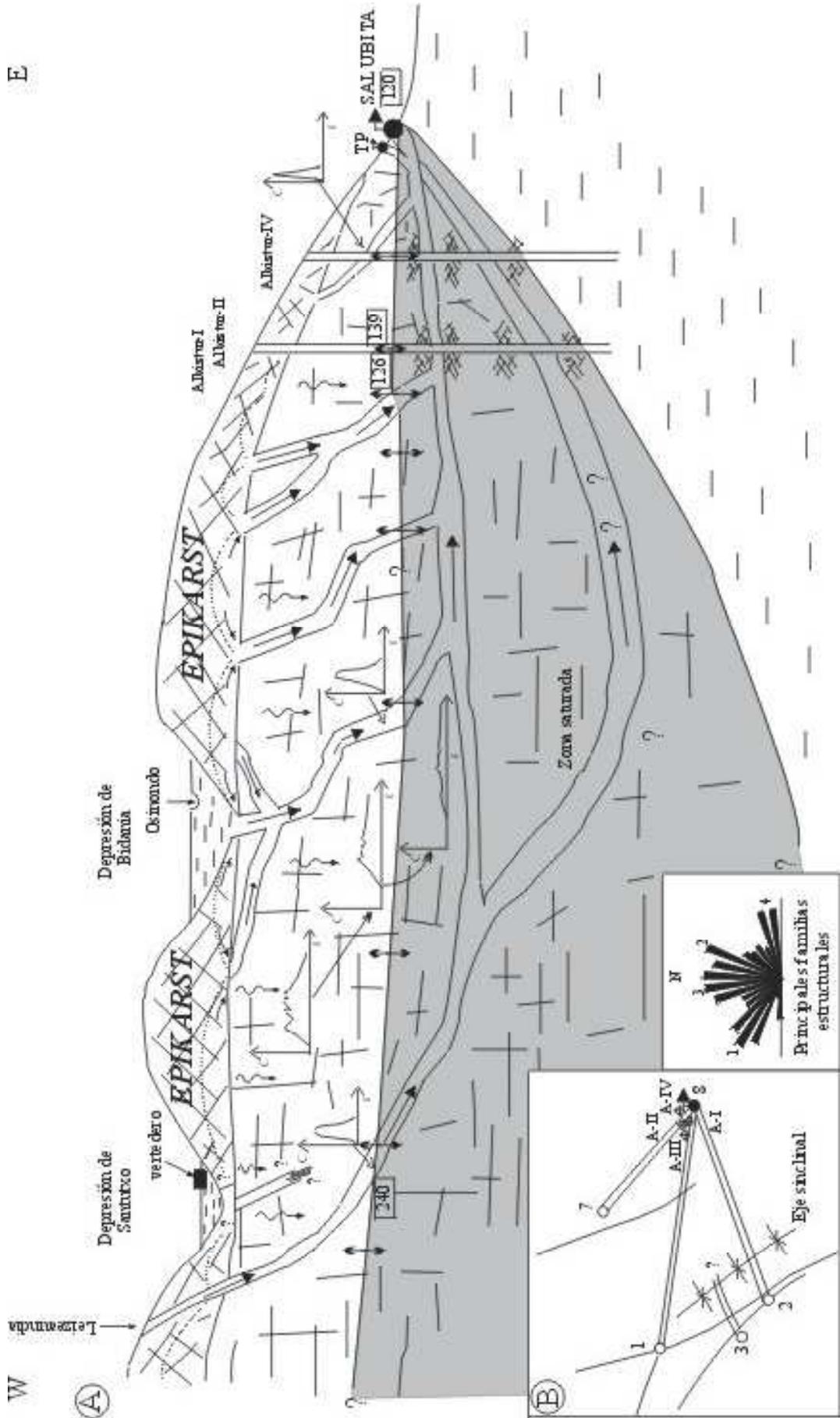


Figura 4.53: Esquema conceptual de la disposición de la red rápida de drenaje kárstico, y del epikarst, en relación con la surgencia de Sabalim en el Sistema Kárstico de Sabalim. A) En plan. B) En perfil. En plan, con indicación de los rasgos tectónicos más importantes, basados en las figuras 3.2 y 4.51. Los números incluidos en los recuadros hacen referencia a la con del nivel piezométrico en ese punto.

#### **4.9. ANÁLISIS DE LOS QUIMIOGRAMAS. TRAZADOS NATURALES**

Durante esta investigación se ha procedido al seguimiento de la evolución hidroquímica temporal detallada en algunos puntos del Sistema Kárstico durante episodios hidrológicos concretos. El muestreo se ha efectuado mediante tomamuestras automáticos y con un paso de toma muy reducido, entre 2 y 6 horas lo que permite un muy buen seguimiento de esos episodios y la deducción de conclusiones importantes sobre el funcionamiento hidrogeológico del Sistema a la escala de la frecuencia del muestreo (factor escala temporal). La interpretación de esta evolución hidroquímica temporal (quimiograma) se realiza, lógicamente, de forma conjunta con la del propio hidrograma.

Se presentan ahora estos quimiogramas usando esa información como si de trazados naturales se tratase, para su interpretación hidrogeológica y para su consideración conjunta con la información recogida y analizada en los apartados anteriores. Algunos aspectos de esta interpretación han sido ya tratados anteriormente en el marco de reflexiones más concretas.

##### ***MANANTIAL SALUBITA (Noviembre de 1999)***

Entre los días 11 y 21 de Noviembre de 1999 se procedió al control sistemático del quimismo en dos puntos del Sistema: la surgencia de Salubita y la regata Albiztur a la altura de la presa en la que se ubica la estación de aforos, es decir, unos 50 m aguas abajo de la surgencia. La toma de muestreo se inició con una frecuencia de 4 horas disminuyendo la frecuencia a mitad del ensayo hasta 6 horas. Este seguimiento coincide justamente con el final del año hidrológico 1998-99 y el principio del 1999-00, es decir, se sitúa claramente en el tránsito aguas bajas-aguas altas. La evolución de todos los elementos controlados en los dos puntos se recoge en la figura 4.54. En este apartado solamente se considera lo referente al quimismo del manantial Salubita.

En la figura 4.14 ya se presentó el hidrograma registrado en la estación de aforos (caudales medios diarios), así como la evolución observada en Salubita para tres elementos químicos (nitratos, sulfatos y bicarbonatos). La elección de estos elementos viene justificada por el hecho de que presentan diferente evolución, siendo la del resto de elementos analizados (los mayoritarios habituales) similar a alguna de estas tres: magnesio, calcio y estroncio, similar al sulfato; potasio similar al nitrato.

Esos tres elementos son considerados como *marcadores naturales* de la procedencia de las aguas. Así, altas concentraciones en **sulfatos** indican presencia de aguas procedentes de los materiales jurásicos (Malm-Neocomiense), sobre todo del manantial de Igaran, vía regata Albiztur; hay que recordar aquí que esta regata en situación de aguas bajas aporta agua al acuífero en las proximidades de la surgencia Salubita, hasta el punto de quedar el cauce seco cuando el caudal en la estación de

aforos es inferior a unos 200 l/s, siendo en este momento todo el agua de la presa procedente de la surgencia.

El **nitrate**, por su parte, es un marcador externo, claramente, de forma que altas concentraciones en la surgencia marcan la llegada de flujos rápidos desde las zonas de superficie proclives a proporcionar este elemento. En nuestro Sistema Kárstico se considera que la zona más favorable, tanto para el suministro de nitratos como para favorecer la infiltración rápida, es la depresión de Bidania, donde se ubica la actividad agrícola más notoria del área estudiada y donde se encuentra el único sumidero activo importante (sumidero Osinondo).

A partir de esta consideración la *curva de paso* del nitrato puede ser interpretada como trazado natural, sobre todo en situaciones hidrológicas como la presente, fuertes lluvias de comienzo del año, en la que los flujos de infiltración rápida arrastran cantidades importantes de nitratos acumulados en los suelos a lo largo de la época estival. En consecuencia, sería un trazado más asimilable a una inyección continua, pero de concentración decreciente, que a una puntual; este aspecto es importante para la interpretación.

Finalmente, el **bicarbonato** es tomado como marcador interno, propio de las formaciones carbonatadas, si bien, en este Sistema, no sirve, de forma clara al menos, como elemento diferenciador de flujos procedentes de las formaciones urgonianas y de los procedentes de las formaciones jurásicas. En cualquier caso, su evolución, como la de cualquier marcador interno, debe reflejar bien la llegada de flujos de infiltración rápida, originando dilución.

A partir de estas consideraciones se hace la interpretación de las figuras 4.14 y 4.54. En lo que al hidrograma se refiere (aunque es el hidrograma registrado en la presa de la regata, ya se ha justificado con anterioridad que en su forma es similar al deducido para la propia surgencia) se observa el final de un estiaje con caudales muy bajos (< 100 l/s, procedente sólo de la surgencia) y el súbito crecimiento de los caudales como consecuencia de las lluvias registradas a partir del 13 de Noviembre, primero en forma líquida (hidrograma puntiagudo) y luego en forma de nieve (hidrograma mas extendido) (88 mm en forma de lluvia entre los días 13 y 16; 41 mm en forma principalmente de nieve entre los días 17 y 18; 22 mm en forma de lluvia el día 19). La importancia de las crecidas, sobre todo de la primera, viene dada por el caudal del pico: 8 m<sup>3</sup>/s, como valor medio del día.

En cuanto al comportamiento de los elementos marcadores se observa que no coinciden en el tiempo los puntos de inflexión (crecida o decrecida) de sus concentraciones. Así, el sulfato es el primero en experimentar una evidente decrecida, no acompañada de comportamiento “anómalo” en

los otros elementos. La explicación de este cambio hay que encontrarla en el comportamiento de la regata y no en el del propio acuífero.

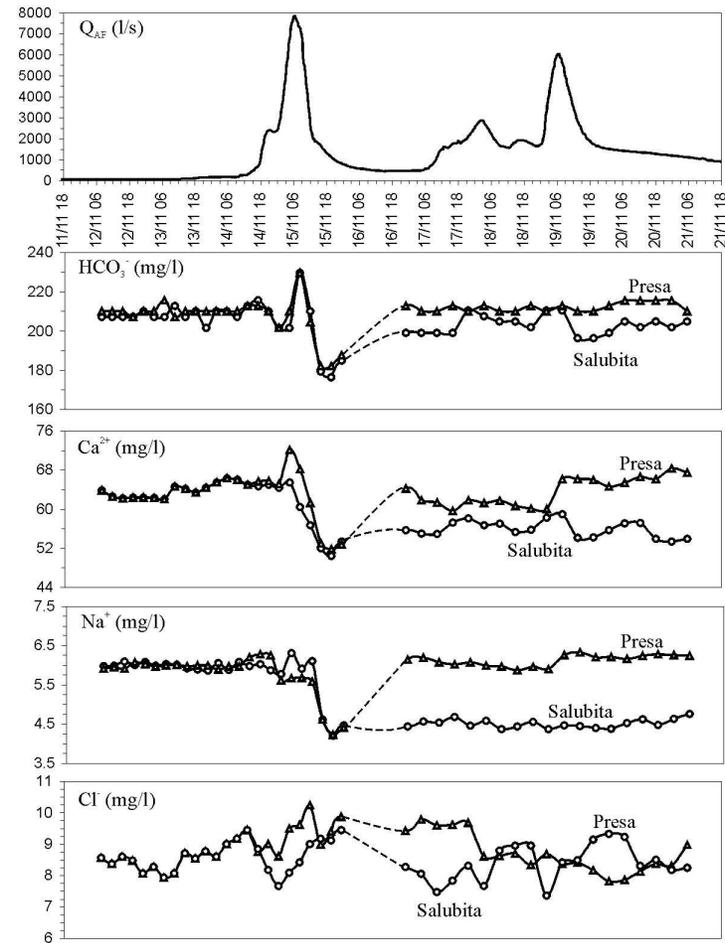
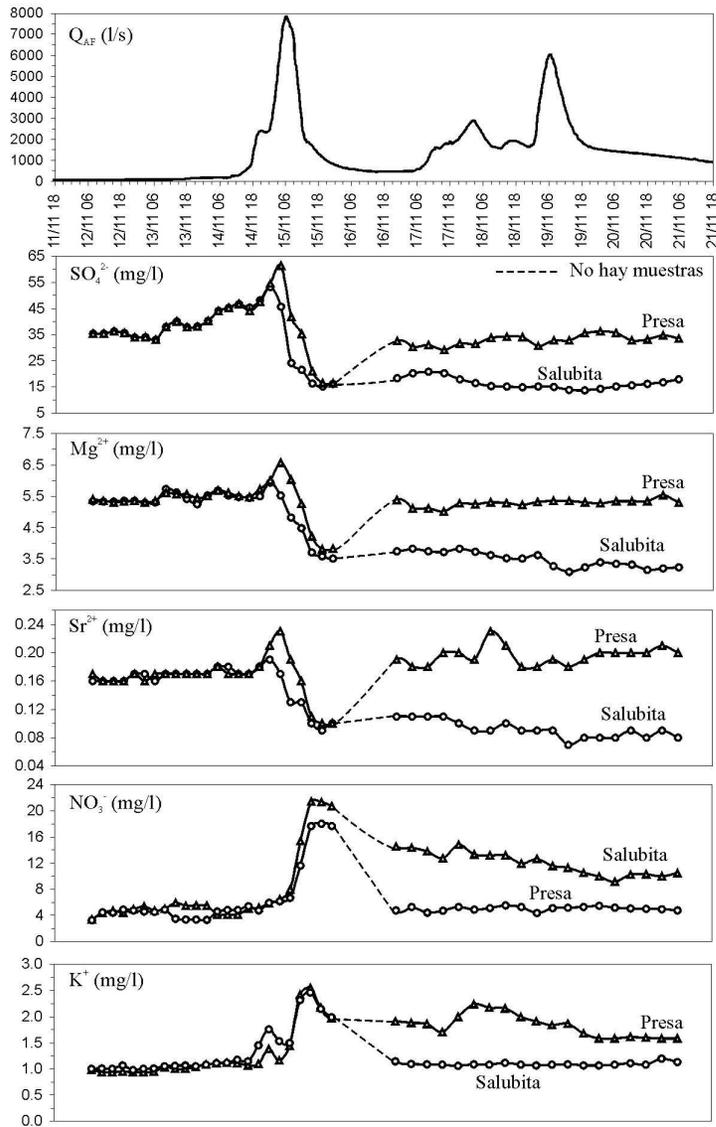


Figura 4.54: Evolución hidroquímica de los elementos mayoritarios de las aguas de la presa (estación de aforos) de la Regata Albiztur y de las aguas de la surgencia de Salubita durante el periodo comprendido entre el 11 y el 21 de Noviembre de 1999, coincidiendo con la primera crecida del año hidrológico 1999-2000. El primer gráfico muestra, en ordenadas, los caudales en la estación de aforos y en abscisas las fechas, de forma que la primera cifra representa el día, la segunda el mes y la tercera la hora.

En efecto, cuando los caudales son muy bajos en la presa el cauce de la regata está seco en su parte baja, antes del manantial, debido a la total infiltración de sus aguas (< 25 l/s) en el acuífero; la alta concentración en sulfatos de las aguas de la regata, procedentes de la surgencia Igaran, justifica su alto valor (40-50 mg/l) en las aguas de Salubita durante el estiaje.

Las primeras lluvias registradas provocan un progresivo aumento del caudal, algo antes en la regata que en el acuífero, de forma que a mayor caudal en la regata menor infiltración desde ésta al acuífero, lo que conlleva una paralela progresiva disminución de la concentración en sulfatos en Salubita, antes de la llegada a la surgencia de los flujos de infiltración rápida en el propio acuífero.

El comienzo real de la llegada de esos flujos de infiltración rápida (tránsito efectivo de aguas) a Salubita viene doblemente marcado: por una parte, por el inicio de la decrecida en la concentración de bicarbonatos, y, por otra, por el inicio de la crecida en la concentración de nitratos. Esta evolución progresiva, ascendente para el marcador externo y descendiente para el interno, es reflejo de la cada vez mayor presencia en la surgencia (no influenciada ya por la regata, a partir de caudales en la presa superiores a unos 800 l/s) de las *aguas jóvenes* de infiltración rápida en comparación con las *aguas viejas* previas al episodio lluvioso. La máxima presencia de la componente rápida del flujo en la surgencia viene marcada por el momento de mayor dilución, que se corresponde con las mínimas concentraciones en los elementos internos (bicarbonatos y sulfatos) y la máxima en los externos (nitratos). Como se observa en la figura, este momento es un poco posterior al pico de la crecida.

A partir de ese momento la componente rápida pierde influencia con relación a la componente lenta del flujo (aguas previas): los bicarbonatos tienden poco a poco a recuperar su nivel anterior; los sulfatos se mantienen en valores propios del acuífero en condiciones de no influencia por parte de la regata, aunque con ligeros crecimientos; los nitratos marcan una tendencia decreciente constante sin llegar, durante el periodo de control, a alcanzar los valores iniciales. Estas evoluciones post-crecida indican una presencia de varios días en la surgencia por parte de las aguas infiltradas en ese episodio lluvioso, si bien la componente rápida sólo llega a ser realmente importante en un periodo de tiempo más corto, en la parte decreciente del hidrograma.

Cinco días más tarde se registra otra crecida importante, alcanzando una punta de unos 6 m<sup>3</sup>/s, valor medio del día, en la que, sin embargo, el comportamiento químico del manantial es diferente. En este caso no se observa fenómeno claro de dilución en ninguno de los elementos; éstos siguen la evolución que traen anteriormente. Es decir, mientras en la primera crecida hay un fenómeno de dilución, por influencia de la componente rápida de infiltración en la surgencia (tránsito), en la segunda lo que hay es un fenómeno pistón, en el que las aguas expulsadas en el aumento de caudal lo han sido empujadas por las aguas que provocan el impulso energético de la crecida (transferencia).

¡Este diferente comportamiento se observa para dos crecidas separadas cinco días!. Este hecho pone de manifiesto, una vez más, la dificultad, mas bien el absurdo, de pretender establecer un patrón general de comportamiento dinámico del acuífero kárstico, ante episodios de lluvia, a partir de las observaciones de la surgencia. En este caso hay, además, dos cuestiones que complican la interpretación: por un lado, el estar justo en el tránsito aguas muy bajas-aguas muy altas de cambio de año hidrológico (en ese tránsito comienzan a renovarse las reservas); y, por otro, el que las precipitaciones entre los días 17-18 fuesen en parte nivales.

En la primera crecida la componente rápida de la infiltración alcanza en poco tiempo la surgencia. Aunque no hay registro detallado de las intensidades horarias de las precipitaciones acaecidas en la cuenca, tomando en consideración el inicio de la crecida en la presa, y admitiendo que la diferencia de tiempo con el inicio, previo, de la crecida en la depresión de Bidania (sumidero Osinondo) puede ser del orden de unas 4 horas (apartado 4.6) en momentos de caudales altos, se deduce un tiempo de tránsito de unas 20 horas para las primeras aguas de infiltración rápida, y de unas 28 horas para el “pico” máximo de esa infiltración. Estos datos de tiempo representan velocidades de unos 205 m/h y 145 m/h, respectivamente, similares a los obtenidos en trazados artificiales para condiciones de aguas altas (tabla 4.18; Abril de 1986).

#### ***PRESA DE REGATA ALBIZTUR-MANANTIAL SALUBITA (Noviembre de 1999)***

Se trata del mismo periodo de seguimiento ahora comentado para Salubita (11-21 de Noviembre). Como se ha comentado no sólo se controló el manantial sino también la Regata Albiztur a la altura de la presa, es decir, unos 50 m aguas abajo de la surgencia. La toma de muestreo se efectuó automáticamente cada 4 horas disminuyendo la frecuencia a mitad del ensayo, al igual que en el manantial, hasta 6 horas. Este seguimiento coincide justamente con el final del año hidrológico 1998-99 y el principio del 1999-00. La evolución de todos los elementos controlados en los dos puntos se recoge también en la figura 4.54. En este apartado se considera lo referente a la evolución del quimismo de la regata aguas arriba de la surgencia inferida a partir de las observaciones aguas abajo.

Hasta el inicio de la primera crecida el quimismo en Salubita y en la presa es coincidente, lo cual es lógico habida cuenta de que con esos bajos caudales todo el agua que pasa por la presa procede de la propia surgencia (flujo de base del acuífero + agua de infiltración de la regata). La inflexión, disminución, en la concentración de los sulfatos (idéntico para magnesio, calcio y estroncio) está desfasada en uno y otro punto, siendo anterior en el manantial. Ya se ha explicado que el aumento de caudales en la regata disminuye su infiltración al acuífero, lo que justifica que la concentración en estos elementos, marcadores de la regata en estiaje, vaya disminuyendo en Salubita.

Sin embargo, sigue aumentando durante unas pocas horas (2-4) en la presa, en momentos de considerables caudales procedentes, ahora sí, tanto de la regata aguas arriba como del acuífero.

Esto indica que las aguas de la regata procedentes de “arriba” presentan contenidos en esos elementos más elevados que los medidos en la presa, es decir, que se da un fenómeno de empuje, tipo pistón, muy puntual en el tiempo, en las zonas drenadas por la regata, probablemente en el acuífero drenado por Igaran, sobre todo, que es el que mayoritariamente mantiene el flujo en la regata en esos momentos.

La dilución en la presa es generalizada y comienza a darse con la inflexión observada, si bien no se sabe cual pueda ser la evolución del quimismo aguas arriba en la regata, ya que en estos momentos el mayor caudal procede de la surgencia de Salubita que es quien marca la evolución química en la presa, como lo indica el hecho de que en el momento de la máxima dilución, poco después del pico de crecida, la concentración de cada elemento es muy similar en uno y otro punto.

A partir de ahí, en la corta recesión que se produce entre las crecidas, se observa una neta diferenciación entre las aguas del acuífero y las de la regata. Para el caso de Salubita ya se ha justificado en el apartado anterior. En la regata se da una recuperación, mayor o menor, de las concentraciones para tender enseguida a la estabilización, sin verse afectada ésta por las crecidas de los días posteriores. En cualquier caso, las concentraciones en la presa son siempre mayores, excepción hecha de nitratos y potasio, que en Salubita, lo que indica que aguas arriba de la regata las aguas presentan mayores contenidos aún, aspecto éste que no deja de ser chocante, en cuanto que lo “habitual” en una regata en momentos de considerables caudales es que las aguas presenten baja mineralización.

En nuestro caso, el comportamiento químico de la regata, aguas arriba de Salubita, está fuertemente condicionado por el comportamiento hidrogeológico de las formaciones jurásicas, origen principal de las aguas de aquélla, con sus fenómenos de empuje y dilución. Para este periodo no se cuenta con el seguimiento en Igaran por lo que se desconoce su evolución. En cualquier caso, la estabilidad química observada en la presa debe estar fundamentalmente condicionada por la estabilidad química en Salubita que es quien aporta la mayor parte del caudal a la regata.

Los bicarbonatos en la presa siguen una evolución similar a la del manantial; como se ha dicho con anterioridad, este elemento no sirve aquí para marcar diferencias, nítidas al menos, entre las aguas de uno u otro medio, habida cuenta, además, de que, junto con el calcio, son elementos de rápida variación en el medio y poco estables una vez tomada la muestra. Por esa razón sólo se interpretan variaciones nítidas y que en el presente caso no sirven para discernir procedencias.

El caso del nitrato y potasio es contrario al de los elementos internos: sus mayores concentraciones coinciden con la llegada de las aguas recientes, que arrastran esos elementos desde la superficie. Además, son los únicos elementos en los que la concentración es mayor en el acuífero que en la regata (presa), siendo por tanto aún menor aguas arriba en la regata. Esto indica que su origen principal está en relación con el acuífero, debiendo ser, sobre todo, la depresión de Bidania.

#### ***MANANTIAL IGARAN-PRESA DE REGATA ALBIZTUR (Marzo-Abril de 2000)***

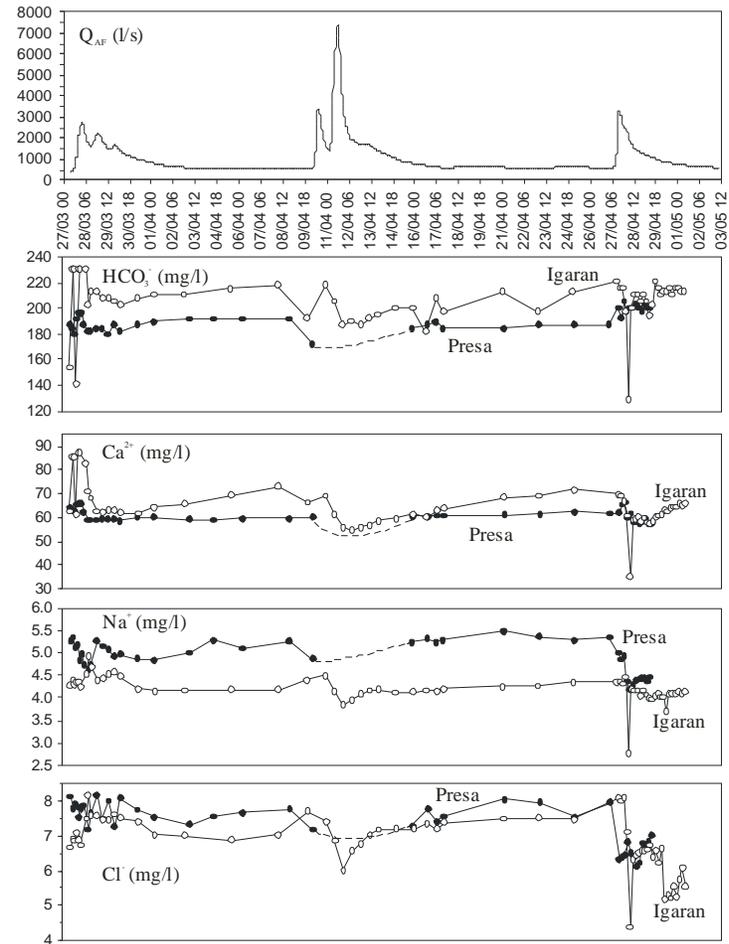
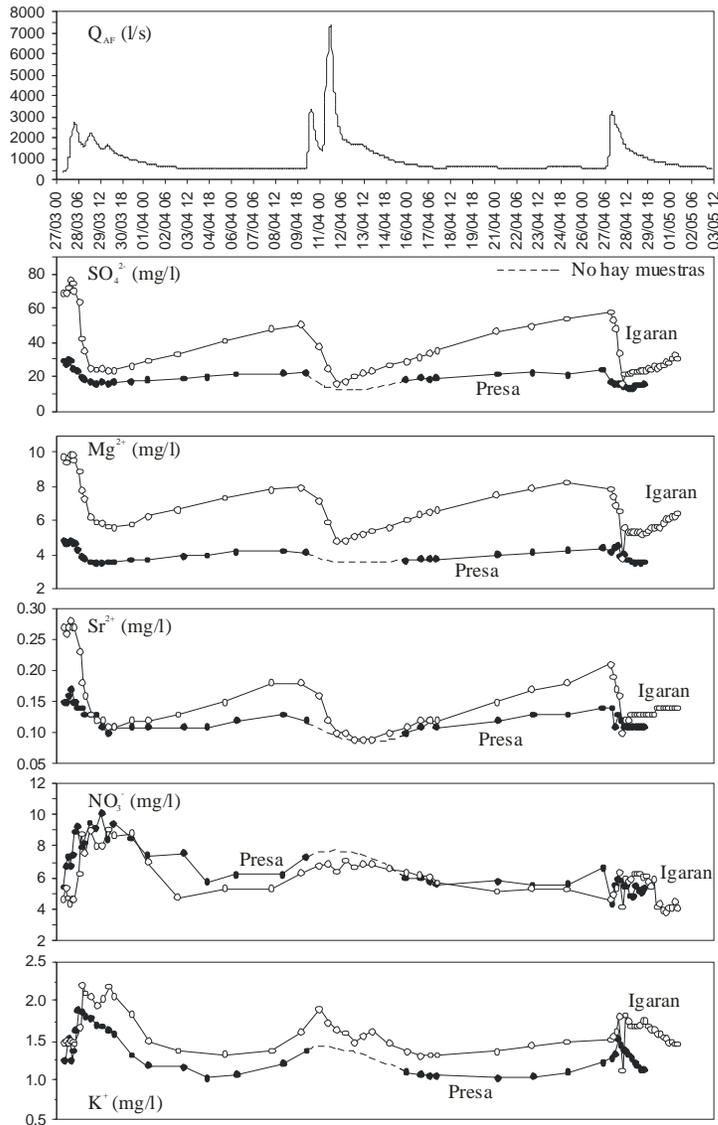
Un seguimiento detallado del quimismo, cada 3 horas pasando posteriormente a una frecuencia de 4 horas, se llevó a cabo también en el manantial de Igaran, y simultáneamente en la presa de la Regata Albiztur durante el período 27 de Marzo a 30 de Abril de 2000. La evolución temporal de las concentraciones en los elementos mayoritarios, en ambos puntos, y el hidrograma registrado en la estación de aforos de la presa se recogen en la figura 4.55.

En ese intervalo de tiempo se registran tres episodios diferenciados de crecida, con caudales máximos en la estación de 2800 l/s, 7400 l/s y 3300 l/s, respectivamente, lo que refleja una situación, en general, de aguas medias. La primera crecida se produce como respuesta a las precipitaciones, registradas en la estación de Erdoizta, caídas en forma de nieve (75 mm) durante los días 27 y 28 de Marzo. Las lluvias de los días 9, 10, 11 y 12 de Abril (72 mm) provocan la segunda crecida mientras que la última es consecuencia de la lluvia del día 27 de Abril (41 mm).

La respuesta química en cada punto es idéntica para las tres situaciones de crecida, y, además, bastante similar entre ambos, aunque con diferente rango de fluctuación de concentraciones. También en ambos puntos de muestreo se aprecia clara similitud en el comportamiento del sulfato, magnesio, calcio, estroncio y bicarbonato, por un lado, y del nitrato y potasio, por otro, en correspondencia a los marcadores internos y externos de las aguas.

Las crecidas, todas ellas, originan una notable, y rápida, dilución en los contenidos de los elementos internos. Esta dilución es mucho más evidente en el manantial Igaran (la presa de la regata ésta afectada por la descarga de la surgencia Salubita). En el detalle se puede observar que la dilución es menor al principio, disminución lenta de las concentraciones, para acelerarse posteriormente. Este cambio viene a coincidir con la segunda crecida observable en cada una de las tres situaciones de crecidas existentes; incluso en la crecida del 27 de Abril se puede observar un segundo pico.

Esto indicaría que si bien la primera crecida de un periodo lluvioso origina una cierta dilución en los elementos internos, por efecto de la llegada rápida a la surgencia de la componente de flujo rápido, la dilución es más notable en las sucesivas crecidas de caudal, o lo que es lo mismo, la componente rápida del flujo es más predominante en crecidas sucesivas que en crecidas aisladas.



*Figura 4.55: Evolución hidroquímica de los elementos mayoritarios de las aguas de la presa (estación de aforos) de la Regata Albiztur y de las aguas de la surgencia de Igaran durante el período comprendido entre el 27 de Marzo de 2000 y el 3 de Mayo de 2000. El primer gráfico muestra, en ordenadas, los caudales en la estación de aforos y en abscisas las fechas, de tal forma que la primera cifra representa el día, la segunda el mes y la tercera la hora.*

La máxima dilución se produce siempre en la parte media de la decrecida que corresponde al último pico de la secuencia. A partir de este momento los contenidos inician su recuperación, coincidiendo con la recesión entre crecidas, para repetir la evolución anterior ante nuevas crecidas. Esa recuperación es debida al progresivo predominio en la surgencia del flujo de base, propio, del acuífero, y tiende a alcanzar los contenidos iniciales para cada elemento considerado.

En la presa la marcha de los elementos internos es similar, si bien las variaciones aquí son más suaves. Los contenidos de las aguas de Igaran y de la presa tienden a coincidir justamente en los momentos de mayor dilución, lo cual es indicativo de dos cuestiones: por un lado, que en esos momentos, puntuales, la presencia en la regata de las aguas procedentes de Igaran es, en términos relativos, importante, y, por otro, que las aguas descargadas por Salubita, de influencia notable en la presa, presentan un quimismo parecido al que en esos momentos tienen las aguas de Igaran, lo cual se debe al efecto homogeneizador del quimismo de todas las aguas en momentos de fuerte dilución.

En los periodos de recuperación entre crecidas es clara y evidente la influencia mayoritaria en la regata de las aguas procedentes de Salubita, de menor mineralización ahora que las de Igaran, de manera que el incremento de los contenidos en las aguas de la presa se da a costa de las aguas de Salubita. Solamente al final de las recesiones, con caudales en la presa inferiores a los 700-800 l/s, se produce infiltración de aguas de la regata, procedentes de Igaran, en el acuífero (apartado 4.3.1), de forma que las propias aguas descargadas por Salubita muestran ya un cierto incremento de la mineralización, que incide en las aguas de la presa.

Los elementos de origen externo, nitratos y potasio, sin embargo, evidencian una evolución claramente contraria a la hasta ahora comentada, en los dos puntos de control. Sus contenidos aumentan en los momentos de crecida y, además, su permanencia con contenidos altos es más prolongada en el tiempo. Este hecho, ya observado en los apartados anteriores (4.9.1 y 4.9.2) es indicativo del empuje de estos elementos desde el exterior producido por la componente rápida del flujo en momentos de precipitaciones, de manera que el inicio del incremento de sus contenidos, coincidente con el inicio del decremento en los contenidos de los elementos internos, sitúa el momento de llegada del flujo rápido. Al no contar con el hidrograma del manantial Igaran, y tratándose de tiempos de tránsito muy cortos, pocas horas, no es posible precisar esa llegada.

Por último, hay otra observación importante a realizar. El nitrato es el único elemento (también sodio y cloro) entre los analizados que sistemáticamente presenta mayores contenidos en las aguas de la presa que en las de Igaran. La explicación a esta observación es que las aguas del manantial Salubita deben de tener contenidos en nitratos mayores que las procedentes de Igaran,

cuestión ésta que ya había sido puesta de manifiesto en el apartado 4.9.1 en donde se relacionaba este elemento con, sobre todo, la depresión de Bidania.

#### **4.10. ESTUDIO DE LAS SERIES CRONOLÓGICAS**

El hidrograma de Salubita deducido del hidrograma de la estación de aforos (Regata Albiztur) ha sido, en este caso, la herramienta utilizada en el estudio de las series cronológicas. Se han estudiado las curvas de decrecida y recesión de cinco años hidrológicos (1985-86, 1986-87, 1988-89, 1997-98 y 1998-99) lo que ha permitido posicionar el Sistema Kárstico de Salubita en el esquema de clasificación propuesto por MANGIN (1970, 1975), pero en un contexto regional.

Se ha realizado también el análisis correlatorio y espectral de los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99, para los caudales de la estación de aforos así como para los caudales del manantial de Salubita. Para ambos casos se han considerado las precipitaciones registradas en la estación de Erdoizta.

El estudio de las series cronológicas ha puesto de manifiesto la importancia del Sistema Kárstico de Salubita debido a su capacidad reguladora. Este estudio se ha llevado a cabo con criterio crítico y tratando de establecer relaciones con lo previamente deducido a partir de otras técnicas de investigación.

#### **ANÁLISIS DE LA CURVA DE RECESIÓN**

El análisis de la *curva de recesión* forma parte del estudio de las series cronológicas, aunque haciendo hincapié en la parte más tardía del hidrograma, es decir, en el final del año hidrológico. Esta curva corresponde a la parte decreciente del hidrograma que se extiende desde la última punta de crecida importante hasta el comienzo de la siguiente crecida de entidad, que suele coincidir con la primera crecida importante del año hidrológico siguiente. En esta curva (figura 4.56) se aprecian dos intervalos (la curva de *decrecida* y la de *agotamiento*), cada uno de los cuales posee un especial significado acerca de la hidrodinámica del sistema kárstico y de los subsistemas que lo componen. Este especial significado permite caracterizar esos subsistemas y describir su estructura en comparación con otros sistemas cuya estructura es bien conocida.

Este tipo de análisis ha sido y sigue siendo una importante herramienta en el estudio de los sistemas kársticos (MANGIN, 1970, 1975; DROGUE, 1972; MILANOVIC, 1981; BONACCI, 1987; GRASSO y JEANNIN, 1994; PADILLA et al., 1994; JEANNIN y SAUTER, 1998). En el País Vasco este análisis ha sido utilizado en regiones kársticas por ANTIGÜEDAD, (1986, 1997), MORALES (1991), LLANOS (1992) y ANTIGÜEDAD et al. (1997).

Se ha realizado el análisis de las curvas de recesión de cinco ciclos diferentes correspondientes a los caudales del manantial de Salubita. El método concreto utilizado para tal fin ha sido el propuesto por MANGIN (1970, 1975) cuyas bases se comentan, de forma abreviada, a continuación. En la interpretación se ha tenido en cuenta la reflexión expuesta por GRASSO y JEANNIN (1994) en el sentido de que la descomposición de la curva de recesión en distintos tramos con sus respectivos coeficientes, da una idea de la importancia de los diferentes subsistemas del acuífero, pero sin precisar la estructura correspondiente.

Por su parte, KIRALY y MOREL (1976) demuestran, mediante simulación numérica, que las exponenciales resultantes de la descomposición de las curvas de recesión no corresponden, en realidad, necesariamente a dominios del acuífero de permeabilidades diferentes, sino, sobre todo, a fenómenos de cambio de flujo entre la red de conductos muy transmisiva y los volúmenes de roca poco permeable.

#### **MÉTODO PROPUESTO POR MANGIN (1970, 1975)**

La base del método radica en la asunción de que un sistema acuífero kárstico está constituido por dos subsistemas: el *subsistema infiltración* (*sous-système infiltration*) y el *subsistema saturado* (*sous-système karst noyé*). El primero corresponde a la zona no saturada; su caudal de salida se representa por  $q^*$ . El segundo subsistema corresponde a la zona saturada, cuyo caudal de salida en el manantial es  $Q_t$ . Cualquier aumento de caudal (crecida) observado en la surgencia significa que  $q^* > Q_t$ . Sin embargo, en la decrecida  $q^* < Q_t$  y en el pico de crecida  $q^* = Q_t$ . Cuando  $q^* = 0$  (sistema no influenciado), es decir, una vez que la infiltración ha cesado, se asume que el agotamiento ha comenzado.

Como se observa en la figura 4.56, la curva de recesión se compone de dos partes, una donde el caudal disminuye rápidamente (decrecida) y otra donde el caudal va disminuyendo lentamente (agotamiento). La forma de la curva de recesión depende de la forma en que se produzca la infiltración (decrecida), lo cual está directamente relacionado con el tipo (lluvia, nieve, hielo...), cantidad e intensidad de la precipitación, así como de las condiciones actuales de la zona saturada, que dependen de las condiciones antecedentes.

El método propuesto por MANGIN consiste en modelizar la curva de recesión mediante la siguiente ecuación:

$$Q_t = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \epsilon t} + Q_{R0} e^{-\alpha t} \quad (1)$$

donde,

$Q_t$ : caudal observado en un tiempo  $t$  (l/s).

$t$ : tiempo (días) contado a partir del momento del pico de la crecida ( $t=0$ ).

$\alpha$ : coeficiente de agotamiento (días<sup>-1</sup>).

$Q_{R0}$ : valor extrapolado (es una aproximación a la realidad) para el flujo base en la punta de la crecida (l/s).

$q_0$ : valor de  $q^*$  cuando  $t=0$  (l/s).

$\eta$ : coeficiente de velocidad de la infiltración (días<sup>-1</sup>). Caracteriza la duración de la infiltración. Se obtiene mediante  $\eta=1/t_i$ , siendo  $t_i$  la duración del tránsito del agua a través de la zona no saturada, medida a partir del momento del pico de crecida. A mayor  $\eta$  menor tiempo de influencia.

$\varepsilon$ : coeficiente de heterogeneidad que caracteriza la concavidad de la curva de recesión (días<sup>-1</sup>).

El primer término de esta relación ( $q^*$ ) define la curva de decrecida (traduce el efecto en la surgencia de la infiltración, es decir, la función infiltración modulada por su transferencia a través de la zona no saturada) y el segundo la curva de agotamiento (vaciado de la zona saturada del sistema kárstico). La curva de agotamiento solo tiene significado físico real a partir del momento en el que  $q^*=0$  ( $t=t_i$ ); a partir de ese momento son las partes capacitivas del sistema las únicas que aseguran el caudal en la surgencia.

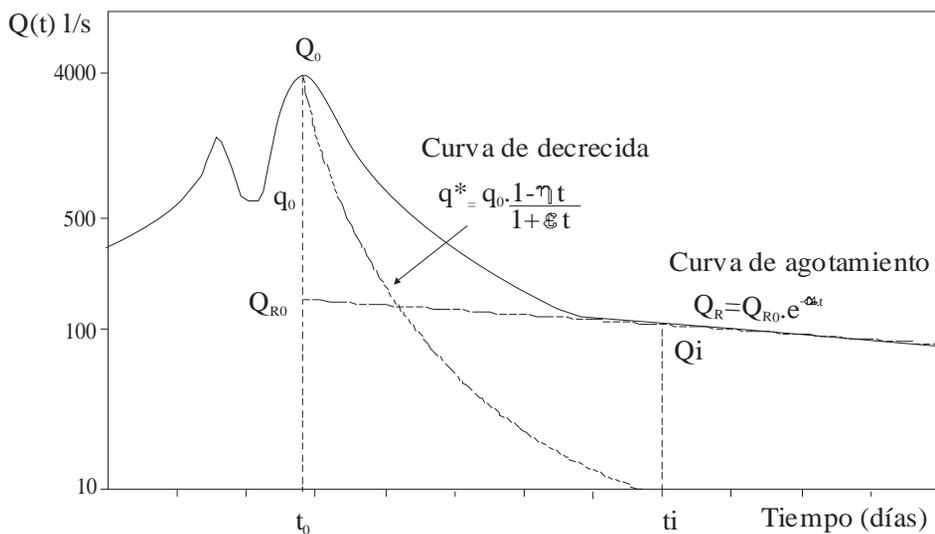


Figura 4.56: Descomposición de la curva de recesión, de acuerdo con MANGIN (1970, 1975).

### CURVA DE AGOTAMIENTO

La curva de agotamiento está definida por el coeficiente de la ley de vaciado de MAILLET que corresponde al segundo término de la expresión (1):

$$Q_R t = Q_{R0} e^{-\alpha t} \quad (2)$$

donde  $\alpha$  es el coeficiente de agotamiento que se obtiene de la curva de agotamiento observada. Para su obtención es necesario representar el hidrograma correspondiente a la curva de recesión en gráfico semilogarítmico (los caudales  $Q(t)$  en escala logarítmica y el tiempo  $t$  en escala aritmética). Una vez que se ha entrado en el agotamiento el primer término ( $q^*(t)$ ) es nulo. La pendiente de la recta,  $\alpha$ , se obtiene mediante la siguiente relación:

$$\alpha = \frac{\log Q_1 - \log Q_2}{0.4343(t_2 - t_1)} \quad (3)$$

### **CURVA DE DECRECIDA**

MANGIN propuso ajustar a la curva de decrecida una de este tipo, empírica, que corresponde al primer término de la expresión (1):

$$q^*(t) = q_0 \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad (4)$$

donde  $\varepsilon$ , como ya se ha comentado con anterioridad, es el coeficiente de heterogeneidad que caracteriza la concavidad de la curva de recesión y se calcula mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{q_0 - q^*(t)}{q^*(t)} - \frac{\eta q_0}{q^*(t)} \quad (5)$$

Cuando  $\varepsilon$  es grande indica un suavizamiento de la decrecida después de un decrecimiento muy rápido del caudal en la surgencia. El valor de  $\varepsilon$  que se suele elegir es aquel que corresponde en la ecuación (5) a un tiempo  $t$  en el que  $Q_t = q_0/2$ .

En la práctica la curva  $q^*(t)$  puede calcularse por diferencia entre  $Q(t)$  (el hidrograma observado) y  $Q_R(t)$  (la curva de agotamiento).

Finalmente, para poder comparar las curvas de decrecida de los diferentes hidrogramas MANGIN utiliza la función  $y(t)$  que se expresa como:

$$y(t) = \frac{1 - \eta t}{1 + \varepsilon t} \quad (6)$$

La función  $y(t)$  cuyos valores oscilan entre 0 (cuando  $t=t_i$ ) y 1 (cuando  $t=0$ ), es independiente de la amplitud de la crecida. Para un mismo sistema existen distintas funciones  $y(t)$  según los períodos de recesión considerados, que sirven para diferenciar comportamientos del acuífero en función del tipo de aporte y de las condiciones del acuífero en cada momento. Las circunstancias concretas en las que se produce cada período de recesión modifican la forma en la que las precipitaciones van a ser moduladas a su paso por el sistema y es esa forma lo que la función  $y(t)$  representa.

### **CLASIFICACIÓN DE LOS SISTEMAS KÁRSTICOS**

Uno de los principales objetivos de este método es poder clasificar los diferentes sistemas kársticos a partir de su funcionamiento. Con el fin de simplificar esta clasificación, MANGIN (1970, 1975) caracteriza cada sistema en función de dos parámetros,  $i$  y  $k$ , que caracterizan, respectivamente, la forma de la decrecida y la importancia de la zona saturada.

El parámetro  $i$  se define como el valor de  $y(t)$  para un valor de  $t$  (tiempo) de 2 días y permite caracterizar un sistema mediante la forma de su curva de decrecida media, expresando la importancia del retraso en la surgencia de las aguas de infiltración. Según MANGIN, los sistemas para los que  $i > 0.5$  son complejos y de grandes dimensiones; para  $0.25 < i < 0.5$  el sistema sufre retardos o desfases importantes en los aportes; y para  $i < 0.25$  el sistema posee una red de drenaje muy bien desarrollada.

El parámetro  $k$  está definido como la relación entre el volumen dinámico ( $V_d$ ) y el volumen de tránsito anual ( $V_t$ ):

$$k = \frac{V_d}{V_t} \quad (7)$$

El parámetro  $k$  da idea de la capacidad del sistema para regularizar el caudal de tránsito. Cuando  $k=1$  el poder regulador del sistema es máximo mientras que  $k=0$  cuando su poder regulador es nulo. Según MANGIN (1970, 1975) los acuíferos kársticos suelen presentar un parámetro  $k < 0.5$  (en el caso de los porosos  $k > 0.5$ ) y los que presentan  $k < 0.1$  poseen un poder regulador muy escaso.

$V_d$  es el volumen de agua presente en la zona saturada del karst (figura 4.61) cuya circulación determina las variaciones de caudal en la surgencia. Este volumen ( $V_d$ ) no corresponde exactamente a la totalidad de la zona saturada, pero puede considerarse como una aproximación de volumen de saturación por encima de la cota de la surgencia, en el momento ( $t$ ) considerado. El volumen dinámico se calcula de la siguiente forma:

$$V_d = \int_0^{\infty} Q_i e^{-\alpha t} \quad (8)$$

donde  $Q_i$  es el caudal al inicio del agotamiento real ( $t_i$ ) (figura 4.56). Si  $Q_i$  está expresado en  $m^3/s$  y  $t$  en días la relación (8), con  $V_d$  en  $hm^3$ , se convierte en:

$$V_d = \frac{Q_i}{\alpha} * 86400 * 10^{-6} \quad (9)$$

El volumen de tránsito anual,  $V_t$  ( $hm^3$ ) con  $Q$  en  $m^3/s$  se calcula como

$$V_t = Q_{\text{medio}} * 86400 * 365 * 10^{-6}$$

A partir de los parámetros  $i$  y  $k$ , MANGIN establece un principio de clasificación (figura 4.60) en el que se pueden individualizar 5 dominios. El I ( $k < 0.1$ ,  $i < 0.25$ ) corresponde a sistemas muy karstificados, sobre todo en el subsistema saturado; red espeleológica muy bien desarrollada. El dominio II ( $0.1 < k < 0.5$ ,  $i < 0.25$ ) es similar al I aunque con un mayor poder de regulación debido a la existencia de una zona saturada importante. En el dominio III ( $k < 0.5$ ,  $0.25 < i < 0.5$ ) la karstificación es mayor en el subsistema de infiltración con retardos en la alimentación debido, por ejemplo, a la presencia de zonas no kársticas. El IV ( $k < 0.5$ ,  $i > 0.5$ ) es el dominio de los sistemas complejos, y el V ( $k > 0.5$ ) el de los sistemas muy poco o nada karstificados.

#### ***ANÁLISIS DE LAS CURVAS DE RECESIÓN DEL MANANTIAL DE SALUBITA***

Se han analizado las curvas de recesión de cinco episodios de decrecida que corresponden a otros tantos años hidrológicos diferentes (figura 4.57). En los cinco casos las curvas de recesión abarcan períodos superiores a 4 meses. El inicio de la recesión se da, prácticamente, a primeros de Mayo de cada año. El análisis se hace ahora considerando la curva de recesión en su conjunto, tratando de ajustar una única recta de agotamiento a cada curva. Un análisis más detallado se hace posteriormente (apartado 4.10.1.5).

Los caudales del manantial de Salubita utilizados para este análisis son los deducidos a partir de los hidrogramas de la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur aguas debajo de la surgencia (apartado 4.3.1). Los datos utilizados corresponden a las decrecidas producidas,

- a partir del 30 de Abril 1986 (año hidrológico 1985-86)
- a partir del 13 de Abril de 1987 (año hidrológico 1986-87)
- a partir del 1 de Mayo de 1989 (año hidrológico 1988-89)
- a partir del 4 de Mayo de 1998 (año hidrológico 1997-98)
- a partir del 21 de Mayo de 1999 (año hidrológico 1998-99)

**RESULTADOS OBTENIDOS**

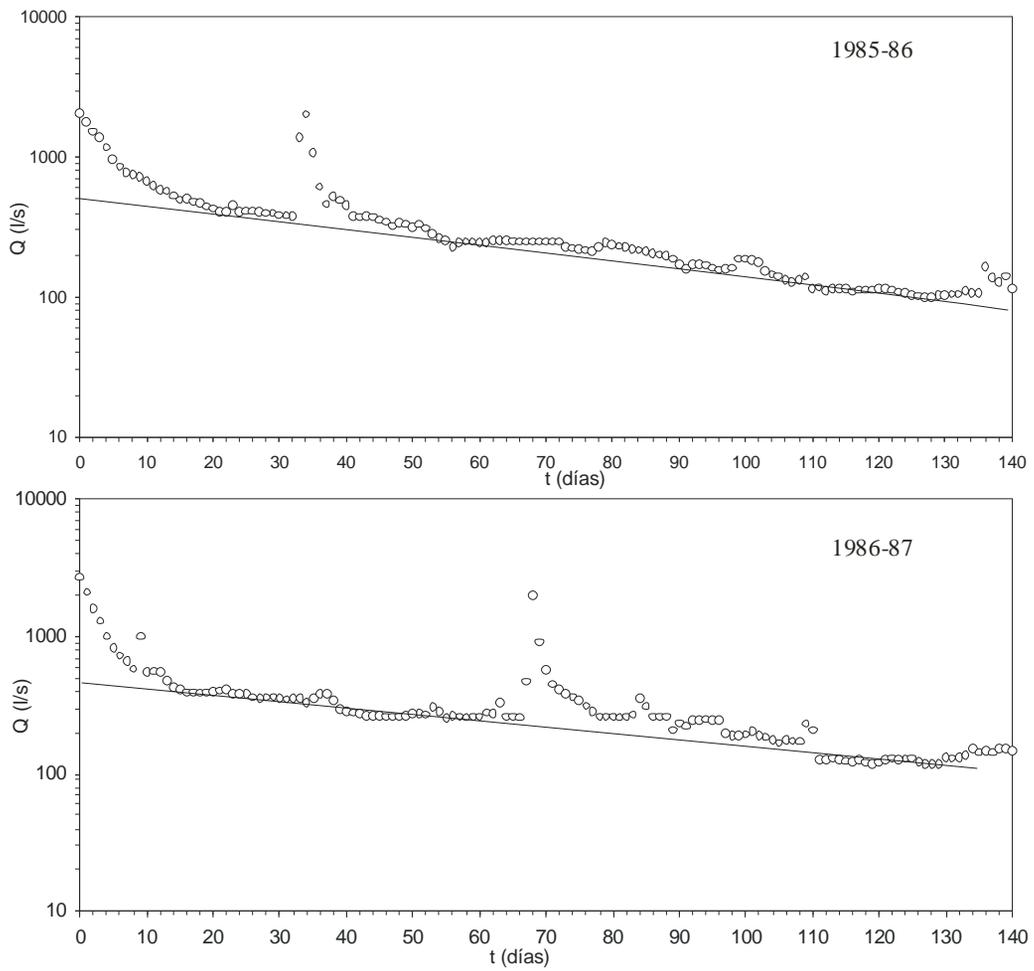
Las figura 4.57 muestra las curvas de recesión obtenidas para cada período y los datos obtenidos de su análisis se muestran en la tabla 4.19. Los volúmenes de tránsito (Vd) que aparecen corresponden a caudales medios anuales en la surgencia de Salubita de (l/s): 752 (1985-86), 674 (1986-87), 491 (1988-89), 497 (1997-98) y 753 (1998-99).

AÑO HIDROL	P* (mm)	Q <sub>0</sub>	Q <sub>R0</sub>	q <sub>0</sub>	Q <sub>i</sub>	t <sub>i</sub>	α	η	ε	Vd (10 <sup>6</sup> )	Vt (10 <sup>6</sup> )	i	k
1985-86	278	2054.3	590	1464.3	456.1	18.0	0.0143	0.055	5.5	2.7	23.7	0.456	0.114
1986-87	211	2731.6	495	2236.6	411.8	16.0	0.0115	0.062	2.6	3.04	21.2	0.308	0.143
1988-89	281	1823.8	350	1473.8	295.3	17.0	0.0100	0.059	2.8	2.5	15.4	0.205	0.162
1997-98	232	3499.5	400	3099.5	212.4	56.0	0.0113	0.017	2.1	1.6	15.6	0.151	0.102
1998-99	97	979.6	190	789.6	140.2	46.0	0.0066	0.021	2	1.8	23.7	0.504	0.077
MEDIA		2217.8	405.0	1812.8	303.2	30.60	0.0107	0.043	3.0	2.3	19.8	0.325	0.120

**Tabla 4.19: Resultados de los análisis de las curvas de recesión del manantial de Salubita. Los caudales se dan en l/s, el tiempo en días y el volumen dinámico y de tránsito en m<sup>3</sup>. P\*: suma de la precipitación registrada durante los últimos 30 días anteriores al inicio de la recesión. Ver significado de algunos parámetros en la figura 4.56.**

En la tabla 4.19 se han incluido también los datos correspondientes a la suma de la precipitación registrada durante los últimos 30 días anteriores al inicio de la recesión. Para los tres primeros años hidrológicos de la tabla se disponía de las precipitaciones registradas en la estación de Berastegi (307 mm para 1985-86, 235 mm para 1986-87 y 312 mm para 1988-89). Puesto que la precipitación de los dos años siguientes corresponde a los datos de la estación de Erdoizta, para que las precipitaciones registradas en Berastegi sean comparables a las de Erdoizta, se les restó un 10% (apartado 3.1) obteniéndose los valores de la tabla.

A excepción del año hidrológico 1998-99 ( $\alpha=0.0066 \text{ d}^{-1}$ ), el resto muestra coeficientes de agotamiento ( $\alpha$ ) que oscilan entre  $0.0100 \text{ d}^{-1}$  y  $0.0143 \text{ d}^{-1}$  (tabla 4.19) facilitando un valor medio de  $\alpha$  de  $0.0107 \text{ d}^{-1}$ . De acuerdo con los valores de la tabla, el valor mínimo de  $\alpha$  coincide con el valor mínimo de la precipitación (P\*) registrada durante los últimos 30 días anteriores al inicio de la recesión. Al parecer únicamente durante este año se ha llegado a una situación en la que se han activado las zonas del sistema que poseen un menor valor de  $\alpha$ . De hecho, es el estiaje más pronunciado (de menores caudales) históricamente observado. La figura 4.58 muestra la relación existente entre el coeficiente de agotamiento ( $\alpha$ ) y precipitación (P\*).



**Figura 4.57:** Curvas de recesión correspondientes a los años hidrológicos 1985-86 y 1986-87.

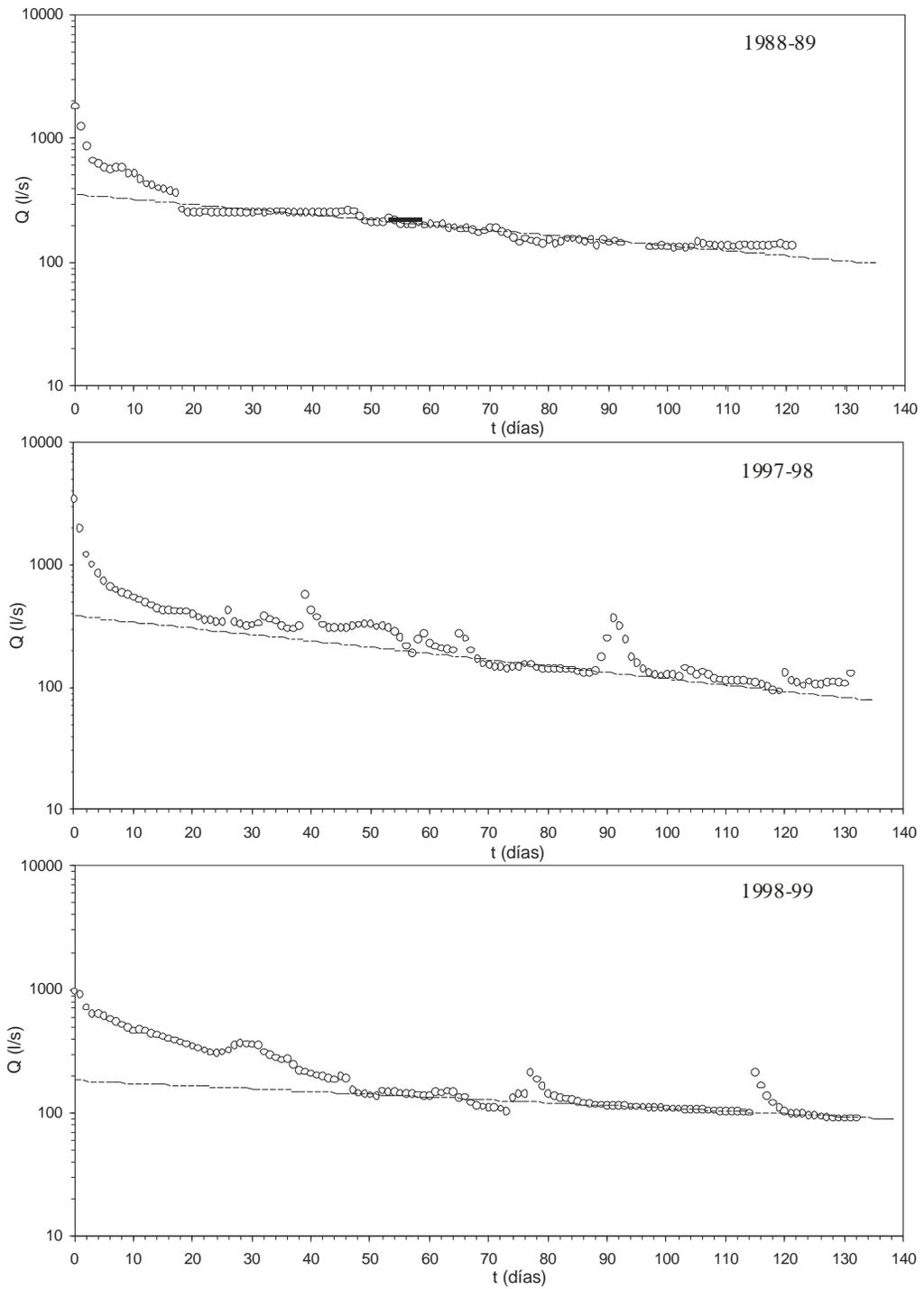
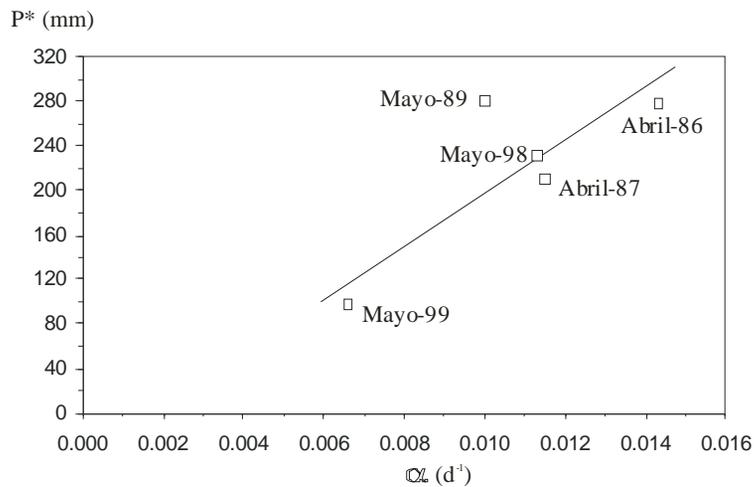


Figura 4.57 (cont): Curvas de recesión correspondientes a los años hidrológicos 1988-89, 1997-98 y 1998-99.



**Figura 4.58: Relación entre el coeficiente de agotamiento ( $\alpha$ ) y la precipitación ( $P^*$ ) registrada durante los últimos 30 días anteriores al inicio de la recesión.**

La figura 4.58 muestra una relación lineal entre  $\alpha$  y  $P^*$  donde a medida que aumenta la precipitación ( $P^*$ ) aumenta el coeficiente de agotamiento ( $\alpha$ ). El punto de menores valores en ambos parámetros corresponde a la recesión del año 1998-99 aun siendo el segundo año más lluvioso (1488 mm) de los cinco considerados (en 1985-86 1524 mm, en 1986-87 1393 mm, en 1988-89 1030 mm y en 1997-98 1268 mm). Esto se debe al reparto de la lluvia a lo largo del año (tabla 4.20). A tenor de los datos de la tabla, durante la primavera y el verano del año hidrológico 1998-99 se registró únicamente el 30% de la lluvia total anual, lo que produjo un estiaje especialmente severo en el sistema, que se traduce en un coeficiente de agotamiento más bajo ( $0.0066 d^{-1}$ ).

	Primavera	Verano	Otoño	Invierno
1985-86	29	11	17	43
1986-87	27.5	12.8	21	38.7
1988-89	37.6	19.7	21	21.7
1997-98	26.4	21	33.6	19
1998-99	16	14	44	26

**Tabla 4.20: Distribución estacional de la lluvia (%) durante los cinco años hidrológicos considerados.**

Por otra parte, el punto correspondiente al año 1988-89 aparece desplazado hacia la izquierda (figura 4.58) ya que, aun siendo el año más seco (1030 mm) de los cinco,  $\alpha$  es más bajo ( $0.0100 d^{-1}$ ) de lo esperado, pudiendo esto estar relacionado con que la mayor parte de la lluvia caída a lo largo del año lo hace durante la primavera, en el momento anterior a la recesión.

Durante el análisis de las curvas de recesión se han realizado también comparaciones con las precipitaciones caídas 60, 90 y 120 días antes del inicio de la decrecida para cada año.

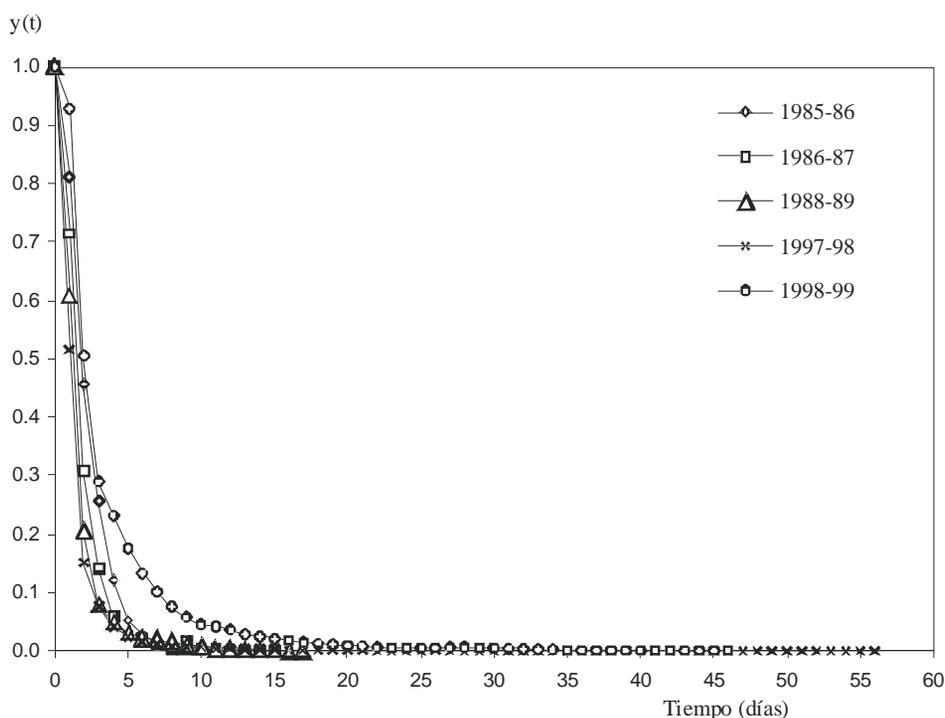
La comparación de esas precipitaciones con los coeficientes de agotamiento ha permitido verificar que cuanto mayor es el período considerado menor es la relación entre las precipitaciones y  $\alpha$ . Se pone así de manifiesto que son las últimas precipitaciones anteriores a la recesión las que, fundamentalmente, condicionan el agotamiento del sistema.

Los valores del coeficiente de velocidad de infiltración  $\eta$  oscilan entre  $0.017 \text{ d}^{-1}$  y  $0.062 \text{ d}^{-1}$  facilitando un promedio de  $0.043 \text{ d}^{-1}$ , lo que indica una influencia de la infiltración, de entre 16 y 56 días, aproximadamente (tabla 4.19). El coeficiente de heterogeneidad  $\epsilon$ , por su parte, muestra un valor medio de  $3 \text{ d}^{-1}$  con un máximo de  $5.5 \text{ d}^{-1}$  y un mínimo de  $2 \text{ d}^{-1}$ . A la vista de los datos de la tabla no parece que exista relación, clara al menos, entre estos parámetros y las precipitaciones antecedentes.

El volumen dinámico (Vd) medio obtenido para el Sistema Kárstico de Salubita, al comienzo del agotamiento real, es de  $2.3 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  con un mínimo de  $1.6 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  y un máximo de  $3.04 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ . El volumen de agua que atraviesa el sistema (Vt) a lo largo del año oscila entre  $15.4 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  y  $23.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  con una media de  $19.9 \cdot 10^6 \text{ m}^3$  (caudal medio anual en Salubita de 630 l/s), con variación entre 491 y 753 l/s. En general, el volumen dinámico supone un 11.6% del volumen de tránsito.

El coeficiente  $k$  (Vd/Vt), por su parte, oscila entre 0.102 y 0.162 a excepción de la recesión del año hidrológico 1998-99 donde  $k < 0.1$  (0.077), lo que indica un menor poder regulador. Esta singularidad se debe al hecho de que, como ya se ha comentado, el año hidrológico 1998-99 fue el segundo más húmedo de los cinco considerados, sobre todo en otoño e invierno (tabla 4.20), lo que se traduce en un volumen de tránsito (Vt) elevado ( $23.7 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ). A su vez, el bajo valor de  $Q_i$  (140.2 l/s) da como resultado un volumen dinámico bajo ( $1.8 \cdot 10^6 \text{ m}^3$ ) que supone únicamente el 7.6% de Vt.

El coeficiente  $i$  muestra valores comprendidos entre 0.151 y 0.504 con un valor medio de 0.325. Los valores más altos de  $i$  (0.456 y 0.504), que caracterizan la forma de la decrecida, menos rápida en este caso, coinciden con los años más lluviosos (1985-86 y 1998-99). La figura 4.59 muestra las curvas de decrecida ajustadas de los cinco ciclos considerados. Todas ellas se agrupan hacia la parte izquierda del gráfico describiendo una fuerte pendiente, aunque ésta es ligeramente inferior en el caso de los dos años más húmedos (1985-86 y 1998-99). Esta diferencia se debe, probablemente, a que además de ser los años más lluviosos, la precipitación en ambos casos se concentra en ciertos períodos (en 1985-86 en invierno y en 1998-99 en otoño), de manera que en el período de la decrecida generalizada las precipitaciones son menores (primavera y verano).



**Figura 4.59:** Curvas modelizadas de las decrecidas producidas en el manantial de Salubita en los cinco períodos considerados.

**POSICIÓN DEL SISTEMA KÁRSTICO DE SALUBITA EN EL MARCO DE LA CLASIFICACIÓN DE MANGIN**

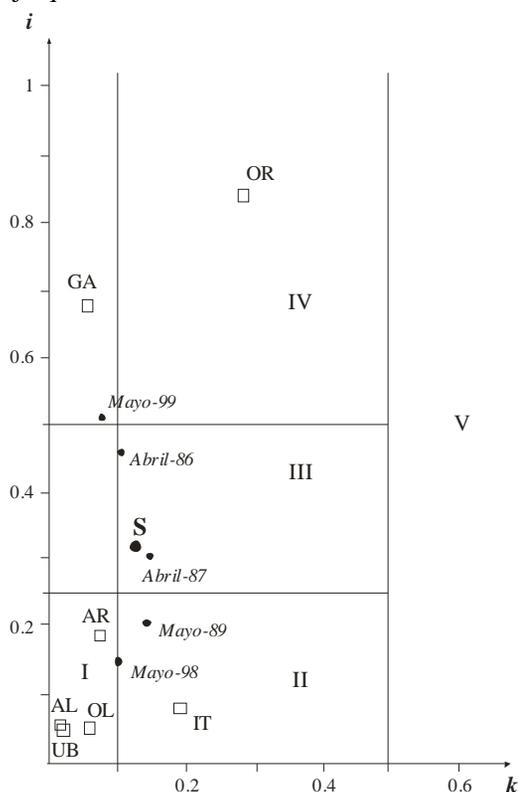
La figura 4.60 permite comparar el Sistema Kárstico de Salubita con varios sistemas kársticos del País Vasco estudiados por ANTIGÜEDAD (1986) y MORALES (1991), cuya estructura es bien conocida. En la figura se muestran varios sistemas kársticos (Aldabide, Argin, Olalde, Orue, Garai, Ubegi e Iturrioz), prácticamente todos ellos relacionados con materiales carbonatados urgonianos, cuya posición en el diagrama corresponde a tres dominios específicos caracterizados por la estructura del acuífero.

De acuerdo con los valores obtenidos para  $i$  y  $k$  (tabla 4.20) a partir de los cinco ciclos considerados, se han representado los puntos obtenidos por separado reflejando las diferentes condiciones hidrogeológicas del Sistema Kárstico de Salubita en cada caso. También se ha incluido la situación del Sistema Kárstico de Salubita (marcado con una **S**) en el seno de esta clasificación representando los valores medios de  $i$  y  $k$  obtenidos de los cinco ciclos estudiados.

Según esta clasificación, el Sistema Kárstico de Salubita se encuentra, en general, en el dominio III caracterizado por un buen desarrollo de la karstificación en la zona no saturada y por el

retardo de las aguas de infiltración. La existencia en la cuenca drenada por el manantial de Salubita de materiales no karstificados (areniscas, lutitas, margas, depósitos aluviales) y el buen desarrollo del epikarst, ya comentado en el apartado 4.3.1, explican la situación del sistema kárstico de Salubita en el marco de la clasificación, y conceptualización, propuesta por MANGIN (1970, 1975).

La figura 4.60 muestra que las condiciones hidrogeológicas del Sistema Kárstico de Salubita cambian de un ciclo a otro haciendo que su comportamiento varíe entre los dominios II, III, e, incluso, IV. Como se puede ver, los años de menor precipitación (1988-89 Mayo-89; 1997-98 Mayo-98) se encuentran en la parte más baja de la figura, en el dominio II que caracteriza, según MANGIN (1970, 1975), sistemas muy karstificados, sobre todo en la zona saturada, y un poder de regulación, en general, bajo. Los dos años hidrológicos más lluviosos (1985-86 Abril-86; 1998-99 Mayo-99) se encuentran desplazados hacia la parte media-alta del hidrograma, entre los dominios III y IV según el mismo autor, es decir, propio de sistemas con retardos en la alimentación y, en cualquier caso, de funcionamiento más complejo que en el dominio II.



**Figura 4.60: Situación del Sistema Kárstico de Salubita (S) en el esquema de clasificación propuesto por MANGIN (1970, 1975). Los círculos pequeños representan la situación del Sistema Kárstico de Salubita bajo condiciones diferentes reflejadas por los cinco ciclos considerados. El círculo grande representa los valores medios. Los cuadrados representan varios sistemas kársticos del País Vasco (AL: Aldabide; AR: Argin; OL: Olalde; OR: Orue; GA: Garai; UB: Ubegi; IT: Iturrioz) estudiados por ANTIGÜEDAD (1986) y MORALES (1991).**

A la vista de los parámetros reflejados en esa figura es obvio que  $k$  varía muy poco siendo  $i$  el parámetro que condiciona los cambios de funcionamiento observados. Es por tanto la forma en la que se produce la decrecida ( $i$ ) lo que establece la diferencia, y esa forma, como se ha comentado un poco antes, está en relación con el régimen pluviométrico previo al comienzo de la decrecida, más que con el total de lluvias anual. En consecuencia, es el régimen de lluvias de Marzo-Mayo el que determinará la forma de la decrecida, incluyendo el agotamiento.

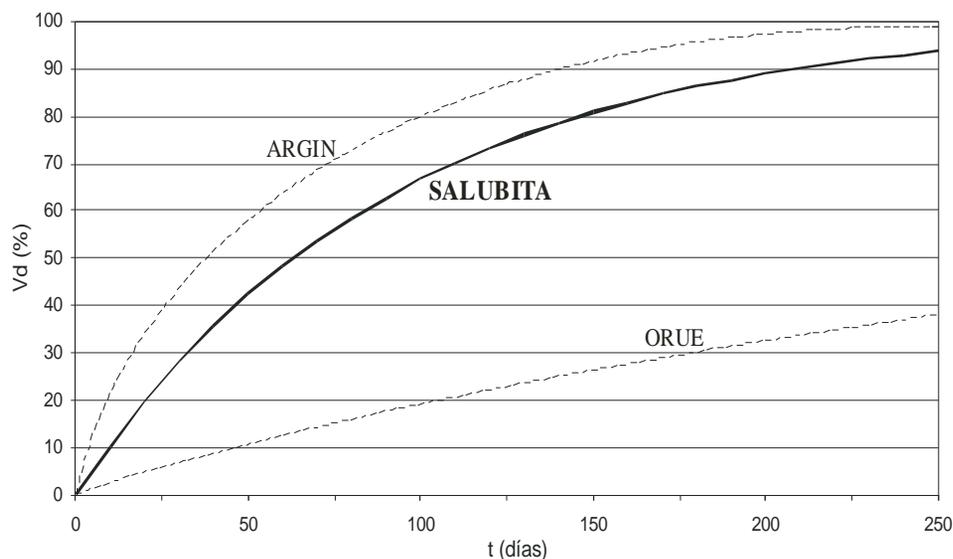
Sin embargo, el poder regulador del acuífero ( $k$ ), es decir, la relación que hay entre el volumen dinámico al comienzo del agotamiento real y el volumen anual de tránsito, parece mantenerse dentro de un margen de variación más estrecho. Lamentablemente, la falta de datos de lluvias medidas en el propio área de estudio, y de datos de evolución piezométrica, no permiten profundizar más en estas relaciones.

Una reflexión similar realizan GRASSO y JEANNIN (1994) en un estudio crítico sobre los métodos de análisis de la respuesta global de surgencias kársticas, aplicado al sistema de Milandrine (Jura suizo). La situación de las cinco recesiones analizadas en el diagrama  $i$ - $k$  de MANGIN es bastante dispersa, sin poder incluir el sistema en un único dominio, es decir, similar a lo que ocurre con el Sistema de Salubita. También al igual que en nuestro caso, es el factor  $i$  el que condiciona la variabilidad en Milandrine:  $i$  varía entre 0.12 y 0.45, valores válidos también en Salubita, mientras que  $k$  es más estable, variando entre 0.3 y 0.4 (en Salubita varía entre 0.07 y 0.16).

Concluyen los autores afirmando que el parámetro  $k$  da una buena idea del poder regulador del sistema y que puede ser considerado como una característica estable del mismo; el parámetro  $i$ , por el contrario, no depende solo de las características estacionarias del subsistema infiltración sino que está ligado también a elementos extremadamente variables, tales como la heterogeneidad de las lluvias, su frecuencia etc. En consecuencia, afirman que el sistema clasificatorio de MANGIN es “peu performante”, y que el cálculo de una curva media para determinar el parámetro  $i$  no tiene apenas sentido ya que el rango de variación de  $i$  es del mismo orden de magnitud que su valor medio. A la luz de la reflexión hecha por nosotros para el sistema de Salubita debemos manifestar nuestro acuerdo con GRASSO y JEANNIN.

A partir de los datos obtenidos del estudio de la recesión se ha representado gráficamente el volumen dinámico drenado por el manantial de Salubita en función del tiempo (figura 4.61), donde se observa su poder regulador (42% drenado al cabo de 50 días sin alimentación). En la figura se han representado también las surgencias de Argin y Orue para poder comparar gráficamente la evolución del volumen dinámico drenado por la surgencia de Salubita con dos casos extremos (Argin y Orue) de tipos de sistemas kársticos del País Vasco.

Tanto en la figura 4.61 como en la 4.60 se observa que, pese a la inercialidad del sistema de Salubita, éste dista mucho del de Orue (Bizkaia), cuyo poder regulador es mucho mayor (ANTIGÜEDAD, 1986), aunque, como se aprecia en la primera figura, buena parte de los sistemas kársticos investigados, en materiales carbonatados urgonianos, se ubican en el dominio I, de claro comportamiento kárstico debido al notable desarrollo de la red de drenaje rápida. Regionalmente, pues, el Sistema Kárstico de Salubita es una referencia de comportamiento interesante.



**Figura 4.61: Porcentaje de volumen dinámico drenado por Salubita en función del tiempo. Se considera  $V_d=2.3 \text{ hm}^3$  y un  $\alpha=0.011 \text{ d}^{-1}$ .  $\%V_d=(1-e^{-\alpha t}) * 100$ . También se han representado las surgencias de Argin y Orue (ANTIGÜEDAD, 1986; MORALES, 1991).**

### **ANÁLISIS DEL AGOTAMIENTO EN SALUBITA**

En el Mapa Hidrogeológico a escala 1:100.000 (E.V.E., 1996) se interpreta la recesión del hidrograma de la presa (Regata Albiztur) y se establece un coeficiente de agotamiento de  $0.00417 \text{ d}^{-1}$  para el flujo más lento y de  $0.134 \text{ d}^{-1}$  para el flujo intermedio, para el año hidrológico 1985-86. En el presente trabajo se han calculado los coeficientes de agotamiento para los años hidrológicos 1985-86, 1986-87, 1997-98, 1998-99 buscando un mayor detalle que en el análisis previo (apartado 4.10.1.3). No se ha realizado el cálculo para los años 1987-88 y 1988-89 por existir numerosos huecos en el registro. Los coeficientes de agotamiento calculados para los cuatro años hidrológicos se reflejan en la figura 4.62. A partir del hidrograma anual ( $\log Q-t$ ) se ha tratado de buscar los tramos de evolución rectilínea, aunque no correspondan a un régimen no influenciado.

Como queda reflejado en el primer gráfico (año hidrológico 1985-86), se obtienen distintos coeficientes. El  $\alpha=0.41 \text{ d}^{-1}$  corresponde al flujo rápido (vaciado del sistema puramente transmisivo), indicador de una red de conductos bien desarrollada. Los valores de  $\alpha$  que oscilan entre 0.048 y  $0.14 \text{ d}^{-1}$  corresponderían al flujo intermedio y  $\alpha= 0.015 \text{ d}^{-1}$  parece ser el reflejo del flujo más lento. Es evidente que el coeficiente de agotamiento correspondiente al último tramo de este año facilitado por el E.V.E. (1996) difiere bastante del calculado aquí. Esta diferencia se debe a un error en la aplicación del método de cálculo de  $\alpha$  en el estudio consultado por el E.V.E. (op. cit).

Para el resto de los años hidrológicos considerados, al flujo lento le corresponde un valor de  $\alpha$  que oscila entre 0.004 y  $0.0064 \text{ d}^{-1}$ , mucho menor que el calculado para 1985-86. Esto puede ser debido a que el año 1985-86 fue más lluvioso de lo normal y que el Sistema no llegó a vaciarse lo suficiente como para que solamente funcionase el flujo lento, de forma que el valor de  $0.015 \text{ d}^{-1}$  correspondería realmente al flujo intermedio como ocurre con el resto de los años. El  $\alpha$  correspondiente al flujo intermedio para esos años oscila entre 0.07 y  $0.015 \text{ d}^{-1}$  y el correspondiente al flujo rápido, como en los casos anteriores, es de  $\alpha=0.41 \text{ d}^{-1}$ .

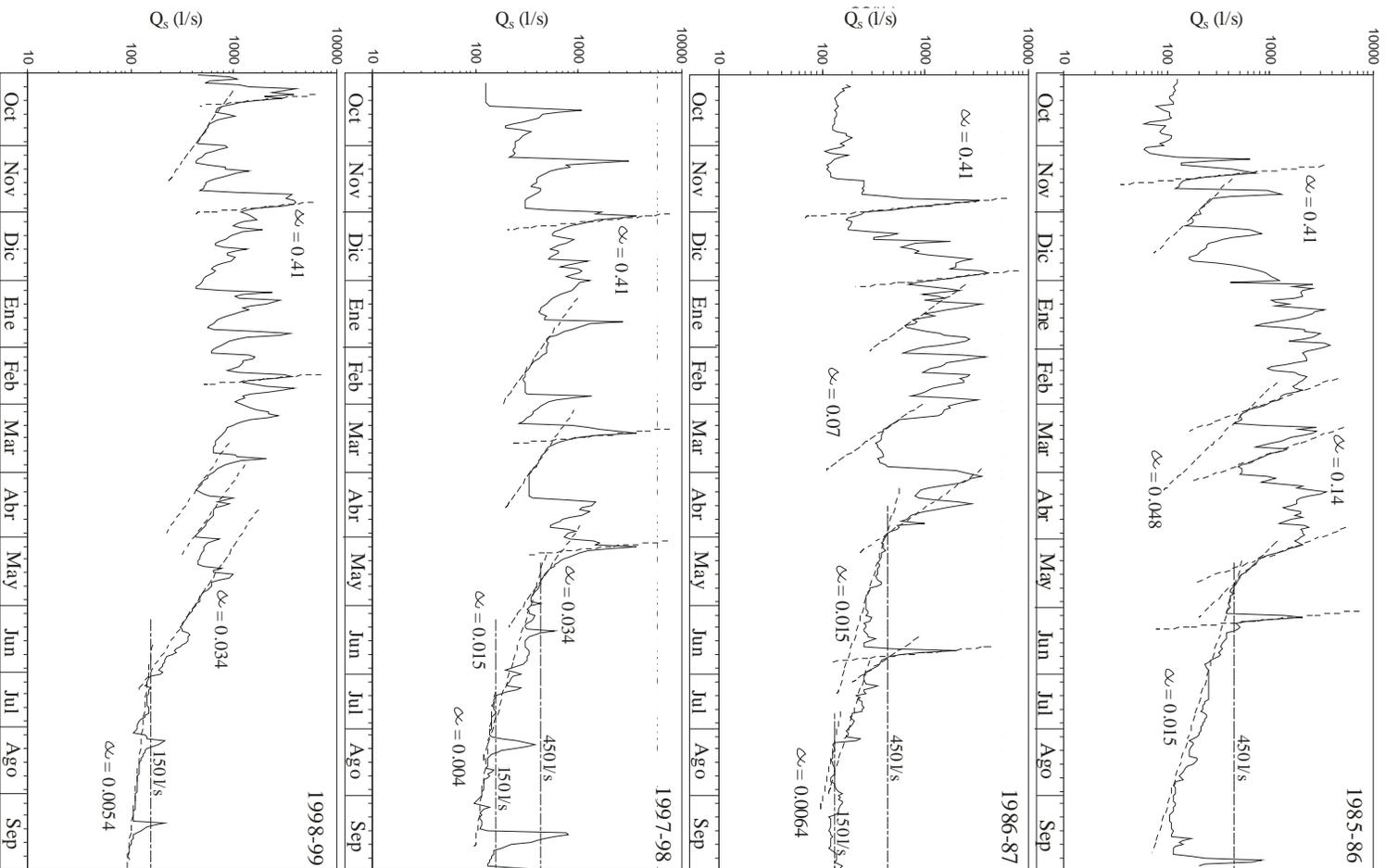
Teniendo en cuenta los coeficientes obtenidos de los cuatro años hidrológicos analizados, se puede concluir que los valores de  $\alpha$  para cada tipo de flujo son los siguientes:

Flujo lento	$0.004-0.0064 \text{ d}^{-1}$
Flujo intermedio	$0.07-0.015 \text{ d}^{-1}$
Flujo rápido	$0.41 \text{ d}^{-1}$

A modo de referencia, SAUTER (1992) encuentra coeficientes comprendidos entre  $0.25 \text{ d}^{-1}$  (pure conduit system) y  $0.0018 \text{ d}^{-1}$  (pure fissured system) en la surgencia kárstica de Gallusquelle (Swabian Alb, Alemania), para tres años de hidrograma, con coeficientes intermedios de  $0.017 \text{ d}^{-1}$  y  $0.006 \text{ d}^{-1}$ . GRASSO y JEANNIN (1994) analizan cinco curvas de recesión en la surgencia de Milandrine (Suiza) encontrando coeficientes entre  $1.6 \text{ d}^{-1}$ , para el vaciado rápido de la red de conductos kársticos, y  $0.002 \text{ d}^{-1}$  para el vaciado de los volúmenes de roca poco permeable.

Los años hidrológicos considerados presentan, en general, coeficientes similares para los casos extremos de (a) flujo más rápido a través de conductos y (b) flujo más lento a favor de fisuras; sin embargo, no ocurre lo mismo en lo que se refiere a los flujos intermedios.

Durante los dos primeros años hidrológicos considerados la transición es más lenta y el paso desde el extremo máximo ( $0.41 \text{ d}^{-1}$ ) al mínimo ( $0.0064 \text{ d}^{-1}$ ) se produce lentamente pasando paulatinamente por diversas situaciones intermedias ( $0.14 \text{ d}^{-1}$ ,  $0.07 \text{ d}^{-1}$ ,  $0.048 \text{ d}^{-1}$  y  $0.015 \text{ d}^{-1}$ ). En los dos últimos años, por su parte, esa transición parece ocurrir de forma mucho más rápida, por lo menos hasta un valor intermedio de  $0.034 \text{ d}^{-1}$ .



**Figura 4.62: Hidrogramas de Salubria y coeficientes ( $\alpha$ ) correspondientes a los tramos rectos ajustados, para los años hidrológicos 1985-86, 1986-87, 1997-98 y 1998-99.**

La explicación a estos hechos habría que buscarla, inicialmente al menos, en la propia forma de producirse las precipitaciones (frecuencia, intensidad, tipo...) antecedentes al período investigado, y en la influencia que ello pudiera ejercer en las condiciones de infiltración y en el comportamiento de los diversos subsistemas del acuífero capaces de incidir en el flujo del agua (también GRASSO y JEANNIN (1994) hacen la misma reflexión); dicho de otra manera, en el papel que juegan las condiciones antecedentes en la dinámica de flujo.

Y todo ello, antes de ir a buscar la causa de los hechos en posibles modificaciones intrínsecas en el propio acuífero (cambios en la configuración funcional de la red de drenaje, cambios en la superficie drenada por el manantial (BONACCI, 1993) que hubieran podido ocurrir en el período de 12 años transcurrido. Este estudio detallado no se ha efectuado en la presente investigación, y queda, por tanto, pendiente de materialización. En cualquier caso, se han deducido los coeficientes que mejor caracterizan el “vaciado” del acuífero en las distintas situaciones hidrológicas (flujo rápido, intermedio y lento).

Finalmente, hay otra observación de interés. A la vista de la figura 4.62 se puede observar que algunos cambios en las pendientes de las rectas dibujadas se dan en los mismos caudales. Esto es, lógicamente, más evidente en las situaciones en las que los flujos lentos son predominantes en la descarga del acuífero: situaciones de aguas bajas. En aguas medias, y sobre todo altas, no es posible encontrar esta relación (cambios de pendiente-caudal) por la propia dinámica imperante en esos momentos: presencia de muy diversos flujos (rápidos, intermedios e incluso lentos) de importancia relativa muy variable en cortos períodos de tiempo, al tratarse de regímenes muy influenciados por las precipitaciones-infiltraciones.

Así, el tránsito de  $\alpha$  entre  $0.0015 \text{ d}^{-1}$  y  $0.005 \text{ d}^{-1}$  ( $0.004-0.006$ ) se da para caudales en la surgencia de Salubita del orden de 150 l/s (figura 4.62). SAUTER (1992) hace también estas observaciones en el manantial, ya citado, de Galusquelle (Swabian Alb) justificándolo como “*water level dropping below the highly conductive horizon*”. Según este autor, la bajada del nivel piezométrico por debajo de un horizonte más transmisor implicaría una ralentización en el vaciado del acuífero y, por tanto, el paso a un  $\alpha$  menor.

Nuestra única referencia de niveles es la comentada e interpretada en el apartado 4.7 (figuras 4.34 a 4.36). Según aquellos datos, con caudales del orden de 150 l/s en Salubita (idéntico caudal para la estación de aforos en la presa) el nivel piezométrico en el sondeo Albiztur-IV es del orden de 124 m, y en el Albiztur-II de 134 m (en el Albiztur-I no hay observaciones para ese caudal pero el nivel está, en todo caso, por debajo de 123 m).

A la vista de las columnas litológicas (figuras 3.4a, 3.4b y 4.33) pudiera relacionarse esos horizontes más transmisivos con las “zonas fracturadas” allí reflejadas; de todas formas, la falta de detalle en esas columnas no permite afinar en estos aspectos (véase lo comentado sobre las columnas en el apartado 4.7). En cualquier caso, hay que recordar una vez más lo ya interpretado en el apartado 4.3.1, sobre el hecho de que con valores de caudal inferiores a unos 200 l/s, todo el agua de la Regata Albiztur (unos 20-30 l/s) se infiltra y alimenta la surgencia de Salubita. Esta infiltración facilitaría, por sí sola, el suavizamiento de la pendiente ( $\alpha$ ) que sería entonces de compleja interpretación, ya que no sería una característica intrínseca del acuífero en sí mismo, sino del conjunto acuífero-regata.

Por otra parte, el paso de un  $\alpha$  mayor (0.048-0.034 d<sup>-1</sup>) a un  $\alpha$  de 0.015 d<sup>-1</sup> parece darse en torno a un caudal en Salubita de unos 450 l/s (figura 4.62). Esto corresponde, en niveles, a unos 125 m (Albiztur-I), 135 (Albiztur-II) y 125 (Albiztur-IV). Vale aquí lo ahora dicho para las columnas de los sondeos, y para la infiltración del agua de la regata, que se sigue produciendo aunque ahora la infiltración no sea total.

## ***ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL***

### ***BREVE INTRODUCCIÓN AL ANÁLISIS***

A lo largo de los últimos veinte años, el estudio de las **series cronológicas** por medio del análisis correlatorio y espectral ha sido una técnica muy extendida y utilizada en el campo de la Hidrología con el fin de describir y caracterizar los sistemas hidrológicos correspondientes. Este método de análisis de series temporales fue desarrollado inicialmente por JENKINS y WATTS (1968), HANNA (1970), BRILLINGER (1975), BOX y JENKINS (1976) y posteriormente aplicado por numerosos autores. Entre los que lo han aplicado a sistemas kársticos cabe citar aquí a MANGIN (1975, 1984), MANGIN y PULIDO-BOSCH (1983), PADILLA y PULIDO-BOSCH (1992), y en el ámbito del País Vasco ANTIGÜEDAD (1986, 1997), MORALES (1991), LLANOS (1992) y ANTIGÜEDAD et al., 1997). Recientemente, y en un contexto más profundo y crítico está el trabajo de EISENLOHR (1995).

En general, el análisis correlatorio y espectral permite deducir el funcionamiento del sistema investigado a partir de la descripción adecuada de las series cronológicas. Así, proporciona información sobre el **efecto memoria** del sistema o, lo que es lo mismo, de la importancia de sus reservas dinámicas y de la forma en que éstas se van agotando.

Para poder aplicar este método, la función de entrada ha de tener un carácter aleatorio marcado. De esta manera, la crónica de salida posee dos componentes: una **componente aleatoria** debida a la señal de entrada y una **componente estructural** relativa a la organización del sistema

causante de la modulación. El análisis correlatorio y espectral surge del estudio de las funciones aleatorias teniendo como objetivo evidenciar la componente estructural de la señal. El sistema hidrológico se asimila a un filtro que deja pasar mayor o menor información relativa a la señal de entrada.

A pesar de que el interés de este método de estudio aplicado a la identificación de la estructura de sistemas kársticos ha sido puesto de manifiesto por, entre otros, los autores antes citados, existen aspectos relacionados con la función de entrada (precipitaciones) que deben ser considerados de forma muy crítica para evitar errores en la interpretación del análisis correlatorio y espectral y en la generalización de sus conclusiones. Es decir, por ejemplo, el estudio de dos años hidrológicos distintos para un mismo sistema, va a producir, seguramente, resultados diferentes por el hecho de que la cantidad y distribución de las precipitaciones a lo largo de los dos años hidrológicos no sean iguales, en cuyo caso la situación del sistema hidrológico será diferente.

En caso de analizar un único año hidrológico se obtendrían conclusiones que pueden no corresponder a una situación “normal” del acuífero, lo que conduciría a errores a la hora de caracterizar temporalmente el sistema estudiado. Quiere esto decir, que la aplicación de este análisis debería ser llevada a cabo para diferentes años hidrológicos y, en cualquiera de los casos, con la consideración conjunta de otro tipo de datos (hidroquímica, isótopos, ensayos de trazado...) o con un cierto conocimiento previo del sistema. Siguiendo a EISENLOHR (1995), *“les corrélogrammes obtenus à partir d’hydrogrammes répondant à des conditions pluviométriques extrêmes, année excédentaire et déficitaire en pluies, et comparés au corrélogramme moyen de l’aquifère permettent de visualiser le comportement des réserves (stockage et déstockage)”*.

El análisis de las series cronológicas se suele llevar a cabo desde dos perspectivas: **dominio temporal** (análisis correlatorio simple-cruzado) y **dominio frecuencial** (análisis espectral simple-cruzado). En el análisis simple se tratan por separado las crónicas de precipitaciones y las de caudales, poniéndose de manifiesto el carácter de cada una de ellas. En el análisis cruzado ambas se tratan conjuntamente, lo que permite definir la relación precipitación-caudal, es decir, en qué medida la señal de entrada ha sido modificada (**función filtro**).

El desarrollo matemático de este método se encuentra en referencias mencionadas con anterioridad (MANGIN; 1975, 1984), por lo que a continuación se comentan brevemente, a modo de referencia, las características de cada dominio.

## **Dominio temporal : análisis correlatorio**

### **Correlograma simple**

Evidencia la dependencia (correlación,  $r$ ) entre las observaciones de la crónica para intervalos de tiempo ( $k$ ) cada vez más grandes por lo que permite deducir el **efecto memoria** del sistema. A una mayor influencia a largo plazo (sistema más inercial) corresponde una decrecida más lenta del correlograma. Según MANGIN (1982), el valor de  $k$  (días) correspondiente a  $r$ : 0.1-0.2 refleja el **efecto memoria** del sistema, que el autor relaciona con la importancia de las reservas.

Puesto que los períodos analizados corresponden a un año hidrológico, utilizándose los datos diarios, el **valor de truncamiento** elegido ha sido de 125 días. La información sobre la estructura de la serie es válida únicamente entre el doble del paso considerado (diario) y el tercio de la longitud de la crónica, lo que corresponde a la **ventana de observación** considerada, es decir, entre 2 y 125 días.

### **Correlograma cruzado**

Puesto que la función de entrada (precipitaciones) corresponde a un proceso que se puede considerar aleatorio el correlograma cruzado representa la **respuesta impulsional** del sistema ofreciendo una buena imagen del hidrograma unitario. Un sistema mal drenado dará un hidrograma unitario extendido mientras que otro bien drenado dará un hidrograma unitario estrecho y puntiagudo.

Se calcula igual que el simple y con el mismo valor de truncamiento. Analíticamente es la función de autocorrelación de dos crónicas finitas considerando la primera de ellas, precipitaciones, ( $x_1, x_2 \dots x_n$ ) como la causa de la segunda, caudales, ( $y_1, y_2 \dots y_n$ ). Como no existe simetría entre las correlaciones de  $x$  en  $y$ , y las correlaciones de  $y$  en  $x$ , el cálculo se realiza para valores positivos y negativos.

## **Dominio frecuencial : análisis espectral**

El análisis espectral permite descomponer la información en función de las frecuencias siguiendo el teorema de PARSEVAL, el cual admite que la información es la misma tanto en el dominio temporal como en el frecuencial. El cambio de representación de un dominio a otro se lleva a cabo mediante la transformada de FOURIER.

### **Espectro de densidad de varianza (espectro simple) ( $S_f$ )**

El análisis sobre una sola crónica permite descomponer la varianza en función de la frecuencia ( $f$ ) y representa la *firma* del sistema. Por otra parte, el espectro posee una forma y anchura

de banda características. La anchura de la banda espectral está limitada por la **frecuencia de corte** ( $F_c$ ) a partir de la cual el espectro es despreciable. Se trata de la mayor frecuencia conteniendo información de donde se deduce que analizar la crónica con una frecuencia mayor (menor paso de tiempo) no aporta mayor información.

El espectro permite además calcular la duración de la influencia de la señal de entrada en el sistema (**tiempo de regulación**). Este parámetro se define como  $S_0/2$ , donde  $S_0$  es el valor del espectro para  $f=0$ . Esta información está ligada a la importancia de las reservas y está relacionada con la anchura del hidrograma unitario.

### **Espectro cruzado**

Es la transformada de FOURIER del correlograma cruzado y expresa la distribución de la información intercambiada por las dos crónicas según las frecuencias (MAX, 1980). Debido a que el correlograma cruzado no es simétrico para los valores positivos y negativos de  $k$ , el espectro resultante se expresa por un número complejo definido por la función de amplitud cruzada y la función de fase.

#### **- Función de amplitud cruzada ( $S_{xy}$ )**

Indica los dominios frecuenciales para los cuales la relación entrada-salida es máxima. Por comparación con el espectro simple de la función de entrada, esta función cruzada muestra la forma en la que esa señal de entrada ha sido modificada por el sistema. Según los casos, ciertos picos visibles en el espectro simple pueden haber sido suprimidos, atenuados o amplificados en el espectro cruzado.

#### **- Función de fase ( $\theta_{xy}$ )**

La transferencia de varianza representada por la función de amplitud se produce de forma desfasada y la función de fase ( $\theta_{xy}$ ) expresa el desfase entrada-salida para cada frecuencia. La función  $t=\theta/2\pi f$  permite calcular este desfase (donde  $t$ =días,  $\theta$ =radianes y  $f$ =frecuencia). Un sistema de comportamiento coherente proporcionará valores de  $\theta$  regulares.

A partir de los espectros de densidad de varianza y cruzado pueden definirse dos nuevas funciones:

#### **- Función de coherencia ( $C_{xy}$ )**

Al igual que la función de ganancia, se define a partir de los espectros simples y del cruzado. Expresa la relación entrada-salida para cada frecuencia, lo cual es una forma de constatar la linealidad

de la misma. Cuando el sistema es completamente lineal,  $C_{xy}=1$  para todas las frecuencias consideradas. Una no-linearidad notable puede suponer la existencia de desfases importantes o de otras entradas o salidas influyendo en el sistema.

#### **- Función de ganancia ( $G_{xy}$ )**

Representa la regresión entre la entrada y la salida del sistema lo que muestra de otra forma la calidad de filtro del sistema. Indica como el sistema modifica la señal de entrada ampliándola cuando  $G>1$  o bien atenuándola cuando  $G<1$ .

### ***APLICACIÓN DEL ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL A LAS SERIES TEMPORALES DEL SISTEMA KÁRSTICO DE SALUBITA***

#### **MANANTIAL DE SALUBITA ( $Q_s$ )**

Se reflejan las características del funcionamiento hidrodinámico del sistema deducido a partir del Análisis Correlatorio y Espectral (ACE). Se han tratado las crónicas de las precipitaciones y de los caudales relativos a los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99. Se comentan primero año a año, para comentarlos después comparativamente, lo cual parece más interesante. En todos ellos, la función de salida utilizada ha sido el caudal medio diario en el manantial de Salubita ( $Q_s$ ) deducido en el apartado 4.3.1, y la función de entrada ha sido diferente en cada caso.

Cabe mencionar el hecho de que no se sigue un orden cronológico en el análisis de los tres años hidrológicos, sino que se acomete primero el análisis de los años más húmedos (1986-87 y 1998-99) en los que la precipitación está muy repartida a lo largo del año y cuyos caudales medios son similares, dejando para el final el más seco (1997-98) en el que las precipitaciones se producen de forma MÁS aislada. Ésto va a permitir comparar similitudes entre los años de mayor pluviosidad y establecer, si cabe, diferencias entre éstos y el año de menor pluviosidad.

#### **Año hidrológico 1986-87**

Los datos utilizados han sido los comprendidos del 01/10/86 al 30/09/87. Los datos diarios de precipitación utilizados como función de entrada corresponden a la estación de Berastegi.

El **correlograma simple** (figura 4.63a) correspondiente a la **precipitación** decrece rápidamente alcanzándose un valor de  $r=0.1$  para  $k=2$  y a partir de ahí oscilando en torno a  $r=0$ . Esta evolución de decrecida rápida evidencia una independencia entre los episodios diarios de precipitación. Por tanto, cabe afirmar que la función de entrada posee un carácter quasi-aleatorio.

El **espectro de densidad de varianza** (figura 4.63b) de la **precipitación** muestra muchos picos con valores de amplitud no despreciables, situándose los valores más altos hacia las frecuencias más bajas (efecto a largo término, anual). Esta abundancia de picos refleja la relativamente débil variación estacional de las lluvias.

El **correlograma simple** correspondiente al **caudal** (figura 4.63a) decrece rápidamente hasta un valor de  $r=0.5$  y  $k=5$  y a partir de ahí decrece lentamente hasta un valor de  $r=0.15$  en torno a  $k=65$ ; a partir de aquí la  $r$  se mantiene en una banda de significado despreciable. Cabe destacar que este descenso no es constante ya que existen dos picos ( $k=32$ ,  $r=0.37$ ;  $k=47$ ,  $r=0.316$ ). Este escalonamiento indica la complejidad del sistema para el cual se pone de manifiesto un efecto memoria próximo a dos meses ( $k=60$  días) que indica una importante capacidad reguladora

En el **espectro de densidad de varianza** (figura 4.63b) se observa que el filtraje se produce para las frecuencias medias pudiendo establecer la frecuencia de corte en torno a 0.16 (6.25 días); a partir de ahí, para las frecuencias altas, el sistema ejerce su poder de filtro, mientras que en las frecuencias bajas se evidencia el efecto de regulación anual. El espectro permite estimar también el **tiempo de regulación** o, lo que es lo mismo, la duración de la influencia de la señal de entrada, que es superior a un mes ( $S_0/2=35$  d). Este dato pone de manifiesto una vez más el carácter inercial del sistema y confirma la existencia de reservas relativamente importantes.

El **correlograma cruzado** (figura 4.63c) muestra, en general, una forma achatada y extendida con un pico central de  $r=0.554$  para  $k=1$  lo que evidencia la rapidez de la respuesta ante las lluvias, a relacionar con el buen desarrollo del sistema de drenaje, al menos en la zona no saturada. Para valores positivos de  $k$  la  $r$  nunca llega a ser nula. A partir de un valor  $k=7$  la pendiente del correlograma es mucho menor y se mantiene, lo que se traduce en un sistema con poder capacitivo importante, a pesar de la rapidez de la respuesta. Los otros picos que refleja el correlograma (coincidentes con los citados para el correlograma simple de los caudales) representan el carácter complejo del sistema y pueden ser debidos a la existencia de subsistemas de capacidad reguladora y poder inercial distintos dando lugar a desfases. Este aspecto se tratará más adelante, una vez descritos todos los años considerados.

La **función de amplitud cruzada** (figura 4.63f) muestra la buena relación entre la precipitación y el caudal para las frecuencias bajas, hasta la frecuencia de corte 0.16, mientras que las medias y altas quedan filtradas. Este hecho se puede traducir como una buena capacidad reguladora del sistema a largo término; los picos del espectro simple de las precipitaciones (figura 4.63b), en las bajas frecuencias, aparecen ahora con valores más reducidos, a excepción del pico de frecuencia más baja. La función de **ganancia** (figura 4.63d) también evidencia que el sistema amplifica las

frecuencias muy bajas ( $f < 0.020$ ; 50 días) y atenúa las medias y altas indicando la existencia de reservas de interés, que regulan anualmente las variaciones de las precipitaciones.

La correlación entre las entradas y salidas del sistema en función de las frecuencias expresadas para la **coherencia** (figura 4.63e) es del orden de 0.7-0.9 no existiendo diferencia entre las bajas y altas frecuencias. Los valores bajos de esta función coinciden con las frecuencias en las que la atenuación de la señal es mayor, como quedaba reflejado en las funciones de ganancia y amplitud cruzada. Se puede decir que presenta una linealidad alta para todas las frecuencias.

La **función de fase** (figura 4.63g) está bastante bien representada en el dominio de las bajas frecuencias siendo el desfase entre la función de entrada y la de salida decreciente a partir de las más bajas frecuencias, siendo del orden de 1.7 días para  $f=0.1$  y de 0.7 días para  $f=0.2$ . Para las frecuencias más altas los valores de  $\theta$  son discontinuos evidenciando una relación entrada-salida condicionada por el efecto de filtraje, la atenuación y la peor linealidad, aspectos ya reflejados en las otras funciones.

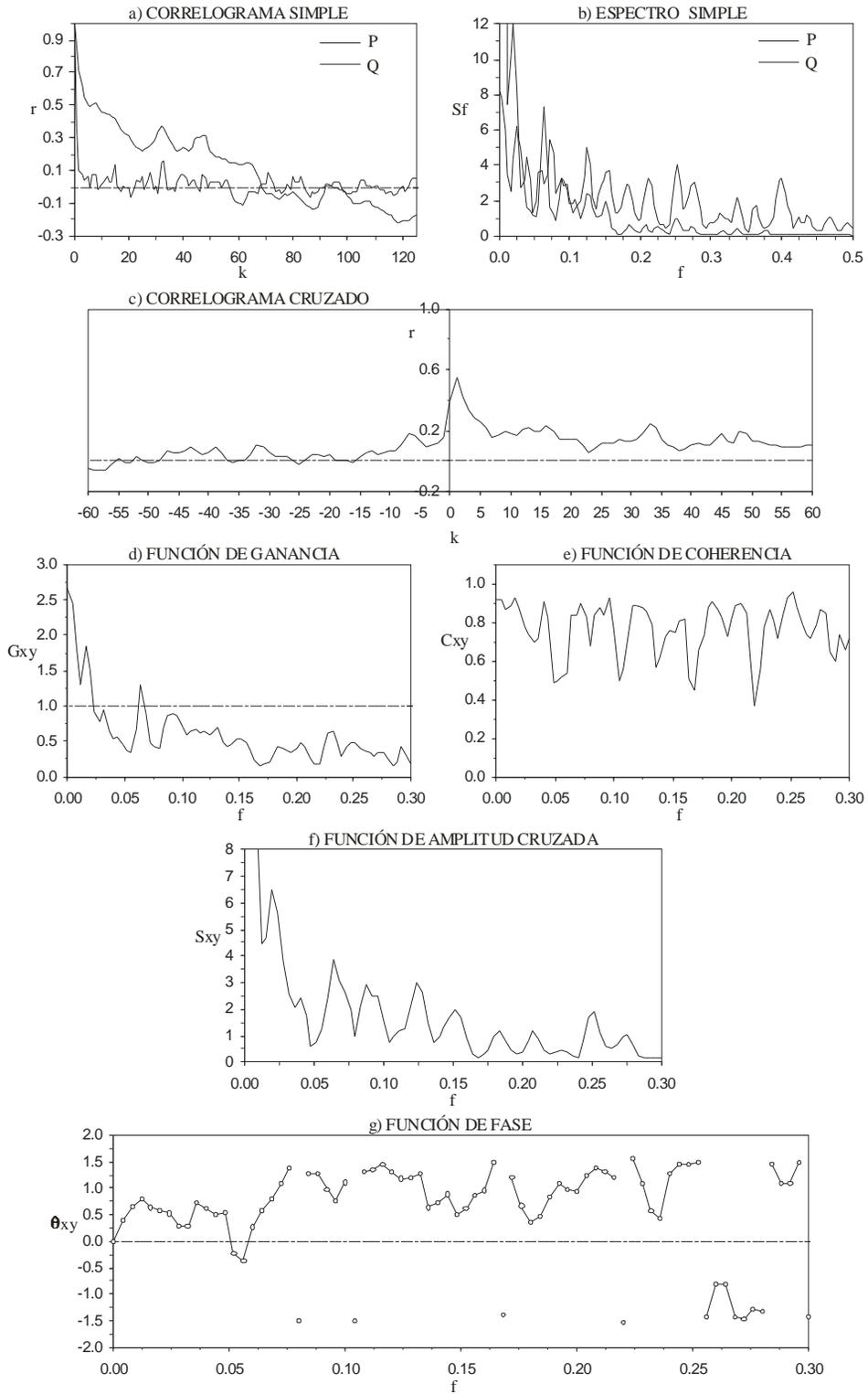
### Año hidrológico 1998-99

Se analiza el período comprendido entre el 01/10/98 y el 30/9/99. Como función de entrada se han utilizado los datos de precipitación diaria de la estación de Erdoizta.

El **correlograma simple** (figura 4.64a) correspondiente a la **precipitación** muestra una fuerte pendiente a lo largo de la cual decrece hasta  $r=0$  cuando  $k=5$  y a partir de ahí oscila poco en torno a cero. Al igual que en el caso anterior, la función de entrada posee un carácter quasi-aleatorio.

En el caso de la **precipitación**, su **espectro de densidad de varianza** (figura 4.64b) muestra que los picos de mayor entidad se encuentran situados a la izquierda del gráfico, unidos a frecuencias bajas lo que traduce un efecto a largo término, anual. La irregular presencia de los picos en este espectro evidencia una irregular producción de las precipitaciones, comparativamente con otros años, menos abundantes en las medias y altas frecuencias.

El **correlograma simple** (figura 4.64a) relativo al **caudal** muestra una fuerte pendiente hasta un valor de  $r=0.35$  cuando  $k=4$  decreciendo lentamente a partir de ese valor hasta  $r=0.16$  cuando  $k=65$  y llegando a  $r=0$  para un valor de  $k=103$ . Aunque la tendencia general es relativamente plana, en buena parte del intervalo existen numerosos picos, reflejo de la complejidad del sistema, entre los cuales el más pronunciado es el correspondiente a  $r=0.398$  para una  $k=49$ , coincidente con un pico claro en el correlograma de las lluvias. Es evidente el importante poder capacitivo del sistema con un efecto memoria de 65 días.



**Figura 4.63:** Correlograma y espectro simple, correlograma cruzado y funciones de ganancia, de coherencia, de amplitud cruzada y de fase a partir de los datos de precipitación de la estación de Berastegi y los caudales del manantial de Salubita para el año hidrológico 1986-87.

El **espectro de densidad de varianza del caudal** (figura 4.64b) permite deducir una frecuencia de corte de 0.21 (4.6 días), o incluso de 0.16 (6.25 días), correspondiente a una banda espectral relativamente ancha. A partir de ahí, la información de entrada queda prácticamente filtrada por el sistema. El tiempo de regulación, por su parte, es próximo a los 35 días, que al igual que para el año 1986-87, pone de manifiesto la existencia de reservas importantes y la notable inercia del sistema.

El **correlograma cruzado** (figura 4.64c) muestra un pico central cuyo punto máximo es  $r=0.516$  para  $k=1$  indicador del desarrollo de un sistema de drenaje que permite la rapidez de la respuesta. En el resto, a partir del día 7, la marcha del correlograma no es significativa, excepción hecha del pico  $k=49$  coincidente con el observado en el correlograma simple (figura 4.64a).

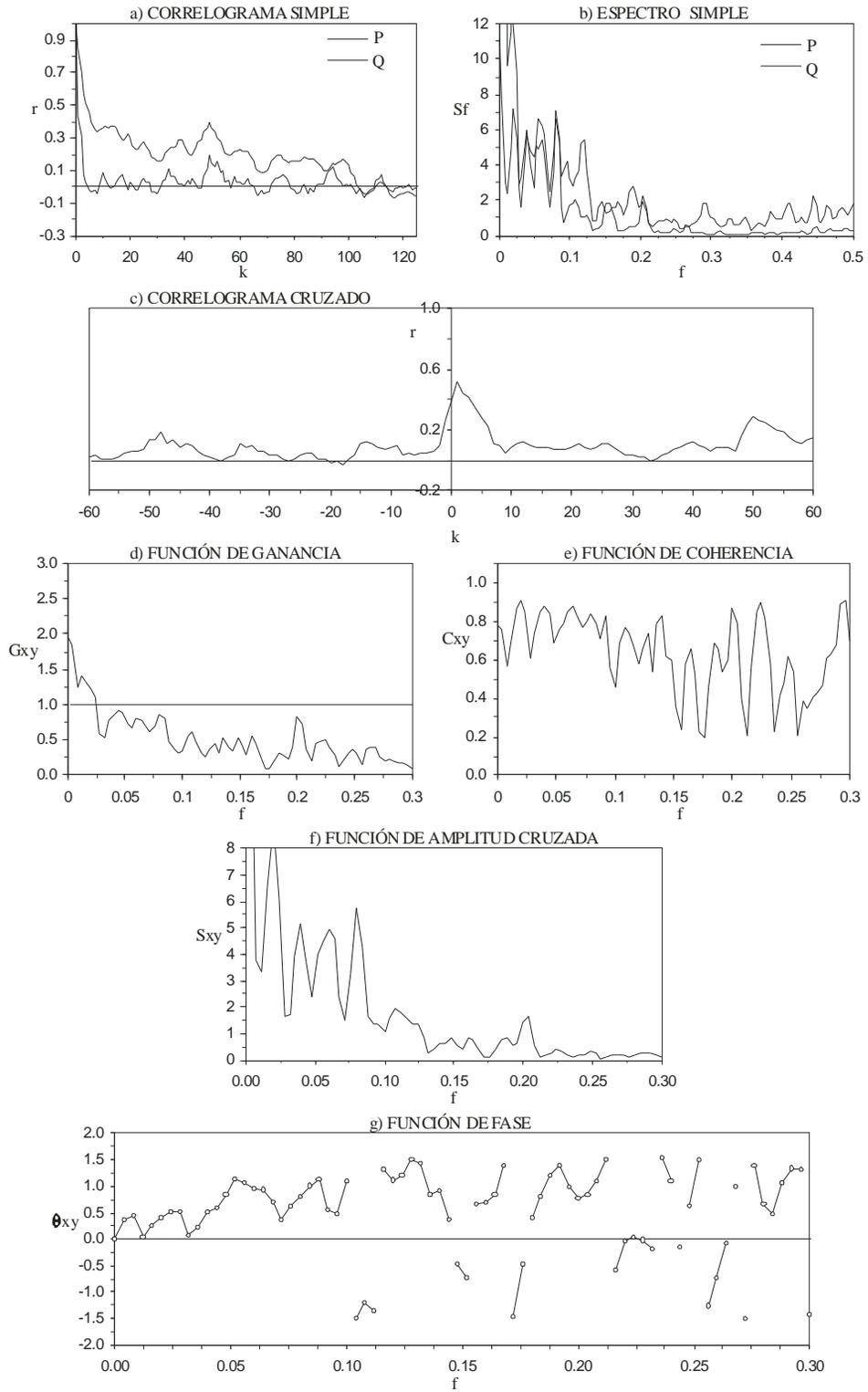
Todos los picos de la precipitación y del caudal observados en los espectros simples, para las bajas frecuencias, coinciden también en la **función de amplitud cruzada** (figura 4.64f). A menores frecuencias, además, los valores del espectro cruzado son mayores que los correspondientes del espectro de precipitaciones lo que indica la buena regulación del sistema a largo término. Es lo que también representa la **función de ganancia** (figura 4.64d) al poner de manifiesto la amplificación de la señal (lluvias) para las bajas frecuencias ( $f<0.02$ ; 50 días) y la atenuación para las frecuencias medias y altas.

La **función de coherencia** (figura 4.64e) muestra una linealidad próxima a 0.8 para las bajas frecuencias, la cual es menor para las frecuencias en las que, a su vez, la atenuación es menor, según la función de ganancia. La **función de fase** (figura 4.64g) está bien representada para  $f<0.1$  siendo el desfase entre la función de entrada y la de salida de 1.7 días para  $f=0.1$  y de 0.6 días para  $f=0.2$ .

### **Año hidrológico 1997-98**

El período que se comenta a continuación comprende los meses situados entre el 01/10/97 y el 30/09/98, para las cuales se han tomado como función de entrada los datos de la estación de Erdoizta.

Las **precipitaciones** poseen un carácter quasi-aleatorio (**correlograma**) (figura 4.65a) y una débil variación estacional (**espectro**) (figura 4.65b), con picos nítidos en todos los dominios frecuenciales. Sin embargo, en este año hidrológico no se observa la tendencia anual de forma clara lo que se justificaría por la falta de un contraste notorio entre las estaciones del año (tabla 4.20).



**Figura 4.64:** Correlograma y espectro simple, correlograma cruzado y funciones de ganancia, de coherencia, de amplitud cruzada y de fase a partir de los datos de precipitación de la estación de Erdoizta y los caudales del manantial de Salubita para el año hidrológico 1998-99.

Los **caudales** muestran un **correlograma** simple (figura 4.65a) de fuerte pendiente descendente hasta una  $r=0.132$  para  $k=10$ . Posteriormente adquiere forma de meseta hasta  $r=0.1$   $k=28$ . Cabe destacar un pico pronunciado cuando  $k=51$ . El efecto memoria, en este caso, se acerca a los 28 días, bastante menor al deducido para años anteriores.

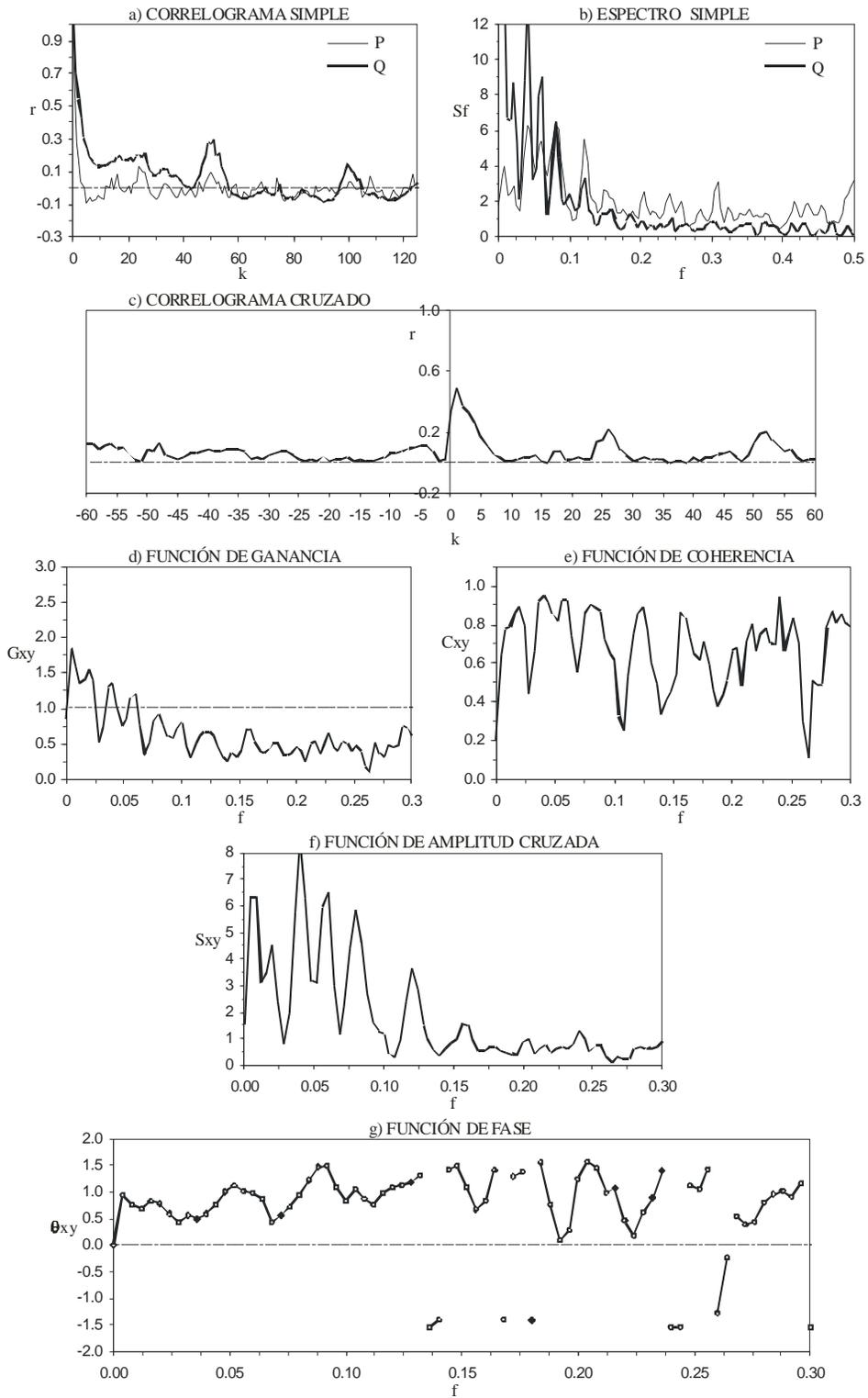
En la representación del **espectro de densidad del caudal** (figura 4.65b) se deduce una frecuencia de corte de 0.16 (6.25 días) a partir de la cual el filtraje es importante. En este caso, es clara la tendencia anual que presenta la serie. El tiempo de regulación, por su parte, es de 15-16 días ( $S_0/2$ ).

El **correlograma cruzado** (figura 4.65c) muestra un pico central de  $r=0.49$  para  $k=1$ , indicador de una respuesta rápida propia de un sistema con gran facilidad de drenaje. La pendiente de ese pico es muy pronunciada alcanzándose un valor de prácticamente  $r=0$  a los 9 días. No obstante, se pueden distinguir otros dos picos agudos en  $k=26$  y  $k=52$  coincidentes con los observados en los correlogramas de lluvias y caudales (figura 4.65a), es, por tanto, información ya aportada por la señal de entrada. El segundo de esos picos secundarios, al menos, aparece también de manera evidente en los otros dos años hidrológicos analizados, y no siempre en la crónica de lluvias, por lo que podría representar una ciclicidad bien mantenida por el sistema acuífero.

La **amplitud cruzada** (figura 4.65f) muestra las frecuencias para las que la relación entrada-salida es máxima, reflejando la superposición de los picos observados en sus espectros simples (figura 4.65b) para frecuencias inferiores a la de corte ( $f=0.16$ ). Esto mismo representa la **función de ganancia** (figura 4.65d) mostrando que el sistema atenúa las frecuencias superiores a 0.06 y amplifica las que quedan por debajo de ese valor, aunque sin reflejar la tendencia anual.

En el caso de la **función de coherencia** (figura 4.65e), la correlación se mantiene en general en torno a 0.6 aunque para frecuencias superiores a 0.15 se observa una ligera distorsión que disminuye aun más la escasa linealidad existente. También aquí es evidente la falta de tendencia anual clara. La **función de fase** (figura 4.65g) está bien representada con un desfase entre las entradas y salidas de 1.3 días para una  $f=0.1$  y de 1 día para  $f=0.2$ .

Los tres años hidrológicos considerados presentan una serie de características comunes aunque el año hidrológico 1997-98 muestra diferencias considerables siendo el efecto memoria, el tiempo de regulación y el desfase entre las funciones de entrada y de salida las más evidentes. El motivo de estas diferencias podría haber sido la elección de un período en el cual las precipitaciones no estuvieran bien centradas, por lo que se optó por realizar el análisis correlatorio y espectral para el período comprendido entre el 01/09/97 y el 31/8/98 para compararlo con el anterior.



**Figura 4.65:** Correlograma y espectro simple, correlograma cruzado y funciones de ganancia, de coherencia, de amplitud cruzada y de fase a partir de los datos de precipitación de la estación de Erdoizta y los caudales del manantial de Salubita para el año hidrológico 1997-98.

Se comprobó que no existe diferencia notable alguna en los valores deducidos del análisis de este período, respecto a los del período anterior. Parece obvio, por tanto, que las diferencias entre el año hidrológico 1997-98 y los otros dos años considerados no se deben a la elección de un período erróneo sino más bien a motivos relacionados con la propia función de entrada, es decir, con la diferente secuencia de precipitaciones en ese año. De hecho ya se ha comentado en su momento la falta de tendencia anual en la serie de lluvias. Además, durante este año se produjeron períodos de nieve importantes en Enero y Abril que también han influido en las relaciones entradas-salidas.

### **COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

Las características deducidas para el sistema a partir de los tres años hidrológicos analizados reflejan, en general, una serie de aspectos importantes que suponen una información cuantitativa valiosa acerca del sistema kárstico drenado por Salubita. Se observan, no obstante, ciertas diferencias entre el año hidrológico 1997-98 y los otros dos años hidrológicos considerados. No hay que olvidar que la situación climática correspondiente a cada año hidrológico es diferente. De hecho, de acuerdo con los datos de las precipitaciones medias de las estaciones meteorológicas consideradas en la tabla 2.2, el año hidrológico 1997-98 fue el año más seco (1268 mm en Erdoizta) de los tres, en el que la precipitación registrada fue un 8.7% inferior a la media anual (Erdoizta, 1390 mm).

Sin embargo, las precipitaciones registradas durante el año hidrológico 1986-87 (1393 mm en Erdoizta, tabla 4.3) suponen un 0.2% por encima de la media anual y las registradas en 1998-99 (1488 mm en Erdoizta) suponen un 7% más que la media anual. Sirvan como referencia de estas apreciaciones los hidrogramas de los tres años, que se agrupan en la figura 4.11.

Dejando de lado la cantidad de precipitación caída durante 1997-98, es necesario recordar además la forma en que ésta se produjo. A diferencia de 1986-87 y 1998-99 en los que las precipitaciones fueron continuadas en el tiempo, en 1997-98 las precipitaciones se produjeron en general de forma aislada, en menor cantidad y durante cortos períodos de tiempo (figura 4.11), además de los períodos de nieve ya comentados. Ésto hizo que en varios momentos del año hidrológico, y no solamente en estiaje, en los que normalmente el caudal del manantial hubiera sido superior a 500 l/s, se obtuvieran caudales inferiores a 380 l/s, lo que significa que el caudal expulsado por el manantial en ese momento correspondía prácticamente al flujo base del sistema. Evidentemente la situación del acuífero durante 1997-98 fue netamente diferente a la situación de 1986-87 y 1998-99, lo cual queda reflejado en el análisis correlatorio y espectral poniéndose de manifiesto que la aplicación de este método para un único año hidrológico puede conducir a errores en la estimación de los parámetros del sistema.

Así, el **espectro** de lluvias no refleja para el 1997-98 la tendencia anual, claramente marcada en los otros dos años. Sin embargo, esta tendencia sí la refleja el espectro de los caudales de ese año, aunque no de manera tan pronunciada como en los otros años; este hecho sería indicativo de una cierta capacidad reguladora, inercia, del sistema para hacer frente a un año de menor pluviosidad, lo que hay que poner en relación con el interés de sus reservas.

Si bien el **correlograma** de lluvias evidencia su carácter quasi-aleatorio, el de los caudales refleja precisamente ese carácter inercial; esta función es similar para la crónica de caudales de los años 1986-87 y 1998-99 y menor para el 1997-98, indicando en este último caso una, comparativa, menor inercia, a pesar del mantenimiento de la tendencia anual. Expresado numéricamente en términos de efecto memoria, inercia, (valor de  $k$  para  $r=0.1-0.2$ ) éste es grande, 60-65 días, para los dos años más lluviosos, y sensiblemente inferior, 28 días, para el año más seco. La propia forma de la decrecida de la función de autocorrelación muestra una mayor complejidad de funcionamiento, precisamente en los años húmedos. El pico observado siempre, entre 47 y 51 días, presente también a veces en la propia serie de lluvias, parece deberse a una ciclicidad, en torno a los 50 días, presente igualmente de forma muy clara en los espectros, que si bien de origen externo sigue marcada en todos los años en la serie de caudales.

En consonancia con lo anterior, el tiempo de regulación es alto, 35 días, en los años húmedos, y bastante menor, 15 días, en el año seco; es decir, en años de lluvias más frecuentes y copiosas es mayor la influencia temporal que éstas ejercen en el sistema, como ya se había reflejado en los correlogramas de los caudales. La función de filtro de la señal de entrada parece verificarse para todos los años a partir de  $f=0.16$  (6.25 días), independientemente de la tipología del año.

Estos aspectos se reflejan igualmente en las funciones cruzadas: Similar respuesta rápida y notoria (**correlograma cruzado**) ante las lluvias no filtradas, lo que muestra la existencia de una red de drenaje kárstico bien desarrollada y activa, desde la superficie, que transmite hasta la surgencia el agua o, al menos, el pulso producido por la componente rápida de la infiltración. La diferente evolución de esta función cruzada, con menores valores de  $r_{xy}$  para 1997-98, muestra ese comportamiento menos inercial en el año seco.

Tanto la función de **amplitud cruzada** como la de **ganancia** evidencian la muy buena relación entre las señales de entrada y salida para el dominio, sobre todo, de las frecuencias bajas, ampliando esa relación hacia la tendencia anual ( $f < 0.02$ ), aunque, una vez más, esta tendencia no es tan notoria en el año seco 1997-98. El sistema muestra una cierta linealidad (**coherencia**), mayor obviamente en el dominio de no-filtraje ( $f > f_{\text{corte}}$ ), linealidad que disminuye puntualmente para aquellas frecuencias en las que no hay buena relación entrada-salida. Esta función no discrimina, de

forma clara al menos los años húmedos del seco. Como tampoco lo hace la función **fase**, si bien parece haber un desfase menor para una frecuencia determinada ( $f=0.1$ , por caso) en el año seco.

En definitiva, se trata de un sistema complejo en el que existen dos partes principales bien diferenciadas: a) red kárstica bien desarrollada o zona de drenaje principal muy transmisiva y de baja capacidad reguladora, de rápida respuesta en la que el agua, o el pulso, se mueve rápidamente a través de conductos, y b) red de fisuras de carácter más inercial, de gran capacidad reguladora a largo término y efecto memoria importante. La relación entre estas dos partes está similarmente caracterizada para los dos años más húmedos de los tres, 1986-87 y 1998-99, siendo diferente, como se ha comentado, en el año seco, 1997-98. Aunque tres años hidrológicos son pocos, queda claro al menos el diferente comportamiento del sistema según sean las características pluviométricas del año considerado: en un año seco, el sistema responde, aunque con menor inercia, tendiendo a un comportamiento habitual de año húmedo.

Ya se vio en el apartado 4.3.1, que era precisamente en el año 1997-98, cuando, siendo las aportaciones de Salubita menores (497 l/s), la influencia del flujo base era mayor (58%). Es a costa de esta mayor implicación del flujo propio del acuífero que éste puede tender a un comportamiento más habitual de año húmedo, o año normal, al menos. Obviamente, esta afirmación, válida para el caso estudiado, no podría ampliarse, sin más, a una secuencia de años secos, que no ha sido investigada. En la tabla 4.21 se reflejan los parámetros hidrogeológicos obtenidos para cada año hidrológico considerado.

	1986-87	1997-98	1998-99
Efecto memoria (días)	60	28	65
Tiempo de regulación (días)	35	15	35
Desfase (días) para $f=0.1$	1.7	1.3	1.7
Frecuencia de corte	0.16	0.16	0.16-0.21

**Tabla 4.21: Parámetros hidrogeológicos obtenidos a partir del Análisis Correlatorio y Espectral de las precipitaciones y los caudales en el manantial de Salubita para los tres años hidrológicos considerados.**

Resulta necesario mencionar aquí las reflexiones que algunos autores (GRASSO y JEANNIN, 1994; EISENLOHR, 1995) han expuesto recientemente sobre algunos aspectos interpretativos de la función de autocorrelación a partir del análisis de series previamente establecidas con características definidas. Llegan a la conclusión de que el correlograma simple de los caudales no solamente recoge las influencias del comportamiento propio del acuífero, sino que incorpora también efectos externos relativos al régimen de precipitaciones habido durante el período estudiado; y, más en concreto, establecen la influencia clara que sobre la marcha del correlograma ejercen la frecuencia de los episodios lluviosos, la forma de los picos de crecida (dependiente de la manera en la que ocurren las

infiltraciones eficaces y, por tanto, de la forma en que ocurre el episodio lluvioso) y la pendiente de la decrecida, incluido el agotamiento.

Teniendo esto presente, GRASSO y JEANNIN (1994) critican el papel que MANGIN (1982) atribuye al efecto memoria (valor de  $k$  (días) para  $r=0.1-0.2$ ) como indicador de la importancia de las reservas del sistema, ya que ese valor es, obviamente, dependiente de la marcha decreciente del correlograma que, a su vez, no sólo depende de la importancia de las reservas sino también de los efectos externos relacionados con las precipitaciones. Por tanto, lo realmente importante es la comparación de las funciones que el análisis correlatorio y espectral proporciona para años de diferente pluviosidad, como ya antes se ha apuntado en palabras de EISENLOHR (1995). Con esta visión plurianual se ha tratado de interpretar en el presente estudio las series cronológicas aquí consideradas.

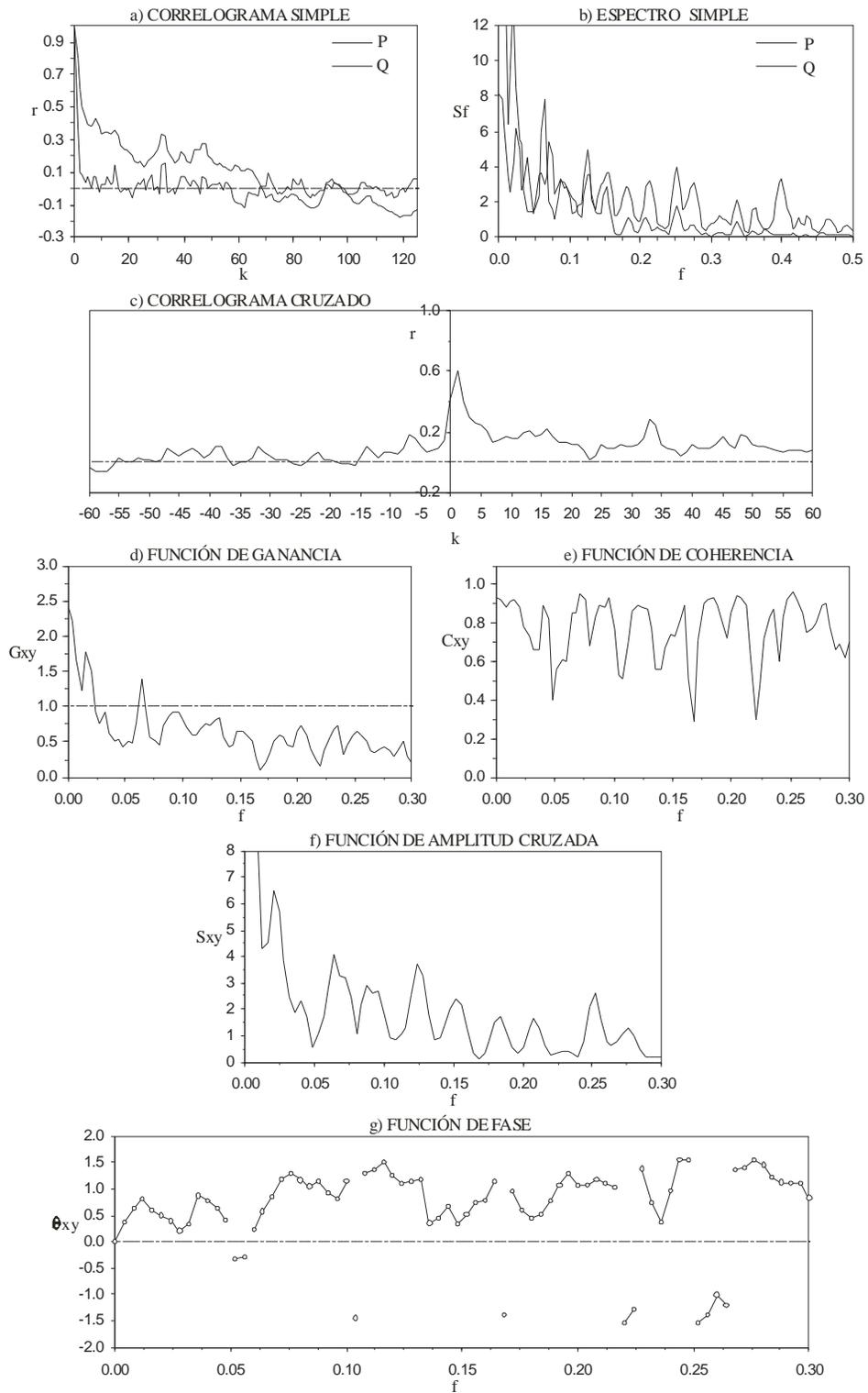
### ESTACIÓN DE AFOROS ( $Q_{AF}$ )

Se ha realizado también el análisis correlatorio y espectral a partir de los datos de caudales realmente registrados en la estación de aforos situada en la Regata Albiztur, aguas abajo del manantial de Salubita. Es decir, se han considerado los datos de caudales correspondientes a la suma de la Regata Albiztur y el caudal del manantial. Los años hidrológicos analizados son los mismos que para el caso anterior al igual que las precipitaciones.

### Año hidrológico 1986-87

Los datos extraídos a partir de este análisis son comparables a los obtenidos del análisis de los caudales del manantial. El **correlograma** (figura 4.66a) muestra un efecto memoria próximo a 60 días, si bien la decrecida ahora es algo más rápida que en el caso del manantial. El **espectro** (figura 4.66b), por su parte, permite calcular un tiempo de regulación de 27 días, algo menor que en Salubita, y una frecuencia de corte similar ( $f=0.16$ ). Los picos del espectro son ahora algo mayores en las medias y altas frecuencias, y menores en las más bajas.

El **correlograma cruzado** (figura 4.66c) muestra un pico central de  $r=0.61$  para  $k=1$ , algo mayor que para Salubita, y los picos secundarios son algo más afilados que para el caso del propio manantial. La función de **amplitud cruzada** (figura 4.66f) muestra picos mayores en las medias frecuencias y menores en las más bajas, siempre en comparación con Salubita. La función de **ganancia** (figura 4.66d) pone en evidencia que las frecuencias más bajas son amplificadas y las medias y altas atenuadas, aunque menos que en el manantial.



**Figura 4.66:** Correlograma y espectro simple, correlograma cruzado y funciones de ganancia, de coherencia, de amplitud cruzada y de fase a partir de los datos de precipitación de la estación de Berastegi y los caudales de la estación de aforos de la Regata Albiztur para el año hidrológico 1986-87.

Aunque la función de **coherencia** (figura 4.66e) muestra una linealidad similar a la obtenida para el manantial, la irregularidad parece ser mayor ya que la diferencia entre los valores máximos y mínimos es superior. La función de **fase** (figura 4.66g) es bastante similar a la del manantial y proporciona un valor de desfase entre la función de entrada y la de salida de 1.8 días para  $f=0.1$ .

### Año hidrológico 1998-99

El **correlograma** (figura 4.67a) muestra un efecto memoria cercano a 20 días, y un decrecimiento muy rápido, lo que supone una diferencia importante con respecto a la función obtenida de los caudales del manantial. El **espectro** (figura 4.67b), por su parte, permite calcular un tiempo de regulación de 19 días y una frecuencia de corte de 0.22; tanto el filtraje como el tiempo de regulación son menores que en el caso de Salubita.

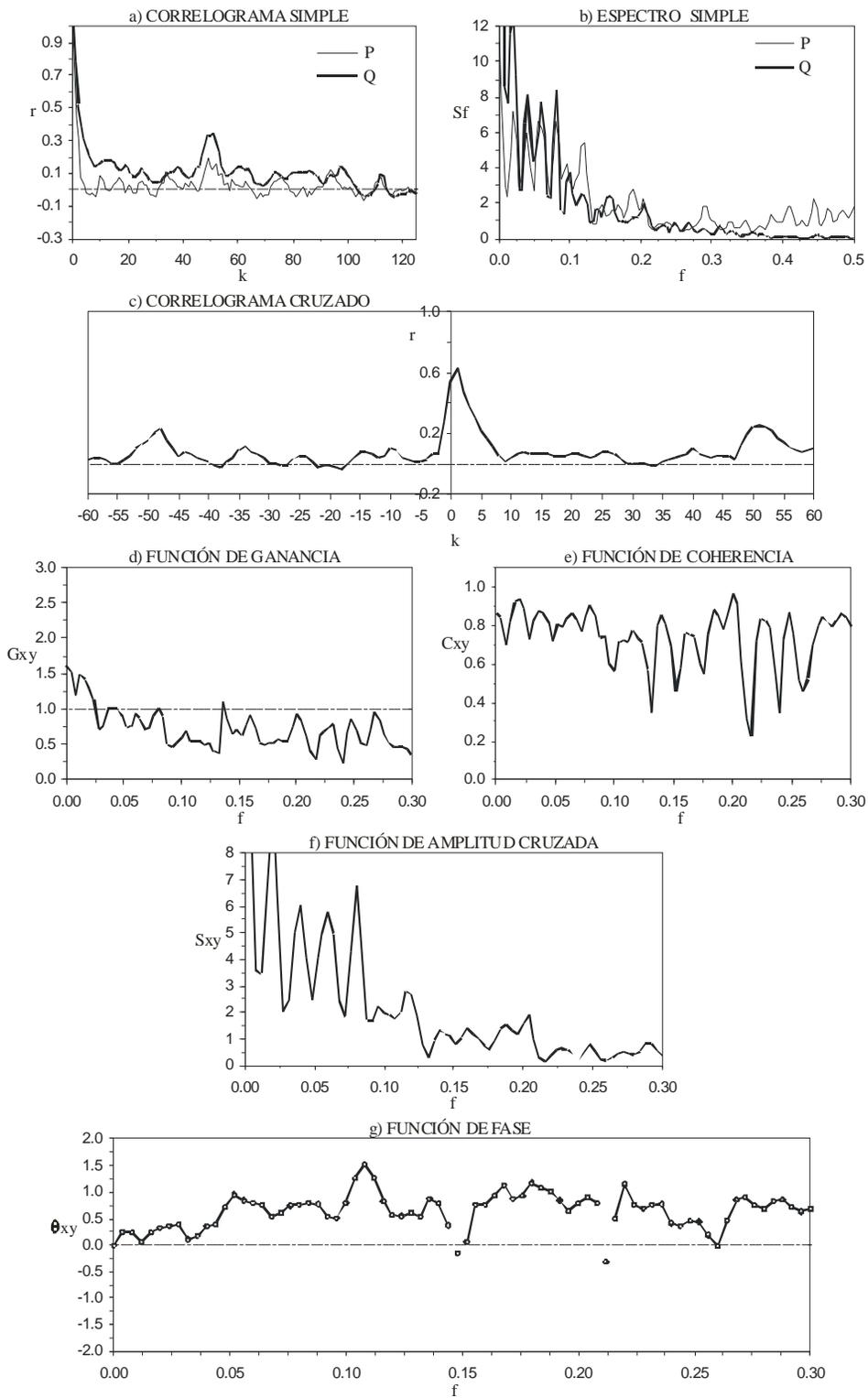
El pico central del **correlograma cruzado** (figura 4.67c) muestra una  $r=0.63$  para  $k=1$  y la función de **amplitud cruzada** (figura 4.67f) picos algo mayores que en el caso de Salubita, a excepción del pico de más baja frecuencia (tendencia anual). Mediante la función de **ganancia** (figura 4.67d) se observa que las frecuencias muy bajas son menos amplificadas y el resto menos atenuadas que en Salubita.

En lo referente a la función de **coherencia** (figura 4.67e), se mantiene que la linealidad es mayor para las bajas frecuencias pero la irregularidad en las altas frecuencias es inferior en comparación con los datos del manantial. La función de **fase** (figura 4.67g), en este caso está bastante bien representada en todo el dominio de frecuencias considerado, siendo el desfase entrada-salida de 1.3 días para  $f=0.1$ .

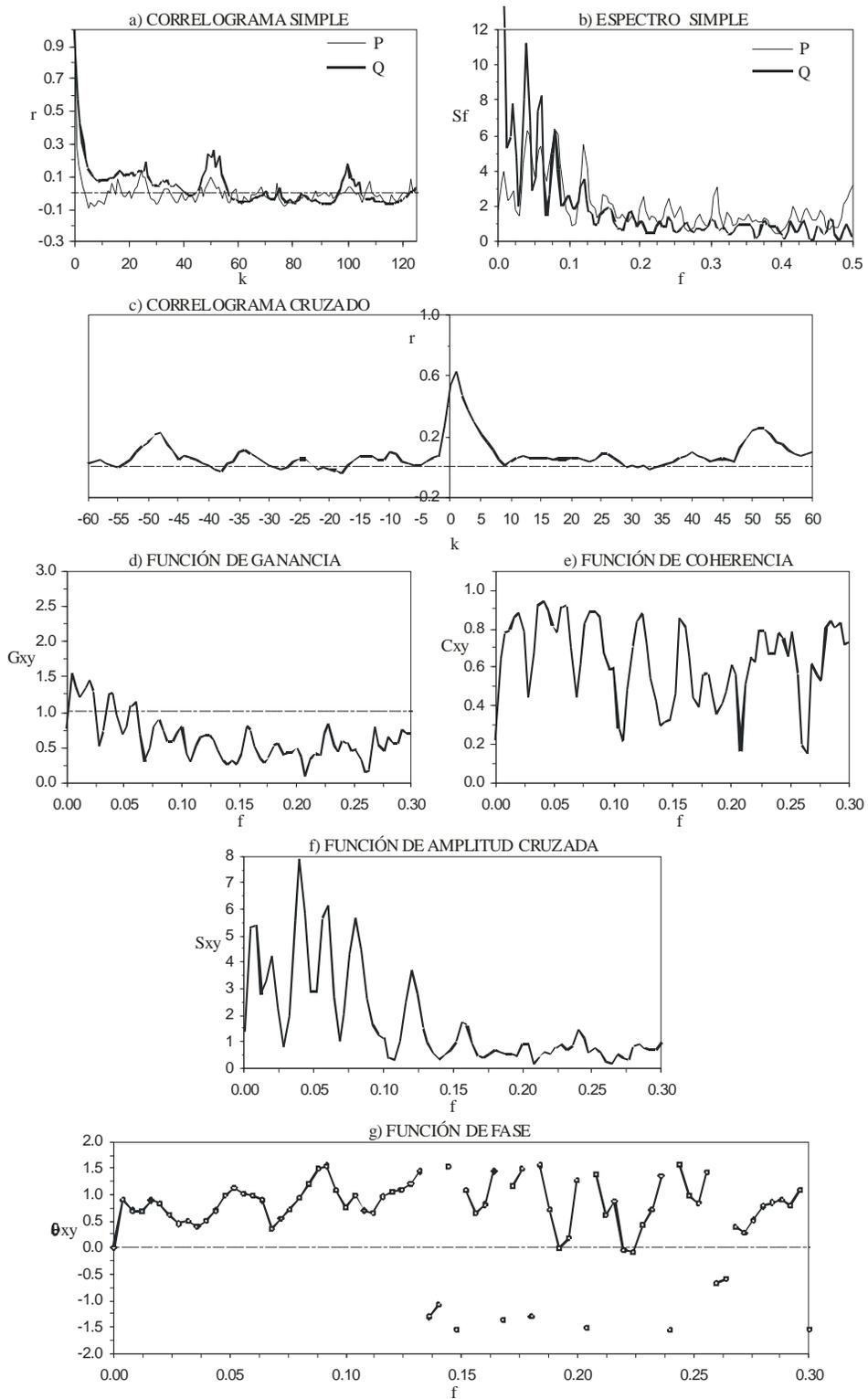
### Año hidrológico 1997-98

Se considera el período 01/10/97 a 30/09/98. El efecto memoria obtenido del **correlograma** (figura 4.68a) se aproxima a los 27 días y del **espectro** (figura 4.68b) se deduce un tiempo de regulación de 11 días y una frecuencia de corte de 0.17. Estos valores son muy próximos a los de Salubita, si bien indican algo menor memoria, regulación y efecto de filtro.

El **correlograma cruzado** (figura 4.68c) muestra un pico central de  $r=0.472$  para  $k=1$  alcanzándose un valor de  $r=0$  a los 9 días. Las funciones de **amplitud cruzada** (figura 4.68f), **ganancia** (figura 4.68d), **coherencia** (figura 4.68e) y **fase** (figura 4.68g) son muy similares a las obtenidas para el caso del manantial mostrando la falta de tendencia anual clara.



**Figura 4.67:** Correlograma y espectro simple, correlograma cruzado y funciones de ganancia, de coherencia, de amplitud cruzada y de fase a partir de los datos de precipitación de la estación de Erdoizta y los caudales de la estación de aforos de la Regata Albiztur para el año hidrológico 1998-99.



**Figura 4.68:** Correlograma y espectro simple, correlograma cruzado y funciones de ganancia, de coherencia, de amplitud cruzada y de fase a partir de los datos de precipitación de la estación de Erdoizta y los caudales de la estación de aforos de la Regata Albiztur para el año hidrológico 1997-98.

### **COMPARACIÓN DE RESULTADOS**

Es evidente la influencia que los caudales de Salubita ejercen en la estación de aforos, aspecto ya cuantificado en el apartado 4.3.1, como se deduce de las figuras 4.63 a 4.68. Los aportes procedentes de la propia regata (excluidos, por tanto, los del manantial) muestran menor inercia (regulación) y peor efecto de filtro sobre las precipitaciones, como lo atestigua la comparación de todas las funciones en la estación de aforos y en Salubita. Las mayores diferencias se dan en el año 1998-99, en el que es menor la capacidad reguladora de la regata.

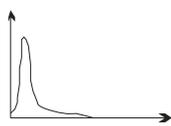
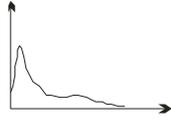
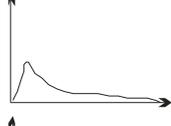
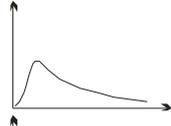
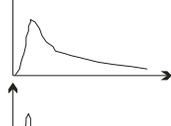
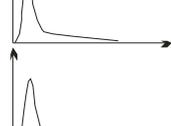
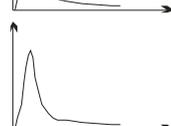
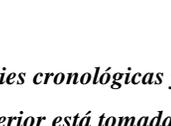
Hay que recordar que es precisamente en este año cuando los aportes propios de la regata en la estación de aforos son mayores (tabla 4.3). En la tabla 4.22 se muestran los parámetros hidrogeológicos obtenidos a partir del Análisis Correlatorio y Espectral realizado para los tres años hidrológicos considerados, tanto para el manantial de Salubita como para la estación de aforos.

	1986-87		1997-98		1998-99	
	Q <sub>S</sub> 80%	Q <sub>AF</sub> 100%	Q <sub>S</sub> 85%	Q <sub>AF</sub> 100%	Q <sub>S</sub> 77%	Q <sub>AF</sub> 100%
$Q_{AF}=Q_S+Q_{Regata}$						
Efecto memoria (d)	60	60	28	27	65	20
Tiempo de regulación (d)	35	27	15	11	35	19
Frecuencia de corte (d <sup>-1</sup> )	0.16	0.16	0.16	0.17	0.16-0.21	0.220
Desfase (d)	1.7	1.8	1.3	1.2	1.7	1.3
Correlograma cruzado valor máximo de r (k=1, siempre)	0.554	0.610	0.490	0.472	0.516	0.630

**Tabla 4.22: Parámetros hidrogeológicos obtenidos a partir del Análisis Correlatorio y Espectral de las precipitaciones y los caudales en Salubita (Q<sub>S</sub>) y en la estación de aforos (Q<sub>AF</sub>) para los tres años hidrológicos considerados. El reparto porcentual corresponde a la tabla 4.3.**

### **CLASIFICACIÓN DE SISTEMAS A PARTIR DEL ANÁLISIS CORRELATORIO Y ESPECTRAL**

La figura 4.69 refleja una clasificación de diferentes tipos de acuíferos kársticos realizada en función del estudio de las series cronológicas. Los primeros casos son los propuestos inicialmente por MANGIN (1970, 1975). Los últimos corresponden a acuíferos kársticos del País Vasco, descritos por ANTIGÜEDAD (1986) y MORALES (1991). Según los datos recogidos en la tabla 4.21 correspondientes al manantial de Salubita, y reflejados en la figura 4.69 junto con el resto de los sistemas kársticos, el Sistema Kárstico de Salubita, con un efecto memoria medio-grande (47 días) y un tiempo de regulación intermedio (25 días), se encontraría entre los sistemas de Le Baget y Fontestorbes.

TIPOS	EFFECTO MEMORIA (r: 0.1 - 0.2)	BANDA ESPECTRAL (Fc)	TIEMPO DE REGULACIÓN (So/2)	HIDROGRAMA UNITARIO
ALIOU	REDUCIDO 5 días	MUY ANCHA 0.30	10-15 días	
BAGET	PEQUEÑO 10-15 días	ANCHA 0.20	20-30 días	
FONTESTORBES	GRANDE 50-60 días	ESTRECHA 0.10	50 días	
TORCAL	MUY GRANDE 70 días	MUY ESTRECHA 0.05	70 días	
ORUE (Aramotz)	45 días	0.09	35 días	
<b>SALUBITA</b>	<b>47 días (28-65)</b>	<b>0.16-0.21</b>	<b>25 días (15-35)</b>	
ALDABIDE (Itxina)	7 días	0.36	13 días	
UBEGI (Itxina)	7 días	0.36	10 días	
ARGIN (Ereñozar)	7 días	0.35	11 días	

**Figura 4.69: Clasificación del Sistema Kárstico de Salubita a partir del estudio de las series cronológicas y su posición en comparación con otros sistemas acuíferos kársticos conocidos. La parte superior está tomada de MANGIN (1970. 1975).**

El comportamiento del Sistema Kárstico de Salubita, en comparación con otros sistemas kársticos del País Vasco, está próximo al de Orue ( $f=0.09$ ), aunque con una banda espectral mucho más ancha definida por la frecuencia de corte ( $f=0.16-0.21$ ). El muy buen filtraje de Orue a partir de  $f=0.09$ , es decir, en el dominio de las medias y altas frecuencias, indica el efecto modulador de ese

sistema debido a una red de drenaje funcional poco desarrollada. En cambio, el filtraje no tan bueno (existencia de pequeños picos en el espectro) de Salubita a partir de  $f=0.16-0.21$ , es decir, en el

dominio de las medias y altas frecuencias, evidencia la existencia de una red de drenaje mejor desarrollada. Esto justificaría la posición (figura 4.60) distanciada de ambos sistemas en el ámbito del esquema de clasificación propuesto por MANGIN (1970, 1975), en el cual Orue se sitúa en el dominio IV y Salubita en el III.

#### **4.11. CÁLCULO DEL BALANCE HÍDRICO**

##### **INTRODUCCIÓN**

La evaporación del agua del suelo o de zonas encharcadas en su superficie se suma a la transpiración de las plantas combinándose en un único proceso denominado *evapotranspiración (ET)*. Ésta es una parte esencial en el cálculo del balance hídrico. La transpiración es el proceso por el cual el agua del suelo, absorbida por las raíces de las plantas, fluye a través de canales vasculares y escapa hacia la atmósfera a través de los minúsculos estomas de la superficie de las hojas. Al igual que ocurre con la evaporación, la evapotranspiración está también estrechamente ligada a las condiciones meteorológicas además de a las características de la propia cubierta vegetal. Sin embargo, La estimación de la ET es, sin ningún tipo de dudas, el mayor problema existente a la hora de realizar un balance hídrico, sea a escala de cuenca sea a escala de suelo.

La dificultad de cuantificar sobre el terreno los diversos procesos, complejos y variables en el espacio y en el tiempo, que condicionan la evapotranspiración (factores meteorológicos, edafológicos, agronómicos...) hace que la estimación de este parámetro venga acompañada de serias incertidumbres. Estas incertidumbres en la estimación de la ET tienen, a su vez, importantes consecuencias en los diferentes campos de aplicación de los balances hídricos: hidrología, hidrogeología, agronomía, climatología..., en los que otros procesos se cuantifican indirectamente a partir de la estimación realizada para la ET.

A pesar de que son numerosos los trabajos llevados a cabo con el objeto de buscar métodos fiables para la estimación de la ET (a escala horaria, diaria, mensual o anual) a partir de parámetros atmosféricos, del suelo y de los cultivos, dependiendo de la fórmula utilizada, existen incertidumbres ligadas tanto a la cantidad y calidad de los datos disponibles como a la posibilidad de extrapolación de las fórmulas a ambientes geofísicos (clima, orografía, suelos, vegetación, cultivos) diferentes.

Como DOORENBOS y PRUITT (1986) indican en un documento de la FAO, *“el ensayo de las fórmulas de predicción (de la evapotranspiración) en un nuevo conjunto de condiciones es una empresa laboriosa, onerosa y que lleva mucho tiempo, y sin embargo, con frecuencia se necesitarán rápidamente datos sobre las necesidades de agua en los cultivos a efectos de planificación regional y preliminar de proyectos...”*. Aunque estos autores se refieren a la planificación agrícola del regadío es

evidente que la cuestión planteada es aplicable a planificaciones de otro tipo, como puede ser la hidro(geo)lógica, en sentido estricto, o la relativa a modelos lluvia - escorrentía en el contexto de la predicción de avenidas.

Es decir, por un lado, en muchas regiones no se sabe ni siquiera el rango de incertidumbre asociado a la estimación de la ET siguiendo las diversas fórmulas conocidas, pero, por otro lado, hace falta aplicarlas, unas u otras, para poder avanzar en la planificación correspondiente. Este es el círculo que hay que ir rompiendo mediante la investigación ordenada tendente a clarificar las incertidumbres asociadas a los diversos métodos susceptibles de ser aplicados y, en consecuencia, tendente a establecer las formulaciones que mejor se ajustan, hoy por hoy, al ámbito geográfico propio y al tipo de datos disponibles en ese ámbito.

Pero, curiosamente, a pesar de la reconocida complejidad de la estimación de la ET, en la práctica es habitual ir directamente a los procedimientos más simples, utilizando fórmulas, tipo Thornthwaite, basadas en muy pocos parámetros, y ello: sin llegar a saber el grado de incertidumbre asociado, es decir, sin realizar un mínimo análisis de sensibilidad de ese método; sin establecer comparaciones con las estimaciones a partir de otros métodos; y, lo que quizás es más grave, sin contar con los datos de otros parámetros que pueden estar disponibles en el ámbito geográfico de actuación (tan absurdo resulta utilizar fórmulas complejas con pocos parámetros disponibles como utilizar fórmulas simples cuando se cuenta con una relativamente buena red de observación de parámetros).

### ***EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL (ETP) Y EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA (ET<sub>0</sub>)***

Tradicionalmente, en nuestro entorno, se ha utilizado el concepto de **Evapotranspiración potencial** (ETP), calculada por la conocida expresión de Thornthwaite que únicamente utiliza el valor medido de la temperatura media del aire y que no considera el efecto de otras variables atmosféricas. Es precisamente esta simpleza del método la causa de su amplio uso así como de la mayor parte de las críticas que se le hacen.

Más recientemente, el efecto del clima sobre el proceso de evapotranspiración (ET) se está describiendo mediante la **Evapotranspiración de referencia (ET<sub>0</sub>)** (*reference crop evapotranspiration*). Este nuevo concepto reconoce que la evapotranspiración potencial depende del tipo de cubierta vegetal, o cultivo, existente; por tanto, la necesidad de definir la ET<sub>0</sub> es una consecuencia de la confusión que acompaña a la definición de ETp (“*ET<sub>0</sub> is an outgrowth of the confusion surrounding ETp*”, en palabras de BURMAN y POCHOP, 1994).

En este capítulo se presentan cuatro métodos a partir de los cuales se ha calculado la evapotranspiración potencial (ETP) (Thornthwaite y Primault) y la de referencia ( $ET_0$ ) (Allen y Penman).

Evapotranspiración potencial (ETp):

Es la evaporación de una superficie extensa de un cultivo verde que sombrea totalmente la superficie del suelo, de altura corta y uniforme, y siempre bien provisto de agua (THORNTHWAITE, 1948; PENMAN, 1948). Esta definición no se aplica exclusivamente a una superficie estándar, es vaga y ofrece varias interpretaciones de su significado (BURMAN et al., 1983). ROSENBERG et al. (1983) definió la ETP como *“la evaporación a partir de una superficie extensa de césped corto que ensombrece totalmente el suelo, y siempre está bien regado con agua”*.

Evapotranspiración de referencia (ETo):

La FAO definió (DOORENBOS y PRUITT, 1977-1986) la  $ET_0$  como “el consumo de agua de una superficie extensa de hierba (o alfalfa), uniforme, de 8 a 15 cm de altura, en crecimiento activo, sombreando la totalidad del suelo y bien provista de agua”.

ALLEN definió en 1994 el concepto de evapotranspiración de referencia como la “tasa de evapotranspiración de un cultivo hipotético de referencia que tiene una altura uniforme de 0.12 m, una resistencia de la superficie de 70 m/s y un albedo de 0.23, que es próximo a las características de una superficie de césped verde de altura uniforme, crecimiento activo, que cubre totalmente el suelo y que está bien abastecido hídricamente” (TUÑÓN, 2000).

**DATOS METEOROLÓGICOS**

El primer paso antes de acometer el balance, ha consistido en comparar los datos de varias estaciones meteorológicas próximas al área de estudio para verificar que los datos utilizados en el proceso del cálculo de la ETP y  $ET_0$  son representativos del área. La localización geográfica de las estaciones consideradas se ha plasmado en la figura 2.1, habiéndose comentado allí (apartado 2.3) los rasgos meteorológicos generales del entorno de la zona de estudio. Se han comparado los datos diarios comprendidos entre Enero y Diciembre de 1997 de las estaciones de Ordizia, Berastegi, Alegia y Erdoizta (Anexo I) y se ha llegado a las siguientes conclusiones:

- En lo referente a la **temperatura**, aunque la tendencia es idéntica (figura 4.70) en las cuatro estaciones, la temperatura media anual más baja corresponde a Berastegi (12,6 °C) y la más alta a Erdoizta (14°C), siendo Ordizia la que presenta una temperatura intermedia (12.9 °C), aunque el registro es incompleto.

- La **precipitación** media anual más alta se ha registrado en Berastegi (1547 mm) y la más baja en Ordizia (en torno a 1276 mm). No se conoce con exactitud la precipitación registrada en Ordizia por la existencia de algunos huecos en el registro aunque éstos se han completado con los datos de Berastegi. No se ha considerado la precipitación registrada en la estación de Alegia por aparecer en el registro numerosos huecos sin datos. En este caso, la estación de Erdoizta es la que proporciona un valor intermedio de precipitación de 1377 mm (figura 4.70).

- El registro de la **radiación solar** se limita a algunas estaciones meteorológicas, siendo Berastegi y Ordizia las más próximas a la zona de estudio con registro de este parámetro, así que únicamente se han comparado estas dos. La evolución es idéntica en ambas estaciones aunque el valor medio anual de irradiación es ligeramente superior en Ordizia (138 W/m<sup>2</sup>) en comparación con Berastegi (119 W/m<sup>2</sup>).

- También la **humedad relativa** del aire se registra sólo en esas dos estaciones. La tendencia es también prácticamente idéntica, aunque el valor medio anual más alto corresponde a Berastegi (84%) y el más bajo a Ordizia (81%).

- Del mismo modo, también la comparación del registro de la **velocidad del viento** se refiere a Berastegi y Ordizia. Se trata de la velocidad del viento a 2 m sobre la superficie del suelo y a la estación de Berastegi le corresponde un valor anual medio de 1.5 m/s y a la de Ordizia un valor de 0.94 m/s. Los datos que faltan en la estación de Ordizia se han completado con los datos de la estación de Berastegi.

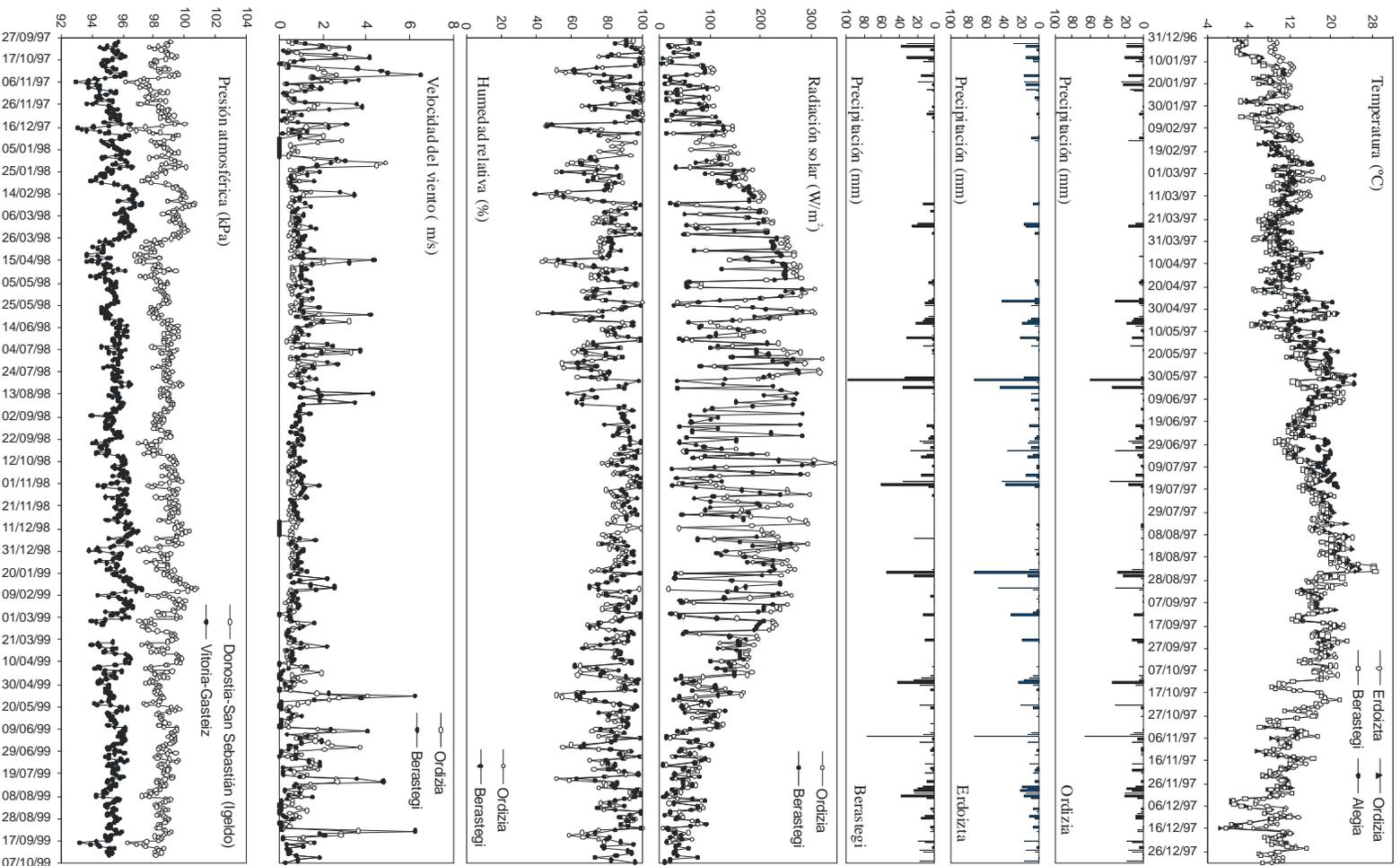
- Se han comparado los datos de **presión atmosférica** de las estaciones de Vitoria-Gasteiz (X:525491 Y: 4745317 Z: 546) e Igeldo, en San Sebastián-Donostia, (X:583212 Y:4797100 Z:100) para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99 (figura 4.70). La primera de ellas ha proporcionado una presión atmosférica media anual de 95.4 kPa mientras que la segunda ha facilitado un valor medio anual de 98.7 kPa. Dado que la estación de Vitoria-Gasteiz se encuentra ubicada a una cota similar a la cota media de la zona de estudio y puesto que variaciones de 2 kPa proporcionan diferencias mensuales máximas en el cálculo de la ETP del orden de 0.2 mm, se ha optado por tomar un valor de presión atmosférica constante de 95 kPa para los cálculos de evapotranspiración.

Se han utilizado los datos de **evaporación** del tanque evaporímetro de la estación de Lareo (X: 572065 Y: 4758919 Z: 745 ), incluidos en la tabla 4.27, para compararlos con los valores de evapotranspiración calculados (figura 4.73).

Siendo Ordizia y Berastegi las dos únicas estaciones meteorológicas de las que se disponen los datos completos y en vista de que los datos de precipitación y temperatura de Ordizia son los que más se asemejan a los de las estaciones circundantes (Alegia, Erdoizta, Arriaran e Ibiur), se ha considerado que es la estación de Ordizia la que proporciona los datos más representativos (humedad relativa, radiación solar y temperatura) de la zona objeto de estudio. Por este motivo, se ha optado por utilizar los datos de esta estación en el cálculo de la evapotranspiración (en mm), puesto que se asume que la evaporación calculada en función de los datos de la estación de Ordizia es representativa de la zona de estudio. Como ya se ha comentado, al no existir aquí registro de presión atmosférica, se ha tomado un valor constante de 95 kPa a partir de los datos existentes obtenidos de las estaciones de Vitoria-Gasteiz e Igeldo. Para el cálculo del porcentaje de precipitación evapotranspirada se han empleado los datos de precipitación de la estación de Erdoizta.

Previamente al cálculo de la evapotranspiración, se ha realizado el balance hídrico “a grosso modo” para los años hidrológicos 1985-86, 1986-87, 1988-89, 1997-98 y 1998-99. Evidentemente, esta aproximación es muy sencilla y se ha llevado a cabo con el fin de tener valores de referencia y, en el caso de los dos últimos años, poder compararlos con la ETR calculada mediante los diferentes métodos que se explican en los apartados 4.11.5. y 4.11.6. Para la superficie de la cuenca drenada por la Regata Albiztur se ha considerado inicialmente un valor de 26 km<sup>2</sup>, a partir de la planimetría de la cuenca vertiente realizada sobre el mapa topográfico a escala 1:10000.

Los valores de precipitación (estación de Erdoizta) son 1524 mm (1985-86), 1393 mm (1986-87), 1030 mm (1988-89), 1268 mm (1997-98) y 1488 mm (1998-99). De este modo, se obtiene un volumen total de agua caída en esa superficie para cada año de 39.6 hm<sup>3</sup> (1985-86), 36.2 hm<sup>3</sup> (1986-87), 26.7 hm<sup>3</sup> (1988-89), 32.9 hm<sup>3</sup> (1997-98) y 38.7 hm<sup>3</sup> (1998-99). Puesto que el caudal medio anual registrado en la estación de aforos (presa) es, en ese orden, de 927 l/s, 845 l/s, 511 l/s, 587 l/s y 977 l/s, el volumen de agua que anualmente pasa por la estación es de 29.2 hm<sup>3</sup>, 26.6 hm<sup>3</sup>, 16.1 hm<sup>3</sup>, 18.5 hm<sup>3</sup> y 30.8 hm<sup>3</sup>, respectivamente. Admitiendo la inexistencia de riegos y bombeos se deduce que en 1985-86 la evapotranspiración fue del 26.3%, en 1986-87 del 26.5%, en 1988-89 del 39.7%, en 1997-98 del 43.8% y en 1998-99 del 20.4% (tabla 4.23).



***Figura 4.70: Comparación de los datos meteorológicos (temperatura, precipitación, radiación solar, humedad relativa y velocidad del viento para el año 1997 y presión atmosférica para 1997-99) de las estaciones consideradas***

Año hidrológico	Precipitación en 26 km <sup>2</sup> (hm <sup>3</sup> )	Descarga (hm <sup>3</sup> )	ETR (hm <sup>3</sup> )	ETR (%)
1985-86	39.6	29.2	10.4	26.3
1986-87	36.2	26.6	9.6	26.5
1988-89	26.7	16.1	10.6	39.7
1997-98	32,9	18,5	14.4	43.8
1998-99	38,7	30.8	7.9	20.4

**Tabla 4.23: Aproximación al cálculo de la ETR para los años hidrológicos 1985-86, 1986-87, 1988-89, 1997-98 y 1998-99 a partir de los caudales en la estación de aforos y a la precipitación registrada en la estación de Erdoizta,**

Para los cinco años hidrológicos se ha tomado inicialmente una superficie de cuenca para la Regata Albiztur de 26 km<sup>2</sup>. Sin embargo, es posible que en precipitaciones muy intensas haya aportes superficiales a la regata desde zonas que normalmente no drenarían a la misma debido a la total infiltración y flujo subterráneo de las aguas hacia fuera de esa cuenca. Podría ser el caso del sector situado al Norte de la falla de Errezil (tomada como límite hidrogeológico de la cuenca), es decir, en torno al monte Ernio (figuras 3.2 y 4.1), de fuertes pendientes, y cuyo drenaje, evidenciado por los trazados efectuados, se da hacia el Este, hacia el río Oria (apartado 4.8). Esta posible variación temporal en el área realmente drenante a una regata en región kárstica es algo que ha sido puesto de manifiesto, como hecho real, por algunos autores, BONACCI (1987) entre ellos. Nos limitamos aquí a reflejar esta posibilidad, si bien más adelante se retomará este asunto en el contexto de un análisis más exhaustivo del balance hídrico.

De todas maneras, a la vista de lo reflejado en la tabla se deduce una ETR anual en un rango de 7.9-14.4 hm<sup>3</sup>, que expuesto en porcentaje sobre la precipitación caída supone un 20.4-43.8%, es decir, una notable variación temporal. En cualquier caso, la mayor ETR, tanto absoluta como, sobre todo, porcentual, se da en los años de menor precipitación (1988-89 y 1997-98), que son también los de menor descarga de la Regata Albiztur. Hasta aquí solamente se considera la precipitación total anual y no su reparto ni las condiciones de temperatura. Por último, es muy posible que algunos de los datos utilizados como base para este cálculo de referencia no sean los óptimos, los caudales por caso, pudiendo conducir a error sobre todo en el caso de los años más lluviosos (apartado 4.11.9).

#### **CÁLCULO DE LA INSOLACIÓN ( $n$ ) A PARTIR DE LA RADIACIÓN SOLAR GLOBAL ( $S_t$ )**

Para poder utilizar los métodos de Thornthwaite y Primault que se presentan a continuación, es necesario conocer las horas de insolación diarias de la zona de estudio. Sin embargo, en las estaciones meteorológicas automáticas se suele carecer de heliógrafos que permitan el registro directo de la insolación, de forma que la medida de la radiación solar, instantánea, se realiza mediante piranómetros.

En cualquier caso, el registro de radiación solar global ( $S_t$ ,  $W/m^2$ , instantánea –en un segundo-) medida con piranómetro posibilita el cálculo de la insolación ( $n$ ) a partir de la fórmula de ANSTRÖM (1924), que relaciona estadísticamente la radiación solar global real diaria ( $S_t(W/m^2)*0.0864=S_t(MJ/m^2 \text{ día})$ ) con la radiación solar extraterrestre ( $S_o$ ):

$$n = \frac{N}{b_s} \left( \frac{S_t}{S_o} - a_s \right)$$

donde,

$n$ : número de horas de sol registradas al día (insolación real).

$N$ : número máximo posible de horas de sol al día.

$n/N$ : porcentaje de luz solar.

$S_o$ : radiación solar extraterrestre ( $W/m^2$ ).

$S_t$ : radiación solar global registrada ( $W/m^2$ ).

$a_s$ : fracción de radiación extraterrestre ( $S_o$ ) en días cubiertos ( $n=0$ ; entonces  $S_t = 0.25 S_o$ ).

$b_s$ : fracción de radiación extraterrestre ( $S_o$ ) en días despejados ( $n=N$ ; entonces  $S_t = 0.75 S_o$ ).

Los valores utilizados para este cálculo han sido  $a_s = 0.25$  y  $b_s = 0.50$ , valores recomendados por DOORENBOS y PRUITT (1977) para climas medios. Estos valores también fueron utilizados por el Ente Vasco de la Energía (EVE, 1987) en el estudio de las condiciones de sol en el País Vasco.

Por otra parte, como la  $S_t$  corresponde al valor de la radiación solar registrada en la estación meteorológica, queda por determinar la radiación solar extraterrestre ( $S_o$ ). Esta última incógnita se ha despejado mediante la siguiente expresión:

$$S_o = \left[ \frac{R}{r} \right]^2 CS \text{ sen}(\beta)$$

donde,

$[R/r]^2$ = variación de la distancia relativa entre la Tierra y el Sol correspondiente a ese día.

$CS$  = constante solar ( $CS = 1372 W/m^2$  instantánea= $118.5 MJ/m^2 \cdot \text{día}$ )

$\beta$  = ángulo de elevación solar medio del día ( $^\circ$ ).

La constante solar ( $CS$ ) representa la radiación solar que llega a una superficie perpendicular a los rayos solares situada en la parte exterior de la atmósfera terrestre.

El valor del ángulo  $\beta$  varía a lo largo de las horas de los días del año y está determinado por los movimientos astronómicos relativos entre la Tierra y el Sol. Se ha tomado un ángulo de elevación

solar medio de 47° considerando que la elevación solar máxima diaria del año en la latitud media del País Vasco (43°) es de 70.5°, en el solsticio de verano, y la elevación solar mínima diaria es de 23.5°, en el solsticio de invierno.

Para calcular la distancia relativa entre la Tierra y el Sol ( $r$ ) se ha utilizado el método del IGN (1994) cuya fórmula para el cálculo aproximado de esa distancia en Unidades Astronómicas (UA, 1 UA = 149 597 870 km), es la siguiente:

$$r = 1 - 0.017 \cos(0.986 DD - 4)$$

donde DD es el día del año (1,2,...365) y los ángulos se miden en grados. Puesto que la distancia media Tierra-Sol es  $R=1.000001018$  UA, el valor de  $[R / r]^2$  es:

$$\left[ \frac{R}{r} \right]^2 = \left[ \frac{1.000001018}{1 - 0.017 \cos(0.986 DD - 4)} \right]^2$$

Los datos obtenidos, mediante la aplicación de estas fórmulas, del número de horas diarias de sol ( $n$ ), se han comparado con los datos de insolación existentes para la estación de Arkaute (Vitoria-Gasteiz; X:530608 Y:4744631 Z:517). Durante los meses de verano, algunos valores obtenidos (Anexo I) mediante la fórmula de Anström sobrepasan con creces los valores medidos en la estación de Arkaute, en cuyo caso se han utilizado los valores de dicha estación.

### **MÉTODOS PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN POTENCIAL BASADOS EN LA TEMPERATURA Y/O EN LA HUMEDAD DEL AIRE**

#### **MÉTODO DE THORNTHWAITE**

Este método basado en la temperatura del aire es muy conocido y su uso está muy extendido debido, principalmente, a que para su utilización se requieren pocos datos climáticos, basta con el dato de temperatura media mensual del aire, el número máximo de horas de sol según la latitud y el número de días del mes. Si se cuenta con datos de insolación ( $n$ ) es conveniente emplear éstos para el cálculo ya que proporcionarán una información más real. La fórmula viene expresada de esta forma:

$$ETP(mm) = 16 \left( \frac{10t}{I} \right)^a \left( \frac{N}{12} \frac{d}{30} \right)$$

Donde ETP es la evapotranspiración potencial mensual en mm,  $N$  es el número máximo de horas de sol al día,  $d$  es el número de días del mes,  $T$  es la temperatura media mensual en °C, y  $a$  está definida como:

$$a = 6.75 \times 10^{-7} I^3 - 7.71 \times 10^{-5} I^2 + 1.79 \times 10^{-2} I + 0.49$$

siendo  $I$  el índice de calor anual obtenido de la suma de los 12 valores de los índices de calor mensuales ( $i$ ), obtenidos mediante la fórmula:  $i = \left(\frac{T}{5}\right)^{1.514}$

Aunque es frecuente el uso de esa fórmula a escala mensual, también se puede aplicar a escala diaria (LLANOS *et al.*, 1999), o incluso horaria si la disponibilidad de datos lo permite, pero siempre sobre la base de la sola consideración de la temperatura. En cualquier caso, la fórmula de Thornthwaite proporciona una estimación inicial del valor de la ETP considerando un mes standard de 360 horas de insolación.

Para el cálculo de la ETP mediante este método, el número de horas de sol al día (h) que se ha incluido en la fórmula no ha sido el referido a la latitud, ya que este hace referencia al número máximo de horas de sol y el valor obtenido se aleja con creces de la realidad proporcionando valores de ETP realmente altos. El número de horas de insolación utilizado ha sido el calculado mediante el método de Anström (apartado 4.11.4), corregido posteriormente según los datos de la estación de Arkaute. En el apartado 4.11.7 se comentan las diferencias obtenidas en el cálculo de la evapotranspiración mediante el método de Thornthwaite según el número de horas de insolación empleado, número máximo de horas de sol según la latitud o número de horas de sol calculado según la fórmula de ANSTRÖM (1924).

La utilización de la temperatura del aire como único dato climatológico hace que la ETP calculada carezca de exactitud. Además, THORNTWHAITE (1948) asume que a temperaturas inferiores a 0°C no se produce evaporación ya que se obtiene una ETP nula o negativa. Finalmente, tampoco se efectúa ningún ajuste según el tipo de vegetación, lo que conduce a error, ya que es evidente que tanto el tipo de vegetación como su grado de desarrollo y las variaciones estacionales repercuten de forma importante en la transpiración.

Este método ha sido puesto en duda por diferentes autores (PELTON *et al.* 1960; TUÑÓN, 2000) debido al hecho de que se basa únicamente en la temperatura y proporciona valores mensuales de ETP ignorando los mecanismos de detalle y simplificando el proceso. En cualquier caso, como afirman CUSTODIO y LLAMAS (1983) respecto al uso de métodos empíricos para el cálculo de la ET “los valores que con ellos se obtienen tendrán escasa validez si no están contrastados con medidas directas en la zona a la que se aplican; sin este requisito será muy aventurado darles un significado ni siquiera orientativo”.

La ETR se ha calculado mediante el balance de agua en el suelo según Thornthwaite, teniendo en cuenta la ETP, las entradas por la lluvia y la capacidad de campo. El valor de esta última ha sido estimado de acuerdo con la información recopilada de la bibliografía. Para suelos que varían entre luvisol órtico (*terra fusca*) y varios tipos de rendzinas, TEUTSCH (1988) estima una capacidad de campo de 60 mm para suelos y BEHRINGER (1988) evalúa esa capacidad de campo en 50 mm para una situación análoga. HEMME (1970), por su parte, estima un valor de 70 mm. Teniendo en cuenta esta información, la ETR se ha calculado para una capacidad de campo de 50 mm.

### **MÉTODO DE PRIMAULT**

El método de PRIMAULT (1963) se utiliza habitualmente en Suiza por el ISM (Institut Suisse de Météorologie) y permite calcular la ETP en pastizales con una periodicidad horaria aunque en este estudio se ha determinado con una periodicidad diaria. Se trata de un método que incluye la humedad relativa del aire, la duración de la insolación, un coeficiente dependiente de la altitud (C) y un coeficiente de vegetación (i). Para este cálculo se ha considerado la altitud media de la cuenca de 500 m por lo que se ha tomado un valor de C de 0.83. El factor de la vegetación, por su parte, no se mantiene constante a lo largo del año oscilando entre 0.1 en Enero y 1.1 en Julio. El cálculo se realiza mediante la siguiente expresión:

$$ETP = E.C.i$$

$$E = \left[ \frac{103 - H}{100} \right] (S + 2n)$$

donde,

*ETP*: evapotranspiración potencial en mm/día.

*E*: evaporación de una superficie de agua libre (mm/día).

*H*: humedad relativa del aire (%).

*S*: duración de la insolación (horas).

*n*: número de días considerados (n=1 para valores diarios)

*C*: coeficiente dependiente de la altitud (0.7-1.1)

*i*: coeficiente dependiente de la vegetación (0.1-1.1)

En este caso la ETR también se ha calculado mediante el balance del agua en el suelo, en el que se ha incluido tanto la ETP como la precipitación y la capacidad de campo (50 mm).

JEANNIN y GRASSO (1995) aplican el método de Primault (paso diario) y el de Thornthwaite a una zona kárstica (bassin de la Milandrine) de Suiza, y evidencian las importantes

diferencias en los resultados. Estiman que el método de Primault subestima y el de Thornthwaite sobrestima la ETP medida a partir de una superficie libre en un tanque próximo a la zona de estudio.

### **MÉTODOS BASADOS EN LA RADIACIÓN SOLAR**

Aunque la relación entre la evapotranspiración y la radiación solar no es lineal, la mayor parte de la energía necesaria para que se produzca la evapotranspiración proviene de la radiación, siendo ésta una relación de fuerte dependencia (ASLYNG, 1974). Esta relación depende, además, de las condiciones climáticas, de la superficie del terreno y de la estación del año (TUÑÓN, 2000). Algunos de los métodos que consideran la radiación solar incluyen también la temperatura, como es el caso de Allen y Penman.

### **MÉTODO DE PENMAN PARA EL CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN DE REFERENCIA $ET_0$ (PROGRAMA ETOCIM)**

El cálculo de la evapotranspiración de referencia ( $ET_0$ ) se ha realizado mediante el programa ETOCIM, que utiliza la versión de DOORENBOS y PRUITT (1977) basada en el método de PENMAN (1948). La expresión general utilizada es la siguiente:

$$ET_0 = \frac{\Delta R_n + \gamma E_a}{\Delta + \gamma} = \frac{\Delta}{\Delta + \gamma} Rn + \frac{\gamma}{\Delta + \gamma} E_a$$

donde,

$ET_0$ : evapotranspiración de referencia (para la alfalfa) horaria (mm).

$\Delta$ : pendiente de la curva de la presión de vapor de saturación ( $e_s$ ) - temperatura (kPa/°C).

$R_n$ : radiación neta (W/m<sup>2</sup>).

$E_a = (e_s - e_d) f(V)$  en W/m<sup>2</sup>; donde ( $V$ ) es velocidad del viento a 2 m sobre la superficie del suelo (m/s).

$e_s$ : presión de vapor de saturación a la temperatura medida (kPa).

$e_d$ : presión de vapor en el punto de rocío ( $e_d = e_s * H.R./100$ ).

H.R.: humedad relativa del aire (%).

$\gamma$ : constante psicométrica (kPa/°C).

La función del viento ( $f(V)$ ) varía dependiendo de la radiación solar ( $R_s$ ) de manera que,

$$\text{si } R_s \leq 0 \quad f(V) = 0.125 + 0.0439 * V$$

$$\text{si } R_s > 0 \quad f(V) = 0.030 + 0.0576 * V$$

Finalmente la ETR se calcula como:

$$ETR = ET_0 * K_c$$

Coeficiente de cultivo ( $K_c$ ): Factor adimensional que considera la morfología y fisiología de la planta e indica la relación existente entre la *evaporación de cultivo de referencia* ( $ET_0$ ) y la *evapotranspiración real* (ETR) de una determinada cubierta vegetal en un tiempo dado. Este coeficiente predice el efecto de las características del cultivo sobre sus necesidades en agua, asumiendo que en todo momento el suelo tiene una cantidad suficiente de agua para el desarrollo vegetativo. Es decir, en la estimación de la  $ET_c$  el agua no es un factor limitante para la evapotranspiración.

La evapotranspiración de cultivo así estimada ( $ET_c$ ) correspondería al concepto de ETR (evapotranspiración real) siempre que el suelo tuviera suficiente humedad en cualquier tiempo; es, por tanto una estimación del valor máximo de evapotranspiración de un cultivo determinado en un periodo de tiempo también determinado. La  $ET_c$  es, obviamente, del máximo interés en agronomía.

En condiciones de humedad variable en el suelo, sin embargo, como ocurre en ausencia de riego programado (el caso más general) la ET real (ETR) va a venir condicionada tanto por la  $ET_c$  como por la disponibilidad de agua en ese momento.

$$ETR = ET_c * (AW/AWC)$$

donde AW es la humedad disponible en el suelo en un momento determinado y AWC es la máxima cantidad de agua que un suelo puede tener disponible para las plantas, de forma que AWC es la diferencia entre el valor de humedad que corresponde a la capacidad de campo y el valor de humedad que corresponde al punto de marchitez (THOMPSON, 1999). Esta última expresión asume una relación lineal entre ( $ETR/ET_c$ ) y ( $AW/AWC$ ), lo que significa que la evapotranspiración real decrece a medida que el suelo va perdiendo humedad, aunque la humedad existente en un momento determinado fuese mayor que la exigencia potencial ( $ET_c$ ); esta asunción tiene en cuenta el efecto que sobre la ET ejerce la mayor fuerza de succión en un suelo que se va secando.

El programa ETOCIM fue diseñado en 1997 por el profesor Richard L. Snyder, biometeorólogo del Departamento del Suelo, Aire y Recursos Hídricos de la Universidad de California y permite realizar el cálculo horario de la  $ET_0$ , para lo cual es necesario incluir los siguientes parámetros de entrada:

- Hora del día (GMT)

- Radiación solar en  $W/m^2$  ( $R_s$ )

- Día del año

- Temperatura del aire en °C

- Presión de vapor en kPa
- Radiación neta en  $W/m^2$  ( $R_n$ )
- Velocidad del viento en m/s a 2 m sobre la superficie del suelo (V).
- Humedad relativa (tanto por 1)

Para poder calcular la ETR es necesario, como paso intermedio, evaluar los coeficientes de cultivo relativos al área de estudio, tarea realmente difícil ya que depende de numerosos factores tales como las diferentes variedades de vegetación allí existente (pradera, bosque), la topografía (orientación y altitud), las fases del desarrollo vegetativo etc. Además, es prácticamente imposible que las características de una misma especie sean comparables en regiones distintas. Por otra parte, es preciso considerar las variaciones de humedad en el suelo, cuestión también difícil de precisar por ausencia de datos al respecto.

Por estos motivos el método de Penman se utiliza en este estudio no tanto con un carácter de estimación precisa de la evapotranspiración real en el área bajo investigación sino, más bien, con un carácter comparativo entre varios métodos como medio de aproximación a los métodos que mejores estimaciones puedan dar, y ello desde un punto de vista de aplicación regional en regiones kársticas, al menos, del País Vasco.

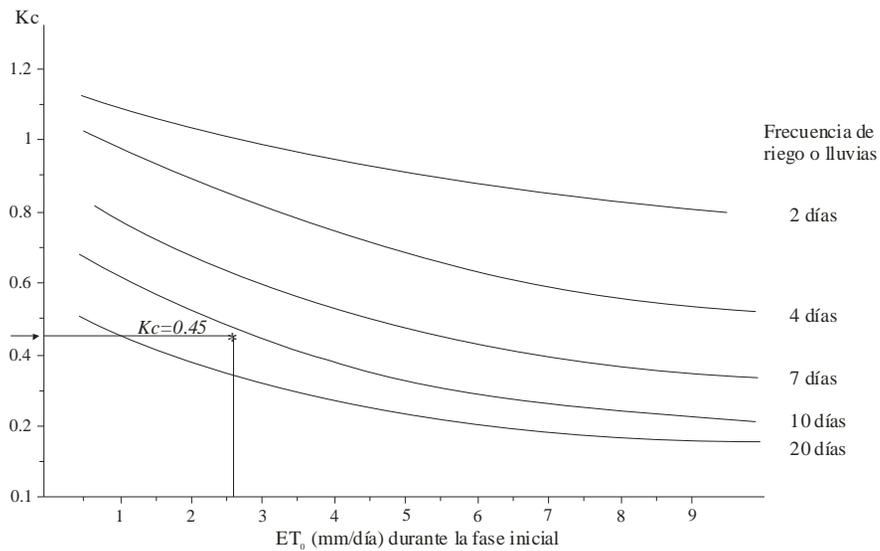
### **ESTABLECIMIENTO DE LOS VALORES MENSUALES DE $K_c$ PARA LA ZONA DE ESTUDIO**

El coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) se refiere a un tipo concreto de planta. Evidentemente en la zona de estudio la vegetación es muy diversa por lo que el  $K_c$  para esta zona ha de considerarse como un promedio, valor general, de los  $K_c$  correspondientes a los diferentes tipos de vegetación existentes (pastos, bosque mixto compuesto de árboles de hoja caduca y perenne, sotobosque, algunos cultivos de verduras y frutales).

El primer paso en la evaluación del coeficiente de cultivo general ha consistido en establecer, de acuerdo con las indicaciones de DOORENBOS y PRUITT (1977), un  $K_c$  mínimo correspondiente a la fase inicial de crecimiento obteniéndose un valor de 0.45 que correspondería al inicio de la primavera (Marzo). Estos autores desarrollan una forma de calcular el  $K_c$  según el valor de  $ET_0$  obtenido y a la frecuencia de la precipitación (figura 4.71).

De acuerdo con la tabla 4.27, los valores de  $ET_0$  obtenidos para el mes de Marzo (1998 y 1999) mediante los métodos de Allen y Penman proporcionan un valor de  $ET_0$  medio diario de 2-2.6 mm/d. Además, las precipitaciones apreciables producidas durante el mes de Marzo (tanto en 1998 como en 1999) suponen una frecuencia de 10 días (no existe aporte de agua por riego), con lo cual se obtiene un valor de  $K_c$  medio en la fase inicial del orden de 0.45.

Posteriormente se ha establecido el valor del  $K_c$  para un estado de crecimiento intermedio (Octubre), que teniendo en cuenta el tipo de vegetación de la zona y según los valores para diferentes cultivos aportados por DOORENBOS y PRUIT (1977) y por SNYDER (1997), se ha considerado como un valor promedio de 0.63 que corresponde a mediados del otoño. El  $K_c$  máximo, correspondiente al momento de mayor desarrollo de la vegetación (Julio), se ha establecido también de acuerdo con los valores para diferentes cultivos aportados por esos autores, lo que ha proporcionado un valor de 0.74.



**Figura 4.71:** Establecimiento del  $K_c$  medio en la fase inicial ( $K_c$  mínimo) a partir del valor de  $ET_0$  (durante la fase inicial) y a la frecuencia de riego o de precipitación apreciable (DOORENBOS y PRUITT, 1977).

Los valores intermedios entre los ahora establecidos se han calculado mediante interpolación, y a los meses de Diciembre, Enero y Febrero se les ha dado el valor del  $K_c$  mínimo, ya que aunque con menor necesidad de agua, la vegetación no desaparece. La tabla 4.24 muestra los valores de los coeficientes de cultivo mensuales considerados, los cuales se han utilizado para la estimación de la ETR a partir de la  $ET_0$  calculada mediante los métodos de Allen y Penman.

Oct	Nov	Dic	Ene	Feb	Mar	Abr	May	Jun	Jul	Ago	Sep
0.63	0.51	0.45	0.45	0.45	0.45	0.49	0.57	0.68	0.74	0.71	0.68

**Tabla 4.24:** Valores del coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) mensuales establecidos para la zona de estudio.

Como ya se ha comentado, estos coeficientes de cultivo no se han calculado considerando un único tipo de vegetación sino en función de la mezcla de una vegetación heterogénea compuesta, en su mayor parte, por bosques de arbolado perenne y caducifolio y pastos que crecen en una zona de media montaña situada en un entorno húmedo de clima oceánico lluvioso.

En cualquier caso, somos conscientes de la cierta arbitrariedad que la elección realizada supone. Lo inhabitual, hasta el momento, al menos, del uso de este tipo de coeficientes, y del propio método de Penman, o similares, en las investigaciones hidrológicas en el País Vasco hacen que este estudio sea un tanto pionero en este campo. Es de esperar que investigaciones más de detalle permitan, mejor pronto que tarde, contar con coeficientes más precisos de las especies vegetales, y de sus estadios de desarrollo, más frecuentes en nuestro ámbito geográfico.

### **MÉTODO DE ALLEN**

Se trata de una modificación del método de Penman que permite calcular de forma teórica la **evapotranspiración de referencia** ( $ET_0$ ) horaria de un cultivo hipotético de césped. La diferencia con respecto al método de Penman es que Allen calcula de forma teórica la **resistencia aerodinámica** y la **resistencia estomática** para un cultivo hipotético de césped, de forma que los valores obtenidos son comparables para cualquier situación geográfica (TUÑÓN, 2000). La primera hace referencia a las condiciones aerodinámicas de la superficie de la planta para la transferencia del agua entre el aire y la propia planta. La resistencia estomática es debida a la respuesta de los estomas influenciada por procesos fisiológicos. La expresión para el cálculo horario de la  $ET_0$  (mm) de Allen es:

$$ET_0 = \frac{0,408\Delta(R_n - S) + \gamma \frac{37}{T + 273} V_2 (e_s - e_d)}{\Delta + \gamma(1 + 0.34V_2)}$$

donde,

$S$ : flujo de calor del suelo ( $MJ/m^2h$ )

$T$ : temperatura del aire ( $^{\circ}C$ )

El resto de términos ha sido ya expresado anteriormente con la diferencia de que ahora  $R_n$  se expresa en  $MJ/m^2h$ .

Al igual que para Penman, el cálculo de la ETR ha de hacerse por medio del *coeficiente de cultivo* ( $Kc$ ), de manera que en ambos casos se han utilizado los mismos valores de  $Kc$  (tabla 4.24).

**CÁLCULO DE LA EVAPOTRANSPIRACIÓN REAL EN LA UNIDAD HIDROGEOLÓGICA KÁRSTICA DE ALBIZTUR**

**MÉTODO DE THORNTHWAITE**

Se ha realizado el cálculo mensual de la ETP para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99 a partir del cual se ha efectuado el balance del suelo teniendo en cuenta la precipitación registrada en Erdoizta y considerando una capacidad de campo de 50 mm. En vista de las lluvias registradas en esta estación durante los meses de Julio, Agosto y Septiembre de 1997, se ha partido de la hipótesis de que a principios de Octubre de 1997 el suelo está húmedo, considerándose unas reservas de 30 mm. La tabla 4.25 muestra los datos obtenidos.

	Oct-97	Nov-97	Dic-97	Ene-98	Feb-98	Mar-98	Abr-98	May-98	Jun-98	Jul-98	Ago-98	Sep-98
Pp (mm)	97.2	196.2	129.2	72.8	53.4	67.4	166.2	116.2	53.6	53.2	78.2	184.2
ETP (mm)	44.3	11.1	3.8	8.5	17.8	26.0	21.6	36.9	56.9	68.4	41.8	47.0
Pp-ETP	52.9	185.1	125.4	64.3	35.6	41.4	144.6	79.3	-3.3	-15.2	36.4	137.2
Reservas	50	50	50	50	50	50	50	50	46.7	31.5	50	50
ETR	44.3	11.1	3.8	8.5	17.8	26.0	21.6	36.9	56.9	68.4	41.8	47.0
Excedentes	32.9	185.1	125.4	64.3	35.6	41.4	144.6	79.3			17.9	137.2
	Oct-98	Nov-98	Dic-98	Ene-99	Feb-99	Mar-99	Abr-99	May-99	Jun-99	Jul-99	Ago-99	Sep-99
Pp (mm)	314	248.6	103.4	150.6	146.4	82	100.7	77.1	47.2	91.2	77.8	48.8
ETP (mm)	22.4	6.3	2.7	5.9	4.2	13.8	22.9	47.1	52.1	61.2	71.1	48.9
Pp-ETP	291.6	242.3	100.7	144.7	142.2	68.2	77.8	30	-4.9	30	6.7	-0.1
Reservas	50	50	50	50	50	50	50	50	45.1	50	50	49.9
ETR	22.4	6.3	2.7	5.9	4.2	13.8	22.9	47.1	52.1	61.2	71.1	48.9
Excedentes	291.6	242.3	100.7	144.7	142.2	68.2	77.8	30		25.1	6.7	

**Tabla 4.25: Datos de ETP calculados según el método de Thornthwaite y de ETR calculados a partir del balance del suelo para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99.**

En cada año hidrológico la ETR y la ETP son iguales, siendo ETP=ETR=384.1 mm para 1997-98 y ETP=ETR=358.6 mm para 1998-99, lo que supone un 30.3% de la precipitación para el primer año (1268 mm) y 24.1% para el segundo (1488 mm). Los excedentes producidos para cada año hidrológico son 863.7 mm (68.1%) para el primero y 1129.3 mm (75.9%) para el segundo. La ETP se ha estimado tomando como referencia las horas de sol calculadas mediante el método de Anström (apartado 4.11.4); sin embargo, si se utilizara el número máximo de horas de sol la ETP (=ETR) obtenida habría sido 823.2 mm para 1997-98 y 758.7 mm para 1998-99, es decir el 64.9% de la precipitación para el primer año y el 50.9% para el segundo.

Cabe destacar el hecho de que los valores de ETR para las condiciones consideradas no varían incluso realizando los cálculos con valores de capacidad de campo diferente. Sólo con valores por

debajo de 20 mm (1997-98) y de 40 mm (1998-99) se vería afectada la ETR, en verano, y, aun así, de forma muy despreciable (disminución inferior al 5% anual).

De esta forma, se puede afirmar que para la zona de estudio la evapotranspiración real anual obtenida según este tipo de balance mensual (Thornthwaite) se mantiene prácticamente constante para un amplio rango de valores de capacidad de campo. No obstante, sí se produce una modificación en uno de los componentes del balance del suelo, se trata de los excedentes. Para el año hidrológico 1997-98, con una variación en la capacidad de campo de entre 20 y 100 mm los excedentes obtenidos serían entre un 2.4% superiores y un 6.0% inferiores, respectivamente, a los obtenidos con una capacidad de campo de 50 mm. Para 1998-99, sin embargo, la ETR y los excedentes no varían al acabar el año anterior sin déficit de humedad en el suelo.

Tanto durante el año hidrológico 1997-98, en el que la precipitación total es de 1268 mm, como en el siguiente, en el que se ha registrado una precipitación total de 1488 mm, la ETR anual es igual a la ETP anual, y el suelo en ningún momento llega a secarse. Para ambos años se considera que toda la precipitación no evapotranspirada termina infiltrándose en el acuífero, ya que consideramos nula la escorrentía superficial efectiva, debido a las condiciones del relieve en buena parte del área de estudio. Esta recarga se produce prácticamente todos los meses, excepto algún mes de verano, diferente según las condiciones de cada año.

A la vista de estas observaciones, y teniendo en cuenta el balance “grosso modo” antes realizado como referencia (apartado 4.11.3), resulta que el método de Thornthwaite (horas de sol calculadas según el método de Anström) a paso mensual subestima la ETR un 30.7% en 1997-98 y la sobrestima un 17.9% en 1998-99. En el caso de la ETR calculada por el máximo de horas de sol, Thornthwaite sobrestima la ETR en ambos casos (un 48.2% en 1997-98 y un 149.5% en 1998-99).

### ***MÉTODO DE PRIMAULT***

Se ha realizado el cálculo diario (Anexo I) mediante la fórmula de Primault y posteriormente se han calculado los valores acumulados mensuales para poder compararlos con los valores obtenidos por Thornthwaite. Al igual que en el caso anterior, la ETR también se ha calculado en función del balance de agua en el suelo. En la tabla 4.26 se muestran los datos obtenidos con Primault.

También en este caso, la  $ETP=ETR$  para cada año hidrológico, siendo 387.3 mm para 1997-98 y 361.9 mm para 1998-99, lo que supone un 30.5% de la precipitación total anual en el primer caso, y un 24.3% en el segundo, habiendo calculado las horas de sol a partir del método de Anström. Por otra parte, los excedentes producidos durante 1997-98 son 860.5 mm (67.8%) y 1125.9 mm (75.7%) durante 1998-99.

Se evidencia la similitud en los valores anuales (ETR y Excedentes) obtenidos por ambos métodos, siendo válidas también ahora las observaciones antes realizadas, para Thornthwaite, respectoa la comparación en los resultados del balance “grosso modo”. Aunque los datos obtenidos a partir de Primault son ligeramente superiores a los obtenidos por Thornthwaite, la diferencia no supera los 4 mm/año.

	Oct-97	Nov-97	Dic-97	Ene-98	Feb-98	Mar-98	Abr-98	May-98	Jun-98	Jul-98	Ago-98	Sep-98
Pp (mm)	97.2	196.2	129.2	72.8	53.4	67.4	166.2	116.2	53.6	53.2	78.2	184.2
ETP (mm)	27.8	10.5	3.7	3.9	10.3	29.5	38.8	53.1	63.1	65.1	44.4	37.1
Pp-ETP	69.4	185.7	125.5	68.9	43.1	37.9	127.4	63.1	-9.5	-11.9	33.8	147.1
Reservas	50	50	50	50	50	50	50	50	40.5	28.6	50	50
ETR	27.8	10.5	3.7	3.9	10.3	29.5	38.8	53.1	63.1	65.1	44.4	37.1
Excedentes	49.4	185.7	125.5	68.9	43.1	37.9	127.4	63.1			12.4	147.1
	Oct-98	Nov-98	Dic-98	Ene-99	Feb-99	Mar-99	Abr-99	May-99	Jun-99	Jul-99	Ago-99	Sep-99
Pp (mm)	314	248.6	103.4	150.6	146.4	82	100.7	77.1	47.2	91.2	77.8	48.8
ETP (mm)	18.0	7.9	3.1	4.1	3.6	21.7	34.6	51.7	57.8	53.3	59.4	46.7
Pp-ETP	296	240.7	100.3	146.5	142.8	60.3	66.1	25.4	-10.6	37.9	18.4	2.1
R.eservas	50	50	50	50	50	50	50	50	39.4	50	26.8	50
ETR	18.0	7.9	3.1	4.1	3.6	21.7	34.6	51.7	57.8	53.3	59.4	46.7
Excedentes	296	240.7	100.3	146.5	146.5	60.3	66.1	25.4		27.3	18.4	2.1

**Tabla 4.26: Datos de ETP calculados según el método de Primault y de ETR calculados a partir del balance del suelo para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99.**

Si se hiciera el cálculo considerando el número máximo de horas de sol la ETP (=ETR) obtenida habría sido 689.7 mm para 1997-98 y 619.5 mm para 1998-99, es decir el 54.4% de la precipitación para el primer año y el 41.6% para el segundo. Estos datos quedan también muy por encima de la evapotranspiración calculada como referencia en el apartado 4.11.3.

**MÉTODO DE PENMAN (PROGRAMA ETOCIM)**

Se han calculado los datos horarios (Anexo I) de  $ET_0$  a partir de los cuales se han obtenido los valores acumulados mensuales. La  $ET_0$  obtenida para los dos años es de 904.7 mm (1997-98) y 894.1 mm (1998-99). Aunque, evidentemente, son valores mucho más altos que los obtenidos para la ETP con los dos métodos anteriores, al multiplicarlos por el coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) la  $ET_c$  obtenida es de 539.6 mm y 543.5 mm. Estos valores corresponden al 42.5% y 36.5% de la precipitación para los años 1997-98 y 1998-99. Los datos mensuales se muestran en la tabla 4.27 junto con los datos obtenidos con el método de Allen.

La  $ET_c$  así obtenida representa la ETR, real, siempre que el agua disponible en el suelo no sea un factor limitante para el desarrollo vegetativo, de ahí que, como ya se ha justificado con

anterioridad, sea necesario tener en consideración la humedad disponible en el suelo en cada periodo de tiempo. Pero este dato no es conocido en la zona de estudio. En cualquier caso, se ha visto con Thornthwaite y con Primault que para valores de capacidad de campo incluso bajos, 20 mm en algunos de los balances efectuados, el suelo nunca llegar a secarse; para valores de 50 mm prácticamente el contenido en humedad no baja de 30 mm.

Aunque esos balances del suelo son a escala mensual y pueden encubrir situaciones de déficit hídrico en el suelo se puede considerar que la  $ET_c$  deducida de Penman, similar para Allen, representa, en términos generales, adecuadamente la ETR, si bien sería ligeramente superior a ésta (ETR) en el caso de que hubiera déficit hídrico en algún momento, sobre todo de la época estival. Así pues, consideramos que  $ET_c$  anual  $\approx$  ETR anual, al menos en áreas bien regadas, por lluvias, de media montaña como es el caso presente. En áreas más cálidas y menos lluviosas, o en años hidrológicos con esas características, la relación entre  $ET_c$  y ETR debe ser considerada con mayor precisión.

### MÉTODO DE ALLEN

El cálculo de los datos horarios de la  $ET_0$  ha sido también la base para obtener los valores mensuales de  $ET_0$  y posteriormente los valores mensuales de ETR. Los coeficientes de cultivo mensuales empleados en este caso han sido los mismos que los utilizados en el método anterior. Se ha obtenido una  $ET_0$  de 917.6 mm para 1997-98 y de 840.1 mm para 1998-99, de donde se obtienen unos valores de ETR de 534.8 mm (42.2% de la precipitación) y 508.1 mm (34.1%) respectivamente.

	P (mm)	ETo All	ETo Pen	Kc	ETRAll	ETRPen	E Lareo
1997-98							
Oct-97	97.2	66.6	66.7	0.63	42.0	42.0	57.8
Nov-97	196.2	56.5	44.1	0.51	29.0	22.6	37.2
Dic-97	129.2	41.7	32.9	0.45	18.8	14.8	28.3
Ene-98	72.8	57.7	44.6	0.45	26.0	20.1	20.1
Feb-98	53.4	67.5	56.3	0.45	30.4	25.3	24.6
Mar-98	67.4	83.9	77.3	0.45	37.8	34.8	48.8
Abr-98	166.2	80.0	78.0	0.49	38.9	37.9	35.1
May-98	116.2	99.2	95.0	0.57	56.2	53.9	63.1
Jun-98	53.6	93.2	100.1	0.68	62.9	67.6	68.9
Jul-98	53.2	106.6	127.8	0.74	78.7	94.3	37.3
Ago-98	78.2	81.9	97.2	0.71	58.2	69.1	48.9
Sep-98	184.2	82.8	84.7	0.68	55.9	57.2	28.8
1998-99							
Oct-98	314	51.5	53.5	0.63	32.4	33.7	19.5
Nov-98	248.6	28.8	30.9	0.51	14.8	15.9	27.7
Dic-98	103.4	33.4	30.2	0.45	15.0	13.6	25.9
Ene-99	150.6	50.9	40.7	0.45	22.9	18.3	38.4
Feb-99	146.4	22.3	25.0	0.45	10.0	11.3	11.2
Mar-99	82	55.4	64.8	0.45	24.9	29.2	47.1
Abr-99	100.7	75.9	85.1	0.49	36.9	41.4	45.7
May-99	77.1	107.0	113.9	0.57	60.7	64.6	71.4
Jun-99	47.2	93.6	110.2	0.68	63.2	74.4	51.2
Jul-99	91.2	102.5	120.5	0.74	75.6	88.9	56.6
Ago-99	77.8	110.8	118.7	0.71	78.8	84.4	58.7
Sep-99	48.8	108.0	100.5	0.68	72.9	67.8	62.3

**Tabla 4.27: Valores de ETR obtenidos mediante los métodos de Allen y Penman para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99. La tabla 4.27 muestra los datos obtenidos mediante los métodos de Penman (ETOCIM) y Allen y se incluyen también los datos del tanque de evaporación de la estación de Lareo (Gipuzkoa). Sirven aquí las consideraciones previamente hechas con Penman sobre la relación entre  $ET_c$  y ETR.**

### COMPARACIÓN DE RESULTADOS

A continuación se muestran gráficamente los datos de ETP,  $ET_0$  (figura 4.72) y ETR (figura 4.73) mensuales obtenidos mediante los cuatro métodos considerados.

Existen dos grupos de valores bien diferenciados. Aunque los datos de ETP y  $ET_0$  presentan una tendencia muy similar a lo largo de los dos años considerados, los valores de ETP obtenidos mediante Thornthwaite y Primault, bastante similares, son sistemáticamente más bajos (20-40 mm/mes inferiores) que los de  $ET_0$  obtenidos mediante Penman y Allen. Al calcular la ETR Thornthwaite y Primault prácticamente no varían el valor, respecto al correspondiente de ETP, mientras que Penman y Allen disminuyen considerablemente el valor de la ETR ( $\approx ETR_c$ ) respecto al inicial de referencia ( $ET_0$ ).

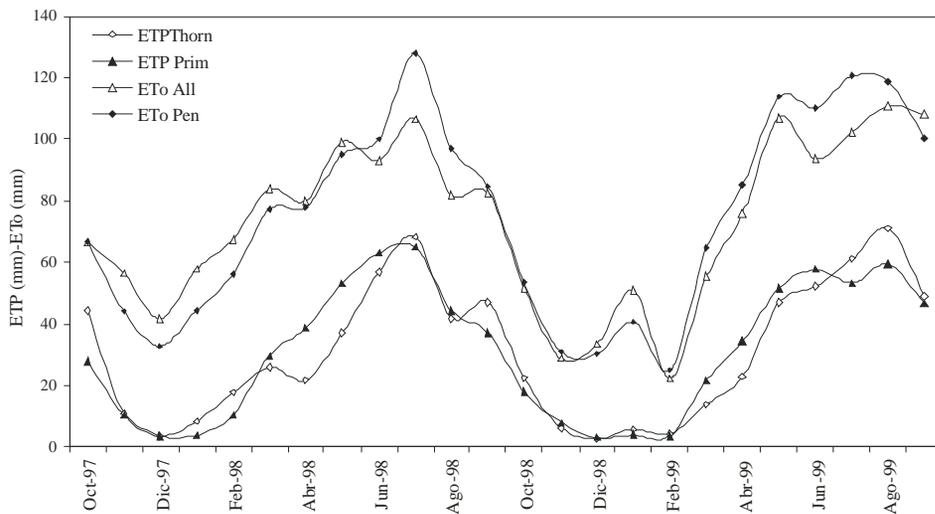


Figura 4.72: Datos de ETP (Thornthwaite y Primault) y de  $ET_0$  (Allen y Penman) obtenidos.

En cuanto a la  $ET_0$  el método de Penman da valores superiores a los de Allen, del orden de 15-20 mm/mes, en los meses de verano, e inferiores a los de Allen, del orden de 10-12 mm/mes, en los de invierno; esto está en relación con la importancia que Allen da a la temperatura ( $T^{\circ}C$ ) en su formulación.

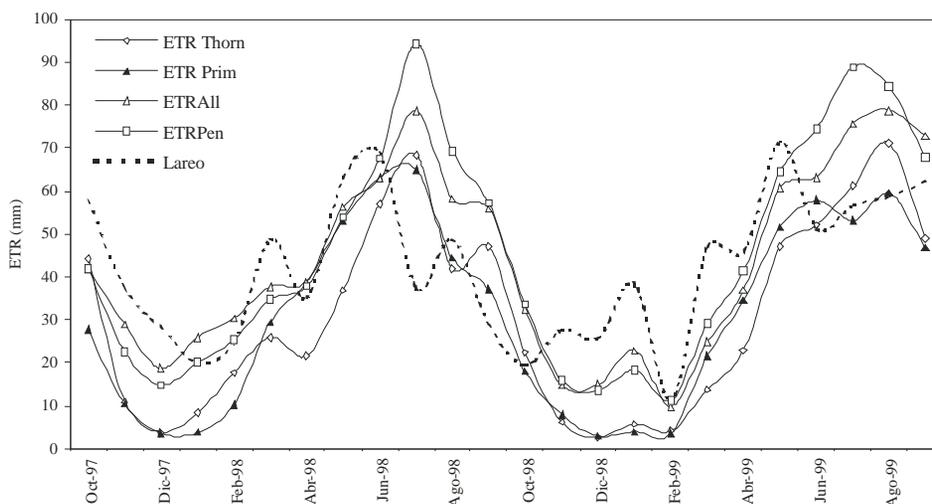
A la vista de la figura 4.73 se observa que los valores de ETR obtenidos mediante Allen-Penman son siempre superiores a los obtenidos mediante Thornthwaite-Primault, observándose las mayores diferencias durante los meses de verano en los que la diferencia puede llegar a los 30 mm/mes. Durante los meses invernales esa diferencia no supera los 20 mm. Es durante los meses de primavera cuando las diferencias son menores, sobre todo con Primault, y no llegan a pasar de 10 mm en ningún momento.

En cuanto a la variación de la ETR mensual calculada por los métodos de Penman y Allen es válido aquí lo antes expuesto respecto a las variaciones estacionales de  $ET_0$ , ya que, al fin y al cabo, el paso de  $ET_0$  a la ETR se hace en ambos métodos de idéntica forma, es decir, multiplicando aquel valor por el mismo coeficiente de cultivo ( $K_c$ ) mensual. Así, las diferencias son más notables en los meses de verano (15 mm máximo) y prácticamente mínimas en el resto del año.

Los porcentajes de evapotranspiración real (ETR) anual obtenidos para los dos años mediante los cuatro métodos se muestran en la tabla 4.28, así como la precipitación anual y el cálculo de la ETR “a grosso modo” realizado, a modo de referencia, en el apartado 4.11.3.

	P (mm)	ETR								
		a grosso modo (%)	Thornthwaite (mm)	Thornthwaite (%)	Primault (mm)	Primault (%)	Penman (mm)	Penman (%)	Allen (mm)	Allen (%)
1997-98	1268	43.8	384.1	30.3	387.3	30.5	539.6	42.5	534.8	42.2
1998-99	1488	20.4	358.6	24.1	361.9	24.3	543.5	36.5	508.1	34.1

**Tabla 4.28: Datos de ETR anual obtenidos mediante los cuatro métodos aplicados.**



**Figura 4.73: Datos de ETR obtenidos mediante los cuatro métodos utilizados. Se incluyen los datos de evaporación de la estación de Lareo (Gipuzkoa).**

En el balance general “a grosso modo” realizado con anterioridad a los cálculos de la evapotranspiración (apartado 4.11.3) se obtuvieron valores de ETR de 43.8% y 20.4% para los años hidrológicos 1997-98 y 1998-99, respectivamente, y para una consideración de 26 km<sup>2</sup> de cuenca; hay que recordar que aquel balance se hizo a partir de la descarga real del acuífero (hm<sup>3</sup>/año) y, por tanto, su paso a unidades de altura (mm), para su comparación con la precipitación, requería considerar una determinada área, que inicialmente se estableció en 26 km<sup>2</sup>.

Según aquella referencia, para el primer año Thornthwaite y Primault proporcionan valores de ETR muy por debajo (aproximadamente un 31%) de lo entonces deducido, mientras que los de Penman y Allen presentan una muy buena similitud aunque lo exceden ligeramente (3%). No obstante, para el segundo año ocurre lo contrario; en este año los valores suministrados por los métodos de Thornthwaite y Primault oscilan entre 18-19% por encima, mientras que Allen y Penman proporcionan valores del 67-79%, también por encima.

Los datos diarios de evaporación medidos en tanque en la estación de Lareo (para ubicación ver figura 2.1) se han incluido en la figura 4.73, pero sólo a modo de referencia. Durante los meses de otoño, invierno y primavera la evaporación en Lareo es parecida (aplicando un factor corrector de 0.8-0.9, como se recoge en la literatura; DOORENBOS y PRUITT, 1977; CUSTODIO y LLAMAS, 1983; THOMPSON, 1999) a la evapotranspiración real obtenida en Albiztur mediante Allen y Penman.

Se suele admitir (CUSTODIO y LLAMAS, 1983) que la evapotranspiración desde suelos muy húmedos tiene un valor cercano a la evaporación de agua libre en las mismas condiciones ambientales, por lo que parece lógico admitir que los datos suministrados por tanques de evaporación pueden ser utilizados como referencia de la ETR en zonas con suelos muy húmedos, que en nuestro caso cubren un período notable entre otoño y primavera.

Durante los meses de verano, por el contrario, los datos de evaporación de Lareo se parecen más a los datos obtenidos por Thornthwaite y Primault, pero es precisamente en esta época cuando la utilización de los datos del tanque es más problemática para nuestros fines.

Teniendo en cuenta el conjunto de consideraciones, parece que por el momento, y como aproximación, los métodos más apropiados para el cálculo de la evapotranspiración son los de Allen-Penman. Sin embargo, queda aun por explicar la importante diferencia existente entre los valores de referencia de la ETR y los calculados mediante Allen-Penman para el año 1998-99. En el siguiente apartado se realiza un análisis de sensibilidad con el fin de poder establecer la causa (o causas) de la aparición de posibles errores en el cálculo de la ETR.

### **CONSIDERACIONES ACERCA DEL BALANCE HÍDRICO. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD**

El cálculo de referencia de la evapotranspiración (apartado 4.11.3) se ha realizado con las precipitaciones registradas en la estación de Erdoizta y con los caudales registrados en la estación de aforos de la Regata Albiztur (presa). Ambas fuentes de datos proporcionan una información básica para este cálculo aunque los resultados obtenidos suponen una aproximación a la situación real en la medida que aquéllos datos están sometidos a ciertas incertidumbres. Esto no significa, en absoluto, que los resultados obtenidos sean erróneos sino que los datos originales han de ser considerados con cierta flexibilidad.

Por un lado, la estación de Erdoizta se encuentra fuera de la cuenca drenada por la Regata Albiztur y aunque los datos de la misma son fiables, es muy posible que la precipitación caída sobre la cuenca difiera de la allí registrada. De acuerdo con los datos de precipitaciones que se recogieron en la tabla 2.2 es posible, además, que la precipitación anual en la cuenca difiera en un 5-10% (por encima o por debajo) de la registrada en Erdoizta. Evidentemente, variaciones de esa magnitud en la precipitación repercuten en el cálculo del porcentaje de lluvia evapotranspirada, ya que dicho cálculo se basa en la precipitación caída.

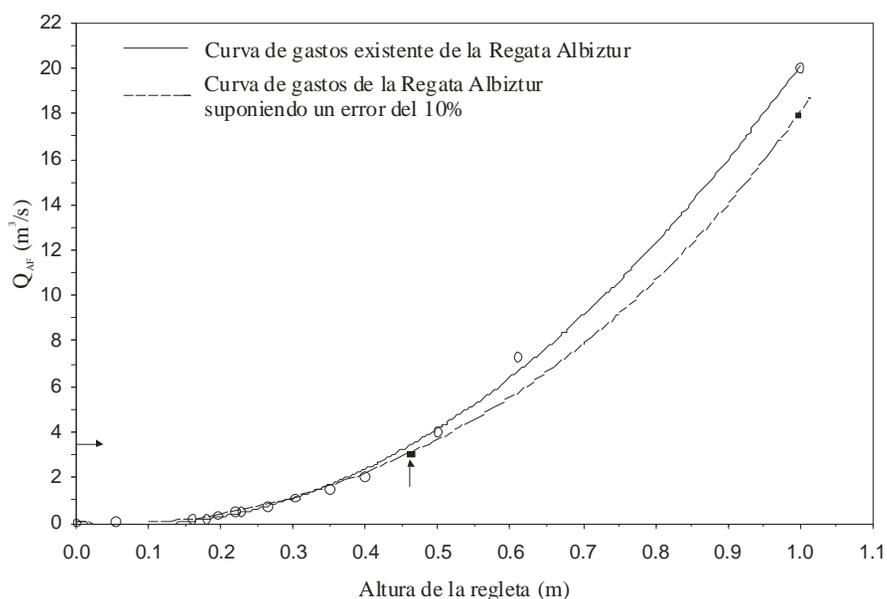
Por otro lado, aunque el registro de niveles de agua de la Regata Albiztur se realiza en continuo, es posible que los caudales calculados a partir de esos niveles mediante la curva de gastos (figura 4.74) contengan ciertos errores, intrínsecos en cualquier curva de gastos, sobre todo hacia los caudales más altos. Esta posibilidad está relacionada con el hecho de que cuanto mayores son los caudales más difícil resulta aforar, puesto que la corriente es mayor y se genera una mayor turbulencia lo que trae consigo mayores errores de medida. Además, esa dificultad unida a los escasos momentos en los que se aforan caudales tan altos influye directamente en la elaboración de la curva de gastos, que presenta un mayor número de medidas en los caudales medios-bajos estando los caudales altos y muy altos restringidos a muy pocos puntos, como es el caso aquí tratado (figura 4.74).

Debido a esto, la curva de gastos estará sujeta a mayores errores hacia los caudales más altos. Puesto que las estimaciones de la evapotranspiración realizadas en el apartado 4.11.3 se basaron en las descargas ( $\text{hm}^3$ ) de la Regata Albiztur a su paso por la presa, y admitiendo la posible existencia de errores en los caudales más altos, la ETR estimada “a grosso modo” tampoco estaría libre de errores.

En cualquier caso, sean los errores del tipo que sean (precipitación o caudales) cabe esperar que su influencia vaya a repercutir de forma mucho más acusada en los años más húmedos, ya que las diferencias espaciales en la precipitación pueden ser mayores en estos años y, además, los niveles altos serán más frecuentes en la Regata Albiztur con la incertidumbre que eso conlleva, puesto que serán

más los datos de caudal estimados a partir de la parte más alta (de menor precisión) de la curva de gastos.

Veamos qué ocurre considerando una precipitación anual un 10% superior (1395 mm en 1997-98 y 1637 mm en 1998-99) a la utilizada para el cálculo de referencia (apartado 4.11.3) de la evapotranspiración. En este caso se obtendría un volumen de agua caída sobre la cuenca (se mantiene una superficie de 26 km<sup>2</sup>) de 36.3 hm<sup>3</sup> para 1997-98 y de 42.5 hm<sup>3</sup> para 1998-99. Sabiendo que los caudales medios registrados fueron 587 l/s (18.5 hm<sup>3</sup>) y 977 l/s (30.8 hm<sup>3</sup>) para esos años hidrológicos, respectivamente, se obtiene una evapotranspiración real (ETR) del 49% (17.8 hm<sup>3</sup>) para 1997-98 y del 27.5% (11.7 hm<sup>3</sup>) para 1998-99.



**Figura 4.74:** Curva de gastos real de la estación de aforos (presa) de la Regata Albiztur facilitada por la Diputación Foral de Gipuzkoa y posible curva de gastos del mismo punto considerando un error del 10% (por encima) en los aforos de caudales superiores a 3400 l/s.

Si se comparan estos valores con los valores de ETR calculados en el apartado 4.11.3 (tabla 4.23), se observa que esta modificación en la precipitación origina para 1997-98 un aumento del 11.9% en el porcentaje de evapotranspiración (el aumento es de un 23.6% en términos absolutos -hm<sup>3</sup>-) y para 1998-99 un aumento del 34.8% (el aumento es de un 48.1% en términos absolutos -hm<sup>3</sup>-). Como se ha comentado, se produce un mayor aumento para el año más húmedo.

La observación de los hidrogramas de la figura 4.11 pone en evidencia que durante el año 1998-99 el caudal sobrepasó los 3400 l/s, de valor medio diario, en varias ocasiones, permaneciendo

durante varios días por encima de ese valor. El año 1997-98, sin embargo, sólo de forma muy puntual registró caudales superiores a ese valor. Debido a que por encima de los 3400 l/s la curva de gastos está definida exclusivamente en función de tres puntos (el más alto muy distanciado), es posible que a partir de este valor se produzcan errores importantes en el cálculo de los caudales de la Regata Albiztur.

Por este motivo se ha calculado una nueva evapotranspiración de referencia teniendo en cuenta estos posibles errores. Así, se ha restado un 10% a los caudales, medios diarios, superiores a 3400 l/s obteniéndose un caudal medio anual de la Regata Albiztur en la presa de 950 l/s ( $29.9 \text{ hm}^3$ ) (antes 977 l/s) para 1998-99. El mismo cálculo se ha realizado para el año 1997-98 pero en este caso el caudal se mantiene prácticamente igual. Utilizando el dato de precipitación inicial para 1998-99 (1488 mm) el volumen de agua caído en la cuenca es  $38.7 \text{ hm}^3$ , de forma que la evapotranspiración ahora deducida ( $8.8 \text{ hm}^3$ ) supone un 22.7% (un 11.2% superior a la inicial -20.4%-).

Como se ha puesto de manifiesto, modificaciones de un 10% en los datos de partida originan cambios importantes en los cálculos de la ETR. Hasta ahora se han considerado de forma aislada las modificaciones en la precipitación, por un lado, y en los caudales, por otro. No obstante, es muy posible que estas variaciones se produzcan al mismo tiempo. Por este motivo se ha realizado el cálculo de la evapotranspiración para el año 1998-99 considerando tanto una precipitación superior a la inicial (1488 mm) en un 10% (1637 mm) como una disminución del caudal del 10% para caudales, medios diarios, superiores a 3400 l/s. De esta forma se tiene que el volumen de agua caído sobre la cuenca es  $42.5 \text{ hm}^3$  y el caudal medio anual de la regata 950 l/s ( $29.9 \text{ hm}^3$ ) de donde se desprende una evapotranspiración de  $12.6 \text{ hm}^3$ , un **29.6%** de la precipitación (un 45.1% superior al % estimado en el apartado 4.11.3).

Puesto que el año hidrológico 1997-98 fue ligeramente seco, las diferencias en la precipitación y/o en los caudales no es tan grande como para producir una modificación importante de la evapotranspiración calculada en el apartado 4.11.3, por lo que esa evapotranspiración (43.8%) puede considerarse una buena referencia a la cual los métodos de Allen y Penman se aproximan muy bien (tabla 4.26).

Por otro lado, considerando todas las posibilidades descritas en los párrafos anteriores y teniendo en cuenta que el cálculo más próximo a los métodos de Allen y Penman, entre los realizados para el año 1998-99, es el que proporciona una evapotranspiración del 29.6% (considerando un error del 10% en la precipitación y en los caudales superiores a 3400 l/s), este valor se considera una buena referencia para la evapotranspiración de ese año hidrológico.

Una vez establecidos los valores de referencia de la evapotranspiración (%), a nivel de toda la cuenca vertiente a la Regata Albiztur, para los dos años hidrológicos, 1997-98 (43.8%) y 1998-99 (29.6%), se ha procedido a estimar la superficie de la cuenca drenada por el manantial de Salubita, ya que aun no se conoce con una cierta precisión la superficie drenada por esta surgencia.

Los cálculos de la evapotranspiración real con los nuevos valores de precipitación (1395 mm en 1997-98 y 1637 mm en 1998-99) se han realizado también mediante los métodos de Allen, Penman, Thornthwaite y Primault. La tabla 4.29 muestra los resultados obtenidos. En comparación con los datos de la tabla 4.28 la ETR anual calculada con los métodos de Allen y Penman se reduce aproximadamente un 9% en ambos años (de 42.3 a 38.5% en el primero, y de 35.3 a 32.1% en el segundo, como valores medios).

La ETR calculada mediante los métodos de Thornthwaite y Primault utilizando el número máximo de horas de sol proporciona valores muy por encima de los calculados mediante los métodos de Allen y Penman, sobre todo el primero (Thornthwaite). Al utilizar el número de horas de sol calculado con el método de Anström (apartado 4.11.4), sin embargo, para los dos años proporcionan valores muy por debajo de los calculados con los métodos de Allen y Penman. El aumento de la precipitación en un 10% ha supuesto una disminución en el valor (%) de la evapotranspiración real estimada con los métodos de Thornthwaite y Primault de un 9% en cualquiera de los caminos seguidos para la consideración de las horas de insolación.

	ETRPenman	ETRAllen	ETRThornthwaite	ETRPrimault	ETRThornthwaite*	ETRPrimault*
1997-98	539.6 mm	534.8 mm	384.1 mm	387.3 mm	823.2 mm	689.7 mm
ETR(%)	<b>38.7</b>	<b>38.3</b>	27.5	27.8	59.0	49.4
1998-99	543.5 mm	508.1 mm	358.6 mm	361.9 mm	758.7 mm	619.5 mm
ETR(%)	<b>33.2</b>	<b>31.0</b>	21.9	22.1	46.3	37.8

**Tabla 4.29: ETR calculada considerando una precipitación un 10% superior. Los valores de las cuatro primeras columnas se han obtenido con las horas de insolación diarias calculadas mediante el método de Anström. En el caso de las dos columnas de la derecha (con asterisco) se ha utilizado el número máximo diario de horas de sol.**

### **CÁLCULO DEL ÁREA DE LA CUENCA DRENADA POR EL MANANTIAL DE SALUBITA**

Puesto que no se posee un conocimiento preciso del área que abarca la cuenca drenada por el manantial de Salubita, el cálculo de la evapotranspiración a partir de los datos de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur puede resultar de ayuda para llegar a ese conocimiento. A continuación se realiza una aproximación para delimitar la superficie de esa cuenca por medio de los datos del manantial de Salubita y de las precipitaciones de la estación de Erdoizta.

La segunda y tercera columna de la tabla 4.30 muestran los cálculos de la ETR considerando la precipitación de la estación de Erdoizta (sin modificación). Para los cálculos de las dos columnas de la derecha se ha considerado una precipitación de 1395 mm (1268 mm + 10%) para el año 1997-98, y de 1637 mm (1488 mm + 10%) para el año 1998-99. El volumen de agua drenado anualmente por la surgencia es de 15.7 hm<sup>3</sup> (497 l/s) y 23.7 hm<sup>3</sup> (752 l/s), respectivamente. Al realizar los cálculos con un aumento en la precipitación del 10% lo único que varía es el volumen de agua caída en la cuenca, lo que se traduce en un aumento de la evapotranspiración deducida. Los cálculos se han efectuado para diferentes superficies de cuenca, entre 18 y 23 km<sup>2</sup>.

	1997-98 (1268 mm)	1998-99 (1488 mm)	1997-98 (1395 mm)	1998-99 (1637 mm)
Superficie (km <sup>2</sup> )	Vol (hm <sup>3</sup> )	Vol (hm <sup>3</sup> )	Vol (hm <sup>3</sup> )	Vol (hm <sup>3</sup> )
18	22.8	26.8	25.1	29.5
19	24.1	28.3	26.5	31.1
20	25.4	29.7	27.9	32.7
21	26.6	31.2	29.3	34.4
22	27.9	32.7	30.7	36
23	29.2	34.2	32.1	37.6
Drenaje Salubita (hm <sup>3</sup> )	15.7	23.7	15.7	23.7
Superficie (km <sup>2</sup> )	Evapotranspiración (%)		Evapotranspiración (%)	
18	31.1	14.7	37.5	19.5
19	34.8	16.2	40.7	23.8
20	38.1	20.2	43.7	27.6
21	40.9	24.0	46.4	31
22	43.7	27.5	48.8	34.2
23	46.2	30.7	51.1	37

**Tabla 4.30: Cálculos de la ETR considerando la precipitación de la estación de Erdoizta sin modificación (1268 mm para 1997-98 y 1488 mm para 1998-99) y con un aumento del 10% en la precipitación (1395 mm para 1997-98 y 1637 m para 1998-99.**

Los valores de evapotranspiración de la tabla que más se asemejan a los valores de ETR de referencia anteriormente establecidos para toda la cuenca de la Regata Albiztur (43.8% para 1997-98, sin modificación alguna, y 27.5% para 1998-99, aumentando la precipitación en un 10%) son 43.7% para 1997-98 y 27.6% para 1998-99, lo que arroja valores para la superficie de la cuenca drenada por la surgencia de Salubita de entre 20 y 22 km<sup>2</sup> según las columnas. Así, una superficie de 20 km<sup>2</sup> da valores muy semejantes con precipitación anual corregida (+10%), mientras que lo mismo ocurre con una superficie de 22 km<sup>2</sup> sin modificación alguna de la precipitación.

En la tabla 4.31 se recogen los cálculos de ETR realizados para el año 1998-99, el más húmedo de los dos, considerando un aumento en la precipitación del 10% (1637 mm) y una disminución del 10% para caudales, medios diarios, en la presa superiores a 3400 l/s. Esta última modificación proporciona un valor del caudal medio anual en el manantial de Salubita para ese año de 737 l/s, de donde se deduce que el volumen de agua drenado por el manantial ha sido de 23.2 hm<sup>3</sup>.

Teniendo en cuenta que la ETR referencial calculada a partir de estas mismas modificaciones, y con los caudales de la regata en la presa, fue de un 29.6% se puede concluir que, según la tabla, la cuenca drenada por el manantial de Salubita posee una superficie de unos 20 km<sup>2</sup>. Puesto que en la tabla 4.30 el valor obtenido ha sido de entre 20 y 22 km<sup>2</sup>, se toma como válido una superficie para la cuenca drenada por el manantial de Salubita de unos **21 km<sup>2</sup>**.

1998-99 (1637 mm)	
Superficie (km <sup>2</sup> )	Vol (hm <sup>3</sup> )
18	29.5
19	31.1
20	32.7
21	34.4
22	36
23	37.6
Drenaje Salubita (hm <sup>3</sup> )	23.2
Superficie (km <sup>2</sup> )	
18	21.2
19	25.4
20	29.1
21	32.5
22	35.5
23	38.4

**Tabla 4.31: Cálculos de ETR realizados para el año 1998-99 considerando un aumento en la precipitación del 10% (1637 mm) y un aumento del 10% para caudales en la presa superiores a 3400 l/s.**

Para poder verificar este dato se dispone de los cálculos realizados en los apartados 4.3.2 y 4.5. La tabla 4.8 recogió que el flujo rápido presente en la surgencia de Salubita procede de una cuenca de, al menos, **12.6 km<sup>2</sup>** que corresponde, seguramente, a las dos áreas que vierten sus aguas a los valles cerrados de Bidania y Santutxo. Al Sur de la Regata Albiztur, hasta el límite de la cuenca vertiente a la regata, por el Sur, y, por el Oeste, hasta el cordal que une los montes de Urkobieta e Intxurre (figuras 2.2 y 3.2), existe otra zona de **6 km<sup>2</sup>** (según planimetría), representada en su mayor parte por calcarenitas y calizas urgonianas, cuyas aguas deben infiltrarse también hacia la surgencia de Salubita.

Las calcarenitas urgonianas afloran también al Norte de la Regata Albiztur, seccionadas por el lecho de este curso fluvial, en un área de aproximadamente **1 km<sup>2</sup>**, y drenadas por el manantial de Salubita (ver trazados en piezómetro Albiztur IV, apartados 4.8.9 y 4.8.11). La suma de estas tres áreas proporciona un valor para la superficie de la cuenca drenada por el manantial de Salubita de **19.6 km<sup>2</sup>**. No hay que olvidar la posible infiltración puntual de aguas de escorrentía, procedentes de

y calcareniticas urgonianas.

Por otra parte, en el borde Suroeste (monte Olloki) de la zona de estudio (figuras 3.2 y 4.75), pero fuera de la divisoria topográfica, afloran también calcarenitas urgonianas que, aunque inicialmente no se consideraron como parte de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur es muy posible que las aguas allí infiltradas alimenten finalmente la surgencia de Salubita. El área correspondiente es de **1 km<sup>2</sup>**. Todas estas consideraciones nos dan una superficie total de **20.6 km<sup>2</sup>**, que es una buena aproximación al valor antes estimado (**21 km<sup>2</sup>**) a partir de los diversos balances efectuados.

Según datos de estudios previos (E.V.E-D.F.G, 1987), recogidos en el Mapa Hidrogeológico del País Vasco (E.V.E., 1996), la alimentación al manantial de Salubita procede de la infiltración directa en los materiales permeables carbonatados, cuya superficie es 14.7 km<sup>2</sup>, a la cual hay que añadir los aportes procedentes de materiales detríticos vertientes a la depresión de Bidania, con una superficie de 4.2 km<sup>2</sup>, lo que hace un total de **18.9 km<sup>2</sup>**.

Por otra parte, según ese mismo estudio, la llamada subunidad Igaran-Urrestilla drenaría parte de sus aguas a la Regata Albiztur, sobre todo a través del manantial Igaran, desde una superficie estimada en 6.8 km<sup>2</sup>, pero que no se incluiría en la cuenca drenada por la surgencia de Salubita. Sin embargo, esa subunidad engloba una serie de materiales de tipo lutítico-margoso (figura 3.2), situados al Noroeste del núcleo de Albiztur, que en épocas de crecida pueden originar una escorrentía superficial importante que va a parar a los materiales urgonianos infiltrándose hacia la surgencia de Salubita. Según planimetría estos materiales abarcan una superficie próxima a los **2 km<sup>2</sup>**. La suma de estos 2 km<sup>2</sup> a los 18.9 km<sup>2</sup> anteriores da como resultado una superficie de **20.9 km<sup>2</sup>**, lo que concuerda con el dato de 20-21 km<sup>2</sup> calculado, para Salubita, según los balances.

Finalmente se concluye que, dado que los datos deducidos mediante todas estas aproximaciones son muy parecidos (21 km<sup>2</sup>, 20.6 km<sup>2</sup> y 20.9 km<sup>2</sup>), la cuenca drenada por el manantial de Salubita posee una superficie de 21 km<sup>2</sup>.

### **CÁLCULO DEL ÁREA DE LA CUENCA DRENADA POR LA REGATA ALBIZTUR**

Se ha recalculado el área de la superficie que ocupa la cuenca vertiente a la Regata Albiztur según los cálculos de evapotranspiración real (ETR) realizados. En el apartado 4.11.3, la ETR se calculó “a grosso modo” considerando una superficie de la cuenca vertiente a la regata de 26 km<sup>2</sup>. Esta superficie corresponde a la planimetría realizada del área limitada por la divisoria topográfica.

Para el año hidrológico 1997-98 se obtuvo una ETR del 43.8%., que se consideró una buena referencia, teniendo en cuenta que ese año fue ligeramente seco y que las modificaciones en los datos de lluvia y caudales no producen variaciones importantes en el cálculo de la ETR para ese año. Puesto que ese valor de referencia de la ETR se calculó para una superficie de 26 km<sup>2</sup>, no tiene sentido ahora

calcular la superficie de la cuenca a partir del valor de ETR, ya que se volvería al punto de partida. Sin embargo, la ETR obtenida para el año hidrológico 1998-99 sí puede resultar válida para ese cálculo.

El año hidrológico 1998-99 proporcionó una ETR del 20.4% considerando una superficie de la cuenca vertiente a la regata de 26 km<sup>2</sup>. No obstante, teniendo en cuenta posibles errores en la precipitación y en los caudales, la ETR asumida como buena para ese año ha sido, finalmente, del 29.6% (considerando un error del 10% en la precipitación y en los caudales superiores a 3400 l/s). Así, se ha utilizado este último valor de ETR para conocer, aproximadamente, la superficie total de la cuenca drenada por la Regata Albiztur.

La forma de calcular la superficie de la cuenca ha sido la siguiente:

$$ETR = \frac{100}{V_p} (V_p - V_{AF})$$

$$S = \frac{V_p}{P \cdot 10^{-3}}$$

donde,

V<sub>p</sub>: volumen (hm<sup>3</sup>) de precipitación (no es conocido si se desconoce la superficie de la cuenca).

V<sub>AF</sub>: volumen (hm<sup>3</sup>) de agua que pasa por la estación de aforos de la regata (conocido).

ETR: evapotranspiración (%) (en este caso 29.6%).

P: precipitación en mm (conocida).

S: superficie de la cuenca en km<sup>2</sup> (desconocida).

Se ha realizado el cálculo teniendo en cuenta cuatro posibilidades: 1) considerando los datos de precipitación (1488 mm) y caudal en la estación de aforos (977 l/s) sin modificación, 2) considerando una precipitación superior en un 10% (1637 mm) a la anterior, 3) considerando un error del 10% en los caudales (se han disminuido en un 10% los caudales medios diarios superiores a 3400 l/s en la estación de aforos) y 4) considerando conjuntamente los casos 2) y 3).

En la tabla 4.32 se muestran los valores obtenidos para la superficie de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur.

	P (mm)	Q <sub>AF</sub> (l/s)	V <sub>AF</sub> (hm <sup>3</sup> )	ETR (%)	km <sup>2</sup>
1)	1488	977	30.8	29.6	29.4
2)	1637	977	30.8	29.6	26.7
3)	1488	950	29.9	29.6	28.4
4)	1637	950	29.9	29.6	25.9

***Tabla 4.32: Valores obtenidos para la superficie de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur (año 1998-99).***

Según la tabla, el primer caso arroja una superficie de 29.4 km<sup>2</sup>. Se trata del valor más alto de los cuatro que, por otra parte, resulta excesivo teniendo en cuenta las limitaciones físicas de la zona bajo consideración. No hay que olvidar que la ETR considerada se calculó considerando posibles errores en la precipitación y en los caudales. Por tanto, puesto que los casos 2) a 4) consideran esos posibles errores, parecen ser estos tres casos los que proporcionan valores más fiables del área de la cuenca, que oscilan entre 25.9 y 28.4 km<sup>2</sup>. Debido a que no se conocen con exactitud los datos de precipitación y caudales, se ha considerado para esta cuenca una superficie aproximada de **27 km<sup>2</sup>**, calculada como la media aritmética de las superficies obtenidas entre los casos 2) y 4).

Las figuras 4.75 y 4.75 (cont.) muestran esquemáticamente las zonas de alimentación del Sistema Kárstico de Salubita así como de la cuenca total vertiente a la Regata Albiztur. Los dos esquemas se han diseñado a partir de las observaciones de campo y de los datos obtenidos para las superficies de las zonas de alimentación del Sistema Kárstico de Salubita (21 km<sup>2</sup>) y de la Regata Albiztur (27 km<sup>2</sup>). Se han considerado dos situaciones extremas (aguas altas y aguas bajas) ya que la relación entre el manantial y la regata se ve modificada considerablemente se esté en una situación o en otra.

La figura 4.75 (aguas altas) describe un período en el que el manantial de Salubita aporta agua a la Regata Albiztur. Durante esta situación la regata no aporta agua al acuífero (no se infiltra) y la totalidad del agua que sale a través del manantial proviene de las áreas vertientes (subterránea y superficialmente) a las depresiones de Bidania y Santutxo y del afloramiento de calizas urgonianas situadas entre el monte Urkobieta y el propio manantial al Sur de la regata (figura 3.2), lo que hace un total de 18.6 km<sup>2</sup>, al que pudiera añadirse 1 km<sup>2</sup> de los materiales carbonatados aflorantes en el sector más suroccidental (monte Oloki).

En estos momentos, la zona del área de alimentación del Sistema Kárstico de Salubita situada más al Norte, de 1.9 km<sup>2</sup> (según planimetría), alimenta, en forma de escorrentía (sub)superficial, la depresión de Bidania. El resto del agua que llega a la Regata Albiztur lo hace a través del manantial de Igaran, que en estos momentos drena una superficie de unos 4.1 km<sup>2</sup>, y de las aguas de escorrentía superficial, sobre todo, que se precipitan desde las zonas más próximas a la surgencia (1.8 km<sup>2</sup>). La superficie drenada por el Sistema Kárstico de Salubita es de 21.5 km<sup>2</sup> y la de la cuenca total vertiente a la Regata Albiztur es de 27.4 km<sup>2</sup> (Igaran y Salubita inclusive). Ambas superficies han sido planimetradas sobre el mapa topográfico a escala 1: 10000.

Durante los períodos extremos de aguas bajas (figura 4.75 (cont.)), cuando el estiaje se encuentra en su momento álgido, la Regata Albiztur se infiltra totalmente a lo largo de su lecho aportando sus aguas al manantial de Salubita. Puesto que todos los cálculos realizados en los apartados 4.3 a 4.7 sobre los caudales del manantial de Salubita se han realizado restando las aguas (que se infiltran en la regata) provenientes del manantial de Igaran, en esta figura se señala el área drenado por el manantial de Salubita, es decir, sin considerar el manantial de Igaran como parte del mismo.

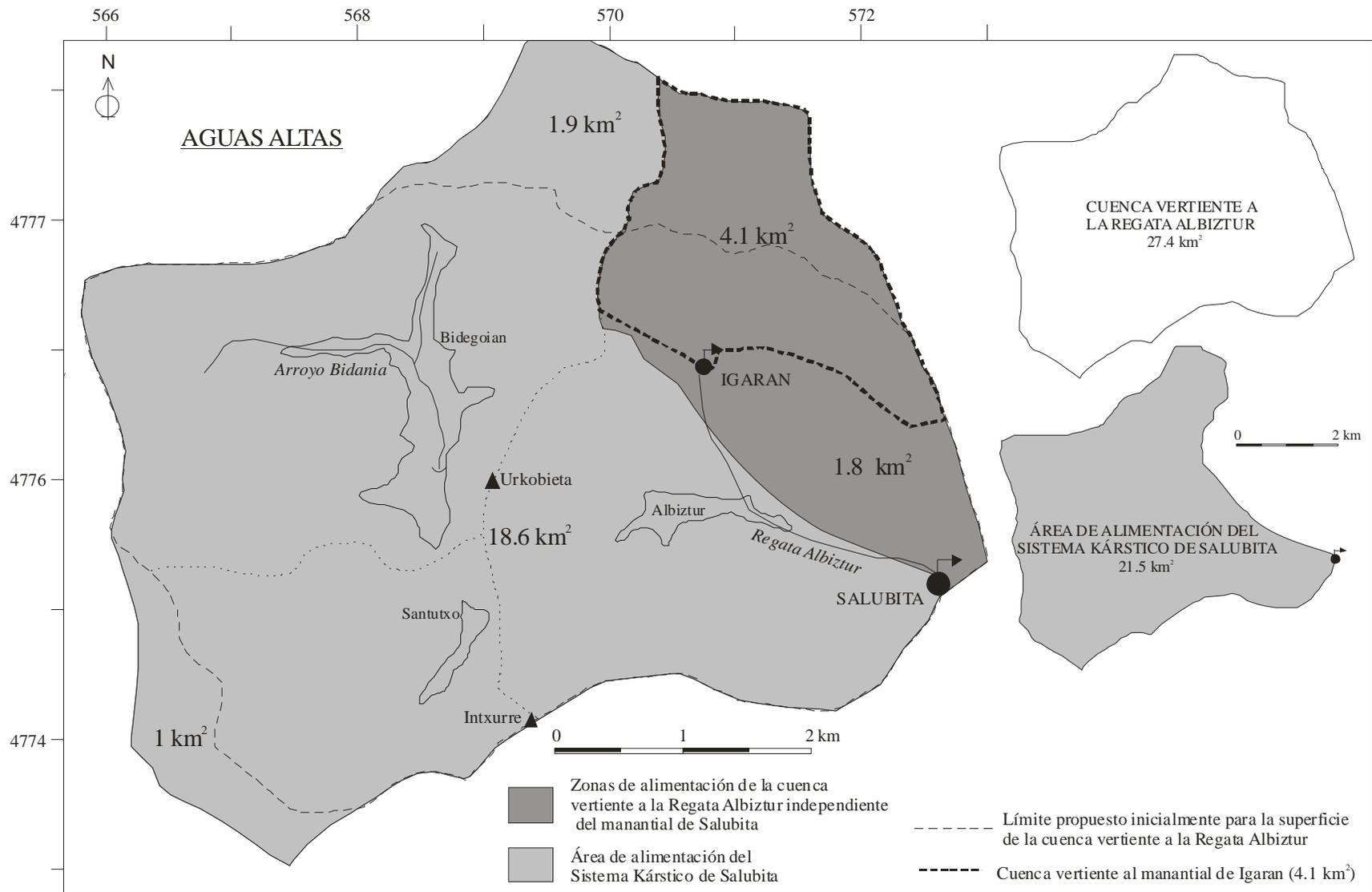
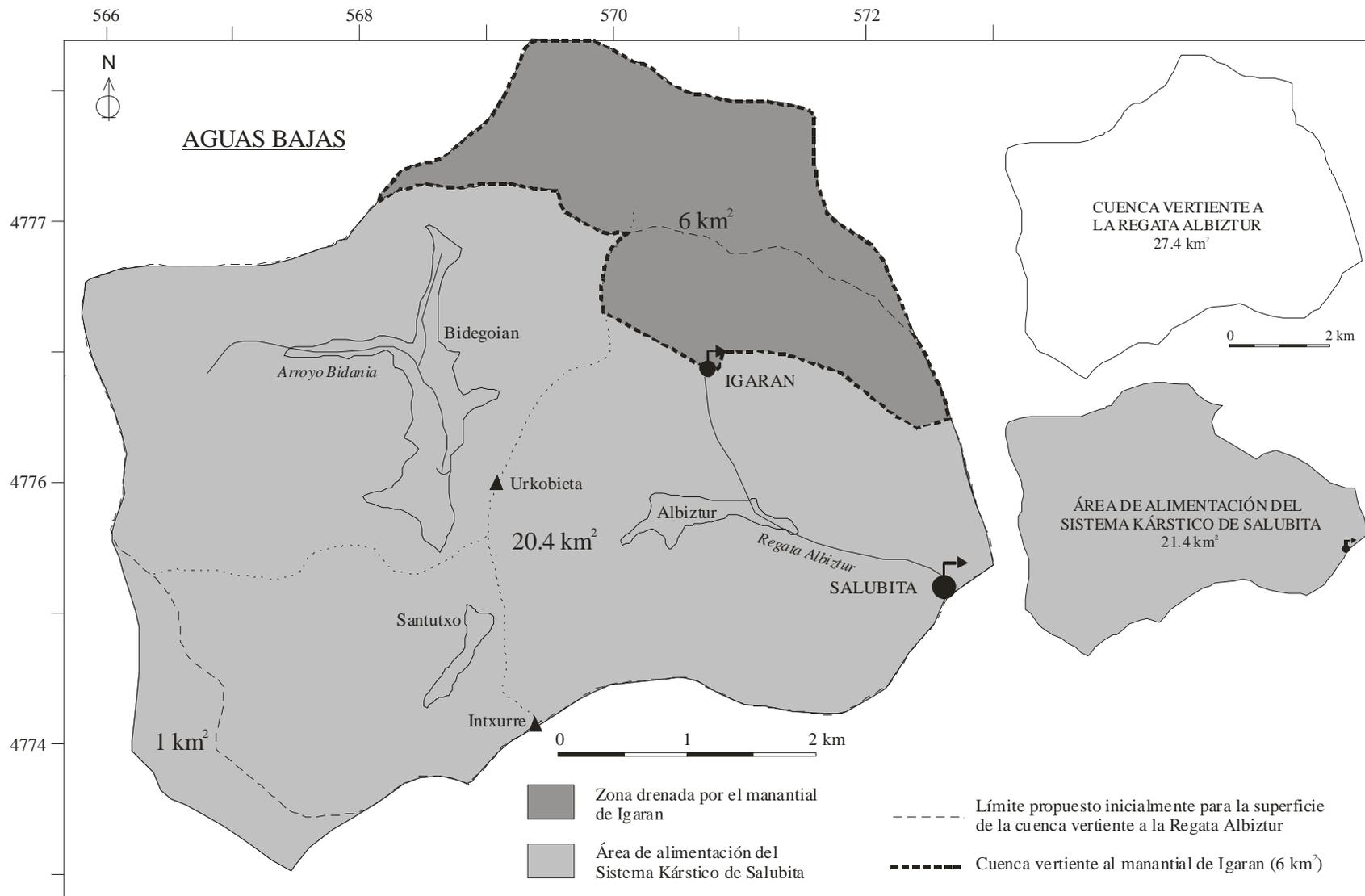


Figura 4.75: Límites estimados de la zona de alimentación del Sistema Kárstico de Salubita, de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur y del manantial de Igaran en período de aguas altas.



**Figura 4.75 (cont.): Límites estimados de la zona de alimentación del Sistema Kárstico de Salubita, de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur y del manantial de Igaran en período de aguas bajas.**

En estos momentos no llegan a la depresión de Bidania las aguas de escorrentía que en el período de aguas altas sí lo hacían desde una zona situada al Norte. Esta pequeña superficie (1.9 km<sup>2</sup>) pasa a formar parte ahora del sistema de alimentación de Igaran y de otros pequeños manantiales que drenan los materiales del Jurásico terminal-Neocomiense (la suma de estas áreas alcanza en estos momentos los 6 km<sup>2</sup> aproximadamente). Los materiales urgonianos próximos a la surgencia de Salubita (1.8 km<sup>2</sup>) alimentan el manantial de Salubita.

Para ambos períodos (aguas altas y aguas bajas) la cuenca vertiente a la Regata Albiztur engloba una superficie de 27.4 km<sup>2</sup>, de los cuales prácticamente 21.5 km<sup>2</sup> corresponden al Sistema Kárstico de Salubita, si bien la localización espacial de esta superficie presenta cambios en función de las condiciones hidrológicas. Estos cambios afectan a pequeños sectores en los que la escorrentía superficial, o subsuperficial, y la subterránea no son convergentes.

En resumen, tomando en consideración todas las posibilidades comentadas anteriormente, se puede concluir que la cuenca total vertiente a la Regata Albiztur, hasta la estación de aforos, es de unos 27 km<sup>2</sup>, de los cuales 21 km<sup>2</sup> corresponderían a la cuenca que drena, estrictamente, el manantial de Salubita. No se ponen aquí decimales porque no tiene demasiado sentido, menos aun estando en una región kárstica de dudosas divisorias. Se ha tratado de limitar estas cuencas, con sectores, en la figura 4.75; los datos concretos que ahí aparecen corresponden a las planimetrías realizadas y, como se ha dicho, hay que considerarlos con flexibilidad, aunque se toman como aproximaciones muy cercanas a la realidad.

### ***RELACIÓN PRECIPITACIÓN-APORTACIÓN A ESCALA PLURIANUAL***

A pesar de que en los últimos apartados la metodología del balance hídrico se ha centrado en los datos (lluvias-caudales) de los últimos dos años, en realidad se cuenta con series más prolongadas en el tiempo. Así, en lo que se refiere a datos de aportaciones registradas en la estación de aforos de la Regata Albiztur, en la presa, se tiene las series prácticamente completas correspondientes a los años hidrológicos 1985-86, 1986-87, 1987-88, 1988-89, 1997-98 y 1998-99, algunas de las cuales ya han sido tratadas y comentadas en otros apartados del presente capítulo. A partir de finales de 1989 la estación de aforos dejó de ser operativa, volviendo a funcionar a principios de 1997 en el marco del inicio de la presente investigación.

También se cuenta con las series de precipitaciones respectivas, registradas siempre fuera de la cuenca objeto de estudio. Ya han sido ampliamente tratados con anterioridad (apartados 2.3 y 4.11.3) los criterios seguidos para establecer los valores de precipitación que se consideran adecuados para la cuenca a partir de los valores registrados fuera de ella.

Con estas series de precipitaciones, por un lado, y aportaciones, por otro, se trata ahora de establecer la relación que entre ellas existe, considerando la escala anual como base de la comparación. Los valores de precipitación que se han tenido en cuenta han sido los acumulados anuales (desde el 1 de Octubre hasta el 30 de Septiembre) tal cual se extrapolaron inicialmente a la cuenca de estudio; es decir, no se considera aquí la posibilidad de errores en esos totales anuales como ha sido el caso del apartado anterior para el estudio de la sensibilidad del balance.

Lo mismo para los caudales. Se han considerado las descargas anuales registradas en la Regata Albiztur, así como las correspondientes, deducidas de aquéllas, de la surgencia de Salubita; tanto en un caso como en el otro los valores no han sido sometidos a ningún tipo de modificación, es decir, se ha tomado la curva de gastos existente como punto de partida en la transformación niveles-caudales.

Los datos anuales base del estudio se recogen en la tabla 4.33: las precipitaciones anuales están en mm y los caudales en l/s, como valor medio anual, sin considerar el efecto de la superficie de la cuenca drenada. Las lluvias anuales presentan un rango comprendido entre 1030 mm (1988-89), que corresponde al primero de los dos años deficitarios (1988-90) en lluvias que ocasionaron una “sequía”, de mayores consecuencias que lo que las lluvias caídas debieran haber originado, y 1709 mm (1987-88) con valores intermedios bien repartidos, lo que permite un análisis dentro de un amplio rango de lluvias.

Se pretende con este tratamiento comprobar si existe alguna relación fiable entre precipitaciones y aportaciones, a escala anual, que permitiera, en su caso, hacer previsiones de descargas, por una parte, o evidenciar anomalías en alguno de los años considerados en lo que a esa relación (lluvias-caudales) hace referencia.

Año	P(mm)	Qs (l/s)	Q <sub>AF</sub> (l/s)	Q <sub>AF</sub> -Qs (l/s)	Q <sub>S</sub> =%Q <sub>AF</sub>
1985-86	1524	752	927	175	81,1
1986-87	1393	674	845	171	79,8
1987-88	1709	902	1100	198	82,0
1988-89	1030	491	511	20	96,1
1997-98	1268	497	587	90	84,7
1998-99	1488	752	977	225	77,0

**Tabla 4.33: Valores anuales considerados en el tratamiento. Precipitación (P, mm). Descargas en Salubita (Qs, l/s). Descargas en la estación de aforos de la Regata Albiztur (Q<sub>AF</sub>, l/s).**

En la figura 4.76 se representa la relación entre la precipitación anual (mm) y el caudal en Salubita (l/s) considerando los seis años disponibles, y quitando uno, 1988-89 o 1997-98, según los

casos, ya que estos dos años se apartan de la tendencia marcada por el resto. Se han establecido dos tipos de tendencia, lineal y potencial, con su correspondiente expresión y su R cuadrado.

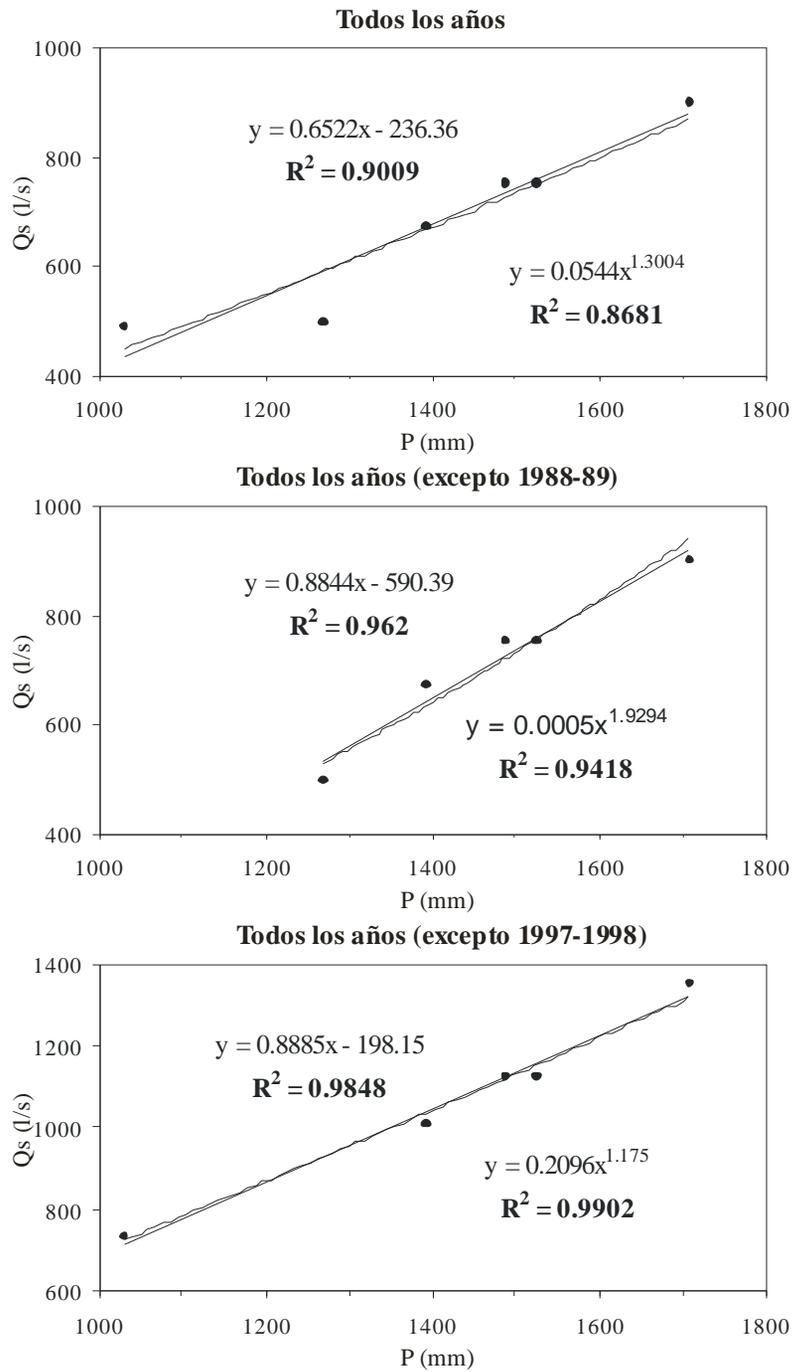
Se observa que si bien considerando todos los años la relación es buena ( $R^2=0.86-0.90$ ), ésta mejora al quitar uno de los años: 0.94-0.96 sin 1988-89 (1030 mm), y, mejor aún, 0.98-0.99 sin 1997-98 (1268 mm). Esto hace pensar que uno de esos dos años es “anómalo”, en el sentido de que se aparta de la relación plurianual establecida para el conjunto de los otros años, y que ese año puede ser el 1997-98. De hecho la mejor relación ( $R^2=0.99$ ) se da para el conjunto de los años exceptuado éste. La ecuación correspondiente es:

$$y = 0.1397 x^{1.175}$$

donde  $y$  es el caudal medio anual de Salubita (l/s) y  $x$  la precipitación anual (mm). Según esta expresión en el año 1997-98 cabría haber tenido un caudal en Salubita de 618 l/s en lugar de los 497 l/s medidos, es decir, un 24% más. Por otra parte, si tomamos por buena la expresión reflejada en la gráfica en la que no se ha considerado el año 1988-89 ( $R^2=0.96$ ) el caudal que cabría haber registrado en Salubita hubiera sido de 320 l/s en lugar de los 497 l/s medidos; un 36% menos.

A la vista de estos datos parece más razonable pensar que es el año 1997-98 (1268 mm) el que presenta anomalías, respecto al comportamiento definido por el resto de años, estando el año más seco de todos (1988-89, 1030 mm) en consonancia con ese comportamiento generalizado. Profundizar más en estas supuestas “anomalías” requeriría entrar en la forma de reparto estacional de las lluvias en cada uno de esos años. Sin entrar en detalle, valga al menos la información que en su momento se presentó en la tabla 4.20 referente a esa distribución estacional. Como se observa en esa tabla, el año 1997-98 registró las mayores lluvias al inicio del año, otoño, mientras que en el año seco, 1988-89, éstas tuvieron lugar en primavera, debiendo ayudar a un comportamiento más inercial, más sostenido en la descarga, del acuífero en el periodo de recesión estival.

GARCIA-MUÑIZ y ANTIGÜEDAD (1991), en un análisis de la sequía de 1988-90 en el País Vasco, establecieron que la precipitación en el año 1988-89 fue, en general, en la cornisa cantábrica del País, un 60% de la habitual en años medios, con una disminución muy notable en el intervalo Octubre-Enero pero, sin embargo, con una cierta normalidad en el periodo Febrero-Mayo e, incluso, con unas lluvias muy por encima (200%) de lo habitual en el lluvioso mes de Abril.



**Figura 4.76:** Relaciones entre la precipitación anual (P, mm) y el caudal medio anual en Salubita (Qs, l/s) para todos los años considerados, y quitando alguno de ellos (1988-89 ó 1997-98).

El año 1997-98, por su parte, aunque más lluvioso a nivel anual, originó una disminución generalizada de caudales en los ríos de Gipuzkoa del orden del 40% (DFG- Diputación Foral de Gipuzkoa, Los ríos de Gipuzkoako ibaiak, Txostena-Memoria 1997-98), lo cual refleja la notable importancia de considerar la distribución estacional de lluvias más allá de su total anual; una distribución inhabitual puede tener efectos importantes en el comportamiento anual del sistema considerado, Salubita en nuestro caso. Ya se ha visto con anterioridad (apartado 4.11.9) que la ETR en este año es mayor que la de 1998-99 en cualquiera de los balances realizados (tabla 4.30).

Ya fueron comentadas en la comparación de resultados del análisis correlatorio y espectral (apartado 4.10.2.2) las anómalas características de este año 1997-98, sin tendencia anual marcada, con precipitaciones aisladas y concentradas, como lo refleja el hidrograma de la figura 4.11, y con un mayor peso en la descarga de la componente de flujo base (figura 4.13). Aunque se decía allí que el sistema tiende a un comportamiento habitual de año medio eso no quita para que se note una cierta irregularidad en la descarga, que a la luz de la ecuación arriba establecida se cifraría en una disminución de un 19% respecto al caudal medio anual que cabría esperar (497 l/s en lugar de 618 l/s).

Así las cosas, la ecuación establecida sin tener en cuenta el año 1997-98 ( $R^2=0.99$ ) se puede considerar como representativa de la relación precipitación-aportación para la cuenca drenada por la surgencia de Salubita. Expresiones de forma similar han sido establecidas por otros autores en otras regiones kársticas. Así, por ejemplo, BONACCI y MAGDALENIC (1993) encuentran una relación del tipo  $y = 29.61x^{0.3826}$  para una cuenca kárstica en la región dinárica, con  $y$  precipitación anual (mm) y  $x$  caudal en la surgencia (mm), para una cuenca drenada de 65 km<sup>2</sup>. KULLMAN (1990) da expresiones del tipo  $Qz = 0.4743Z + 11.64$  (caso concreto del sistema de Velky Choc) para un buen número de diferentes sistemas kársticos en Slovakia, con  $Z$  precipitación anual (mm) y  $Qz$  descarga (mm).

No se trata de establecer comparaciones entre ecuaciones, sino de mostrar el interés de que la relación precipitación ( $x$ , mm) - aportación ( $y$ , l/s ó mm) pueda ser generalizada a nivel regional con expresiones de este tipo. Con ese fin, las expresiones que consideramos como válidas para el Sistema de Salubita (tomando el caudal –  $y$  - tanto en l/s como en mm considerando un área de 21 km<sup>2</sup> – según apartado 4.11.9- para su área de alimentación) son (en tendencia lineal y en potencial) las siguientes (figura 4.76):

$$y = 0.1397 x^{1.175} \quad (y = \text{l/s}) \quad (R^2 = 0.99) \quad y = 0.2096 x^{1.175} \quad (y = \text{mm})$$
$$y = 0.5923x - 132.1 \quad (y = \text{l/s}) \quad (R^2 = 0.985) \quad y = 0.8885x - 198.15 \quad (y = \text{mm})$$

También se han establecido las relaciones entre la precipitación anual (mm) y la ETR (mm, %), relaciones que se recogen en la tabla 4.34 y en la figura 4.77. La evapotranspiración real se ha deducido teniendo en cuenta una superficie de cuenca para Salubita de 21 km<sup>2</sup> (apartado 4.11.9), esto

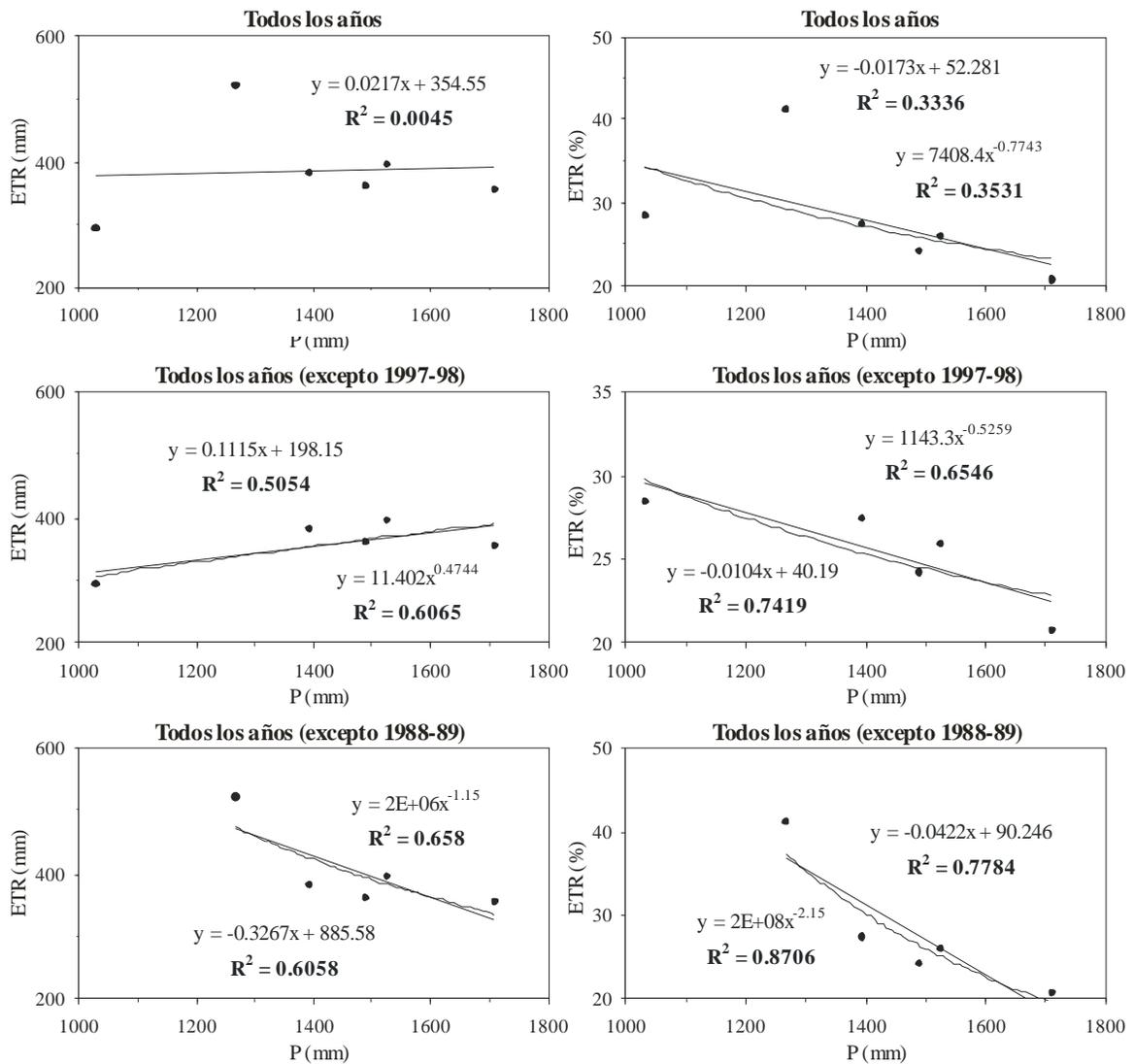
ha permitido pasar de l/s (o  $\text{hm}^3/\text{año}$ ) a mm, y viceversa, y de conocer la ETR tanto en mm como en porcentaje de precipitación.

Año	P(mm)	P ( $\text{hm}^3/\text{a}$ ) 21 $\text{km}^2$	Qs (l/s)	Qs (mm)	Qs ( $\text{hm}^3/\text{a}$ )	ETR (mm)	ETR ( $\text{hm}^3$ ) 21 $\text{km}^2$	ETR (%)
1985-86	1524	32.00	752	1128	23.69	396	8.3	26.0
1986-87	1393	29.25	674	1011	21.23	382	8.0	27.4
1987-88	1709	35.89	902	1353	28.41	356	7.5	20.8
1988-89	1030	21.63	491	737	15.47	294	6.2	28.5
1997-98	1268	26.63	497	746	15.66	523	11.0	41.2
1998-99	1488	31.25	752	1128	23.69	360	7.6	24.2

**Tabla 4.34: Valores de precipitación anual (mm,  $\text{hm}^3$ ), de caudales (mm, l/s,  $\text{hm}^3$ ) y de ETR (mm, %,  $\text{hm}^3$ ) considerando una superficie de cuenca para Salubita de 21  $\text{km}^2$ .**

La ETR anual (en %) se mantiene bastante constante, entre 20.8 (en el año más lluvioso) y 28.5% (en el menos lluvioso), en todos los años, excepto en el 1997-98 en el que se dispara hasta un 41.2%, como ya se había visto en los balances realizados (apartado 4.11.9). En términos absolutos la ETR oscila entre 294 y 396 mm, excepto el año anómalo ahora citado (523 mm), y entre 6 y 8  $\text{hm}^3$ . De aquí puede deducirse que el rango 20-28% (300-400 mm) de la precipitación, sirve orientativamente como referencia de la ETR para un amplio abanico de condiciones hidrológicas, pero no para todas.

Al ser los datos de ETR bastante próximos entre sí para todos, excepto uno, y ser notoriamente diferente para ese año, resulta que la mejor relación ( $R^2=0.87$ ) se da precisamente cuando se incluye este año, siendo algo menor ( $R^2=0.74$ ) cuando se descarta (figura 4.77). La ausencia de datos de ETR intermedios dificulta la interpretación de los hechos: ¿fueron anómalas las condiciones de 1997-98 en lo que a la ETR se refiere, en relación con lo repetidamente expuesto para este año?, lo que implicaría que el rango antes establecido (20-28%, 300-400 mm) es un buen referente anual, o bien ¿ocurre realmente un aumento de la ETR proporcional a la disminución de la precipitación?, esto último implicaría que en el año 1988-89 la ETR debería haber sido del orden de un 66-67%, según la ecuación de mayor  $R^2$  (0.87) lo que parece excesivo. Una vez más, es razonable pensar que es el año 1997-98 el “anómalo”, siempre considerando el comportamiento a escala anual, y que las ecuaciones antes establecidas son una buena referencia del comportamiento del sistema drenado por Salubita a esa escala de tiempo.



**Figura 4.77: Relaciones entre la precipitación anual (mm) y la ETR (mm, %) para todos los años considerados, y quitando alguno de ellos (1988-89 ó 1997-98).**

En cuanto a las aportaciones registradas en la propia Regata Albiztur (estación de aforos de la presa) sus datos anuales se recogen en la tabla 4.35 y las relaciones con la precipitación se observan gráficamente en la figura 4.78. En comparación con las relaciones establecidas entre las precipitaciones y las aportaciones en Salubita (figura 4.76) en el caso de la regata se observa que las relaciones son mejores cuando se considera el conjunto de los seis años hidrológicos ( $R^2=0.92$ ), lo que hace pensar que las “anomalías” que antes se han comentado no lo son tanto para el conjunto de la cuenca drenada por la Regata Albiztur.

Año	P(mm)	P (hm <sup>3</sup> /a) 27km <sup>2</sup>	Q <sub>AF</sub> (l/s)	Q <sub>AF</sub> (hm <sup>3</sup> /a)	Q <sub>AF</sub> (mm) 27 km <sup>2</sup>
1985-86	1524	41.15	927	29.2	1082
1986-87	1393	37.61	845	26.6	986
1987-88	1709	46.14	1100	34.7	1283
1988-89	1030	27.81	511	16.1	596
1997-98	1268	34.24	587	18.5	685
1998-99	1488	40.18	977	30.8	1140

**Tabla 4.35: Valores de precipitación anual (mm, hm<sup>3</sup>), de caudales (mm, l/s, hm<sup>3</sup>) y de ETR (mm, %, hm<sup>3</sup>) en la cuenca de la Regata Albiztur para una superficie de 27 km<sup>2</sup>.**

En cuanto a la consideración excluyendo los dos años “anómalos” (1988-89 y 1997-98) la figura 4.78 refleja que, al igual que para Salubita, la mejor relación ( $R^2=0.98$ ) se da cuando no se incluye el año 1997-98, siendo ahora la relación más baja ( $R^2=0.89$ ) que para Salubita cuando el año que no se incluye es el 1988-89. Dicho de otra manera, el año 1997-98 parece ajustarse mejor a la dinámica general anual en la cuenca vertiente a la regata que en el acuífero drenado por Salubita.

Así las cosas, las ecuaciones que mejor representan (mayores  $R^2$ ) el comportamiento anual del conjunto de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur (x precipitación anual en mm; y caudal medio anual expresado en l/s ó en mm) toman esta forma:

$$y = 0.0114 x^{1.5459} \quad (y = \text{l/s}) \quad (R^2 = 0.98) \quad y = 0.0133 x^{1.5465} \quad (y = \text{mm})$$

$$y = 0.8762 x - 379.87 \quad (y = \text{l/s}) \quad (R^2 = 0.98) \quad y = 1.0223 x - 443.25 \quad (y = \text{mm})$$

Con las ecuaciones antes establecidas para Salubita y las ahora presentadas para la Regata Albiztur se tienen ya las funciones que marcan, de forma general y a escala anual, las relaciones entre las precipitaciones y las aportaciones para esos dos sistemas.

Las relaciones precipitaciones-ETR, sin embargo, no presentan buenas correlaciones, aunque son bastante mejores para el acuífero de Salubita (figura 4.77) que para la cuenca total de la regata en donde  $R^2$  no sobrepasa el valor 0.3. En esta cuenca la ETR está comprendida entre 23 y 29% de la precipitación (tabla 4.35), excepto ahora los dos años citados (1988-89 y 1997-98) en los que alcanza los 42-46%. En términos absolutos la ETR anual oscila entre 9.4 y 11.9 hm<sup>3</sup> (entre 348 y 443 mm), excepto para el año 1997-98 que es 15.7 hm<sup>3</sup> y 583 mm. Valen aquí los comentarios antes realizados en torno al mismo aspecto pero referido a la cuenca drenada por Salubita.

En resumen, la ETR anual para toda la cuenca vertiente a la regata oscila normalmente en el rango 350-450 mm, es decir, unos 50 mm más que para la cuenca vertiente a Salubita (300-400 mm). En consecuencia, la ETR anual en los 6 km<sup>2</sup> de cuenca vertiente a la regata (27 km<sup>2</sup>) que no son parte

de la cuenca de Salubita (21 km<sup>2</sup>) debe ser del orden de 525-625 mm, es decir, un 55-75% más que en el área de alimentación al acuífero de Salubita, lo que pone en evidencia la importante función que

juega la parte superficial de los afloramientos carbonatados urgonianos favoreciendo una rápida infiltración, lejos, al menos, del efecto de la evapotranspiración, en relación con el epikarst, como ya fue comentado en el apartado 4.3.2.

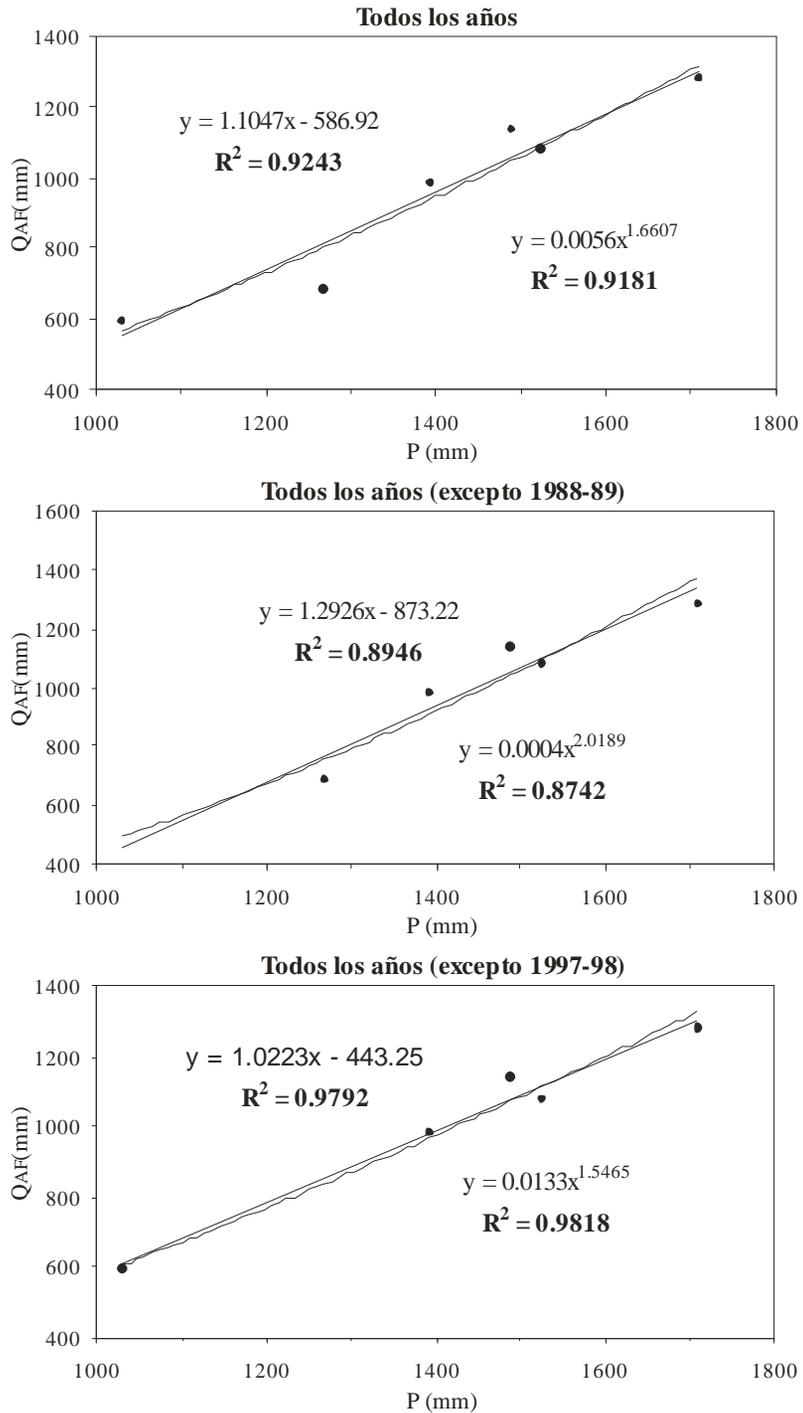
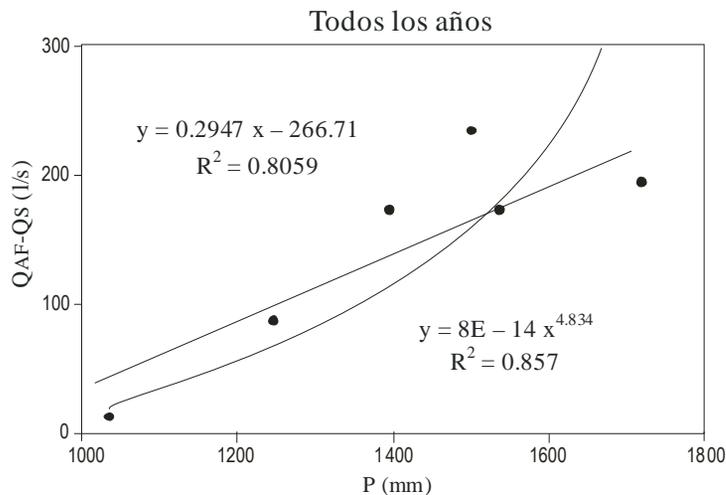


Figura 4.78: Relaciones entre la precipitación anual (P, mm) y el caudal medio anual en la estación de aforos (Qs, mm) para todos los años considerados, y quitando alguno de ellos (1988-89 ó 1997-98).

Por último, en la figura 4.79 se recoge la relación existente entre la precipitación anual (mm) y la diferencia entre los caudales medios anuales de la presa (estación de aforos) y Salubita ( $Q_{AF}-Q_s$ ) expresada en l/s. Esta diferencia representa los aportes a la regata que no proceden del acuífero urgoniano; son, por tanto, los procedentes del sector de Igaran y aportes superficiales ocasionales en momentos de lluvias intensas. La relación para el conjunto de años hidrológicos considerados es buena ( $R^2=0.806-0.857$ ) lo que permite estimar, a escala anual, esos aportes en función de la precipitación anual.

Con los tratamientos que en este apartado se han realizado se ha pretendido avanzar más en la comprensión de las relaciones existentes entre precipitaciones, caudales y evapotranspiraciones en los dos sistemas considerados, el global vertiente a la regata, y el vertiente al manantial de Salubita, y ello a la escala del comportamiento anual. Este tipo de tratamiento abre un camino interesante en zonas kársticas próximas que, a medida que se avance, puede permitir una mejor definición, con las expresiones correspondientes, de ese comportamiento a escala anual y, además regional.



**Figura 4.79:** Relación existente entre la precipitación anual (mm) y la diferencia entre los caudales medios anuales de la presa (estación de aforos) y Salubita ( $Q_{AF}-Q_s$ ) expresada en l/s.

## **4.12. RESUMEN-CONCLUSIONES**

### ***Obtención del hidrograma del manantial de Salubita***

Los caudales medios diarios del manantial de Salubita (hidrograma de Salubita), para los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99, se han deducido (figura 4.11) a partir de los caudales medios diarios realmente registrados en la única estación de aforos del área objeto de estudio: Regata Albiztur, en la presa inmediatamente aguas abajo del manantial de Salubita. También el hidrograma de la regata, aguas arriba del manantial, ha sido deducido (figura 4.17) a partir del hidrograma registrado. El procedimiento seguido se recoge en la figura 4.4.

La descomposición del hidrograma registrado se ha fundamentado, por una parte, en datos de aforos diferenciales realizados a lo largo de la regata, antes y después del manantial, y, por otra, en el contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  en las aguas de diversos puntos de la regata y en Salubita. Ambos métodos proporcionan resultados similares. Las figuras 4.10a y 4.12 recogen las expresiones matemáticas que relacionan los caudales aforados en la presa ( $Q_{AF}$ ) y los deducidos para Salubita ( $Q_s$ ) a partir de los dos métodos.

### ***Relación entre el manantial de Salubita y la regata Albiztur***

Cuando el caudal en la estación de aforos  $Q_{AF} < 700-800$  l/s, la regata infiltra agua al acuífero, aguas arriba de Salubita. La infiltración es total para  $Q_{AF} < 200-225$  l/s; en estos momentos todo el agua que pasa por la estación proviene del manantial, siendo una parte de este caudal procedente, por infiltración, de la regata, la cual, a su vez, es alimentada sobre todo por el manantial de Igaran (figura 4.4). La notable diferencia en el contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  de las aguas de Igaran y del acuífero que drena a Salubita hace que este elemento sea un marcador idóneo para la descomposición del hidrograma registrado en la estación.

El caudal propio drenado por el acuífero de Salubita, una vez descontada la aportación procedente de la regata, representa entre un 77% (753 l/s) y un 85% (497 l/s) del caudal anual total que pasa por la presa de la Regata Albiztur. Esta influencia del acuífero en la regata es mayor en los años de menor precipitación (1997-98) y menor en los años más lluviosos (1998-99) (tabla 4.3). A escala de caudales instantáneos (figura 4.10b) la influencia de Salubita en la regata es del orden de 75-100%, aunque este porcentaje debe disminuir bastante en momentos puntuales de aguas muy altas, que no han sido controladas en sus contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$ .

El hidrograma, valores diarios, de Salubita ha sido, a su vez, descompuesto en sus componentes de *flujo rápido* y *flujo base* (figura 4.13), a partir del contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  (balance de masas). El caudal medio anual del flujo base se mantiene bastante constante en términos absolutos (286-309 l/s) durante los tres años (tabla 4.7), mientras que el del flujo rápido varía notablemente (210-443 l/s), aumentando con la precipitación. En términos relativos el flujo base oscila entre 41 y 58%, siendo mayor en el año más seco (1997-98), lo que refleja la capacidad reguladora del acuífero; en este año el flujo base (58%) es mayor que el rápido (42%). El caudal base diario se mantiene durante los meses húmedos en torno a los 350-380 l/s (figura 4.13).

También con el hidrograma deducido para la Regata Albiztur aguas arriba de Salubita (figura 4.17) se ha realizado una descomposición con los datos de  $\text{SO}_4^{2-}$ . Resulta que la aportación del manantial de Igaran supone prácticamente un 78-80%, medio anual, del agua que lleva la regata antes de Salubita, o, un 12% (año seco)-18% (año húmedo) del total registrado en la estación de aforos de la regata (tabla 4.12). El resto de aportaciones proceden de manantiales y cursos

superficiales, de importancia sólo en momentos de aguas altas. La superficie necesaria para justificar el flujo rápido a la regata, antes de Salubita, resulta ser de 6.2 km<sup>2</sup>.

En la figura 4.20 se reflejan, a modo de conclusión, todos los hidrogramas (caudales medios diarios) deducidos a partir del único registrado (presa de la Regata Albiztur), para los tres años hidrológicos considerados. Sus relaciones en términos porcentuales se observan en la figura 4.21.

### ***Relación entre la depresión de Bidania y el manantial de Salubita***

La evolución de niveles en el sumidero de Osinondo (Depresión de Bidania) y en la presa de la Regata Albiztur indica que las puntas de las crecidas se producen prácticamente al mismo tiempo (1-7 horas) en ambos puntos. Quiere ésto decir que los picos registrados en la presa no son consecuencia del aumento de caudal en Osinondo, sino que las dos crecidas son efecto de un mismo suceso (precipitaciones). La unimodalidad general de los picos en la presa indica que los aumentos de caudal producidos en Osinondo se amortiguan en el acuífero y llegan a la presa, a través del manantial de Salubita, con un retardo de unas 20-50 horas (evidenciado por los trazadores), pasando desapercibidos en el limnigrama de la presa.

La comparación de los caudales diarios en ambos puntos (figuras 5.30 a 5.32), teniendo en cuenta el retardo, muestra que en aguas bajas el caudal del sumidero supone un 1-2% del registrado en la presa; en aguas medias es de 5-16%, y en aguas altas muy variable, pudiendo llegar puntualmente al 40%. Esto indica claramente que el caudal drenado por Salubita proviene principalmente de otros sectores. La lenta decrecida del caudal en la presa, en comparación con la de Osinondo, sugiere una mayor regulación del agua que pasa por la misma, dominada, en su mayor parte, por las aguas que manan a través del manantial de Salubita.

### ***Análisis de la piezometría***

Los niveles de los sondeos Albiztur-I y Albiztur-II experimentan fuertes variaciones (2.6 y 5.0 m respectivamente; gradientes: 0.01-0.04), sobre todo en caudales bajos (figuras 4.34 y 4.35). Esto puede ser debido a que el flujo en los sectores circundantes a los sondeos se encuentre en carga o a la baja permeabilidad de los bloques perforados en su parte más baja, en contraste, con una mayor permeabilidad en su parte alta.

A partir de ciertos umbrales de nivel (figura 4.36), los niveles casi no varían en estos dos sondeos a pesar de los importantes aumentos de caudal en el manantial. Esto se explica por existencia en esas cotas de zonas altamente transmisivas que permiten el flujo rápido del agua hacia la descarga. Estas zonas deben estar asociadas a fracturación y karstificación (figura 4.33). Comparativamente, por debajo ya de la zona transmisiva, el descenso de nivel es más rápido en Albiztur-II, lo que representaría una mayor transmisividad (o menor coeficiente de almacenamiento) en ese sector que en el del Albiztur-I.

No obstante, teniendo en cuenta la situación de estos dos sondeos, próximos al cauce de la Regata Albiztur, y con niveles por debajo de éste, es posible que las pérdidas de caudal desde la regata expliquen, en parte al menos, las importantes variaciones de nivel observadas en estos dos sondeos en el dominio de los caudales bajos-medios.

Las fuertes variaciones lineales de nivel del sondeo Albiztur-IV (figura 4.36), que se producen en cualquier rango de caudales, también hacen pensar en un flujo en carga en este sector, a pesar de que en este caso no se aprecia ninguna zona concreta altamente transmisiva que permita la regulación temporal de los niveles. El gradiente aquí es de 0.01-0.04.

### ***Ensayos con trazadores***

Los trazados han constituido una parte importante de este estudio, con un total de 9 ensayos (figura 4.51 y tabla 4.18). A tenor de los resultados obtenidos (tasas de restitución superiores al 74%, paso del trazador en cuestión de horas, curvas de paso unimodales y baja dispersión longitudinal y transversal) los trazados realizados a lo largo de este estudio han proporcionado mejores resultados en los materiales cretácicos (calizas y calcarenitas urgonianas) que en los jurásicos. Ésto indica el buen desarrollo de la red kárstica activa en estos materiales, aunque algunas zonas como la depresión de Santutxo, no parecen estar bien conectadas a esa red (figura 4.53) o, de estarlo, la dilución a la que está sometido el trazador es muy grande, debido a la mayor importancia en esa red de los aportes procedentes de otras áreas (epikarst, depresión de Bidania). Esta cuestión es de notable importancia habida cuenta de la ubicación en Santutxo de un vertedero clausurado de residuos varios; según este estudio, no hay impacto observable alguno en la surgencia, a pesar de su situación en el área drenante a Salubita.

Las inyecciones realizadas al Norte de la Falla de Errezil han demostrado que esa zona no posee conexión subterránea apreciable ni con el manantial de Salubita ni con la Regata Albiztur, por lo que esa estructura parece constituir el límite Norte del Sistema Kárstico de Salubita. No obstante, sí se ha evidenciado algún aporte, aunque despreciable, desde las calcarenitas urgonianas, hacia el sector de Legorreta. Así, el límite Sur del Sistema Kárstico se puede establecer en el contacto entre los materiales carbonatados urgonianos y los lutíticos del Albiense Superior que prácticamente, coincide con la divisoria de aguas en ese borde (figura 3.2).

Metodológicamente se muestra que si bien los trazados son fundamentales en estas investigaciones, resulta necesaria su repetición bajo diversas condiciones hidrológicas, tanto en lo referente a las condiciones del momento, consecuencia de las antecedentes y fáciles de conocer, como a las condiciones inmediatamente posteriores al ensayo, de casi imposible pronóstico. Los resultados clarifican aspectos importantes pero crean también dudas razonables. En los ensayos realizados se ha dado gran importancia a la frecuencia y tiempo de muestreo, lo que ayuda mucho en la interpretación de los resultados positivos y en la razonabilidad de los otros.

### ***Análisis de los quimiogramas***

La primera crecida del año hidrológico provoca (figura 4.54), en el manantial de Salubita, el aumento de concentración en elementos externos (nitratos y potasio), indicadores del flujo rápido, y la dilución de los internos. Este hecho es observable también en el manantial de Igaran (figura 4.55), no sólo durante la primera crecida del año hidrológico sino también en crecidas posteriores. En Salubita, sin embargo, las crecidas posteriores no muestran una variación hidroquímica palpable, lo que indica un efecto pistón; se pone de manifiesto lo absurdo de establecer un patrón único de comportamiento dinámico del acuífero kárstico, ante episodios de lluvia, a partir de las observaciones en la surgencia.

En el manantial de Igaran y en la presa de la regata la hidroquímica tiende a coincidir en momentos de mayor dilución (aguas muy altas), debido a que en esos momentos puntuales las aguas procedentes de Igaran poseen una importante presencia en la presa, y a que las aguas de Salubita presentan también un quimismo parecido, motivado por el efecto homogeneizador de la fuerte dilución. El nitrato es el único elemento que sistemáticamente presenta contenidos mayores en las aguas de la presa que en las de Igaran. Esto es debido a que las aguas de Salubita poseen mayores contenidos en nitratos (procedentes sobre todo de la depresión de Bidania).

El nitrato, como indicador de la presencia del flujo rápido en Salubita (figura 4.54), permite deducir el tiempo de tránsito para las primeras aguas de infiltración rápida (20 horas) y para el “pico” máximo de infiltración (28 h), de donde se han calculado velocidades de entre 145 m/h y 205 m/h, similares a las obtenidas en trazados artificiales en aguas altas (tabla 4.18). De esta forma, se evidencia la utilidad del nitrato, en este Sistema al menos, como trazador, aunque sería un trazado más asimilable a una inyección continua de concentración decreciente.

### ***Estudio de las series cronológicas***

El estudio de las curvas de recesión de cinco años hidrológicos considerados, ha proporcionado para Salubita un coeficiente de agotamiento ( $\alpha$ ) medio de 0.0107 d<sup>-1</sup> (tabla 4.19). Se observa que no existe relación alguna entre la precipitación anual total y  $\alpha$ . Sin embargo, considerando la precipitación registrada durante los últimos 30 días anteriores al inicio de la recesión, principios de Mayo, sí se puede observar relación, de forma que a medida que aumenta esa precipitación,  $\alpha$  también aumenta (figura 4.58).

Según la clasificación i-k de MANGIN, el Sistema de Salubita se encuentra, en general, en el dominio III: buen desarrollo de la karstificación en la zona no saturada y retardo de la infiltración. Resulta ser la forma de la decrecida (i) la condicionante del comportamiento del sistema en la recesión: esa forma está en relación con el régimen pluviométrico (Marzo-Mayo) previo a la decrecida y no con el total de lluvia anual. El término k puede ser considerado como una característica estable del sistema, y en Salubita vale 0.12 (figura 4.60). Posee un volumen dinámico medio anual de 2.3 hm<sup>3</sup>, de los cuales drena un 42% tras 50 días sin alimentación (figura 4.61), lo que muestra el poder regulador de este acuífero.

Un análisis más detallado del agotamiento da valores de  $\alpha$  de 0.004-0.0064 para el flujo lento y de 0.07-0.015 para el intermedio (figura 4.62). Se pone de manifiesto que el cambio de pendiente flujo intermedio-flujo lento ocurre para un caudal en Salubita de unos 150 l/s. Esta ralentización en el vaciado estaría originada por el descenso de nivel por debajo de un horizonte más transmisivo, que a la vista de la figura 4.36 debe situarse a una cota de 124 m en Albiztur-IV y 134 m en Albiztur-II. También aquí hay que recordar la infiltración de las aguas de la regata (caudales de 150 l/s en la presa; igual en Salubita) que podría ayudar a suavizar la pendiente durante el agotamiento.

A partir del Análisis Correlatorio y Espectral realizado con los caudales diarios de Salubita para los años 1986-87, 1997-98 y 1998-99, se deduce un tiempo de regulación de 15-35 días y un efecto memoria de 28-60 días (tabla 4.21; figuras 4.63 a 4.65). El comportamiento es muy similar en el primer y tercer año, pero diferente en el año más seco (1997-98). Esto evidencia la importancia de no limitar el análisis a un año concreto; es más, la importancia del mismo radica, sobre todo, en la comparación plurianual de las respuestas.

Las gráficas ponen de manifiesto la tendencia del Sistema de Salubita durante ese año seco a comportarse como un año más húmedo, lo que indica un interesante poder regulador plurianual, coincidente con lo ya establecido en la descomposición de los hidrogramas (tabla 4.3). A pesar de ello, al año seco le corresponden los valores más bajos de efecto memoria y tiempo de regulación. El análisis también se ha aplicado a los caudales de la estación de aforos de la Regata Albiztur evidenciándose, una vez más, la notable influencia del acuífero de Salubita en su hidrograma.

Del conjunto de análisis efectuados con las series cronológicas de este estudio se evidencia que es siempre preciso tomar en consideración el régimen de lluvias, no solamente el total anual sino también su distribución estacional, a la hora de analizar series cronológicas (incluido el agotamiento), ya que es frecuente asignar al comportamiento del acuífero

aspectos que, en buena medida, tendrían su causa última en condicionantes externos (ejemplo: la frecuencia de ocurrencia de episodios lluviosos anteriores). En este estudio se han tratado de evidenciar algunos de estos aspectos.

### ***Balance hídrico***

Es conocida la dificultad de establecer balances hídricos en zonas kársticas. En este caso se ha dado a este tema una especial relevancia. Así, se han aplicado cuatro métodos de cálculo de la evapotranspiración (ET). Dos de ellos (Thornthwaite y Primault) calculan la ET<sub>real</sub> (ETR) en función de la potencial (ETP), calculada a su vez a partir de la temperatura del aire. Los otros dos métodos (Penman y Allen) calculan la ETR mediante la ET de referencia (ET<sub>o</sub>), calculada mediante un buen número de variables meteorológicas (temperatura del aire, humedad, velocidad del viento...). La aplicación de los cuatro métodos ha permitido una primera valoración de la bondad, aplicabilidad, de cada método en esta cuenca (tabla 4.28). El balance previo se realizó a partir de los datos reales de lluvias y caudales en la estación de aforos, y admitiendo una superficie de cuenca de 26 km<sup>2</sup>, se había deducido una ETR anual de 43.8% (1997-98) y de 20.4% (1998-99). Como se ve en la tabla ningún método se ajusta bien para los dos años, aunque en el año menos lluvioso el ajuste es muy bueno para Penman y Allen.

Los resultados mensuales de ETR se recogen en la figura 4.73. Se observan valores similares para Thornthwaite y Primault, por un lado, y para Penman y Allen, por otro. Los valores mensuales de estos últimos parecen servir bien para el año más seco (1997-98), pero su consideración para el segundo año no es, hasta ahora, adecuada en absoluto.

Con el objetivo de buscar una mayor aproximación a lo que ocurre en este año lluvioso (1998-99) se ha llevado a cabo un análisis de sensibilidad, teniendo en cuenta que el cómputo total de lluvias puede albergar dudas, al no contar con estaciones en la propia cuenca, y que los propios datos de caudales pueden presentar incertidumbres en los caudales altos, debido a la escasa definición de la curva de gastos de la presa (figura 4.74) en esos momentos. Ambas incertidumbres son más notables en el año lluvioso 1998-99. De este análisis ha resultado para este año un valor de ETR del 29.6% como más idóneo, en lugar del 20.4% previo.

Los valores idóneos de la ETR para los dos años considerados se han utilizado para estimar, o confirmar, la superficie drenada por el sistema acuífero de Salubita. Teniendo en cuenta las incertidumbres, ha resultado un área de 21 km<sup>2</sup> (tabla 4.30). También se ha hecho esa estimación para el total de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur, siendo esta de 27 km<sup>2</sup>. Las figuras 4.75 muestran esquemáticamente la ubicación de ambas superficies (la de Salubita se incluye en su totalidad en la cuenca), y también la de Igaran, en aguas altas y aguas bajas, habida cuenta del distinto comportamiento, y dirección del flujo, que la escorrentía superficial y subterránea presentan en algunas zonas concretas.

Por último se ha establecido una relación plurianual, con datos anuales de seis años hidrológicos, entre las precipitaciones y las aportaciones, tanto a nivel del conjunto de la cuenca de la Regata Albiztur como a nivel del acuífero de Salubita. La relación viene determinada por las expresiones matemáticas correspondientes (figuras 4.76 y 4.78) que indican un muy buen ajuste (altos R<sup>2</sup>), aunque con normalidad puntual: el ajuste es mejor si se ignora el año 1997-98 (ya se han comentado sus condiciones climáticas). Sin embargo, no hay relación significativa con la ETR (precipitación-aportación), que en Salubita se mantiene bastante estable, 300-400 mm/año (20-28%), a excepción del año anómalo 1997-98 (tabla 4.34).

La ETR anual para toda la cuenca vertiente a la Regata Albiztur oscila entre 350 y 450 mm, es decir, unos 50 mm más que para la cuenca vertiente a Salubita. Por tanto, la ETR en los 6 km<sup>2</sup> que no son parte de esta última cuenca debe ser del orden de 525-625 mm/año, 55-75% más que en el área de alimentación a Salubita, lo que pone en evidencia la importante función que juega la parte superficial de los afloramientos carbonatados, favoreciendo la rápida infiltración, lejos del efecto de la evapotranspiración.

## 5.1. INTRODUCCIÓN

Resulta evidente la importancia de la hidroquímica en el estudio hidrogeológico de cualquier sistema acuífero (BAKALOWICZ, 1979; ANTIGÜEDAD, 1986; MUDRY, 1987, PLAGNES, 1997; entre muchos otros). La evolución tanto del quimismo como de los aspectos físicos de las aguas subterráneas permite conocer en detalle el funcionamiento del acuífero que las alberga. La evolución temporal del quimismo en la surgencia, su respuesta ante las precipitaciones, la presencia de diferentes tipos de agua en el manantial en relación con su posición a lo largo del año hidrológico, la presencia y evolución de marcadores externos y los propios del acuífero etc. proporcionan la información necesaria para, junto a las consideraciones hidrogeológicas, poder conocer en detalle el comportamiento del acuífero.

Estando la hidrogeología y la hidroquímica estrechamente relacionadas, algunos aspectos hidroquímicos (ensayos con trazadores y evolución temporal de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{SO}_4^{2-}$ ) se han tratado ya en el capítulo 4 referente a la Hidrogeología; de hecho la descomposición del hidrograma de Salubita (apartado 4.3.2) en sus componentes de *flujo base* y *flujo rápido* se ha basado exclusivamente en las concentraciones de sulfatos.

En la **Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur** se produce la unión de las aguas procedentes de diferentes zonas de la cuenca vertiente a la Regata Albiztur. Los diferentes orígenes de las aguas se reflejan en su contenido hidroquímico, siendo el contenido en sulfatos el mejor marcador natural interno de las mismas. En este capítulo se hace un análisis exhaustivo de los datos hidroquímicos recogidos en los diferentes puntos de muestreo.

Tras un breve comentario de los diversos análisis hidroquímicos y bacteriológicos realizados hasta el momento por diferentes entidades, se realiza la estadística descriptiva de las principales especies iónicas analizadas durante este estudio, así como el Análisis en Componentes Principales (ACP) de los datos analíticos existentes y el análisis temporal de la evolución hidroquímica.

## 5.2. ANÁLISIS QUÍMICOS

### 5.2.1. ANTECEDENTES

#### 5.2.1.1. ANÁLISIS DE MAYORITARIOS Y ESPECÍFICOS (E.V.E.-D.F.G.)

En el marco del Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987), entre Octubre de 1985 y Agosto de 1986 se realizaron 51 análisis químicos de muestras tomadas con una periodicidad variable (mensual, quincenal y semanal) en el manantial de Salubita (35), en el sondeo Albiztur-II (8), en la Regata Albiztur a la altura de Benta Zaharra (3) y en la Regata Albiztur a

la altura de Gain (5). En las 51 muestras se analizaron los elementos mayoritarios ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{SiO}_2$ ) así como los parámetros físico-químicos habituales (conductividad, pH, residuo seco, dureza, y TAC) considerando también el caudal.

Además, en 44 de las 51 muestras se llevó a cabo el análisis de componentes específicos (coliformes totales, coliformes fecales, bacterias aerobias, estreptococos fecales y clastridios sulfito-reductores) estimándose una calidad de agua no potable en todos los casos excepto en uno de los análisis efectuado en el manantial de Salubita. Además, en dos de las muestras recogidas en el manantial de Salubita se realizó el análisis de otros elementos minoritarios y aspectos físico-químicos como  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_3^+$ , DQO (Demanda Química de Oxígeno), turbidez, color, Pb, Zn, Cu y Cd.

Los análisis químicos convencionales se realizaron en los laboratorios de METRALAB (Sondika, Bizkaia) mientras que los bacteriológicos se llevaron a cabo en los Laboratorios de Osakidetza y en el Laboratorio del Doctor Moco-roa, ambos en Donostia. Las medidas de caudal, conductividad y temperatura se realizaron *in situ*. Aunque las medidas de caudales se tomaron en su mayor parte con molinete, en algún caso (no se especifica) se hicieron aforos volumétricos o estimativos. Las medidas de conductividad se tomaron con un conductímetro de campo CRISON y las medidas de temperatura con un termómetro convencional. En la tabla 5.1 se muestra el rango (valores máximos y mínimos) de los principales parámetros analizados durante el período comprendido entre Noviembre de 1985 y Agosto de 1986 en los tres puntos citados.

Parámetro	SALUBITA		ALBIZTUR-II		BENTA ZAHARRA		GAIN	
	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo	mínimo	máximo
T (°C)	10.2	12.1						
PH	7.85	8.4	7.7	8.2	8	8.2	8.05	8.2
C (µS/cm)	255	378	316	-	-	-	-	-
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	6.74	10.33	9.08	23.58	8.2	9.74	6.73	9.52
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	12.7	38.5	85.97	228.1	23.7	157	31.03	93.79
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	137.5	186.17	160.49	235.03	127.63	182.4	146.81	189.1
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	2.2	12.6	4.25	19.3	3.85	8.8	4.02	7.25
Na <sup>+</sup> (mg/l)	3.23	5.75	5.72	20.05	3.4	4.01	3.75	5.21
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	1	5.75	5.5	13.87	2.49	22.4	4.18	9.25
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	48.2	68.43	83.52	142.77	55.61	98.85	52	84.73
K <sup>+</sup> (mg/l)	0.25	2.75	1.76	3.2	1.2	2.15	0.88	1.5
Res. Sólido	233	315	375	645	260	485	255	395
Dureza	14	19.2	23	39.5	17	33.6	15	24.75
SiO <sub>2</sub> (mg/l)	0.2	20.1	1.25	4.22	0.1	3.25	0.33	2.75
TAC	112.7	152.6	131.55	158.25	104.61	149.51	120.34	155

**Tabla 5.1: Valores máximos y mínimos obtenidos de los análisis de los principales parámetros determinados en el marco del Estudio Hidrogeológico del Área de Tolosa Occidental (E.V.E.-D.F.G., 1987).**

De los datos recopilados y analizados durante el período comprendido entre Octubre de 1985 y Agosto de 1986 (E.V.E.-D.F.G., 1987), los autores obtuvieron las siguientes conclusiones con respecto al manantial de Salubita:

- Los datos hidroquímicos y los bacteriológicos no presentan correlaciones significativas. Además, el número de análisis químicos efectuados (n= 35) plantea dudas puntuales en la evolución hidroquímica observada.

- Las mayores mineralizaciones aparecen en las aguas drenadas en períodos de estiaje, mientras que en aguas altas se evidencia una dilución generalizada.

- La dilución es bastante estable en aguas altas sin que se produzcan disminuciones bruscas de mineralización por lo que se puede hablar de una relativa homogeneidad hidroquímica.

- El hecho de que a finales de estiaje las aguas de la surgencia de Salubita presenten un mayor carácter sulfatado evidencia la influencia ejercida por los aportes procedentes del drenaje de terrenos jurásicos.

- Los rellenos cuaternarios ejercen su influencia sobre el quimismo de las aguas en la surgencia debido a la retención y reconcentración por evapotranspiración. Las primeras lluvias importantes del año hidrológico empujan hacia el manto aguas con contenidos más altos en elementos de origen externo ( $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$ ).

- La homogeneidad hidroquímica de las aguas de la surgencia y su evolución durante el aumento de los caudales ponen de manifiesto el interés hidrogeológico del acuífero investigado.

Los sondeos Albiztur-I, Albiztur-II y Albiztur-III fueron objeto de sendos análisis químicos al finalizar las respectivas labores de perforación. En los dos primeros se analizaron  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{NO}_2^-$ ,  $\text{NH}_4^+$ , Fe (disuelto),  $\text{Ca}^{2+}$ , conductividad y pH. En el sondeo Albiztur-III se analizaron  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ , Fe, Mn,  $\text{SiO}_2$ , residuo seco, conductividad, pH y dureza. En el caso de los dos primeros sondeos los análisis se realizaron en el Laboratorio Agrario Provincial del Departamento de Agricultura y Pesca de la Diputación Foral de Gipuzkoa, mientras que los del tercer sondeo se realizaron en los laboratorios de METRALAB (Sondika, Bizkaia). En los tres casos cabe destacar el alto contenido en sulfatos, atribuido (E.V.E.-D.F.G., 1987) a los aportes del manantial de Igaran infiltrados en el cauce de la Regata Albiztur.

Al margen de los análisis comentados, en Febrero de 1986 se realizan diversos análisis por la técnica de *cromatografía de gases-espectrometría de masas* de una muestra de agua del manantial de Salubita. Estos análisis se realizan en el LABORATORI D'ESPECTOMETRIA DE MASSES del Consejo Superior de Investigaciones Científicas (C.S.I.C.) de Barcelona, por encargo del Servicio de Medio Ambiente de la Diputación Foral de Gipuzkoa. Según estos análisis los principales productos encontrados en las aguas, todos ellos en concentraciones inferiores a 5  $\mu\text{g/l}$ , son:

- Simazina
- Atrazina
- Ácidos saturados (tetradecanoico, hexadecanoico, octadecanoico)
- Hidrocarburos ramificados del orden de 30 átomos de carbono
- Alcoholes saturados e insaturados entre 29 y 33 átomos de carbono.
- 2-Etil-5-metilfenol
- Siloxano
- 2,4-dinitrotolueno
- Fosfato de tributilo
- Adipato de dioctilo
- Ftalatos
- Alcohol de C-18
- Ácidos mirístico y esteárico
- Hidrocarburo ramificado C-30

- La fragmentografía de masas descartó la presencia de guayacoles y productos relacionados con el ácido abiético, típicos de papeleras. Tampoco se detectaron hidrocarburos aromáticos policíclicos.

La Simazina y la Atrazina son herbicidas del grupo de las triazinas, ampliamente utilizados y han sido detectados en aguas de diferentes orígenes. La CEE los incluye en la denominada “lista negra” de contaminantes orgánicos en aguas (Liste I de la Directive 76/464/CEE du Conseil).

Los Fosfatos, Adipatos y Ftalatos son plastificantes comúnmente usados siendo frecuentes en aguas contaminadas ya sean de origen urbano o industrial.

Los ácidos de cadena larga son contaminantes frecuentes de origen urbano.

En cuanto a los alcoholes de cadena larga encontrada y al 2,4-dinitrotolueno, no es posible atribuirles con exactitud un origen concreto.

Cabe destacar el hecho de que la Diputación Foral de Gipuzkoa sigue, desde 1986, llevando un control hidroquímico del manantial de Salubita mediante la toma de muestras mensuales y el análisis, en el Laboratorio Agrario Provincial antes citado, de los elementos mayoritarios pH,

temperatura, conductividad, turbidez, nitritos, fecales, sílice, residuo seco, óxidos disueltos y alcalinidad. En la tabla 5.2 se reflejan los datos estadísticos de los principales parámetros controlados por la D.F.G entre Noviembre de 1988 y Noviembre de 1999.

	M	MDN	DE	Mín.	Máx.	n
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	178.95	177.00	9.51	162.00	206.00	55
K <sup>+</sup> (mg/l)	1.03	1.10	0.28	0.38	1.59	46
Na <sup>+</sup> (mg/l)	4.38	5.11	1.58	0.97	7.43	55
Mg <sup>2+</sup> (mg/l)	4.55	4.45	1.06	2.98	8.39	55
Ca <sup>2+</sup> (mg/l)	62.82	62.60	5.75	48.40	77.10	55
Cl <sup>-</sup> (mg/l)	10.14	9.68	3.36	4.88	22.00	55
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	25.37	24.60	5.83	15.80	41.20	54
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup> (mg/l)	4.32	4.54	1.46	0.37	8.02	55
pH	7.99	8.00	0.19	7.60	8.30	55
C (µS/cm)	320	318	21.24	260	370	55
Fe (mg/l)	0.04	0.03	0.03	0.02	0.13	31
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup> (mg/l)	0.08	0.04	0.09	0.01	0.40	25
SiO <sub>2</sub> (mg/l)	4.91	4.96	0.52	3.70	5.90	42
Turbidez (U.N.F.)	1.18	0.80	1.37	0.30	9.60	55
NO <sub>2</sub> <sup>2-</sup> (mg/l)	0.02	0.02	0.01	0.003	0.04	21

*Tabla 5.2: Media (M), mediana (MDN), desviación estándar (DE), máximo (Máx.) y mínimo (Mín.) de los principales parámetros analizados en el manantial de Salubita por la D.F.G. entre Noviembre de 1988 y Noviembre de 1999. n: número de muestras consideradas.*

### 5.2.1.2. ANÁLISIS DE MAYORITARIOS (SANCHO Y ANTIGÜEDAD, 1988)

En el marco del Estudio de las Transferencias en Medio Kárstico (SANCHO y ANTIGÜEDAD, 1988) se realizan cuatro campañas de muestreo que abarcan el período comprendido entre el 29 de Junio de 1987 y el 18 de Marzo de 1988. El número total de muestras recogidas asciende a 58, de las cuales 33 se tomaron en el manantial de Salubita, 7 en la estación de aforos de la Regata Albiztur y 18 en la Regata Albiztur aguas arriba de la surgencia. En todas las muestras se determinó el contenido en SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Cl<sup>-</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup>, SiO<sub>2</sub>, pH, y conductividad. El estudio hidroquímico detallado realizado a lo largo de ese estudio (Análisis Estructural de la Crónica de Caudales y los Análisis en Componentes Principales) permitió llegar a las siguientes conclusiones:

- Existencia de dos flujos diferenciados: 1) uno más profundo y generalizado, presente sobre todo cuando los caudales son mayores, que alimenta el grupo de surgencias de Salubita y cuyo grado de mineralización es menor y 2) otro, más mineralizado, más superficial y localizado, relacionado con materiales jurásicos y, quizá, con algunas de las depresiones de la Unidad. Se pone de manifiesto la influencia química puntual de las aguas de la regata en la surgencia, sobre todo en momentos de aguas bajas-medias.

- Predominio, en la estación de aforos, de los caudales drenados por la surgencia de Salubita sobre los aportados por la Regata Albiztur.

-  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  resultan ser los elementos que mejor caracterizan las aguas de la regata, aguas arriba del manantial de Salubita, así como los mejores marcadores de posibles influencias que la regata pueda ejercer sobre la surgencia.

- Evolución estacional del resto de los elementos ( $\text{HCO}_3^-$ , fundamentalmente) en relación con el potencial agresivo de las aguas relacionado, a su vez, con la variación estacional de la actividad biológica.

- Carácter subsaturado de las aguas de la surgencia y sobresaturado de las aguas de la regata.

- Interesante poder regulador (un efecto memoria próximo a 50 días y un tiempo de regulación de 40 días) del sistema drenado por Salubita, así como presencia de un efecto empuje (flujo pistón) observado durante el pico de caudal.

- La variabilidad química es mayor en la regata que en la surgencia, aunque la evolución entre ambos tipos de aguas es paralela.

### 5.2.1.3. ISÓTOPOS

Entre Noviembre de 1990 y Agosto de 1994 se lleva a cabo el análisis isotópico de 20 muestras del agua de precipitación recogida en la estación meteorológica de Bidania situada a una cota de 592 m y de 23 muestras tomadas en el manantial de Salubita. En todas las muestras se analiza el  $\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$  mientras que el  $\delta\text{D}^0/_{00}$  se analiza únicamente en 6 muestras del agua de lluvia y en 1 muestra del manantial de Salubita y el tritio (U.T.) en 2 muestras de agua de lluvia y en 2 muestras del manantial. Los análisis se realizaron en Lisboa, Viena y Uppsala, siendo en este último lugar donde se realizaron la mayor parte de los análisis (22 de Salubita y 14 del agua de lluvia). Considerando únicamente los análisis realizados en Uppsala, la media para el agua de lluvia es  $-6.93 \delta^{18}\text{O}^0/_{00}$  (mediana= $-7.36$ ) y para el manantial de Salubita  $-7.73 \delta\text{O}18^0/_{00}$  (mediana= $-7.72$ ).

A partir de estos datos IRIBAR (1996) estima un tiempo de permanencia de 33 meses del agua en el acuífero en base al contenido en  $\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$  aplicando el **modelo exponencial sencillo** del programa MULTIS v.3.11 (STICHLER et al., 1984) y superior a 5 años según el contenido en tritio aplicando el **modelo exponencial de dos sistemas conectados en paralelo**. Para este último caso calcula, además, el porcentaje en caudales (5%) que el sistema de conductos representa en la totalidad del acuífero.

## 5.2.2. ANÁLISIS EFECTUADOS EN EL MARCO DE ESTE ESTUDIO

### 5.2.2.1. ANÁLISIS DE MAYORITARIOS Y ESPECÍFICOS

Entre Enero de 1997 y Julio de 2000 se lleva a cabo un intenso muestreo tanto de manantiales como de aguas superficiales y de la precipitación. El número total de muestras recogidas es de 1184, de las cuales casi la mitad (489) han sido tomadas en la surgencia de Salubita. A lo largo de estos años la frecuencia de muestreo en la surgencia ha variado en función de las condiciones hidrogeológicas, de manera que en el manantial principal se han tomado muestras semanalmente de forma manual, midiendo in situ la temperatura, el pH y la conductividad, y en algunos casos se han tomado muestras a mayor frecuencia (entre 4 horas y 3 días) mediante la utilización de tomamuestras automáticos.

La tabla 5.3 refleja los puntos muestreados, así como la cantidad de muestras tomadas y la frecuencia de muestreo. Como se puede ver, la frecuencia de muestreo es diferente para cada punto de muestreo e incluso en algunos se han tomado muestras a diferentes frecuencias. En los casos en que la frecuencia de muestreo es de pocas horas (4-6 h), la toma de muestras se ha realizado mediante tomamuestras automáticos de 24 botellas (SIGMA 900).

Desde Agosto de 1997 hasta Octubre de 1998 se controló en continuo la temperatura en la surgencia de Salubita para lo que se utilizó una HIDRODATA que se programó para almacenar datos cada 10 minutos. Sin embargo, el alto grado de humedad existente dificultó el buen funcionamiento del aparato produciéndose numerosos vacíos en el registro. En cualquier caso, los datos de temperatura recopilados en continuo ponen de manifiesto que al comenzar a aumentar el caudal en la surgencia la temperatura también aumenta (unos 0.8 °C aproximadamente), produciéndose una disminución posterior, antes que el pico de caudal llegue a su punto álgido. Esta observación apoya, una vez más, la existencia de un flujo pistón (*piston flow*) comentado en el capítulo 4 (apartado 4.9).

Las 1184 muestras (incluidas las muestras de agua de lluvia), tomadas en botes de polipropileno de 125 ml de capacidad, se conservaron a una temperatura de 4°C hasta ser analizadas en el Laboratorio de Química Analítica de la U.P.V.-E.H.U., en donde para cada una de las cuales se determinaron los iones mayoritarios ( $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  y Fe).

El  $\text{NH}_4^+$  se analizó en las muestras recogidas hasta Julio de 1998 pero dejó de analizarse debido a que, a excepción del agua de lluvia, la del cuaternario y de algunos cursos superficiales, el resto de las aguas presentaban contenidos en amonio inferiores al límite de detección (0.01 mg/l), lo mismo ocurría con el hierro, cuyo límite de detección es de 0.02 mg/l. En la tabla 5.4 se muestran las técnicas analíticas utilizadas para la determinación de cada ion, así como sus límites de detección. Durante la toma de las muestras se determinaron *in situ* el pH, la temperatura y la conductividad.

El pH y la temperatura se determinaron mediante un pH-metro portátil WTW y la conductividad mediante un conductímetro portátil de la casa CRISON.

Punto muestreado	nº total de muestras	Nº de muestras (frecuencia de muestreo)	Observaciones
SALUBITA	489	129 (semanal); 360 (4 h- 3 d)	Figura 4.1
IGARAN	107	47 (quincenal); 60 (4 h)	Figura 4.1
OSINONDO	88	88 (semanal, quincenal)	Sumidero permanente de la depresión de Bidania
CUATERNARIO	58	58 (semanal, quincenal)	Hilo de agua que nace del cuaternario de la depresión de Bidania
PRESA	163	95 (semanal); 68 (4-6 h)	Aguas debajo de la surgencia de Salubita
GAIN	94	94 (semanal)	Aguas arriba de la surgencia de Salubita
ETXEBERRI	15	15 (semanal, mensual)	Figura 4.1
ERRAUSTI	7	7 (esporádicamente)	Figura 4.1
MADARIAGA	4	4 (esporádicamente)	Figura 4.1
JANGOAIN	3	3 (esporádicamente)	Figura 4.1
STA. MARINA	3	3 (esporádicamente)	Manantial situado al Sur del monte Olloki
PRECIPITACIÓN	66	66 (quincenal)	Muestras tomadas junto al caserío Osinondo
LEGORRETA	23	23 (semanal) 20/10/98-02/07/99	Figura 4.1
ESKU	16	16 (quincenal) 07/10/97-28/12/98	Regata proveniente de Intxurbe (Figura 4.1)
EZKE	16	16 (quincenal) 07/10/97-28/12/98	Regata proveniente de Aoztegi (Figura 4.1)
ARTUTXE	2	2 (esporádicamente)	Figura 4.1
ELOLA	1		Figura 4.1
SOND. OSINONDO	1		Figura 3.5
SONDEO BEONDEGI	1		Figura 3.5
ALBIZTUR-IV	2	2 (esporádicamente)	Sondeo (Figura 3.3)
OTZARAIN	23	23 (semanal) 04/01/97-08/10/98	Figura 4.1
FECALES	1		En la depresión de Bidania
LIXIVIADOS DEL VERTEDERO DE SANTUTXO	1		Depresión de Santutxo (Figura 3.2)

**Tabla 5.3: Puntos muestreados en el presente estudio, cantidad de muestras tomadas y frecuencia de muestreo.**

Además de los muestreos convencionales, se llevaron a cabo muestreos específicos en la surgencia de Salubita (4) en el manantial de Legorreta (4), en el sumidero de Osinondo (1) y en la Regata Albiztur (1) aguas arriba de Benta Zaharra. Los análisis se realizaron en el laboratorio de la empresa GAIKER (Zamudio, Bizkaia) determinándose los siguientes parámetros: Fenoles Totales, Hidrocarburos Halogenados (Diclorometano, 1,1,1-Tricloroetano, 1,1,2-Tricloroetano, Triclorometano, Tetracloroetileno), Plaguicidas Organoclorados (Dieldrin), Plaguicidas Nitrogenados (Atrazina) y Detergentes Aniónicos.

Las especificaciones analíticas se comentan en el apartado 5.10 así como los resultados obtenidos.

ION	TÉCNICA ANALÍTICA	LÍMITE DE DETECCIÓN
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Método volumétrico	5 mg/l
Cl <sup>-</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Electroforesis capilar	0.1 mg/l, 0.1 mg/l, 0.02 mg/l
Na <sup>+</sup> , Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup>	Espectroscopía de emisión atómica por plasma acoplado inductivamente (ICP-AES)	0.03 mg/l, 0.03 mg/l, 0.02 mg/l
K <sup>+</sup>	Espectroscopía de absorción atómica (AA)	0.03 mg/l
Fe <sup>2+3+</sup> , Sr <sup>2+</sup>	Espectroscopía de absorción atómica (AA)	0.02 mg/l
NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	Electrodo de ion selectivo	0.01 mg/l

**Tabla 5.4: Técnicas analíticas empleadas para la determinación de los elementos mayoritarios y sus límites de detección.**

### 5.2.2.2. ISÓTOPOS

Entre Noviembre de 1998 y Octubre de 1999 se realizaron análisis isotópicos de 75 muestras de agua recogidas en los manantiales de Salubita, Igaran y Legorreta, así como del agua de precipitación recogida junto al caserío Osinondo (depresión de Bidania), a una cota de 480 m. El <sup>18</sup>O se analizó en todas las muestras mientras que el <sup>2</sup>H únicamente en 23 de ellas. 24 muestras corresponden al manantial de Salubita, 14 muestras al manantial de Igaran y 16 muestras pertenecen al agua de lluvia. En el manantial de Legorreta y en las aguas del cuaternario se tomaron 14 y 7 muestras respectivamente, aunque en ninguna de ellas se analizó el <sup>2</sup>H. La tabla 5.5 muestra el número de muestras en las que se analizó <sup>18</sup>O y <sup>2</sup>H y la media de los valores obtenida para cada caso, así como la mediana.

	SALUBITA		IGARAN		LLUVIA		LEGORRETA	CUATERNARIO
	δ <sup>18</sup> O/‰	δ <sup>2</sup> H/‰	δ <sup>18</sup> O/‰	δ <sup>2</sup> H/‰	δ <sup>18</sup> O/‰	δ <sup>2</sup> H/‰	δ <sup>18</sup> O/‰	δ <sup>18</sup> O/‰
n	24	15	14	1	16	7	14	7
Media	-6.93	-40.62	-7.03	-39.7	-5.96	-38.16	-6.67	-6.59
Mediana	-6.95	-40.65	-7.06	-39.7	-5.48	-34.70	-6.71	-6.64

**Tabla 5.5: Análisis isotópicos realizados en el marco de este estudio en manantiales (Salubita, Igaran, Legorreta y cuaternario) y en el agua de lluvia. n: número de muestras en las que se ha analizado <sup>18</sup>O ó <sup>2</sup>H.**

Las muestras se tomaron en recipientes de polipropileno de 5 ml de capacidad y se conservaron a 4 °C hasta ser enviadas al Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad Autónoma de Madrid, donde se analizaron. El error analítico en la determinación de δ<sup>2</sup>H fue del 0.9 ‰ y en el δ<sup>18</sup>O de 0.07 ‰.

### 5.3. SELECCIÓN Y DEPURACIÓN DE LOS DATOS HIDROQUÍMICOS DE LOS ELEMENTOS MAYORITARIOS. BALANCE IÓNICO

El estudio hidroquímico se ha basado en los análisis químicos realizados en el Departamento de Química Analítica de la U.P.V.-E.H.U., de las muestras recogidas durante este estudio. No se han tratado los datos procedentes de otras fuentes puesto que los análisis se han realizado en otros

laboratorios y su comparación puede resultar inadecuada. Además, el número de muestras propias del presente estudio es suficientemente abundante, en comparación con estudios previos, como para permitir su tratamiento específico, obviando los inconvenientes que, de forma habitual, comporta la diferencia en los modos analíticos según los distintos laboratorios.

Antes de proceder al análisis hidroquímico se ha realizado el cálculo del *balance iónico* con el fin de depurar los datos obtenidos. Así, se han considerado únicamente los datos cuyo balance iónico ha dado como resultado errores inferiores al 13%. El cálculo del balance iónico (B.I.) se ha realizado de la siguiente manera:

$$B.I.(%) = 100 \frac{(\sum Cat. - \sum Ani.)}{(\sum Cat. + \sum Ani.)}$$

donde

$$\sum Cat. = Na^+/22.91 + K^+/39.1 + Ca^{2+}/20, Mg^{2+}/12.5, Sr^{2+}/43.81$$

$$\sum Ani. = HCO_3^-/61 + Cl^-/35.5 + SO_4^{2-}/48 + NO_3^-/62$$

Punto muestreado	Número de muestras
SALUBITA	115 (semanal); 340 (4 horas- 3 días)
IGARAN	43 (quincenal); 60 (4 h)
OSINONDO	79
CUATERNARIO	51
PRESA	87 (semanal); 50 (4-6 horas)
GAIN	80
ETXEBERRI	15
ERRAUSTI	7
MADARIAGA	4
JANGOAIN	2
STA. MARINA	2
LEGORRETA	23
ESKU	16
EZKE	16
ARTUTXE	2
ELOLA	1
SONDEO OSINONDO	1
SONDEO BEONDEGI	1
ALBIZTUR-IV	2
OTZARAIN	21
FECALES	1
LIXIVIADOS DEL VERTEDERO DE SANTUTXO	1

**Tabla 5.6: Número de muestras por cada punto de muestreo, cuyos errores en el balance iónico son inferiores al 13%.**

Del cálculo realizado se desprende que los análisis del agua de lluvia proporcionan errores muy superiores al 13% (>30%), debido a la propia inestabilidad de los elementos presentes en las aguas de lluvia, por lo que no se han tratado en el análisis estadístico de los datos hidroquímicos. Sí se han considerado, sin embargo, como valores de referencia en el apartado 5.8. De la totalidad de los análisis químicos (1118 muestras sin contar las precipitaciones), 1020 muestran un error en el balance iónico inferior al 13%. Es decir, para el estudio hidroquímico se ha considerado el 91.2% de las muestras analizadas, al margen de las de las precipitaciones. La tabla 5.6 refleja el número de muestras considerado para cada caso.

#### **5.4. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA DE LAS PRINCIPALES ESPECIES IÓNICAS**

En la tabla 5.7 se han incluido los cálculos estadísticos (media, mediana, máximo, mínimo y desviación estándar) de las especies iónicas analizadas en las aguas de Salubita y de otros puntos muestreados (presa, Igaran, Gain, Osinondo, cuaternario, Etxeberri y Legorreta). Se trata de los datos hidroquímicos ya depurados y el número de muestras utilizadas en cada caso aparece también en la tabla. Además, estos mismos datos se han representado mediante los diagramas de Schoeller-Berkaloff (figura 5.1) con el fin de poder visualizarlos gráficamente.

Las aguas globalmente menos mineralizadas corresponden a la surgencia de Salubita y a la presa, mientras que las más mineralizadas son las procedentes de los manantiales de Legorreta e Igaran. Entre ambos extremos se encuentran las aguas procedentes de los depósitos cuaternarios de la depresión de Bidania, las del manantial de Etxeberri, las de la Regata Albiztur aguas arriba del manantial de Salubita (Gain) y las aguas del Arroyo Bidania a su entrada al sumidero de Osinondo.

Resulta evidente, a la vista de la tabla 5.7, la notable similitud, en todos los parámetros y elementos físico-químicos considerados, entre Salubita y presa, por un lado, y entre Igaran y Gain, por otro, lo que refleja, desde un punto de vista hidroquímico ahora, lo ya ampliamente comentado a lo largo del capítulo 4: la gran influencia que los caudales de la surgencia de Salubita tienen en la Regata Albiztur (presa), y la gran influencia que los caudales de Igaran tienen en la regata antes (Gain) de Salubita. Por otra parte, las desviaciones (DE) más pequeñas se dan en Salubita (y presa), es decir, mayor homogeneidad hidroquímica, y las más grandes en Igaran (y Gain), en este último caso en referencia, sobre todo, a los sulfatos y a la conductividad eléctrica, notablemente influenciada por ese elemento.

A la vista del conjunto de datos expuestos en la tabla 5.7 se deduce que las aguas que alimentan de forma superficialmente difusa el acuífero drenado por Salubita (dejando aparte, por tanto, las procedentes del sumidero de Osinondo) tienen, en relación con las infiltradas en Osinondo, menores contenidos en  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$  (menor conductividad) y mayores contenidos en

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>; en este último caso, sulfatos, la explicación no sólo hay que buscarla en la ya comentada (capítulo 4) infiltración de aguas ricas en ese elemento desde la Regata Albiztur al acuífero, en las proximidades de Salubita, en épocas de aguas bajas, sino que teniendo en cuenta los contenidos mínimos de SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> en Salubita, mucho mayores que los medidos en Osinondo en esos momentos de aguas altas, hay que admitir que las otras aguas de infiltración al acuífero se cargan, efectivamente, con más sulfatos, dentro de los propios materiales carbonatados urgonianos.

	M	MDN	DE	Mín.	Máx.	n		M	MDN	DE	Mín.	Máx.	n
<b>Salubita</b>							<b>Presa</b>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	207.37	205.97	13.65	179.71	246.03	115	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	210.39	210.42	17.34	114.83	246.03	87
K <sup>+</sup>	1.19	1.10	0.33	0.82	3.02	115	K <sup>+</sup>	1.24	1.11	0.37	0.87	3.08	87
Na <sup>+</sup>	5.32	5.27	0.53	4.00	6.66	115	Na <sup>+</sup>	5.28	5.33	0.48	3.58	6.31	87
Mg <sup>2+</sup>	4.29	4.19	0.77	2.69	7.84	115	Mg <sup>2+</sup>	4.68	4.63	0.90	2.95	9.37	87
Ca <sup>2+</sup>	61.2	61.26	4.97	50.34	75.61	115	Ca <sup>2+</sup>	62.26	61.93	6.00	49.60	87.95	87
Cl <sup>-</sup>	7.92	7.83	1.00	5.46	9.85	115	Cl <sup>-</sup>	7.69	7.70	1.24	4.96	14.42	87
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	21.29	19.15	7.31	10.34	46.11	115	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	25.29	22.26	11.48	11.53	81.61	87
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.53	5.27	1.79	3.27	17.02	115	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.35	5.18	1.99	2.66	18.65	87
Sr <sup>2+</sup>	0.15	0.15	0.03	0.09	0.24	115	Sr <sup>2+</sup>	0.17	0.16	0.06	0.10	0.51	87
PH	7.57	7.53	0.28	6.61	8.43	85	PH	7.60	7.57	0.20	7.31	8.20	72
T	11.84	11.8	0.36	11	12.9	91	T	11.8	11.9	0.56	10.8	13.5	77
C	292	285	26.99	235	390	97	C	296	290	24.49	248	353	77
<b>Igaran</b>							<b>Gain</b>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	232.62	231.49	24.74	154.06	275.10	43	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	228.44	227.00	14.20	195.08	269.60	80
K <sup>+</sup>	1.67	1.60	0.41	1.18	3.64	43	K <sup>+</sup>	1.95	1.82	0.54	1.13	3.86	80
Na <sup>+</sup>	4.33	4.25	0.44	3.18	5.32	43	Na <sup>+</sup>	4.89	4.61	0.93	3.85	8.86	80
Mg <sup>2+</sup>	9.01	8.43	3.08	4.99	15.55	43	Mg <sup>2+</sup>	8.21	8.02	2.16	3.97	13.54	80
Ca <sup>2+</sup>	80.67	74.05	19.17	54.38	120.53	43	Ca <sup>2+</sup>	76.97	75.55	12.52	53.61	105.76	80
Cl <sup>-</sup>	6.83	6.75	1.45	1.09	10.09	43	Cl <sup>-</sup>	6.83	6.83	1.44	1.53	10.50	80
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	71.50	49.62	48.32	15.08	195.09	43	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	61.10	50.93	34.44	16.81	156.31	80
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.43	5.29	2.21	1.35	12.62	43	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.63	5.57	1.46	1.58	11.88	80
Sr <sup>2+</sup>	0.29	0.23	0.15	0.11	0.60	43	Sr <sup>2+</sup>	0.27	0.27	0.11	0.12	0.60	80
PH	7.39	7.36	0.18	7.06	7.92	33	PH	8.13	8.13	0.26	7.12	8.66	73
T	11.7	11.8	0.27	11.3	12.7	33	T	12.4	12.0	3.01	6.5	19.5	77
C	402	375	100.4	277	598	34	C	380	350	93.99	246	658	76
<b>Osinondo</b>							<b>Cuaternario</b>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	236.73	238.86	33.33	108.57	309.27	79	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	250.07	252.95	43.28	131.36	318.92	51
K <sup>+</sup>	2.69	1.98	1.67	1.00	8.36	79	K <sup>+</sup>	1.24	1.01	0.98	0.34	5.00	51
Na <sup>+</sup>	6.52	4.96	3.91	3.48	25.98	79	Na <sup>+</sup>	6.64	6.72	0.90	4.05	8.71	51
Mg <sup>2+</sup>	5.35	5.32	1.06	3.02	11.48	79	Mg <sup>2+</sup>	2.99	2.99	0.37	1.65	3.78	51
Ca <sup>2+</sup>	62.86	62.45	8.60	37.93	84.58	79	Ca <sup>2+</sup>	73.80	74.09	11.35	39.43	104.31	51
Cl <sup>-</sup>	8.44	7.25	3.57	5.17	24.88	79	Cl <sup>-</sup>	10.49	6.48	7.82	2.94	35.81	51
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	13.49	13.78	3.38	2.45	28.04	79	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	15.42	15.39	3.02	9.87	19.94	51
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	5.37	4.71	3.36	0.91	20.21	79	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6.87	7.01	2.65	0.08	18.20	50
Sr <sup>2+</sup>	0.13	0.14	0.03	0.06	0.20	79	Sr <sup>2+</sup>	0.05	0.05	0.01	0.02	0.08	51
PH	7.81	7.80	0.19	7.34	8.41	64	PH	7.30	7.23	0.49	6.40	8.66	47
T	11.3	11	3.86	3.30	20.5	69	T	13	11.7	3.07	10.2	25.1	46
C	317	286	84.05	212	567	69	C	327	319	41.92	220	429	50
<b>Ettxeberri</b>							<b>Legorreta</b>						
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	240.55	247.36	18.91	201.01	259.67	15	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	253.71	249.38	19.35	225.93	308.11	23
K <sup>+</sup>	1.32	1.29	0.18	1.16	1.83	15	K <sup>+</sup>	1.49	0.93	1.48	0.59	6.21	23
Na <sup>+</sup>	4.38	4.49	0.26	3.74	4.68	15	Na <sup>+</sup>	5.43	5.36	0.68	4.28	6.96	23
Mg <sup>2+</sup>	6.53	6.78	0.88	4.90	7.80	15	Mg <sup>2+</sup>	6.47	6.55	1.19	4.08	8.91	23
Ca <sup>2+</sup>	69.70	73.82	9.16	53.71	79.24	15	Ca <sup>2+</sup>	79.97	79.09	6.05	70.09	94.10	23
Cl <sup>-</sup>	7.42	7.33	1.11	5.21	9.16	15	Cl <sup>-</sup>	9.85	9.91	1.43	6.71	12.47	23
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	24.86	26.87	5.10	16.03	31.43	15	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	48.34	48.97	9.43	15.82	61.43	23
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	6.35	5.87	2.10	3.87	12.20	15	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	8.37	6.97	5.51	2.42	21.55	23
Sr <sup>2+</sup>	0.15	0.14	0.03	0.09	0.22	15	Sr <sup>2+</sup>	0.16	0.15	0.04	0.11	0.30	23
PH	7.68	7.71	0.25	7.20	8.03	14	PH	7.52	7.51	0.24	7.11	7.85	20
T	12.6	12.6	0.22	12.1	12.8	13	T	14	14	0.22	13.7	14.6	22
C	362	355	21.6	327	395	15	C	413	408	33.54	358	505	23

**Tabla 5.7: Media (M), mediana (MDN), desviación estándar (DE), máximo (Máx.) y mínimo (Mín.) de las especies iónicas en los principales puntos de descarga estudiados (Salubita, Presa, Igaran, Gain, Osinondo, Cuaternario, Ettxeberri y Legorreta). Unidades en mg/l, excepto conductividad (µS/cm) y temperatura (°C).**

En comparación, sin embargo, con las aguas de la regata procedentes de Igaran, es evidente el hecho de que las aguas descargadas por Salubita presentan contenidos menores en casi todos los

elementos y, de forma mucho más notoria en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Sr}^{2+}$ , elementos estos claramente marcadores del drenaje de las formaciones jurásicas. Solamente en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  son las aguas de Salubita más ricas, estando estos elementos más presentes aún en las aguas infiltradas en el sumidero de Osinondo.

En cuanto a la temperatura, ésta es similar, en valor medio (11.7-11.8 °C) y en rango ( $\Delta T=1.9-1.4$  °C), para Salubita e Igaran, a pesar de la diferencia de cota de las surgencias (Salubita a 120 m e Igaran a 325 m). La influencia de la descarga de Salubita en la regata hace que la temperatura del agua en la presa sea muy similar a la del manantial y además bastante regular ( $\Delta T=2.7$  °C), mientras que aguas arriba (Gain) la influencia de la temperatura ambiental en la regata es clara ( $\Delta T=13$  °C).

Queda patente la regulación térmica ejercida por las aguas subterráneas en el curso superficial. También las aguas del Arroyo Bidania en Osinondo muestran un amplio rango de temperaturas ( $\Delta T=17.2$  °C), al igual que el manantial controlado en el cuaternario ( $\Delta T=14.9$  °C). Por su parte, el rango es de 0.7 °C en el manantial de Etxeberri y de 0.9 °C en Legorreta, si bien con bastante menos datos, en ambos casos con valores medios (12.6 °C y 14 °C respectivamente) mayores que los de Salubita e Igaran, al encontrarse aquéllos a cota más baja (Etxeberri a 108 m y Legorreta a 90 m).

La geometría de las medianas de las especies iónicas representadas en diagramas de Schoeller-Berkaloff (figura 5.1) es similar en el caso de Salubita y de la presa, no en vano, el agua que pasa por la presa proviene en un 85% (media anual) de Salubita (figura 4.4). Algo parecido ocurre con los diagramas de Igaran y Gain, puesto que el 80% del agua que pasa por Gain a lo largo del año proviene del manantial de Igaran (figura 4.4). Estos últimos se diferencian de los otros diagramas por la existencia de una mayor dispersión en las concentraciones de cloruros y sulfatos. En casi todos los casos las diferencias más importantes se producen en las concentraciones de sulfatos, a excepción del cuaternario y Legorreta en los que la mayor dispersión se produce en el  $\text{K}^+$ .

En general, la dispersión entre el máximo y el mínimo de los diferentes iones en las aguas de los manantiales es escasa, aunque destaca notablemente Etxeberri con una dispersión mucho menor. Se podría pensar que la casi inexistente variación hidroquímica del manantial de Etxeberri se debe al bajo número de muestras (15), sin embargo, a excepción de una muestra tomada durante una crecida importante, el resto representan situaciones de aguas medias-bajas, momento en el que el contenido en sulfatos debiera ser alto. Además, la realización del diagrama de Schoeller-Berkaloff del manantial de Igaran para 15 muestras (tomadas en la misma situación hidrológica que las tomadas en Etxeberri) muestra que la variabilidad en Igaran es igual con 15 que con las 43 muestras.

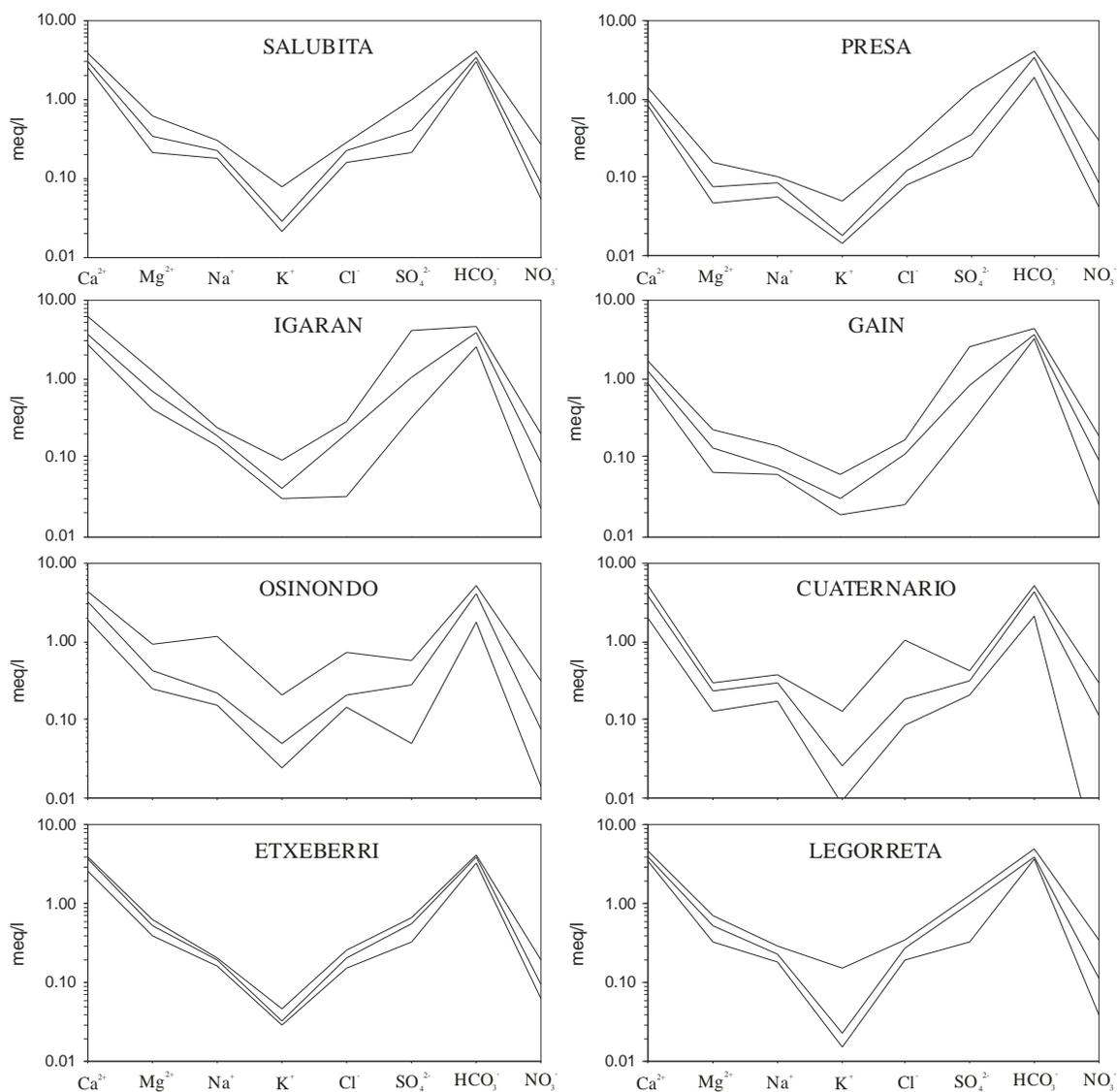


Figura 5.1: Diagramas de Schoeller-Berkaloff contruidos a partir de los datos de la tabla 5.7. La línea más oscura representa la mediana de los valores y las líneas finas el rango de variación entre el máximo y el mínimo.

Aunque los manantiales de Igaran y Etxeberri afloran en relación a las calizas y margas jurásicas (figura 4.51), parece claro que ambos drenan materiales distintos, habida cuenta de sus diferencias hidroquímicas. Este hecho se debe, probablemente, a que el manantial de Etxeberri aparece unido a materiales más antiguos (Oxfordiense o base del Malm) que el manantial de Igaran (Portlandiense-Neocomiense o transición entre el Malm y el Cretácico Inferior) (figura 3.2) lo que, vista la disposición geológica, posibilitaría el drenaje en aquél desde zonas más profundas, viéndose

afectadas en menor medida por aguas de origen externo, lo que explicaría esa homogeneidad hidroquímica (figura 5.1 y apartado 5.6.9).

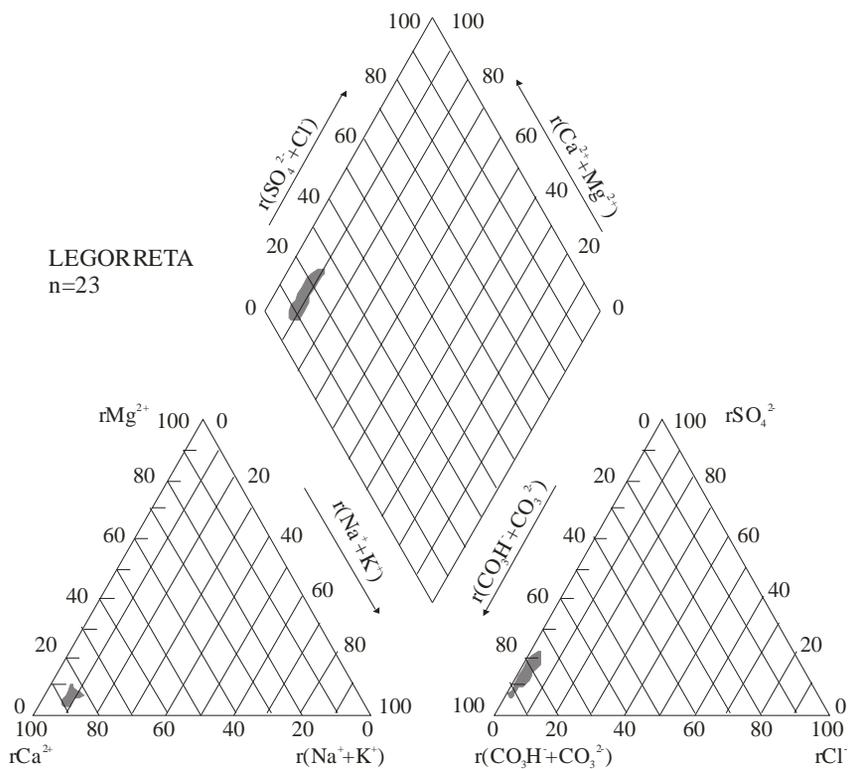
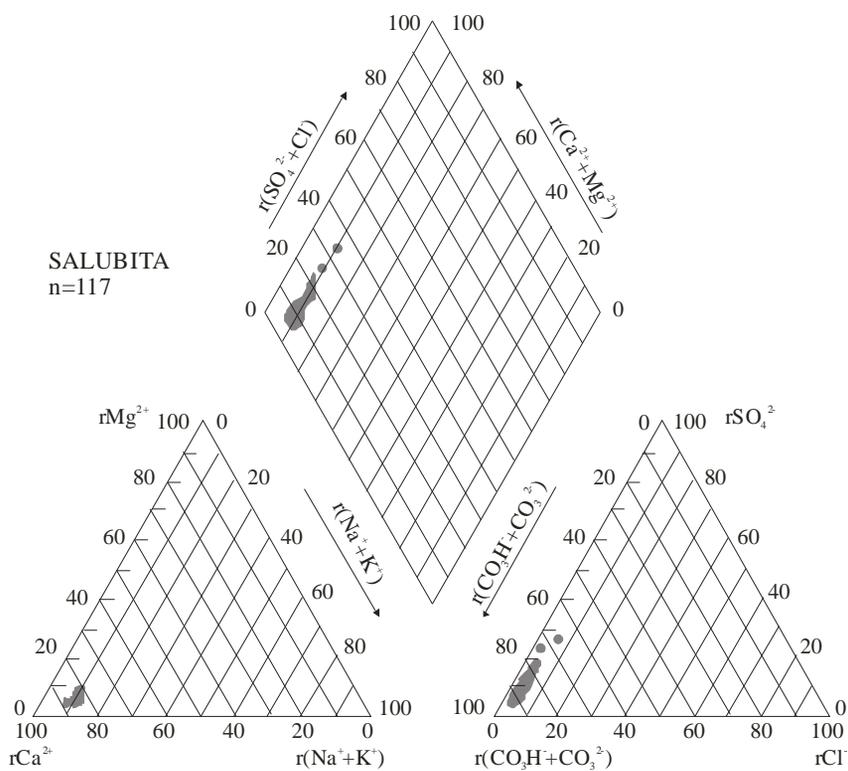
Las aguas que drenan los materiales cuaternarios y las que se infiltran en Osinondo difieren bastante de las aguas de los manantiales ya comentados y presentan un grado de dispersión mucho mayor. Aunque una parte de las aguas que se infiltran en Osinondo proviene de dos manantiales (Aoztegi e Intxurbe), una parte importante tiene su origen en el agua de lluvia. Además, esta regata recoge las aguas residuales de una zona rural, lo que explicaría la gran dispersión de la mayoría de las especies iónicas, sobre todo de  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  (apartado 5.6.5). Las aguas que salen al exterior a través de los materiales cuaternarios de la depresión de Bidania están estrechamente ligadas a las actividades agrícolas que se realizan sobre esos materiales, lo que puede explicar la importante dispersión que se produce en las especies iónicas  $\text{K}^+$ ,  $\text{Cl}^-$  y  $\text{NO}_3^-$  (apartado 5.6.6).

### 5.5. ANÁLISIS ESPACIAL

La caracterización hidroquímica de las aguas se ha realizado en base al diagrama de Piper. Se han representado seis puntos de muestreo de los reflejados en la figura 5.1 (no se han incluido los datos de la presa y de Gain, ya que son muy similares a los de Salubita e Igaran, respectivamente). Se han incluido también manantiales de menor entidad y fuentes (Errausti, Madariaga, Sta. Marina, Jangoain, Artutxe, Elola), el sondeo Albiztur-IV, una muestra de aguas fecales tomada junto al sumidero de Osinondo, otra de los lixiviados del vertedero de residuos industriales de Santutxo y otras dos de los sondeos Osinondo y Beondegi (apartado 3.2.4.1). Las figuras 5.2 a 5.5 muestran la representación gráfica de todos estos puntos .

Según la figura 5.2, las aguas de los manantiales de Salubita y Legorreta son claramente **bicarbonatadas cálcicas**. Ambas se sitúan en una zona próxima del diagrama aunque se puede observar que la variabilidad en relación a los sulfatos es mayor para Salubita (característica también observada en la figura 5.1) debido a la influencia en el manantial de la regata en estiaje.

La figura 5.3 muestra una clara diferencia entre los manantiales de Igaran y Etxeberri. Aunque el agua en ambos casos es **bicarbonatada cálcica** (en estiaje Igaran alcanza prácticamente el límite de las aguas bicarbonatadas-sulfatadas cálcicas), la variabilidad hidroquímica es más importante en Igaran (sobre todo cuando en estiaje aumenta el contenido en sulfatos) mientras que Etxeberri se mantiene casi constante.



**Figura 5.2: Representación en el diagrama de Piper de las muestras tomadas en Salubita y Legorreta. n: número de muestras consideradas.**

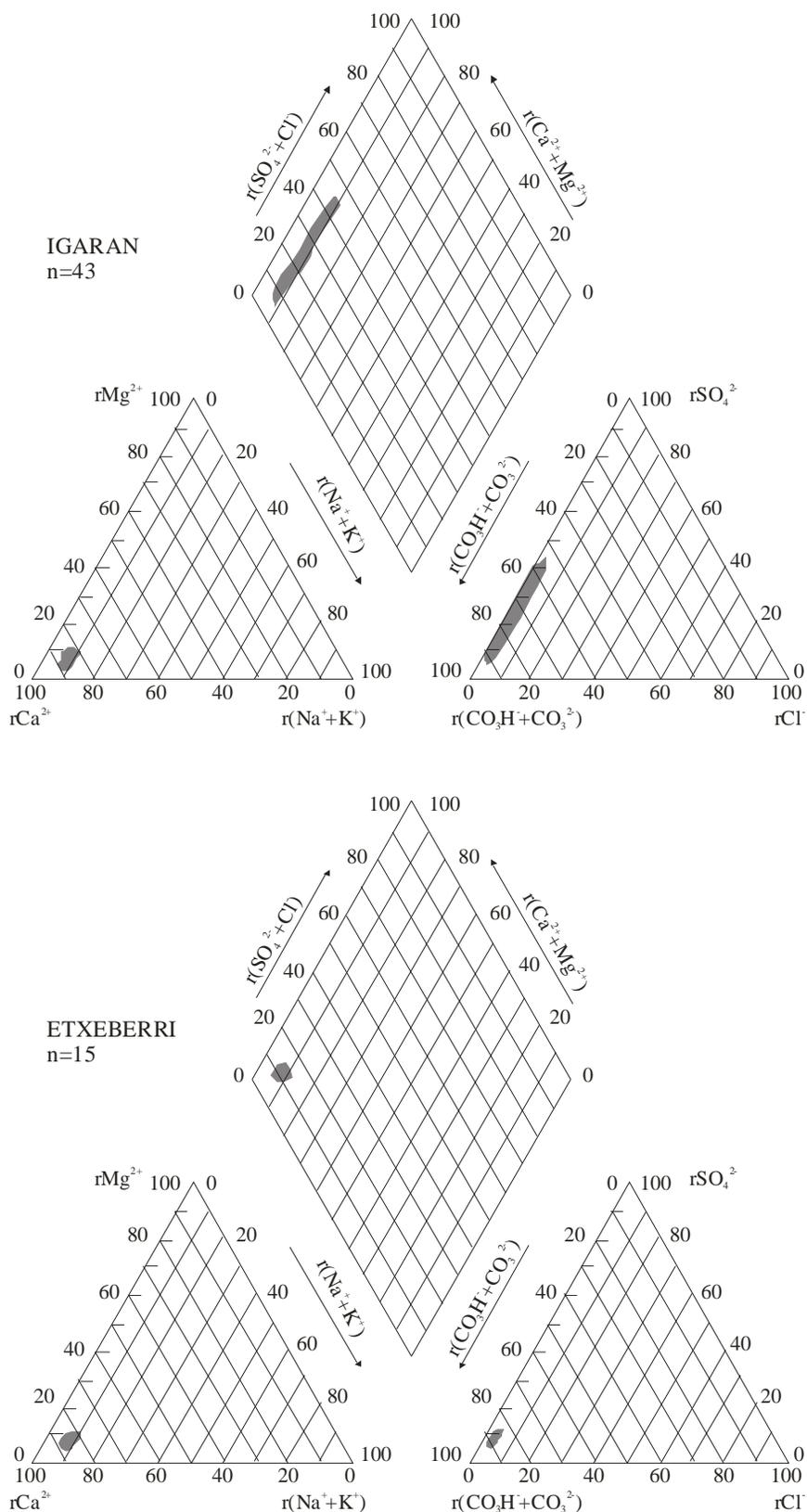


Figura 5.3: Representación en el diagrama de Piper de las muestras tomadas en Igaran y Etxeberri. n: número de muestras consideradas.

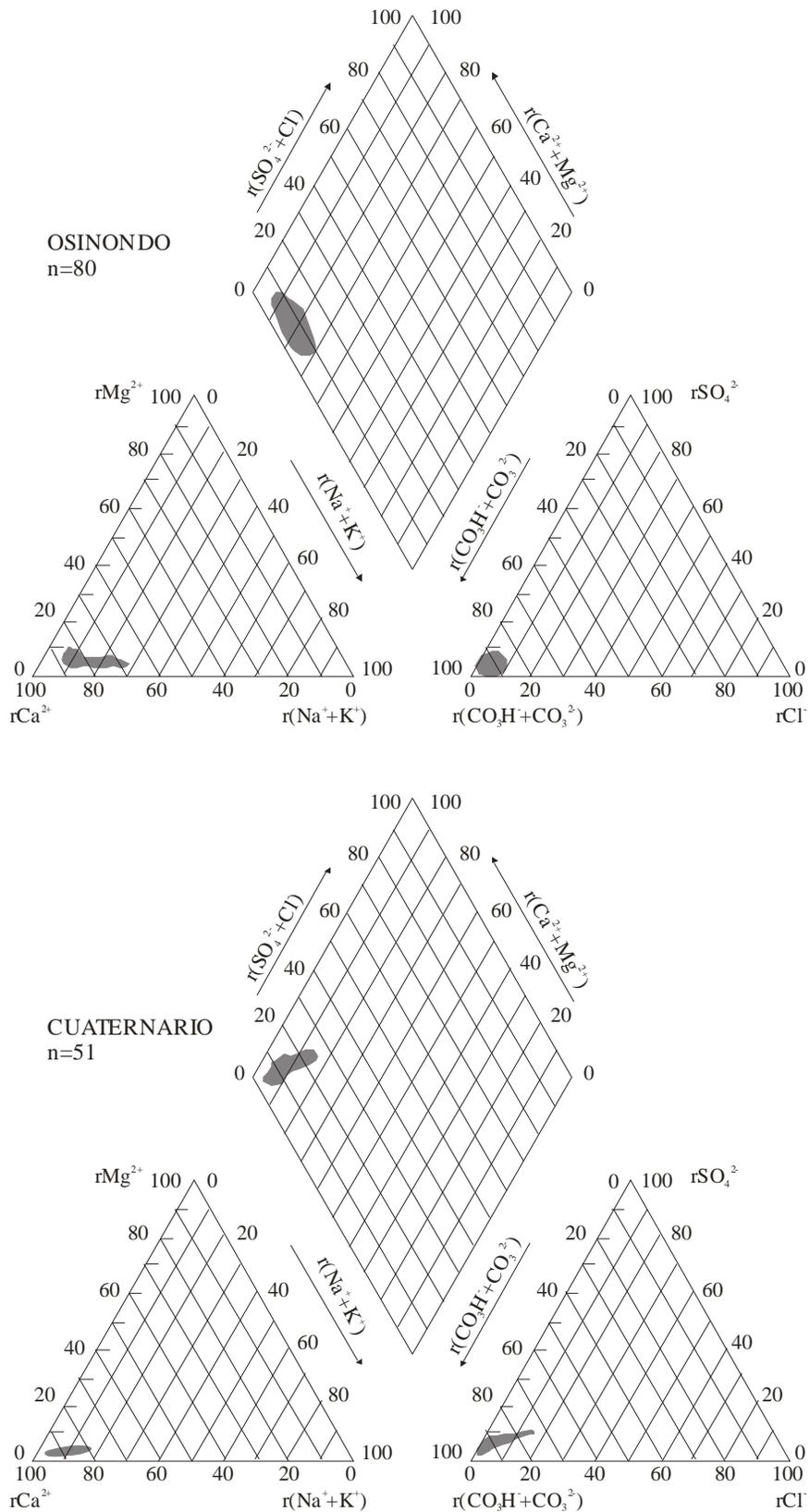
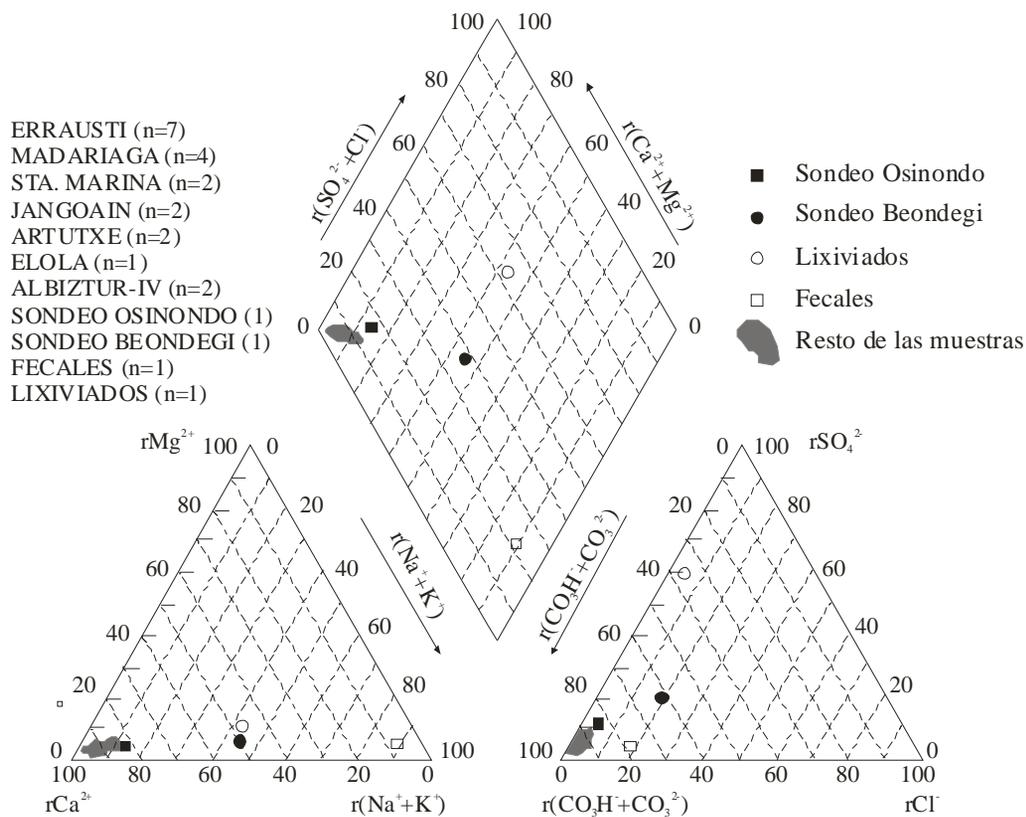


Figura 5.4: Representación en el diagrama de Piper de las muestras tomadas en Osinondo y en el cuaternario de la depresión de Bidania. n: número de muestras consideradas.



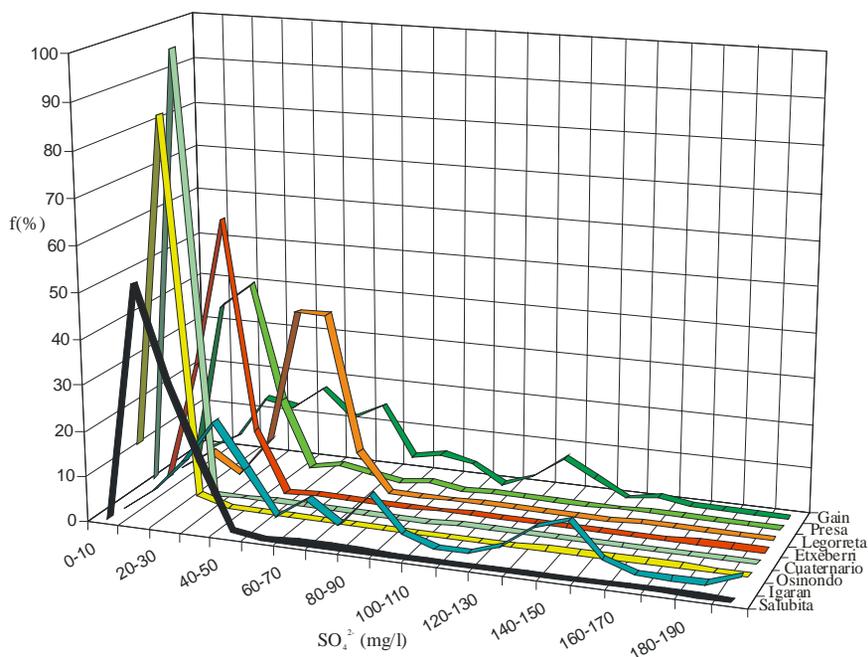
**Figura 5.5:** Representación en el diagrama de Piper de las muestras de fuentes y manantiales de menor entidad y de las aguas fecales y lixiviados recogidos a la entrada del sumidero de Osinondo y en el vertedero de Santutxo respectivamente. *n*: número de muestras consideradas.

En cuanto a las aguas que entran al Sistema Kárstico de Salubita, como las aguas de los materiales cuaternarios de la depresión de Bidania y las aguas que se infiltran a través del sumidero de Osinondo (figura 5.4), éstas también son **bicarbonatadas cálcicas** aunque su evolución es diferente a las anteriores. En este caso se produce una evolución horizontal en relación con el calcio-sodio en ambos casos y también en relación con los cloruros en las aguas del cuaternario.

La figura 5.5 evidencia que todos los puntos de descarga se concentran en el espacio correspondiente a las aguas **bicarbonatadas cálcicas**. Lógicamente, los lixiviados y las aguas fecales ocupan lugares distales con respecto al grupo de puntos de descarga debido a sus concentraciones anómalas de mayoritarios. Los lixiviados corresponderían a un tipo de aguas **sulfatadas cálcico-sódico-potásicas** y las aguas fecales al tipo **bicarbonatado sódico-potásico**. Resulta interesante el hecho de que las aguas del sondeo Beondegi, que se encuentran muy cerca de la superficie del terreno (80-90 cm de profundidad) poseen una mineralización muy baja y en el diagrama de Piper se sitúan en torno al centro del mismo describiendo unas aguas **bicarbonatadas cálcico-sódico-potásicas**. Las

aguas del sondeo Osinondo son también **bicarbonatadas cálcicas** aunque desplazadas hacia términos ligeramente más sódico-potásicos como ocurre en la figura 5.4 con las aguas del cuaternario. No hay que olvidar que el sondeo Osinondo está ubicado en el fondo de la dolina-sumidero de Osinondo atravesando materiales cuaternarios.

Las curvas de frecuencia de la figura 5.6 muestran el carácter pluri- o unimodal de cada punto de agua muestreado y tratado detalladamente en los párrafos siguientes. Se visualiza de forma gráfica el grado de variabilidad hidroquímica de cada punto. Para ello se han utilizado las concentraciones en  $\text{SO}_4^{2-}$  ya que es éste el ion más representativo de las variaciones espaciales observadas y el que mayor variabilidad suele presentar temporalmente en cada punto de control.



**Figura 5.6: Reflejo de la variabilidad hidroquímica de las aguas muestreadas (cuaternario, Osinondo, Etxeberri, Salubita, Presa, Legorreta, Gain e Igaran).**

El manantial de Salubita es claramente unimodal, al igual que las aguas de la presa, con concentraciones de  $\text{SO}_4^{2-}$  que oscilan mayoritariamente entre 10 y 30 mg/l, llegándose en estiaje hasta 40-50 mg/l. Se pone de manifiesto, una vez más, la plurimodalidad de Igaran y de Gain mientras que las aguas de Osinondo y de los materiales cuaternarios muestran una marcada unimodalidad con concentraciones de 10-20 mg/l. Etxeberri presenta también una aguda unimodalidad aunque, en comparación con Salubita, el pico se encuentra ligeramente desplazado hacia concentraciones algo mayores en general. Por último, es el manantial de Legorreta el que presenta una unimodalidad marcada asociada a mayores concentraciones (40-70 mg/l) con cierta dispersión.

## 5.6. ANÁLISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)

Se han realizado los ACP correspondientes a los puntos de agua (manantiales y cursos superficiales) reflejados en la tabla 5.7. Puesto que el manantial de Salubita es el punto de descarga de mayor interés, tanto en calidad como en cantidad, de la zona de estudio, para este punto se han realizado dos ACP considerando diferentes variables con el fin de poder establecer con mayor claridad las relaciones entre los elementos mayoritarios y entre éstos y las muestras consideradas. El método elegido en todos los casos ha sido el de Rotación Varimax.

Los datos de los caudales han sido incluidos únicamente en los ACP del manantial de Salubita debido a que no se dispone de los datos de caudales del resto de los puntos de agua muestreados. No obstante, los períodos de estiaje, transición y aguas altas en todos los casos se han descrito según los caudales del manantial de Salubita (figura 5.8), a las precipitaciones y a las observaciones de campo. La información estadística de las especies iónicas de todos los puntos de agua se encuentra recogida en la tabla 5.7.

### 5.6.1. SALUBITA

Para la realización de los ACP del manantial de Salubita, se ha considerado un total de 115 muestras (tabla 5.7) que comprenden el periodo entre Enero de 1997 y Abril de 2000. Para el primer ACP se han considerado 11 variables ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$ , caudal y conductividad).

El 75.18% de la varianza total se explica en los cuatro primeros factores del ACP (tabla 5.8), aunque algo más de la mitad de la varianza (53.48%) se explica entre el primer (34.63%) y el segundo factor (18.85%); el tercero (12.92%) y el cuarto (8.79%) explican también una parte relativamente importante de la misma.

La matriz de correlaciones (tabla 5.8) muestra que la conductividad está bien correlacionada, positivamente, con  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$  y  $Sr^{2+}$  y negativamente con el caudal. Estas variables evidencian, además, buenas correlaciones entre ellas, y el  $Mg^{2+}$  se correlaciona bien con el  $Ca^{2+}$ . Por otra parte, el  $K^+$  se correlaciona bien, positivamente, con el  $NO_3^-$ . Cabe destacar que  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$  y  $Na^+$  no presentan correlaciones significantes ni entre ellos ni con ninguna otra variable.

En el campo de las variables del ACP (figura 5.7) y según la matriz de componentes de la tabla 5.8, se observa que el eje I está determinado por  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad en la parte positiva y por el caudal en la parte negativa. El factor II está determinado, en su parte positiva, por  $K^+$  y  $NO_3^-$ . El eje III está marcado por  $Cl^-$  en su parte positiva y  $HCO_3^-$  en la negativa. Por último, el factor IV está determinado por el  $Na^+$  en su parte positiva.

MATRIZ DE CORRELACIONES											
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Sr <sup>2+</sup>	C	Q	Cl <sup>-</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1										
K <sup>+</sup>	0.333	1									
Na <sup>+</sup>	0.093	-0.019	1								
Mg <sup>2+</sup>	0.207	0.262	0.388	1							
Ca <sup>2+</sup>	0.262	0.238	0.144	<b>0.549</b>	1						
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	-0.248	-0.102	0.328	<b>0.556</b>	0.311	1					
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	0.254	<b>0.583</b>	-0.236	-0.097	0.062	-0.267	1				
Sr <sup>2+</sup>	0.020	0.114	0.183	<b>0.589</b>	0.375	<b>0.552</b>	-0.322	1			
C	-0.048	0.082	0.333	<b>0.639</b>	0.397	<b>0.645</b>	-0.132	<b>0.525</b>	1		
Q	0.044	0.118	-0.322	-0.478	-0.346	<b>-0.523</b>	0.347	<b>-0.508</b>	<b>-0.505</b>	1	
Cl <sup>-</sup>	-0.265	0.006	0.252	0.041	-0.092	0.367	0.181	-0.116	0.005	-0.015	1

MATRIZ DE COMPONENTES					VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	4	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.007	0.425	<b>-0.654</b>	0.435	1	3.81	34.63	34.63
K <sup>+</sup>	0.154	<b>0.847</b>	-0.103	-0.004	2	2.07	18.85	53.48
Na <sup>+</sup>	0.251	-0.140	0.148	<b>0.875</b>	3	1.42	12.92	66.39
Mg <sup>2+</sup>	<b>0.810</b>	0.186	-0.048	0.294	4	0.97	8.79	75.18
Ca <sup>2+</sup>	<b>0.635</b>	0.302	-0.242	0.091	5	0.62	5.66	80.84
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0.750</b>	-0.155	0.486	0.095	6	0.51	4.63	85.47
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.235	<b>0.874</b>	0.116	-0.107	7	0.48	4.36	89.83
Sr <sup>2+</sup>	<b>0.817</b>	-0.112	-0.110	-0.072	8	0.44	4.00	93.83
C	<b>0.809</b>	0.003	0.123	0.088	9	0.28	2.55	96.38
Q	<b>-0.692</b>	0.293	-0.014	-0.183	10	0.22	1.96	98.34
Cl <sup>-</sup>	-0.047	0.176	<b>0.861</b>	0.297	11	0.18	1.66	100.00

**Tabla 5.8: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos del manantial de Salubita (n=115) para las 11 variables Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup>, caudal y conductividad (Q: caudal; C: conductividad).**

Los planos I-II, I-III y I-IV de las unidades estadísticas se reflejan en la figura 5.7. En el plano I-II se pueden establecer tres períodos principales:

- Estiaje: caudales en el manantial inferiores a 200 l/s, con aguas más mineralizadas, drenadas sobre todo en los meses de verano y finales de los años hidrológicos. En la figura 5.8 corresponde a las aguas comprendidas en el ámbito del dominio A.

- Aguas altas: caudales en el manantial superiores a 800 l/s, con aguas menos mineralizadas. En la figura 5.8 son las aguas del dominio C. Este grupo se puede subdividir en dos subgrupos en base al contenido en K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Las muestras tomadas durante las crecidas presentan, en general, mayores contenidos en estos dos elementos, mientras que las de decrecida muestran menores concentraciones.

- Transición: caudales comprendidos entre 200 y 800 l/s. Aguas comprendidas en el dominio B de la figura 5.8. El plano I-II refleja la existencia de una muestra de caudal intermedio (200-800 l/s) con elevados contenidos en K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Se trata de una muestra que coincide con la primera crecida del año hidrológico 1997-98 (16/10/97) (figura 5.8).

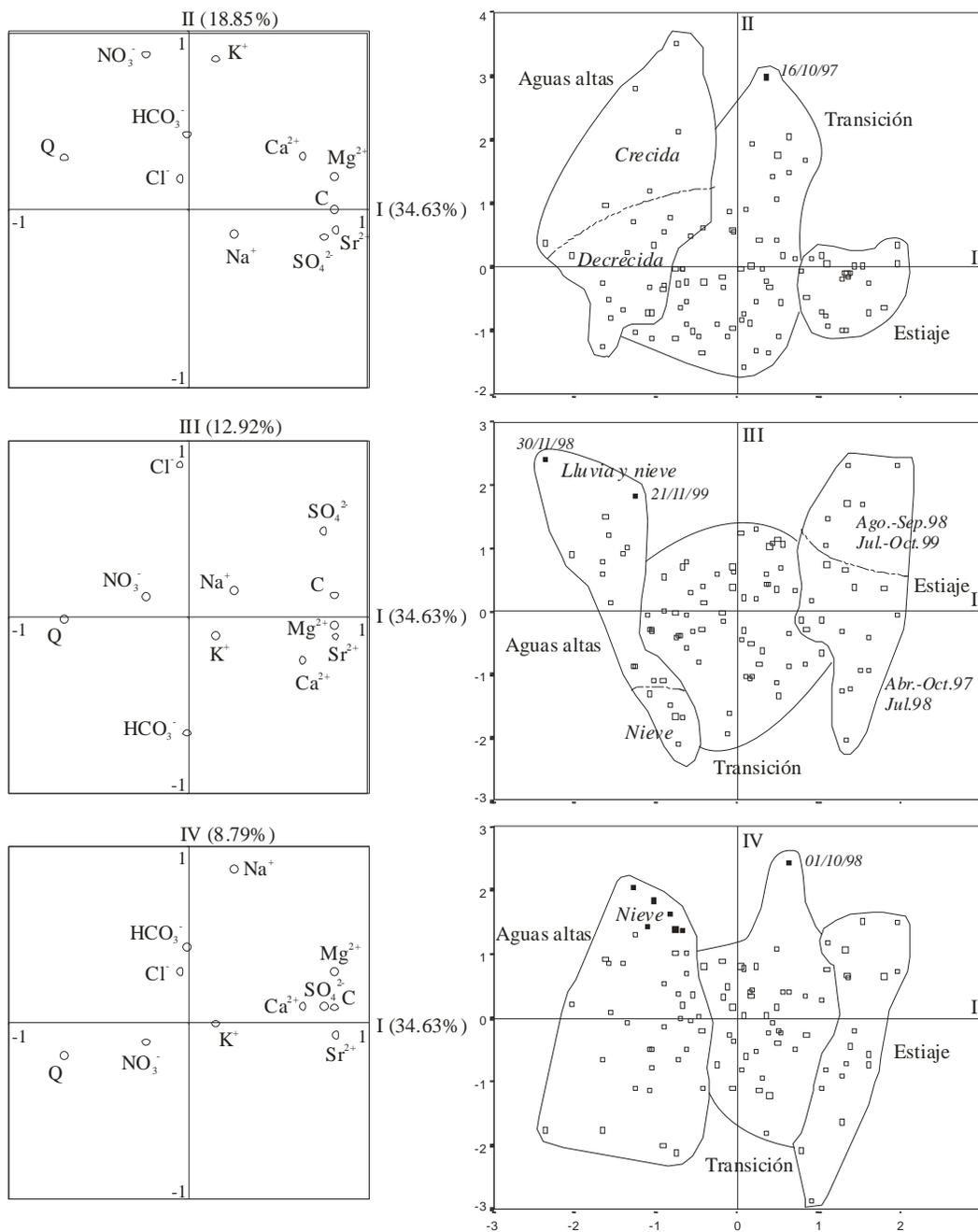
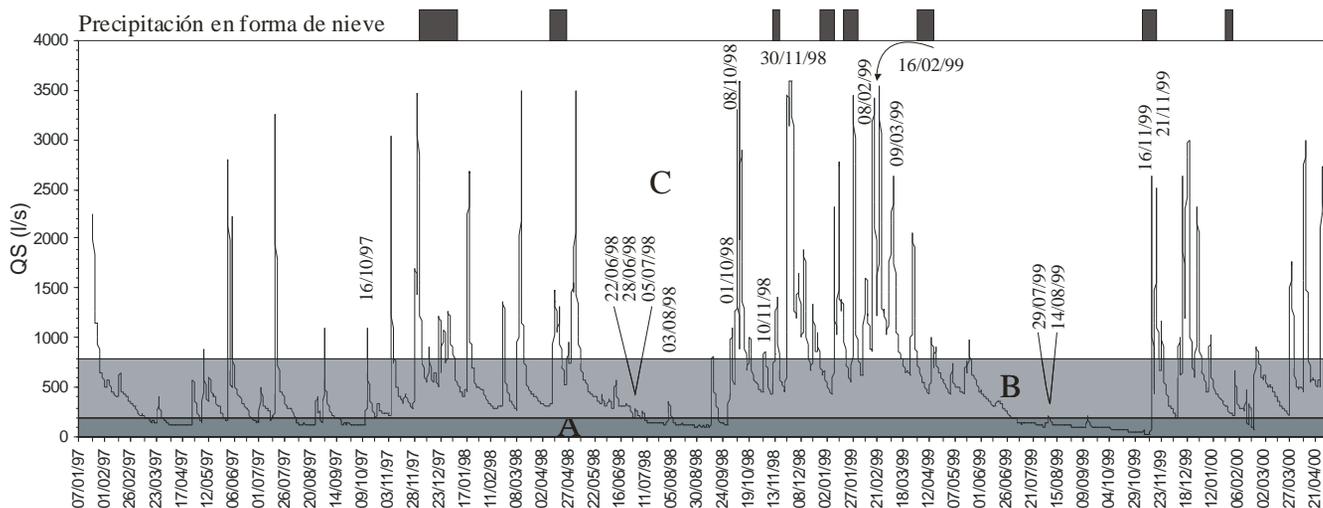


Figura 5.7: Representación de los planos I-II, I-III e I-IV del ACP del manantial de Salubita para las 11 variables.

En el plano I-III se observan los tres períodos principales observables en el plano I-II y es posible subdividir también el período de estiaje en dos subgrupos. El localizado en la parte superior derecha (mayores contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$ ) representa las muestras tomadas en el período Agosto-Septiembre de 1998 y en el Julio-Octubre de 1999, momentos en los que el estiaje fue realmente

severo alcanzándose en el manantial caudales inferiores a 100 l/s (ámbito A de la figura 5.8). El otro subgrupo representa las muestras tomadas en estiaje entre Abril-Octubre de 1997 y en Julio de 1998 (ámbito B de la figura 5.8).

Por otra parte, es posible subdividir el período de aguas altas según el contenido en  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ . Los puntos localizados en ambos extremos de ese área corresponden a muestras tomadas en períodos muy concretos. Las situadas en el extremo de la parte negativa del eje III (altos contenidos en  $\text{HCO}_3^-$ ) se recogieron durante un período de fuertes nevadas (Diciembre de 1997) mientras que las situadas en el extremo de su parte positiva (altos valores en  $\text{Cl}^-$ ) coinciden con dos momentos (30/11/98 y 21/11/99) de fuertes precipitaciones en forma de lluvia y nieve. El resto de las muestras del ámbito de las aguas altas no han sido tomadas en períodos de nieve.



**Figura 5.8:** Ámbitos en los que se han tomado las muestras. A: estiaje ( $QS < 200$  l/s); B: transición ( $200 < QS < 800$  l/s) y C: aguas altas ( $QS > 800$  l/s).

Los tres grupos de aguas también se observan claramente en el plano I-IV, aunque éste muestra sobretodo la influencia del sodio en la distribución de las muestras. El punto más alto (01/10/98) del grupo de las muestras tomadas en el período de transición coincide con la primera crecida del año hidrológico 1998-99 (figura 5.8). Los puntos localizados en el extremo superior del período de aguas altas corresponden a las muestras tomadas durante las nevadas de Diciembre de 1997.

De acuerdo con este primer ACP del manantial de Salubita, es claro que el **factor I** representa las características internas del sistema o, lo que es lo mismo, la **mineralización**, en contraposición al caudal. El **factor II** parece representar la influencia en el sistema de **componentes externos** representados, en este caso, por  $\text{K}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ , cuyo origen estaría en relación con la contaminación

agrícola y la actividad edáfica, lo que reflejaría la importancia de los usos del suelo y su influencia en la calidad de las aguas. El **factor III** resulta difícil de caracterizar aunque a tenor de las observaciones realizadas respecto a la nieve y los contenidos de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$ , podría representar la influencia en el sistema de **aspectos atmosféricos (meteorológicos)**. Finalmente, el factor IV, representado por el  $\text{Na}^+$  parece estar también relacionado con ciertos aspectos atmosféricos aunque debido a que este ion puede verse afectado por otro tipo de reacciones químicas (intercambio iónico) de las que no se tiene información para la zona de estudio, queda por verificar esta cuestión.

Puesto que el primer ACP ha puesto de manifiesto la inexistencia de correlaciones significativas de los iones  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Na}^+$  ni entre ellos ni con el resto de los elementos, se ha realizado un segundo ACP sin contar con esos tres iones, es decir, considerando 8 variables ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , caudal y conductividad) y utilizando las mismas muestras (115) que en el caso anterior.

En este caso los tres primeros factores explican el 75.40% de la varianza total (tabla 5.9). No se ha incluido en la tabla la matriz de correlación ya que ésta no varía, puesto que se han utilizado los análisis de las mismas muestras (115).

En el campo de las variables del ACP (figura 5.9), la matriz de componentes de la tabla 5.9 muestra que el eje I está determinado por  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$  y conductividad en su parte positiva y caudal en la negativa. Al igual que en el primer ACP, el factor II está determinado, en su parte positiva, por  $\text{K}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . El eje III está marcado por el  $\text{Sr}^{2+}$  en su parte positiva.

MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
$\text{K}^+$	-0.036	<b>0.907</b>	0.259	1	3.61	45.12	45.12
$\text{Mg}^{2+}$	<b>0.586</b>	0.176	0.439	2	1.78	22.19	67.31
$\text{Ca}^{2+}$	0.208	0.126	0.112	3	0.65	8.10	75.40
$\text{SO}_4^{2-}$	<b>0.861</b>	-0.164	0.193	4	0.59	7.33	82.73
$\text{NO}_3^-$	-0.060	<b>0.828</b>	-0.432	5	0.48	6.01	88.74
$\text{Sr}^{2+}$	0.408	-0.036	<b>0.827</b>	6	0.36	4.51	93.25
C	<b>0.864</b>	0.050	0.169	7	0.30	3.81	97.06
Q	<b>-0.515</b>	0.336	-0.324	8	0.24	2.94	100.00

**Tabla 5.9: Matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos del manantial de Salubita (n= 115) para las 8 variables  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ , caudal y conductividad.**

Los planos I-II y I-III de las unidades estadísticas se reflejan en la figura 5.9. En ambos planos se pueden distinguir los tres períodos principales comentados para el primer ACP (estiaje, transición y crecida). En el plano I-II se distinguen también los dos subgrupos del período de aguas altas (crecida y decrecida) y los dos subgrupos del período de estiaje (Agosto-Septiembre de 1998 y Julio-Octubre de 1999; Abril-Octubre de 1997). Los tres puntos situados en el extremo de la parte positiva del eje II

(mayores contenidos en  $K^+$  y  $NO_3^-$ ) corresponden a muestras tomadas en Octubre y Noviembre de 1997 y en Noviembre de 1999 (esta última acompañada de nieve), es decir, en las primeras crecidas del año hidrológico.

El plano I-III muestra un aspecto nuevo que no había sido puesto de manifiesto hasta el momento. Los puntos situados en el extremo de la parte positiva del eje III (mayor contenido en  $Sr^{2+}$ ) corresponden a muestras tomadas entre Septiembre y Noviembre de 1997. Todas estas muestras se tomaron durante un período de estiaje aunque coincidiendo con pequeños picos de caudal como consecuencia de lluvias aisladas por lo que el caudal en estos casos es superior a 200 l/s.

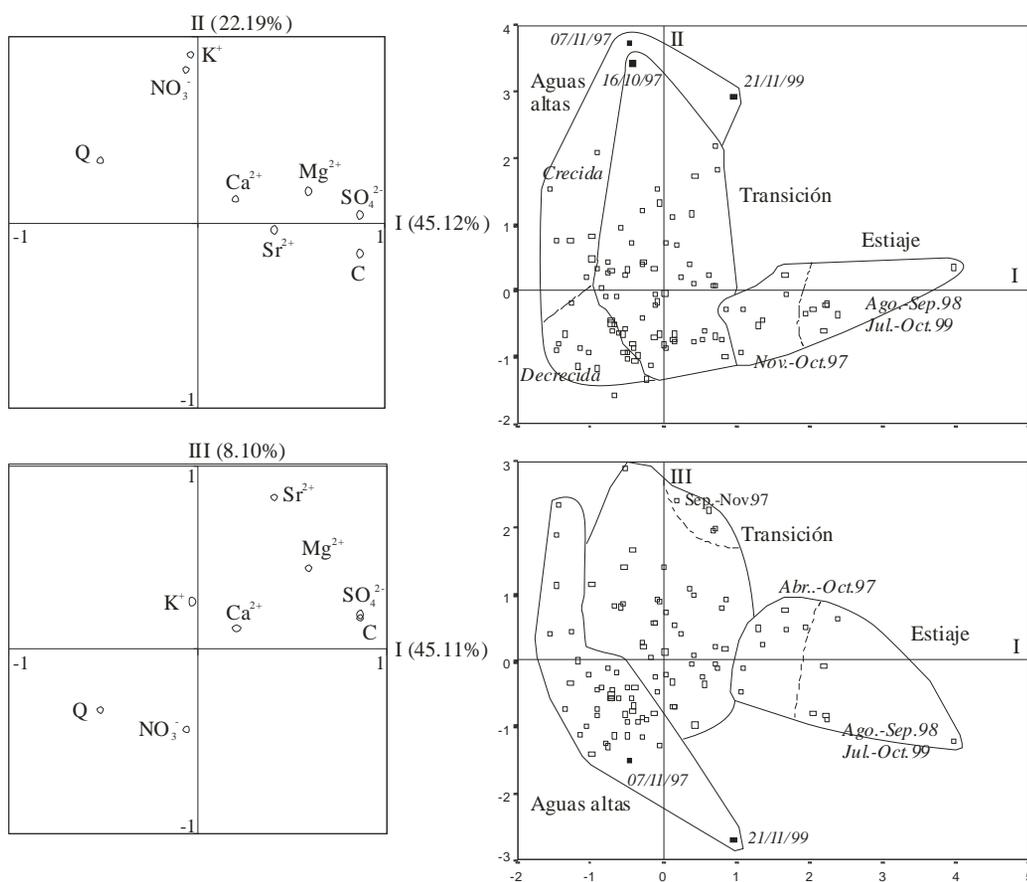


Figura 5.9: Representación de los planos I-II y I-III del segundo ACP del manantial de Salubita para las 8 variables.

Una vez descartados los posibles efectos atmosféricos ( $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$  y  $Na^+$ ), este segundo ACP muestra casi las mismas características que el primero con la diferencia del estroncio. El factor I representa la **mineralización**. El factor II representa la influencia en el sistema de **componentes externos**, y el factor III caracteriza también en cierta medida la mineralización pero basada ahora en el

$\text{Sr}^{2+}$ . En cualquier caso, las mineralizaciones representadas por los factores I y III están relacionadas en vista de las correlaciones entre los elementos que caracterizan estos dos ejes.

Los Análisis en Componentes Principales realizados para el manantial de Salubita han permitido poner de manifiesto los siguientes aspectos, algunos de los cuales se habían comentado en apartados anteriores:

- Lógicamente, la mineralización de las aguas es mayor en estiaje y menor en aguas altas mientras que los períodos de transición muestran aguas de mineralización intermedia. Es, por tanto, evidente el efecto de dilución sobre los elementos de origen interno.

- En estiajes más pronunciados, ámbito A de la figura 5.8, se incrementa sobre todo el contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  debido a la total infiltración de las aguas de la Regata Albiztur, procedente del sector del manantial de Igaran, en el acuífero cerca ya de la surgencia de Salubita.

- Las muestras tomadas en aguas altas muestran una baja mineralización, pero diferente en función de si han sido tomadas durante la crecida o durante la decrecida. Así, en general, las muestras tomadas durante las crecidas presentan mayores contenidos en  $\text{K}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . Además, las crecidas del inicio del año hidrológico aportan un mayor contenido en  $\text{K}^+$  y  $\text{NO}_3^-$  que el resto de las crecidas.

- Las aguas del período de transición, caudales intermedios, presentan características intermedias pero próximas a las de las aguas en los períodos extremos (aguas altas, aguas bajas) en situaciones cercanas a las extremas.

- Pequeños aumentos de caudal producidos en el ámbito de períodos de estiaje aportan cantidades de  $\text{Sr}^{2+}$  mayores de lo habitual. En cualquier caso, el seguimiento no ha sido lo suficientemente exhaustivo como para poder explicar estas observaciones muy limitadas en el tiempo.

- Ciertos aspectos atmosféricos, como la precipitación en forma de nieve, parecen repercutir directamente en el contenido de  $\text{Cl}^-$  y  $\text{HCO}_3^-$  en la surgencia. Períodos de fuertes nevadas y bajas temperaturas favorecen la presencia de bicarbonatos en las aguas de la surgencia, mientras que períodos de intensas lluvias, con algo de nieve, en otoño aportan más cloruros. De todas formas, la influencia de este tipo de episodios requeriría un seguimiento más detallado de la variación hidroquímica correspondiente, a una escala que, indudablemente, no es la que aquí se ha considerado.

### **5.6.2. IGARAN**

El ACP del manantial de Igaran se ha realizado con un total de 43 muestras (tabla 5.7) que comprenden el periodo entre Febrero de 1997 y Abril de 2000. Y se han utilizado 10 variables ( $\text{Mg}^{2+}$ ,

SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup> y conductividad). No se cuenta aquí con registro de caudales.

MATRIZ DE CORRELACIONES										
	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup>	Na <sup>+</sup>	Mg <sup>2+</sup>	Ca <sup>2+</sup>	SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	Sr <sup>2+</sup>	C	Cl <sup>-</sup>	NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	1									
K <sup>+</sup>	0.361	1								
Na <sup>+</sup>	0.327	0.259	1							
Mg <sup>2+</sup>	<b>0.594</b>	0.075	<b>0.616</b>	1						
Ca <sup>2+</sup>	<b>0.658</b>	0.145	<b>0.549</b>	<b>0.961</b>	1					
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0.564</b>	0.026	<b>0.519</b>	<b>0.945</b>	<b>0.942</b>	1				
Sr <sup>2+</sup>	<b>0.655</b>	0.140	<b>0.526</b>	<b>0.937</b>	<b>0.934</b>	<b>0.928</b>	1			
C	<b>0.561</b>	0.112	<b>0.556</b>	<b>0.956</b>	<b>0.932</b>	<b>0.952</b>	<b>0.940</b>	1		
Cl <sup>-</sup>	-0.342	-0.092	0.375	-0.042	-0.180	-0.075	-0.103	0.003	1	
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	-0.254	0.479	-0.213	<b>-0.647</b>	<b>-0.591</b>	<b>-0.668</b>	<b>-0.628</b>	-0.631	0.090	1

MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>0.673</b>	0.411	-0.345	1	6.00	59.96	59.96
K <sup>+</sup>	0.090	<b>0.945</b>	-0.013	2	1.56	15.65	75.61
Na <sup>+</sup>	<b>0.590</b>	0.286	<b>0.610</b>	3	1.39	13.92	89.53
Mg <sup>2+</sup>	<b>0.979</b>	-0.011	0.080	4	0.37	3.75	93.28
Ca <sup>2+</sup>	<b>0.973</b>	0.066	-0.060	5	0.31	3.11	96.39
SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup>	<b>0.965</b>	-0.076	0.021	6	0.19	1.89	98.28
Sr <sup>2+</sup>	<b>0.968</b>	0.040	-0.018	7	0.06	0.61	98.89
C	<b>0.964</b>	-0.004	0.095	8	0.05	0.50	99.40
Cl <sup>-</sup>	-0.108	-0.080	<b>0.937</b>	9	0.04	0.38	99.78
NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	<b>-0.684</b>	<b>0.635</b>	0.072	10	0.02	0.22	100.00

*Tabla 5.10: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos del manantial de Igaran (n=43) para las 10 variables Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, K<sup>+</sup>, NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Cl<sup>-</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Na<sup>+</sup>, Sr<sup>2+</sup> y conductividad.*

El 89.53% de la varianza total queda explicado en los tres primeros factores del ACP (tabla 5.10), aunque la mayor parte (59.96%) se explica en el primer factor lo cual indica la fuerte estructuración de la misma.

La matriz de correlaciones (tabla 5.10) muestra que la conductividad está bien relacionada, positivamente, con Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup> y Sr<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> con buenas correlaciones entre ellos. El NO<sub>3</sub><sup>-</sup> presenta buenas correlaciones, aunque negativas, con Mg<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Sr<sup>2+</sup> y Ca<sup>2+</sup>. Por otra parte, el K<sup>+</sup> y el Cl<sup>-</sup> no se correlacionan bien con ningún elemento aunque el K<sup>+</sup> se relaciona significativamente (0.479) con el NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, y el Cl<sup>-</sup>, menos, con el Na<sup>+</sup> (0.375).

En el campo de las variables del ACP (figura 5.10) y de acuerdo con la matriz de componentes de la tabla, el eje I está determinado por HCO<sub>3</sub><sup>-</sup>, Mg<sup>2+</sup>, Ca<sup>2+</sup>, SO<sub>4</sub><sup>2-</sup>, Sr<sup>2+</sup>, Na<sup>+</sup> y conductividad en su parte positiva y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> en la parte negativa. El factor II está determinado, en su parte positiva, por K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> y el eje III está marcado por y Cl<sup>-</sup> y Na<sup>+</sup> también en su parte positiva.

Los planos I-II y I-III de las unidades estadísticas se reflejan en la figura 5.10. En el plano I-II se pueden establecer los tres períodos principales descritos para el manantial de Salubita:

- Estiaje: aguas más mineralizadas, drenadas sobre todo en los meses de verano y finales de los años hidrológicos. Se distinguen claramente, además, las muestras tomadas durante los estiajes

más pronunciados (Agosto-Septiembre de 1998 y Julio-Octubre de 1999) del resto (Abril-Octubre de 1997 y Julio de 1998).

- Aguas altas: aguas menos mineralizadas. Según el contenido en  $\text{NO}_3^-$ , los tres puntos situados en la parte positiva del eje II dentro de este dominio (figura 5.10) coinciden con los períodos de crecida, mientras que los otros pertenecen a muestras tomadas durante las decrecidas.

- Transición: aguas comprendidas entre los dos dominios anteriores. El punto negro situado en el extremo positivo del eje II según el plano I-II, presenta contenidos importantes en  $\text{K}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . Se trata de una muestra que coincide con la primera crecida del año hidrológico 1997-98 que fue tomada el mismo día (16/10/97) que la muestra de Salubita ya comentada figura 5.8.

El plano I-III hace observables dos aspectos: por una parte, el grupo de las aguas altas muestra dos puntos extremos hacia la parte positiva del eje III (mayores contenidos en  $\text{Cl}^-$ ) que corresponden a un período de intensas precipitaciones en forma de lluvia y nieve (figura 5.10). Se trata de las muestras tomadas los mismos días (30/11/98 y 21/11/99) que las recogidas en el manantial de Salubita, las cuales se sitúan en la misma posición del plano I-III de la figura 5.7; también allí era el  $\text{Cl}^-$  el elemento que definía el factor III. Por otra parte, el punto negro del período de estiaje localizado en el extremo negativo del eje III desplazado hacia la parte positiva del eje I (mayores contenidos en  $\text{HCO}_3^-$ ) coincide con un pequeño aumento de caudal (en el hidrograma del manantial de Salubita) en la época de estiaje (03/08/98).

Tanto en el plano I-II como en el plano I-III de la figura 5.10 se ha marcado la evolución hidroquímica de la segunda mitad del año hidrológico 1998-99, período de clara recesión, caracterizada por un estiaje extremo. Las flechas indican la evolución desde Marzo hasta Octubre de 1999.

El factor I representa la **mineralización** estando presentes también  $\text{Na}^+$  y  $\text{HCO}_3^-$ , iones que en el manantial de Salubita no formaban parte de la mineralización, al menos de forma importante. El factor II, al igual que en Salubita, parece representar la influencia en el sistema **de componentes externos** ( $\text{NO}_3^-$  y  $\text{K}^+$ ) y el factor III, marcado principalmente por  $\text{Cl}^-$  y en cierta medida por  $\text{Na}^+$ , representaría la influencia de **procesos meteorológicos**.

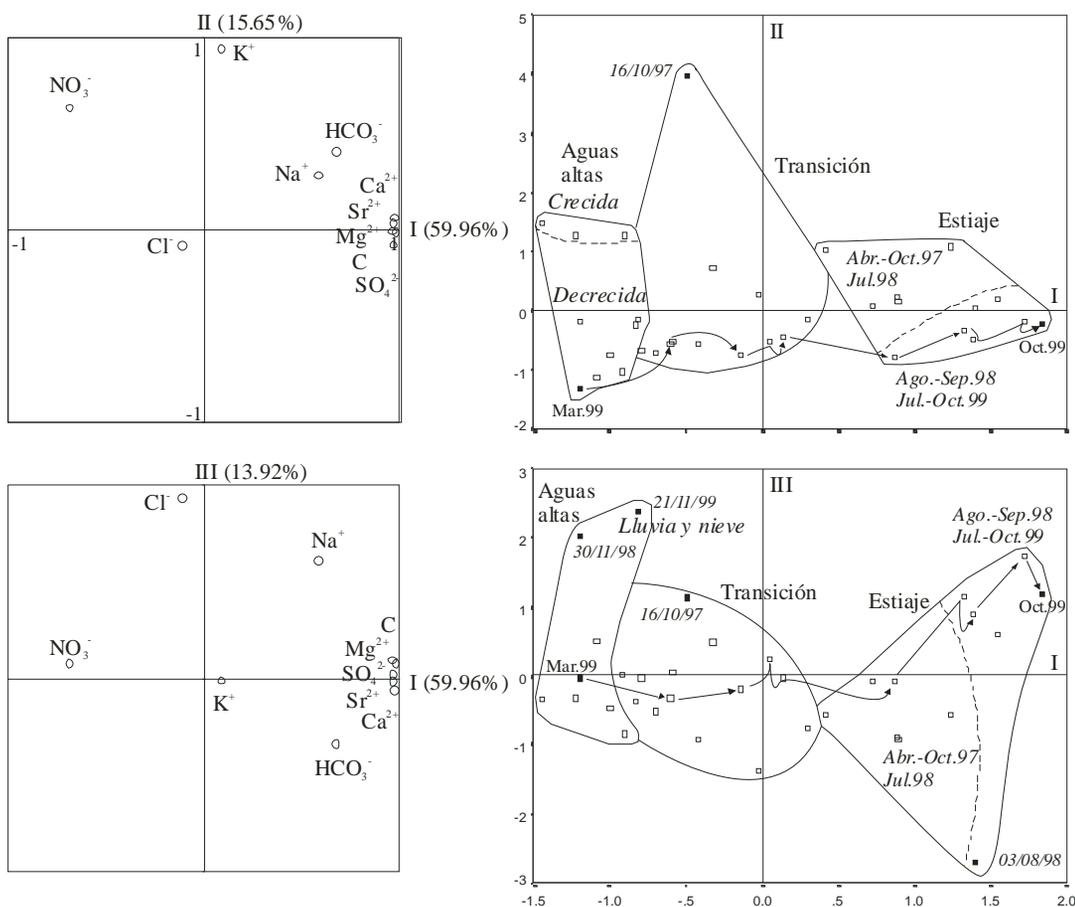


Figura 5.10: Representación de los planos I-II y I-III del ACP del manantial de Igaran para las 10 variables.

El ACP realizado para el manantial de Igaran ha mostrado que:

- La mineralización de las aguas es mayor en estiaje, sobre todo en estiajes extremos, y menor en aguas altas (efecto de dilución) mientras que los períodos de transición muestran aguas de mineralización intermedia.
- Las crecidas y las decrecidas de los períodos de aguas altas presentan una mineralización baja, pero diferente mostrando las crecidas mayores contenidos en  $\text{NO}_3^-$ . La crecida del inicio del año hidrológico 1998-99 muestra un aumento en  $\text{K}^+$ , acompañado del  $\text{NO}_3^-$ , superior al resto de las crecidas.
- La presencia de nieve durante las precipitaciones, en otoño, hace aumentar el contenido de  $\text{Cl}^-$  en las aguas de la surgencia.

- La evolución temporal del quimismo durante la recesión del año 1999 es clara muestra del efecto de concentración en elementos internos, efecto contrario al de la dilución.

**5.6.3. GAIN (Regata Albiztur aguas arriba del manantial de Salubita)**

Para la realización del ACP de Gain se han utilizado 80 muestras (tabla 5.7) tomadas entre Junio de 1997 y Octubre de 1999 y las 10 variables utilizadas han sido las mismas que las empleadas para el ACP del manantial de Igaran ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad).

Aunque los dos primeros factores explican el 74.95% de la varianza total, lo que indica la buena estructuración de la misma, se han considerado también los factores tres y cuatro ya que entre los dos explican el 16.08% de la varianza total (9.61% el tercero y 6.47% el cuarto) y dan buena cuenta de algunos elementos que no están suficientemente representados en los factores I (55.11%) y II (19.83%).

La matriz de correlaciones (tabla 5.11) refleja las buenas correlaciones positivas existentes entre la conductividad y los iones  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Na^+$  y  $K^+$ , cuyas relaciones mutuas son también buenas. El  $NO_3^-$  presenta cierta correlación, positiva, con el  $K^+$  (0.487) y con el  $Cl^-$  (0.418), y negativa, aunque no significativa, con  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ . Por último, el  $HCO_3^-$  no presenta correlación buena con ninguna otra variable, si bien las más significativas son con  $Mg^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  y  $Ca^{2+}$ .

MATRIZ DE CORRELACIONES										
	$HCO_3^-$	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	$Sr^{2+}$	C
$HCO_3^-$	1									
$K^+$	0.070	1								
$Na^+$	0.066	<b>0.663</b>	1							
$Mg^{2+}$	0.322	0.431	<b>0.661</b>	1						
$Ca^{2+}$	0.363	0.427	<b>0.643</b>	<b>0.944</b>	1					
$Cl^-$	-0.251	0.229	<b>0.506</b>	0.083	-0.007	1				
$SO_4^{2-}$	0.197	0.452	<b>0.683</b>	<b>0.904</b>	<b>0.898</b>	0.102	1			
$NO_3^-$	-0.084	0.487	0.305	-0.088	-0.126	0.418	-0.023	1		
$Sr^{2+}$	0.325	<b>0.508</b>	<b>0.607</b>	<b>0.854</b>	<b>0.883</b>	-0.021	<b>0.837</b>	-0.070	1	
C	0.185	<b>0.528</b>	<b>0.736</b>	<b>0.889</b>	<b>0.884</b>	0.171	<b>0.883</b>	-0.021	<b>0.827</b>	1

MATRIZ DE COMPONENTES					VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	4	Factor	Total	% de la var.	% acum.
$HCO_3^-$	0.196	-0.008	-0.134	<b>0.967</b>	1	5.51	55.11	55.11
$K^+$	0.473	<b>0.806</b>	-0.002	-0.043	2	1.98	19.83	74.95
$Na^+$	<b>0.700</b>	0.396	0.459	-0.019	3	0.96	9.61	84.56
$Mg^{2+}$	<b>0.948</b>	0.010	0.065	0.163	4	0.65	6.47	91.03
$Ca^{2+}$	<b>0.955</b>	0.005	-0.024	0.190	5	0.33	3.32	94.35
$Cl^-$	0.048	0.200	<b>0.949</b>	-0.141	6	0.18	1.81	96.16
$SO_4^{2-}$	<b>0.942</b>	0.066	0.062	0.025	7	0.14	1.43	97.59
$NO_3^-$	-0.166	<b>0.859</b>	0.301	0.026	8	0.10	1.03	98.61
$Sr^{2+}$	<b>0.909</b>	0.120	-0.104	0.146	9	0.09	0.91	99.52
C	<b>0.941</b>	0.107	0.117	0.010	10	0.05	0.48	100.00

**Tabla 5.11: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=80) de la Regata Albiztur (Gain) para las 10 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad.**

En vista de la matriz de componentes y a tenor del campo de las variables del ACP de la figura 5.11, el eje I está determinado por  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$ ,  $Na^+$  y conductividad en su parte positiva. El factor II está determinado por  $K^+$  y  $NO_3^-$  en su parte positiva. El eje III está marcado por el  $Cl^-$  en su parte positiva y el factor IV está determinado por el  $HCO_3^-$ .

Los tres planos muestran de forma palpable la diferencia entre las muestras tomadas en estiaje, en aguas altas y en el período de transición entre unas y otras, pudiéndose diferenciar los tres grupos de puntos:

- Estiaje: aguas más mineralizadas, drenadas sobre todo en los meses de verano y finales de los años hidrológicos. Se distinguen claramente, además, las muestras tomadas durante los estiajes más pronunciados (Agosto-Septiembre de 1998 y Julio-Octubre de 1999) del resto (Abril-Octubre de 1997 y Julio de 1998).

- Aguas altas: aguas menos mineralizadas. El plano I-III muestra un punto (16/02/99) visiblemente desplazado hacia el extremo positivo del eje III que corresponde a una muestra tomada durante un período de lluvia caracterizado sobre todo por un aumento de  $Cl^-$  y  $HCO_3^-$  en la regata. Los seis puntos situados en la parte más alta del plano I-IV corresponden a muestras tomadas en Diciembre de 1997 y Octubre de 1998. Las primeras muestras se caracterizaron por la presencia de intensas nevadas y las otras por intensas precipitaciones que duraron varias semanas. Las seis muestras presentan un aumento en  $HCO_3^-$  y  $NO_3^-$ , hecho éste ya observado en Salubita. La muestra correspondiente al 16/10/97, que en el plano I-II aparece desplazada hacia el extremo positivo del eje II, se caracteriza también por el aumento de los nitratos.

- Transición: aguas comprendidas entre los dos dominios anteriores. La hidroquímica se mantiene bastante homogénea, en comparación con la de las situaciones extremas.

Al igual que en los ACP anteriores el factor I representa la **mineralización** (con presencia también del ión  $Na^+$ ) y el factor II sería el reflejo de la influencia en el sistema de **componentes externos** ( $NO_3^-$  y  $K^+$ ). El factor III y IV indicarían también la influencia de procesos externos, meteorológicos, marcados por la presencia de  $Cl^-$  y  $Na^+$ , en el tercero, y  $HCO_3^-$ , en el cuarto. No hay que olvidar que aunque las aguas de Gain (Regata Albiztur) provienen en su mayor parte del manantial de Igaran, están sujetas a influencias externas, a veces puntuales, en aguas altas, por aportes superficiales, debido a que se trata de un cauce superficial. Actividades agrícolas y ganaderas así como algunas urbanas e industriales (núcleo de Albiztur) que de una manera u otra pueden alcanzar las aguas de la regata podrían ser las causantes de una cierta modificación del comportamiento, sobre todo de  $HCO_3^-$ . Por lo demás, el propio peso de las variables en los factores es bastante similar en Igaran y Gain.

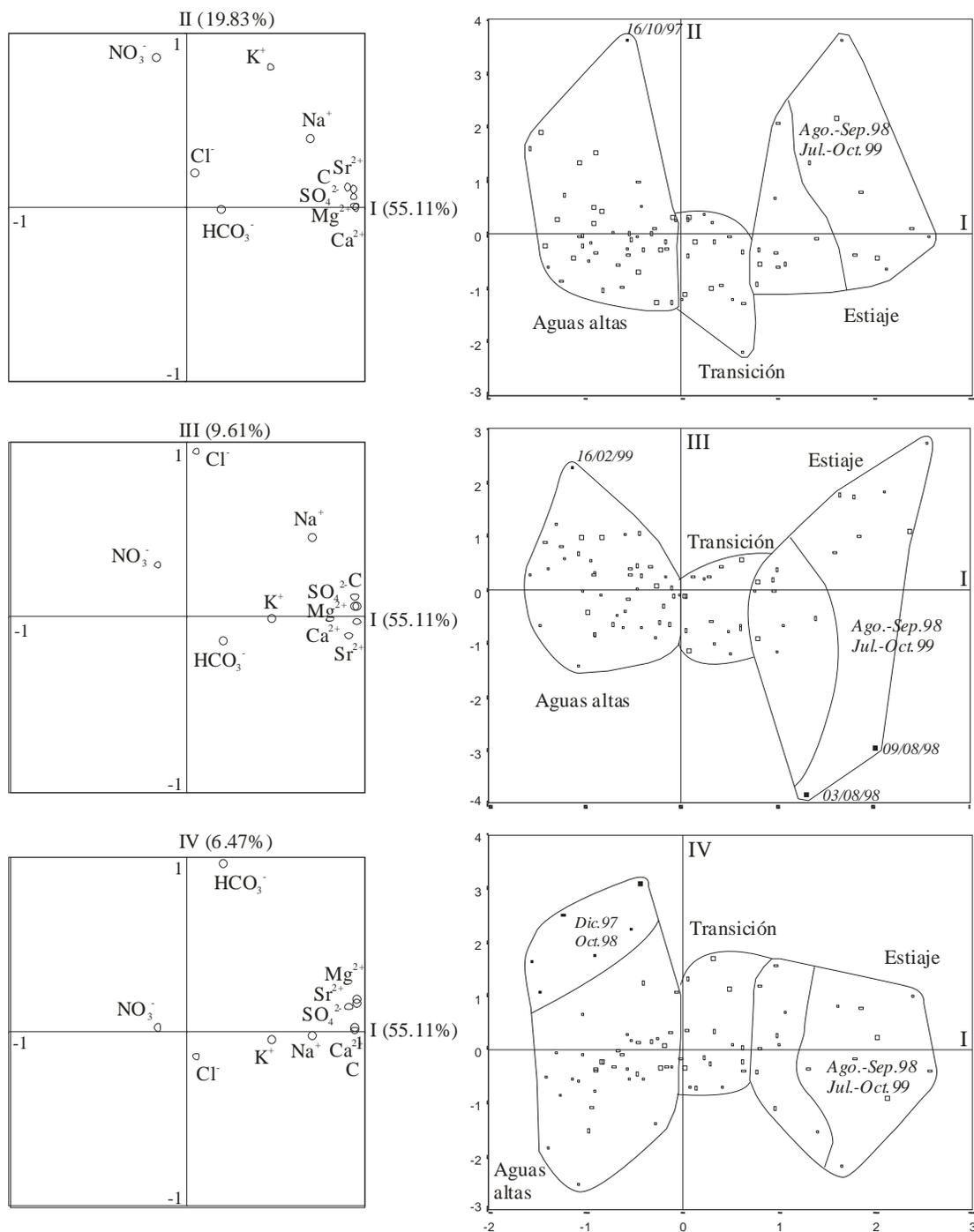


Figura 5.11: Representación de los planos I-II, I-III y I-IV del ACP de la Regata Albiztur (Gain) para las 10 variables.

El ACP realizado para las muestras tomadas en la Regata Albiztur (Gain) ha puesto de manifiesto que:

- El estiaje proporciona aguas más mineralizadas produciéndose una dilución generalizada en los períodos de aguas altas. Los períodos de estiaje aportan mayores contenidos en  $K^+$  y  $Na^+$ .

- Las primeras crecidas del año hidrológico provocan en la regata un aumento del contenido en  $NO_3^-$  y los episodios de lluvias intensas y períodos nivales originan en la regata el aumento en el contenido en  $HCO_3^-$  y un incierto comportamiento del  $Cl^-$  ya que a veces aumenta, en otoño, y otras disminuye.

### ***RELACIÓN ENTRE IGARAN Y GAIN***

Los diagramas de Schoeller-Berkaloff (figura 5.1) ponen de manifiesto la similitud hidroquímica entre la surgencia de Igaran y la Regata Albiztur en Gain, similitud, por otra parte, lógica ya que la mayor parte (80%), en términos medios anuales, del agua que pasa por Gain proviene de Igaran. La tabla 5.7 muestra también valores similares para ambos puntos aunque con concentraciones en la regata ligeramente superiores en  $K^+$ ,  $Na^+$  y  $NO_3^-$  e inferiores en  $HCO_3^-$ ,  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ , y  $SO_4^{2-}$ . Parece claro que el resto del agua (20%) que forma la regata provoca cierta dilución en los iones provenientes de la mineralización del sistema acuífero de Igaran y un aumento en los componentes de origen externo (de usos del suelo, sobre todo).

Los ACP realizados para Igaran y Gain evidencian que el  $HCO_3^-$  no presenta el mismo comportamiento para ambos puntos. Si bien en Igaran el  $HCO_3^-$  forma parte directa en el factor I (mineralización) estando significativamente relacionado con una buena parte del resto de elementos, en la regata aparece mucho menos relacionado, no sirviendo de forma clara para la discretización de las muestras.

En estiaje, las aguas de la regata (en Gain) presentan mayores contenidos en  $Na^+$ ,  $K^+$  y  $NO_3^-$  mientras que las aguas de Igaran experimentan un aumento, sobre todo, de  $Na^+$ . Los aumentos de caudal del inicio del año hidrológico aportan mayores contenidos en estos elementos en la regata que en Igaran, consecuencia de la mayor influencia de los usos del suelo en la regata. La evolución de  $Cl^-$  en la regata es a todas luces incierta ya que no presenta una pauta de comportamiento general. Si bien en Igaran la precipitación en forma de nieve provocaba el aumento de  $Cl^-$  en la surgencia, en la regata no existe relación clara alguna entre ese ion y las condiciones climáticas o de caudales. Según la tabla 5.7 el valor medio de la concentración en cloruros es igual en Igaran y en la regata aunque el valor máximo es ligeramente superior en la regata, lo que indica el origen externo de este ion.

### 5.6.4. PRESA

El ACP de la presa (situada aguas abajo del manantial de Salubita, figura 4.2) se ha realizado con 87 muestras (tabla 5.7) tomadas entre Marzo de 1997 y Noviembre de 1999, para lo cual se han considerado 11 variables ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$ , caudal y conductividad).

Los cuatro primeros factores explican el 76.97% de la varianza (34.25% el primero, 17.65% el segundo, 14.94% el tercero y 10.13% el cuarto). Este peso de los factores es muy similar al resultante en Salubita (tabla 5.8). Según la matriz de correlaciones (tabla 5.12), la conductividad está bien correlacionada, positivamente, con  $Mg^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  estando ambos bien relacionados, positivamente, entre ellos, y lo está negativamente con el caudal. Por su parte,  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$  están también bien relacionados entre sí y en otra medida con  $Mg^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$  (la relación  $Ca^{2+}$ -  $Mg^{2+}$  es notable). También hay una buena relación entre  $NO_3^-$  y  $K^+$ . El  $HCO_3^-$  y el  $Cl^-$  no presentan relaciones significativas. El  $Sr^{2+}$  guarda relación con  $Mg^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$ . Esta matriz es acorde con la previamente establecida en Salubita (tabla 5.8).

La matriz de componentes (tabla 5.12) evidencia que el eje I viene marcado por  $Mg^{2+}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad en la parte positiva y caudal en la parte negativa. El factor II está determinado, en su parte positiva, por  $K^+$ ,  $NO_3^-$  y caudal. El eje III está marcado por  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$  en su parte positiva, y, por último, el factor IV está determinado por el  $Cl^-$ , en su parte positiva.

MATRIZ DE CORRELACIONES											
	$HCO_3^-$	$K^+$	$Na^+$	$Mg^{2+}$	$Ca^{2+}$	$Cl^-$	$SO_4^{2-}$	$NO_3^-$	$Sr^{2+}$	C	Q
$HCO_3^-$	1										
$K^+$	0.205	1									
$Na^+$	0.122	-0.166	1								
$Mg^{2+}$	0.185	0.056	0.434	1							
$Ca^{2+}$	0.400	0.257	<b>0.509</b>	<b>0.738</b>	1						
$Cl^-$	-0.274	-0.114	0.268	-0.090	-0.162	1					
$SO_4^{2-}$	-0.156	-0.141	0.468	<b>0.580</b>	0.354	0.223	1				
$NO_3^-$	0.010	0.486	-0.217	-0.174	-0.100	0.375	-0.150	1			
$Sr^{2+}$	0.029	-0.059	0.252	0.496	0.390	-0.245	0.461	-0.323	1		
C	-0.094	0.152	0.200	<b>0.528</b>	0.424	0.002	<b>0.546</b>	0.022	0.288	1	
Q	0.096	0.440	-0.395	<b>-0.516</b>	-0.213	-0.056	<b>-0.544</b>	0.334	-0.476	-0.371	1

MATRIZ DE COMPONENTES					VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	4	Factor	Total	% de la var.	% acum.
$HCO_3^-$	-0.159	0.100	<b>0.828</b>	-0.189	1	3.77	34.25	34.25
$K^+$	0.072	<b>0.862</b>	0.202	-0.172	2	1.94	17.65	51.90
$Na^+$	0.374	-0.344	<b>0.527</b>	0.513	3	1.64	14.94	66.85
$Mg^{2+}$	<b>0.787</b>	-0.054	0.413	-0.025	4	1.11	10.13	76.97
$Ca^{2+}$	<b>0.572</b>	0.118	<b>0.709</b>	-0.049	5	0.59	5.33	82.30
$Cl^-$	-0.007	0.072	-0.179	<b>0.918</b>	6	0.57	5.22	87.52
$SO_4^{2-}$	<b>0.800</b>	-0.185	-0.027	0.290	7	0.37	3.41	90.93
$NO_3^-$	-0.117	<b>0.782</b>	-0.106	0.375	8	0.34	3.05	93.98
$Sr^{2+}$	<b>0.646</b>	-0.274	0.108	-0.326	9	0.28	2.51	96.49
C	<b>0.814</b>	0.230	-0.085	-0.002	10	0.24	2.21	98.71
Q	<b>-0.623</b>	<b>0.551</b>	0.029	-0.115	11	0.14	1.29	100.00

*Tabla 5.12: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos de la presa (n=87) para las 11 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$ , conductividad y caudal.*

En la figura 5.12 se muestran los planos I-II, I-III y I-IV de las unidades estadísticas. En todos ellos se distinguen claramente los tres grupos de aguas (estiaje, transición y aguas altas) definidos ya en los ACP anteriores. El plano I-II muestra tres puntos desplazados hacia la parte positiva del eje II ( $K^+$  y  $NO_3^-$ ) uno por cada grupo de aguas diferentes. Durante el estiaje se produce el día 01/10/98 (figura 5.8) un pequeño aumento de caudal en el que aumenta ligeramente el contenido en  $NO_3^-$ . Una semana más tarde los caudales aumentan de forma que el día 08/10/98 (punto desplazado hacia arriba en el ámbito de las aguas altas) (figura 5.8) se ha producido una dilución de la mineralización aumentando en las aguas el contenido en  $K^+$  y  $NO_3^-$ . En ese mismo plano, en el dominio de las aguas de transición aparece otro punto (16/11/99) que corresponde a la muestra tomada durante la primera crecida del año hidrológico 1999-00 (figura 5.8), momento caracterizado por la presencia de nevadas, lo que provoca un aumento del caudal así como de  $K^+$  y  $NO_3^-$ . En los tres casos son situaciones de crecidas, aunque con muestras tomadas en diferentes niveles de caudal, al principio del año hidrológico, momento más propicio para el arrastre de estos elementos externos.

También en este plano I-II se observa la mayor influencia del  $SO_4^{2-}$  en las aguas de los estiajes más pronunciados (Agosto-Septiembre de 1998 y Julio-October de 1999), aspecto este último también observable en el plano I-III, siempre en relación con la posición ocupada en los planos por el  $SO_4^{2-}$ .

En el plano I-III, el grupo de muestras que ocupa la mitad superior del dominio de las aguas altas corresponde a las muestras tomadas durante episodios de intensas lluvias acompañados de nieve (figura 5.8) que provocan un aumento de  $HCO_3^-$  en las aguas. La muestra situada en la parte inferior izquierda del plano I-III (09/03/99) se tomó durante una crecida producida durante un período de aguas altas (figura 5.8) que produjo una disminución generalizada de la mineralización (y de  $NO_3^-$ ).

La **mineralización** viene caracterizada por el factor I mientras que el factor II indica la influencia en las aguas de la presa de **elementos externos**. El factor III, marcado principalmente por  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$ , parece estar ligado también a la mineralización aunque de origen diferente, no ligada directamente al factor I, sino a influencia de **condiciones meteorológicas**, sobre todo en situaciones adversas (episodios nivales). El factor IV, por su parte, está marcado por el  $Cl^-$ , de **origen meteórico**, cuyo comportamiento en la presa es bastante irregular, cosa lógica habida cuenta que las aguas de la presa poseen dos orígenes principales (Salubita y Gain) en cuyas aguas el  $Cl^-$  presenta también un comportamiento errático.

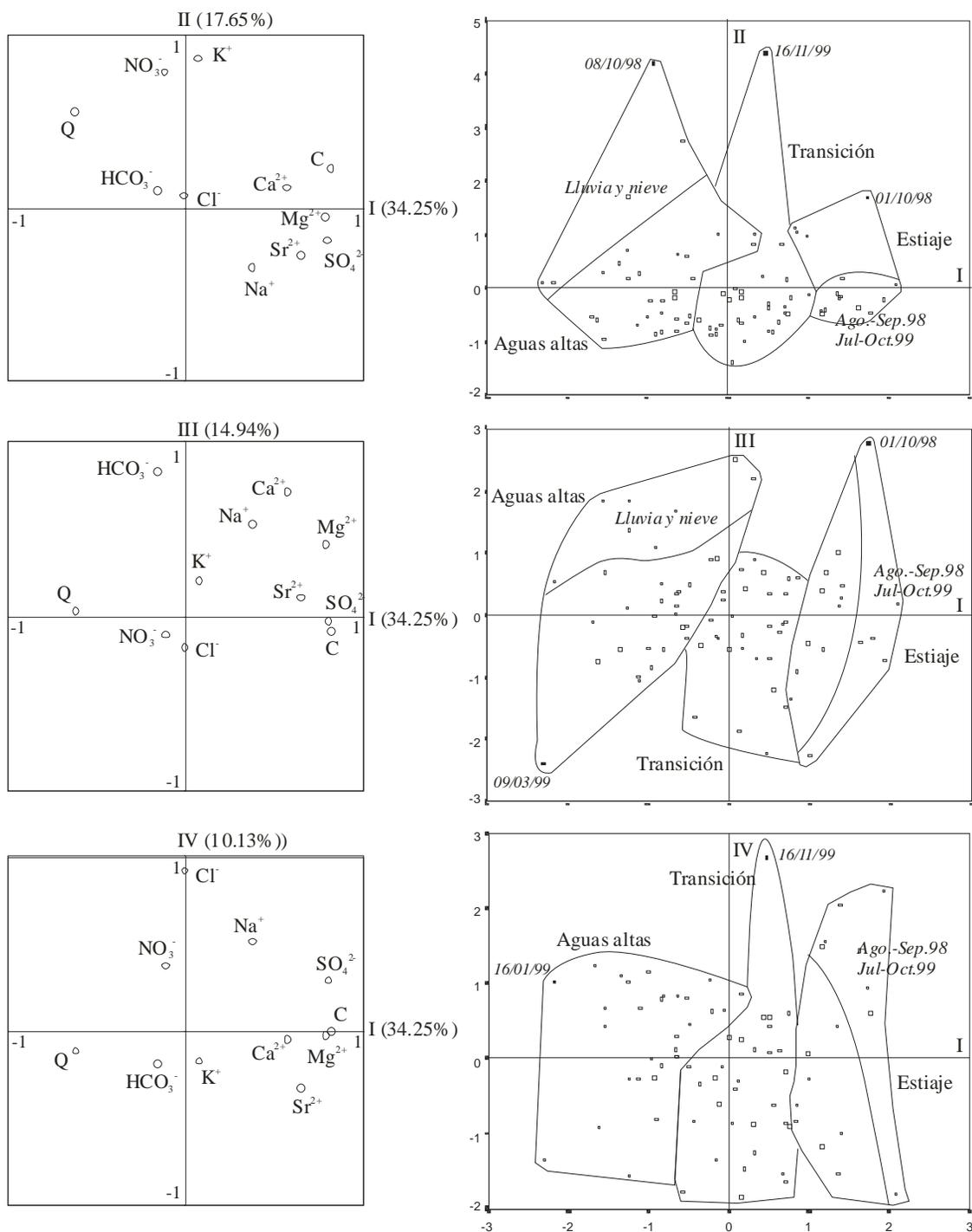


Figura 5.12: Representación de los planos I-II, I-III y I-IV del ACP de la presa para las 11 variables.

### RELACIÓN ENTRE LA PRESA, GAIN Y SALUBITA

Durante la mayor parte del año las aguas que pasan por la presa son una mezcla de las aguas drenadas por el manantial de Salubita y las aguas de la Regata Albiztur, que provienen en su mayor parte del manantial de Igaran. Durante la época de estiaje el agua que pasa por la presa proviene en su totalidad de la surgencia de Salubita. Lógicamente, en vistas a esta relación, el ACP realizado para las aguas de la presa pone de manifiesto la diferente importancia relativa temporal de esos dos aportes de aguas de diferente origen que se produce a lo largo del año, por ejemplo el peso de las aguas de la Regata Albiztur en la presa en épocas de estiaje. La tabla 5.13 muestra las variables que representan cada factor en cada punto de agua.

FACTOR	GAIN	SALUBITA	PRESA
I	Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , Na <sup>+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Sr <sup>2+</sup> , C	Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Sr <sup>2+</sup> , C, <b>Q</b>	Mg <sup>2+</sup> , Ca <sup>2+</sup> , SO <sub>4</sub> <sup>2-</sup> , Sr <sup>2+</sup> , C, <b>Q</b>
II	K <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	K <sup>+</sup> , NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>
III	Cl <sup>-</sup> , (Na+)	<b>HCO<sub>3</sub><sup>-</sup></b> , Cl <sup>-</sup>	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup> , Na <sup>+</sup> , (Ca+)
IV	HCO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	Na <sup>+</sup>	Cl <sup>-</sup> , (Na+)

**Tabla 5.13: Relación entre las variables y los factores para los ACP de Gain, Salubita y la presa. Los parámetros en negrita indican correlación negativa.**

Los factores I y II son idénticos para Salubita y para la presa, aunque el calcio en la presa está también representado en el factor III. La única diferencia de Gain es la presencia en el factor I del ion Na<sup>+</sup>, que aparece también en el factor III. En cualquier caso, los dos primeros factores son prácticamente iguales en los tres casos (I: mineralización; II: influencia externa, sobre todo de los usos del suelo). El resto de los factores para la presa son una combinación de los factores de Salubita y Gain. Los HCO<sub>3</sub><sup>-</sup> y el Na<sup>+</sup>, que en Gain y Salubita representan el factor IV, en la presa aparecen junto al Ca<sup>+</sup> representando el factor III. El Cl<sup>-</sup> adopta su propia entidad y, desde el factor III de Gain y Salubita pasa a caracterizar el factor IV de la presa. En resumen, se puede manifestar que los factores del ACP realizado para las muestras de la presa corresponden a:

- I: **mineralización** que caracteriza la surgencia de Salubita
- II: **aportes externos** (usos del suelo)
- III y IV: **aportes externos** (posible influencia atmosférica de diversos procesos)

La influencia de esos dos aportes (Salubita y Gain) sobre las aguas de la presa se evidencia de forma clara también en los datos estadísticos de la tabla 5.7. Como se puede comprobar, los valores correspondientes a la presa quedan comprendidos entre los valores de Gain y de Salubita, aproximándose más a los de la surgencia. No hay que olvidar que el 85% del agua, a escala anual, de la presa proviene de la surgencia de Salubita (figura 4.4).

### 5.6.5. OSINONDO

El ACP la analítica de las aguas que se infiltran en el sumidero de Osinondo (Bidegoian) se ha realizado a partir de 79 muestras (tabla 5.7) de agua tomadas entre Enero de 1997 y Julio de 2000 para lo cual se han considerado 10 variables ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad).

La tabla 5.14 muestra que los tres primeros factores del ACP explican el 79.73% de la varianza total (51.78% el primero, 18.12% el segundo y 9.83% el tercero). Según la matriz de correlaciones de esa misma tabla, la conductividad está bien correlacionada, positivamente, con  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$  y  $Na^+$ . Estos cinco elementos se correlacionan bien entre ellos. El  $Mg^{2+}$  aparece bien correlacionado únicamente con el  $HCO_3^-$ , y peor con el  $Ca^{2+}$ . El  $SO_4^{2-}$ , que en los ACP anteriores aparece siempre fuertemente unido a otros elementos, se muestra aquí aislado y sin correlacionarse significativamente con ninguna otra especie iónica, si no es con  $Sr^{2+}$  (0.436) y con  $Mg^{2+}$  (0.354). El  $NO_3^-$  tampoco muestra relación alguna con ninguna otra variable. Evidentemente, la hidroquímica de las aguas de Osinondo muestra importantes diferencias en comparación con los aspectos hidroquímicos del resto de las aguas tratadas hasta ahora.

El eje I (tabla 5.14 y figura 5.13) está determinado por  $Ca^{2+}$ ,  $K^+$ ,  $Cl^-$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y conductividad en su parte positiva. El factor II está marcado, también en su parte positiva, por  $Sr^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Mg^{2+}$  y en menor medida por  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$ . Finalmente, el eje III está marcado claramente por el  $NO_3^-$  en su parte positiva.

MATRIZ DE CORRELACIONES										
	HCO3	K	NA	MG	CA	CL	SO4	NO3	SR	C
HCO3	1									
K	<b>0.596</b>	1								
NA	<b>0.624</b>	<b>0.918</b>	1							
MG	<b>0.658</b>	0.298	0.252	1						
CA	<b>0.823</b>	<b>0.571</b>	<b>0.559</b>	0.492	1					
CL	<b>0.562</b>	<b>0.898</b>	<b>0.954</b>	0.313	0.457	1				
SO4	0.110	-0.038	-0.150	0.354	0.117	-0.049	1			
NO3	-0.017	0.278	0.180	0.085	0.088	0.203	-0.050	1		
SR	<b>0.545</b>	0.312	0.292	0.400	<b>0.565</b>	0.196	0.436	-0.058	1	
C	<b>0.719</b>	<b>0.842</b>	<b>0.850</b>	0.425	<b>0.641</b>	<b>0.795</b>	0.130	0.194	0.478	1

MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO3	<b>0.689</b>	<b>0.556</b>	-0.219	1	5.18	51.78	51.78
K	<b>0.927</b>	0.105	0.177	2	1.81	18.12	69.90
NA	<b>0.977</b>	0.018	0.047	3	0.98	9.83	79.73
MG	0.276	<b>0.725</b>	0.063	4	0.74	7.45	87.18
CA	<b>0.625</b>	<b>0.540</b>	-0.137	5	0.61	6.06	93.24
CL	<b>0.923</b>	0.027	0.137	6	0.30	2.99	96.23
SO4	-0.244	<b>0.772</b>	0.142	7	0.16	1.63	97.86
NO3	0.171	-0.001	<b>0.938</b>	8	0.11	1.14	99.00
SR	0.260	<b>0.753</b>	-0.169	9	0.08	0.84	99.84
C	<b>0.857</b>	0.341	0.086	10	0.02	0.16	100.00

Tabla 5.14: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=79) de las aguas que se infiltran en el sumidero de Osinondo (Bidegoian) para las 10 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad. (C: conductividad).

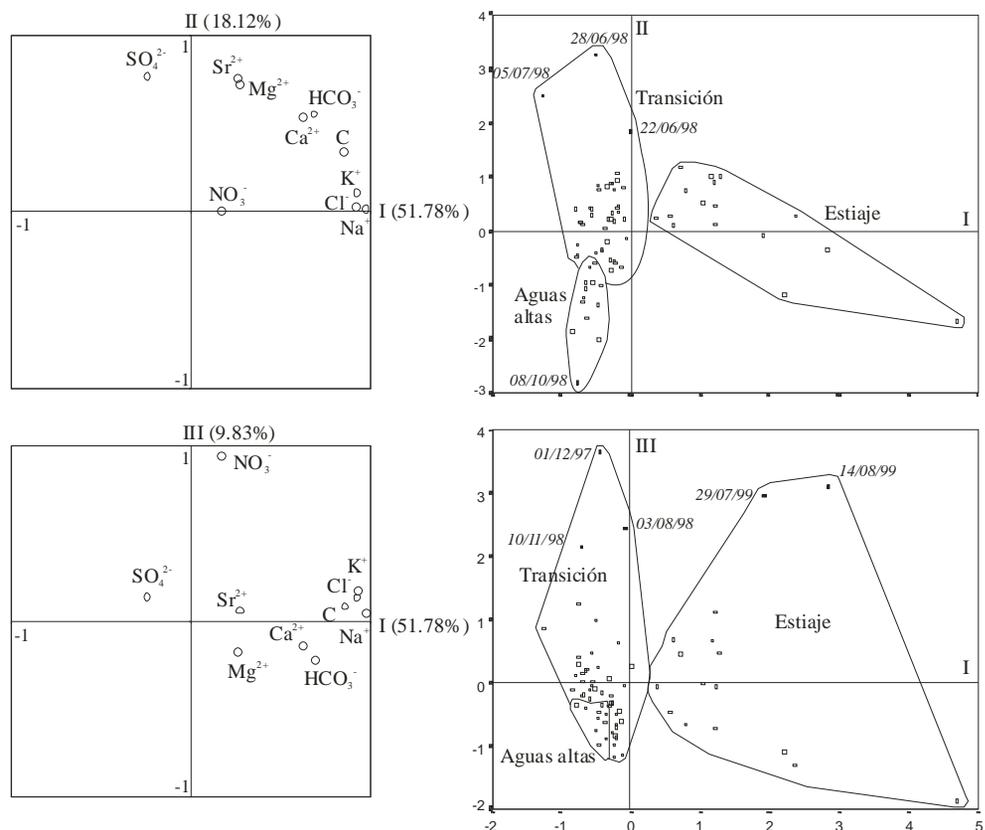
Los planos I-II y I-III de las unidades estadísticas representados en la figura 5.13 permiten diferenciar las tres situaciones (estiaje, transición y aguas altas) en las que se tomaron las muestras. Estos planos no diferencian gráficamente las tres situaciones en la forma en que lo hacían en los ACP realizados hasta ahora. Aquí, las aguas correspondientes a la transición y a las aguas altas vienen separadas por el eje II y el eje III y no por el que explica la mayor parte de la varianza (el factor I). Pero, como se comenta más adelante, hay que tener en cuenta que ahora es distinto el significado de los ejes.

El plano I-II muestra el aumento en estiaje de los elementos que representan el lado positivo del eje I. En el grupo de las aguas del período de transición hay tres puntos (22/06/98, 28/06/98 y 05/07/98) desplazados hacia los valores más positivos del eje II (mayores contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$ ). Las tres muestras (figura 5.8) fueron tomadas durante un período de tiempo caracterizado por lluvias de poca intensidad. Este mismo plano pone en evidencia la existencia de un punto, en el dominio de las aguas altas, desplazado hacia valores negativos de los ejes I y II que corresponde a la muestra recogida el 08/10/98, durante la primera crecida importante del año hidrológico (figura 5.8) que provoca una dilución generalizada.

En el plano I-III (figura 5.13) se observan, en el dominio del estiaje, dos puntos desplazados hacia el extremo positivo del eje III (aumento de la concentración de  $\text{NO}_3^-$ ). Ambos puntos corresponden a muestras recogidas durante la decrecida (29/07/99 y 14/08/99) de dos pequeños picos de caudal (figura 5.8) originados tras dos períodos de lluvia aislada y poco intensa. El punto situado en el extremo positivo de ese mismo eje, en el dominio de las aguas de transición, se caracteriza también por su alto contenido en  $\text{NO}_3^-$  y representa la muestra tomada el 01/12/97 (figura 5.8, durante la decrecida posterior a la importante crecida que se produjo días antes. Las otras dos muestras (10/11/98 y 03/08/98) próximas al punto anterior, en el dominio de la transición, representan también sendos momentos de decrecida. En cualquier caso, todas estas aguas que presentan altos valores en  $\text{NO}_3^-$  se han recogido en momentos de verano avanzado y comienzos de otoño.

Las aguas del Arroyo Bidania que desaparece en el sumidero de Osinondo proceden principalmente de dos pequeños riachuelos cuyo origen se encuentra en dos manantiales (Aoztegi e Intxaurbe) situados al Oeste y al Norte de Bidegoian (figura 4.1). El arroyo se encuentra expuesto, por supuesto, a otro tipo de influencias externas (lluvias, nieve, escorrentía superficial...) que repercuten en la evolución hidroquímica de las aguas. De acuerdo con el ACP, el factor I representa sobre todo las **influencias externas**, meteóricas fundamentalmente ( $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Cl}^-$ ), del sistema, aunque también indica parte de la **mineralización** ( $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{HCO}_3^-$ ), influencia del manantial de Intxaurbe. El factor II representa también la **mineralización**, aunque su origen es diferente. En este caso es el  $\text{SO}_4^{2-}$  (junto a  $\text{Sr}^{2+}$  y  $\text{Mg}^{2+}$ ) el marcador de esa otra mineralización cuyo origen se sitúa en el manantial de Aoztegi. El factor III, representado por el  $\text{NO}_3^-$ , representaría otro tipo de **influencia externa**, las derivadas de

los **usos del suelo**. Como se ve, el significado de los ejes ha cambiado. En Osinondo el factor principal (I) está caracterizado por elementos externos, propios de un curso superficial sometido a notables influencias externas.



**Figura 5.13: Representación de los planos I-II y I-III del ACP de Osinondo para las 10 variables.**

El ACP realizado para las muestras de Osinondo permite afirmar lo siguiente:

- Estas aguas están fuertemente influenciadas por elementos externos: propio carácter de las lluvias, usos del suelo, falta de sistemas de saneamiento en el perímetro urbano circundante.

- Queda clara la influencia de los dos tipos de mineralización (Aoztegi e Intxaurbe), en referencia a los aportes subterráneos al cauce, sobre las aguas de Osinondo, de forma que pequeños aumentos de caudal durante el estiaje producen un aumento de la influencia de Aoztegi, principalmente con aumentos de  $\text{SO}_4^{2-}$ .

- Aumentos de caudal importantes originan la dilución generalizada de los elementos mayoritarios, sobre todo de los internos, aunque las primeras crecidas del año hidrológico así como pequeños aumentos de caudal durante períodos de estiaje provocan el aumento en la concentración de  $\text{NO}_3^-$ .

### 5.6.6. CUATERNARIO

Los materiales cuaternarios que rellenan gran parte de la depresión de Bidania están representados por arenas, arcillas y gravas. Las aguas que se infiltran, o fluyen, a través de estos materiales, unidas a las que llegan hasta ellos a favor de los materiales calizos circundantes, experimentan un movimiento lento produciendo cierto retardo sobre los episodios atmosféricos. Conviene incidir en el hecho de que se trata de una zona de importante actividad agrícola y ganadera.

El ACP de las aguas de la depresión de Bidania se ha desarrollado a partir de 51 muestras (tabla 5.7) tomadas entre Agosto de 1997 y Julio de 2000 en un pequeño manantial (Q<1 l/s) que drena los materiales cuaternarios allí presentes. En este caso se han considerado 9 variables ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ ).

Según la tabla 5.15, los dos primeros factores del ACP explican el 51.28% de la varianza total mientras que el tercero y el cuarto explican el 15.63% y el 12.08% respectivamente. Este reparto de la varianza es significativo de una cierta desestructuración de la misma, mucho mayor que la hasta ahora observada en los ACP de otros puntos. La matriz de correlaciones evidencia que, en general, las correlaciones entre las variables son escasas. El  $Ca^{2+}$  y el  $HCO_3^-$  presentan una buena correlación (0.671) y lo mismo ocurre entre el  $SO_4^{2-}$  y el  $Cl^-$  (0.653).

MATRIZ DE CORRELACIONES									
	HCO3	K	NA	MG	CA	CL	SO4	NO3	SR
HCO3	1								
K	-0.229	1							
NA	-0.213	0.163	1						
MG	0.402	0.113	0.097	1					
CA	<b>0.671</b>	-0.337	-0.247	0.278	1				
CL	-0.291	-0.075	0.356	-0.195	0.171	1			
SO4	-0.213	-0.159	0.312	0.054	0.269	<b>0.653</b>	1		
NO3	-0.330	0.185	-0.102	-0.225	-0.091	0.247	0.400	1	
SR	0.160	0.099	0.106	0.331	0.261	0.356	0.341	0.038	1

MATRIZ DE COMPONENTES					VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	4	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO3	-0.317	<b>0.708</b>	0.441	-0.130	1	2.40	26.65	26.65
K	-0.171	<b>-0.726</b>	0.444	0.227	2	2.22	24.62	51.28
NA	0.497	-0.435	0.128	<b>-0.618</b>	3	1.41	15.63	66.91
MG	-0.111	0.126	<b>0.809</b>	-0.209	4	1.09	12.08	78.99
CA	0.174	<b>0.836</b>	0.327	0.105	5	0.64	7.15	86.14
CL	<b>0.892</b>	-0.002	-0.050	0.020	6	0.54	5.99	92.14
SO4	<b>0.878</b>	0.098	0.094	0.155	7	0.37	4.08	96.22
NO3	0.337	-0.232	-0.081	<b>0.808</b>	8	0.22	2.46	98.68
SR	0.425	0.085	0.670	0.088	9	0.12	1.32	100.00

Tabla 5.15: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=51) de las aguas que drenan los materiales cuaternarios de la depresión de Bidania para las 9 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ .

A tenor de los valores reflejados en la tabla, el eje I está determinado por  $Cl^-$  y  $SO_4^{2-}$  en su parte positiva. El eje II se encuentra representado por  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$  en su parte positiva y por  $K^+$  en la negativa. El  $Sr^{2+}$  y el  $Mg^{2+}$  caracterizan el factor III y, por último, el  $NO_3^-$  determina la parte positiva del eje IV y el  $Na^+$  su parte negativa. En cualquier caso, el  $HCO_3^-$  y el  $Na^+$  presentan también cierta

afinidad ( $>0.440$ ) con el eje III, así como el  $\text{Sr}^{2+}$  con el eje I (0.425) y el  $\text{Na}^+$  con el I (0.497) y con el II (-0.435).

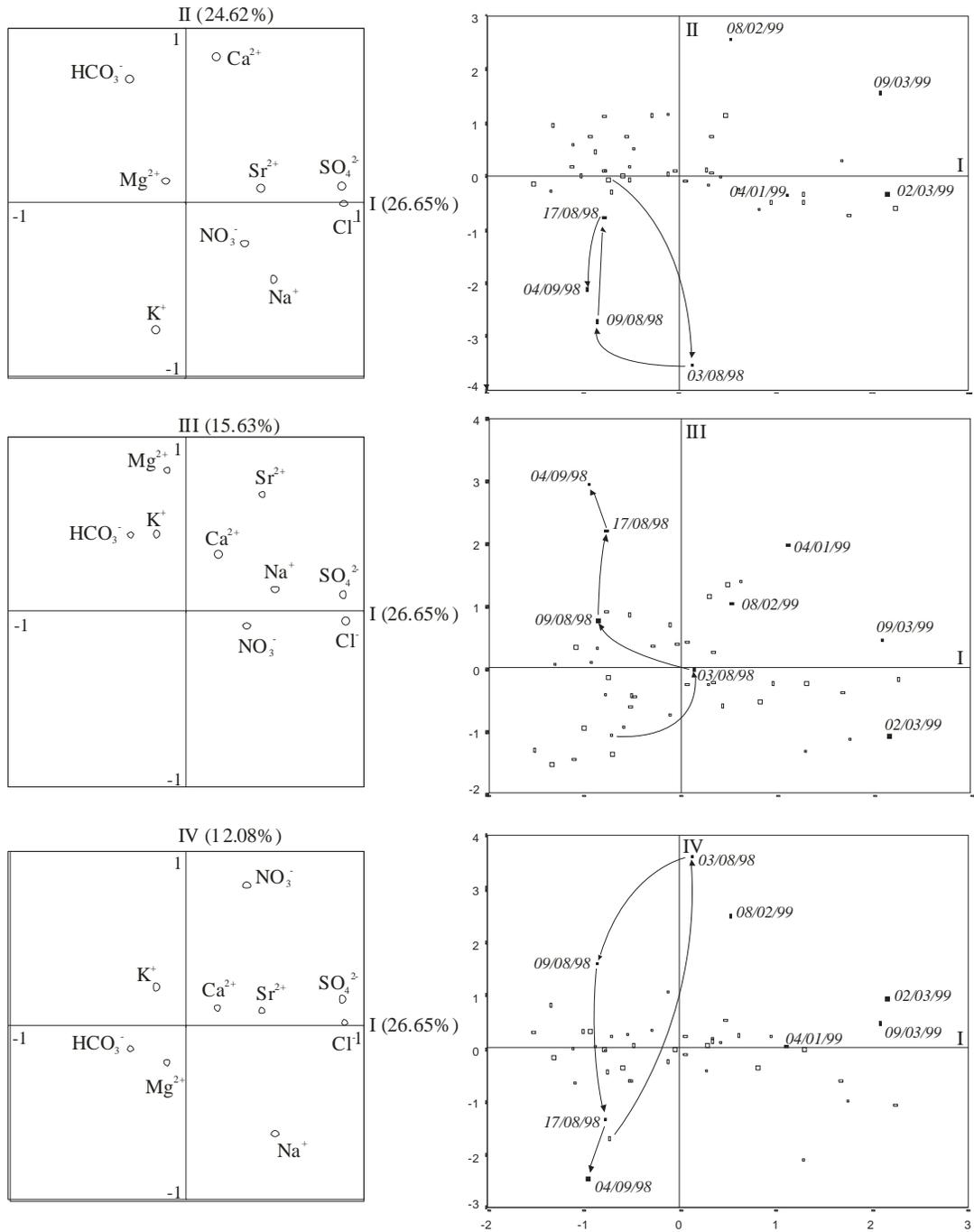
Los planos I-II, I-III y I-IV de las unidades estadísticas se muestran en la figura 5.14. En este caso resulta difícil establecer los límites entre las muestras tomadas en períodos de estiaje, de transición y de aguas altas, ya que las precipitaciones no producen cambios significativos de caudal en el punto de descarga (caudal siempre inferior a 1 l/s). En el plano I-II aparecen dos puntos (08/02/99 y 09/03/99) desplazados hacia la parte positiva del eje II, caracterizados por un aumento de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ . Ambos fueron tomados en el ámbito de las precipitaciones ocurridas entre Enero y Marzo de 1999 (Figura 5.8).

Este mismo plano muestra la presencia de cuatro puntos (03/08/98, 09/08/98, 17/08/98 y 04/09/98), correspondientes a muestreos seguidos en condiciones de recesión (figura 4.8), desplazados hacia valores negativos del eje II. El más próximo a la base del eje II se tomó durante una precipitación lluviosa que originó el aumento del contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{NO}_3^-$  (plano I-IV) en el manantial con una disminución de  $\text{HCO}_3^-$ . La decrecida posterior provoca la recuperación del  $\text{HCO}_3^-$  y la disminución del contenido en  $\text{NO}_3^-$ , evolucionando las siguientes muestras hacia valores menos negativos del eje II y más negativos del eje I; esta evolución se ha marcado sobre todos los planos de la figura 5.14.

El ACP del agua que drena la parte superficial de las arenas, gravas y arcillas de la depresión de Bidania muestra la importante influencia de las actividades agrícolas y ganaderas desarrolladas sobre estos materiales así como del saneamiento, diferentes aportes de manantiales.... Los cuatro ejes parecen tener relación con aspectos no inherentes al agua en sí misma. Todos ellos forman un mosaico, suma de la mezcla de diferentes actividades que pueden aportar al sistema diferentes componentes. No resulta posible definir con claridad el origen de cada elemento o su relación con una actividad concreta ya que algunos de ellos pueden provenir de diferentes actividades. En cualquier caso, se puede afirmar que:

- La precipitación en forma de nieve origina una influencia singular sobre el agua produciendo el aumento de  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  aunque el resto de los iones se comporta de manera ambigua.

- Lluvias producidas en estiaje provocan el aumento en el punto de descarga de la concentración de  $\text{NO}_3^-$ .



**Figura 5.14: Representación de los planos I-II, I-III y I-IV del ACP del agua de los materiales detríticos cuaternarios de la depresión de Bidania para las 9 variables.**

### 5.6.7. SALUBITA/PRESA

Desde el 11 de Noviembre de 1999 hasta el día 22 del mismo mes se tomaron muestras cada 4 horas en el manantial de Salubita y en la presa. Estos datos fueron considerados en otro momento (apartado 4.9) pero se trata ahora de su consideración en el marco de los ACP. La evolución gráfica de todos los elementos se puede observar en la figura 4.54. Los análisis químicos de las 90 muestras recogidas (45 en cada punto) han servido como base para la realización de un ACP detallado cuyos resultados numéricos se muestran en la tabla 5.16. Las variables consideradas fueron 9:  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ .

MATRIZ DE CORRELACIONES									
	HCO3	K	NA	MG	CA	SO4	NO3	SR	CL
HCO3	1								
K	<b>-0.645</b>	1							
NA	<b>0.671</b>	<b>-0.809</b>	1						
MG	<b>0.570</b>	<b>-0.710</b>	<b>0.908</b>	1					
CA	<b>0.672</b>	<b>-0.742</b>	<b>0.829</b>	<b>0.899</b>	1				
SO4	0.478	<b>-0.589</b>	<b>0.788</b>	<b>0.910</b>	<b>0.815</b>	1			
NO3	<b>-0.764</b>	<b>0.925</b>	<b>-0.844</b>	<b>-0.783</b>	<b>-0.829</b>	<b>-0.696</b>	1		
SR	<b>0.570</b>	<b>-0.720</b>	<b>0.899</b>	<b>0.919</b>	<b>0.769</b>	<b>0.840</b>	<b>-0.760</b>	1	
CL	-0.314	<b>0.554</b>	-0.356	-0.395	-0.480	-0.210	<b>0.621</b>	-0.306	1

MATRIZ DE COMPONENTES			VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO3	<b>0.556</b>	-0.510	1	6.61	73.39	73.39
K	-0.606	<b>0.682</b>	2	1.03	11.49	84.88
NA	<b>0.877</b>	-0.370	3	0.60	6.68	91.56
MG	<b>0.921</b>	-0.293	4	0.32	3.58	95.14
CA	<b>0.803</b>	-0.458	5	0.19	2.12	97.26
SO4	<b>0.933</b>	-0.094	6	0.13	1.43	98.69
NO3	-0.669	<b>0.706</b>	7	0.07	0.77	99.46
SR	<b>0.909</b>	-0.241	8	0.03	0.34	99.80
CL	-0.049	<b>0.912</b>	9	0.02	0.20	100.00

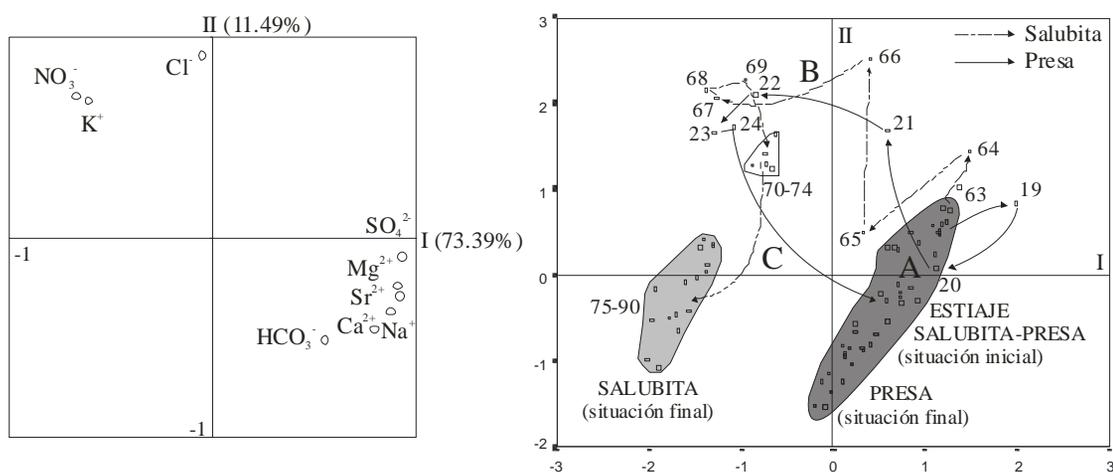
**Tabla 5.16: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=90) de las aguas de la surgencia de Salubita y de la presa para las 9 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ .**

La tabla 5.16 muestra que los dos primeros factores del ACP explican el 84.88% de la varianza total siendo el factor I (73.39%) claramente representativo de la varianza total. Hay que tener en cuenta que se está analizando un episodio concreto, de manera que no se consideran modificaciones que pueden darse a otras escalas de tiempo. Según la matriz de correlaciones, todas las variables presentan, de una manera u otra, buenas correlaciones. Las variables relacionadas con la mineralización ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ ) presentan correlaciones positivas altas entre ellas y lo mismo ocurre con las variables que representan los factores externos ( $K^+$ ,  $NO_3^-$ , y  $Cl^-$ ). Sin embargo, las correlaciones entre los iones de los dos grupos son negativas.

Se trata de un ACP especial puesto que las muestras abarcan el paso entre la situación de final de estiaje del año hidrológico 1998-99 y el inicio del año hidrológico 1999-00. Durante el estiaje las aguas de la presa y las de Salubita muestran un mismo carácter hidroquímico; sin embargo, el aumento de caudal y la incursión hacia las características hidrológicas posteriores al inicio del año hidrológico

separan ambos grupos de aguas, de forma que las aguas de la presa vuelven a la situación inicial y las de Salubita se quedan definiendo su propio dominio (figura 5.15).

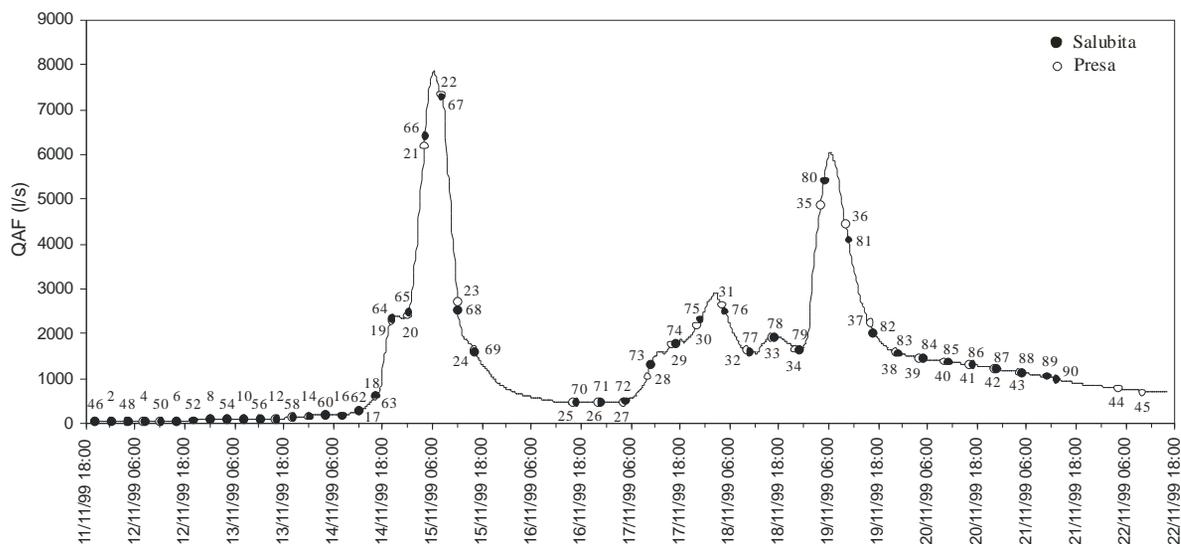
El factor I representa la **mineralización** y el factor II la influencia en el sistema de **componentes externos**. El plano I-II (figura 5.15) permite distinguir con neta claridad la evolución hidroquímica de las aguas de Salubita de las de la presa. La figura 5.16, por su parte, muestra con exactitud la situación hidrológica de cada muestra (las muestras 1-45 son de la presa y 46-90 de Salubita). La propia evolución hidroquímica se puede dividir en tres etapas:



**Figura 5.15: Representación del plano I-II del ACP del agua de Salubita y de la presa durante la transición del año hidrológico 1998-99 y 1999-00 para las 9 variables.**

- A (estiaje): La Regata Albiztur se infiltra en su totalidad aguas arriba del manantial de Salubita. El agua que pasa por la presa proviene de la surgencia de Salubita (influenciado por la regata). A este período corresponden las muestras 1-18 y 46-62 de la figura 5.16. Se trata del grupo de puntos A de la figura 5.15.

- B (transición): Una vez que se producen las primeras precipitaciones y el caudal comienza a aumentar, empieza a producirse una evolución hidroquímica prácticamente paralela para ambos grupos de aguas (Salubita: muestras 63 a 69; presa: 19 a 24). Las aguas que ahora llegan a la presa provienen también de la regata pero el agua que sale por la surgencia no posee ya influencia de la misma. Los dos evolucionan hacia valores positivos del eje II y negativos del eje I: las aguas presentan mayores contenidos en NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, K<sup>+</sup> y Cl<sup>-</sup>. Notar que los contenidos máximos de K<sup>+</sup> y NO<sub>3</sub><sup>-</sup> se producen en Salubita entre las muestras 67 a 69, período en el que el *flujo rápido* está presente en la surgencia (apartado 4.9. y figura 4.54).



**Figura 5.16: Situación hidrológica de las muestras tomadas en el manantial de Salubita y en la presa durante la transición del año hidrológico 1998-99 y 1999-00.**

- C (recuperación): Las aguas de Salubita, después de permanecer durante 2 días en esa situación (muestras 70 a 74) se desplazan finalmente hacia valores negativos de los ejes I y II, aguas poco mineralizadas, manteniéndose en ese ámbito durante el resto del período considerado. Las aguas de la presa vuelven a su situación inicial a partir de la muestra 25 y se mantienen ahí a pesar de que se producen nuevas precipitaciones y aumentos de caudal. Los altos contenidos de  $K^+$  y  $NO_3^-$  duran menos tiempo en las aguas de la presa que en las de Salubita, debido a la influencia de la regata.

### 5.6.8. IGARAN/PRESA

Al igual que en el caso anterior, se muestrearon la presa y el manantial de Igaran, en este caso a intervalos de entre 3 y 8 horas desde el 27 de Marzo hasta el 1 de Mayo de 2000. Se recogieron 100 muestras en total (41 en la presa y 59 en Igaran). Un análisis detallado de parte de esta información se llevó a cabo en el apartado 4.9 (figura 4.55). Durante el mes largo (36 días) que duró el muestreo se registraron fuertes precipitaciones que originaron tres picos importantes en el caudal (figura 5.18). Evidentemente, las condiciones iniciales de este muestreo y el del comentado en el apartado 5.6.7 son diferentes ya que ahora la situación hidrológica inicial no es de estiaje sino de un momento de aguas medias en el seno del avanzado año hidrológico. Se realizó un ACP basado en las 100 muestras recogidas para el cual se consideraron las variables que aparecen en la primera columna de la matriz de correlaciones de la tabla 5.17. En esta misma tabla se muestran los resultados obtenidos mediante el ACP.

MATRIZ DE CORRELACIONES									
	HCO3	K	NA	MG	CA	CL	SO4	NO3	SR
HCO3	1								
K	0.238	1							
NA	-0.481	-0.350	1						
MG	0.449	0.291	-0.449	1					
CA	<b>0.604</b>	0.078	-0.072	<b>0.764</b>	1				
CL	-0.329	-0.010	<b>0.651</b>	-0.065	0.061	1			
SO4	0.319	0.110	-0.236	<b>0.941</b>	<b>0.813</b>	0.104	1		
NO3	-0.321	0.484	0.368	-0.339	-0.261	<b>0.590</b>	-0.338	1	
SR	0.245	0.108	-0.085	<b>0.822</b>	<b>0.803</b>	0.064	<b>0.927</b>	-0.315	1

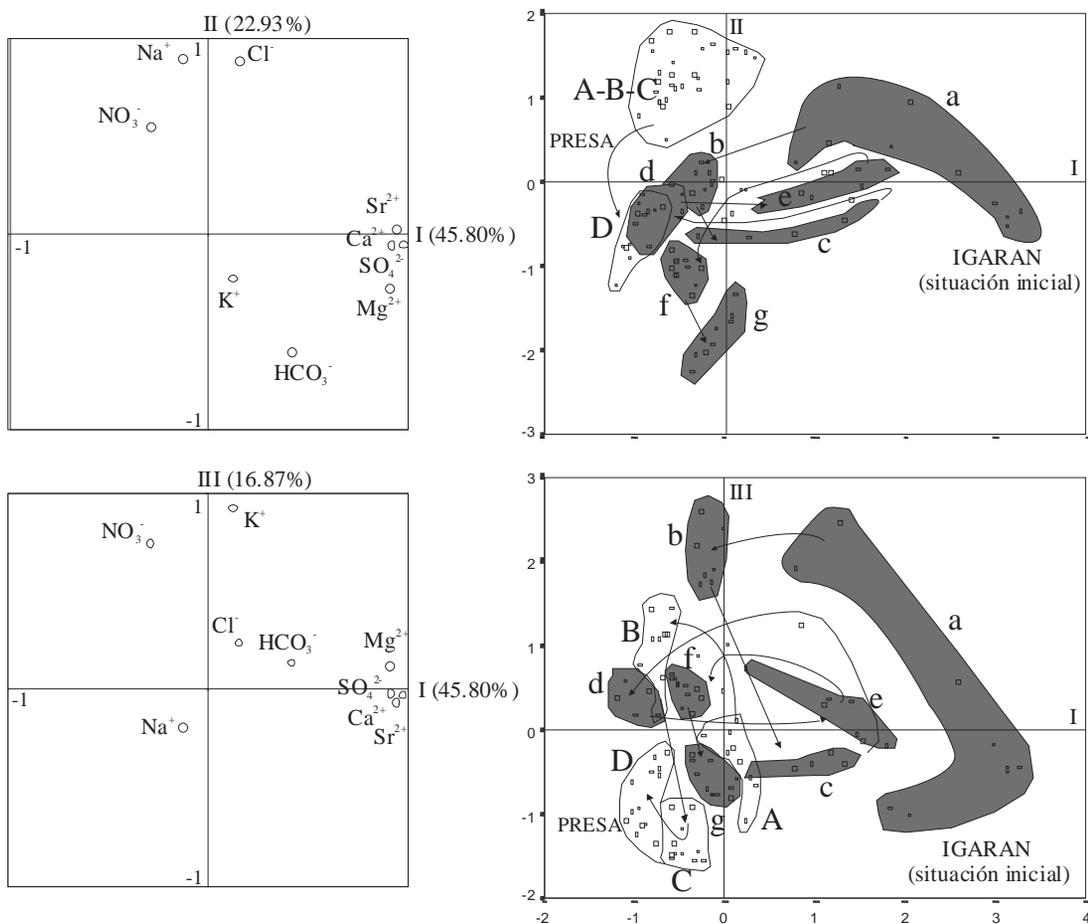
MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO3	0.417	<b>-0.603</b>	0.138	1	4.12	45.80	45.80
K	0.124	-0.227	<b>0.925</b>	2	2.06	22.93	68.73
NA	-0.125	<b>0.889</b>	-0.192	3	1.52	16.87	85.60
MG	<b>0.907</b>	-0.283	0.122	4	0.72	8.05	93.65
CA	<b>0.912</b>	-0.062	-0.016	5	0.32	3.55	97.20
CL	0.154	<b>0.879</b>	0.242	6	0.14	1.53	98.72
SO4	<b>0.972</b>	-0.056	-0.027	7	0.08	0.84	99.56
NO3	-0.288	0.546	<b>0.746</b>	8	0.03	0.35	99.91
SR	<b>0.939</b>	0.019	-0.065	9	0.01	0.09	100.00

**Tabla 5.17: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=100) de las aguas de la surgencia de Igaran y de la presa para las 9 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ .**

Según la tabla los tres primeros factores del ACP explican el 85.6% de la varianza total. El  $Ca^{2+}$  y el  $HCO_3^-$  están bien correlacionados positivamente. El  $Na^+$  y el  $Cl^-$  también muestran una buena correlación positiva. El  $SO_4^{2-}$  se correlaciona muy bien, también positivamente, con  $Ca^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Sr^{2+}$ , así como todos estos entre sí. El  $NO_3^-$  muestra una buena relación, positiva, con el  $Cl^-$ .

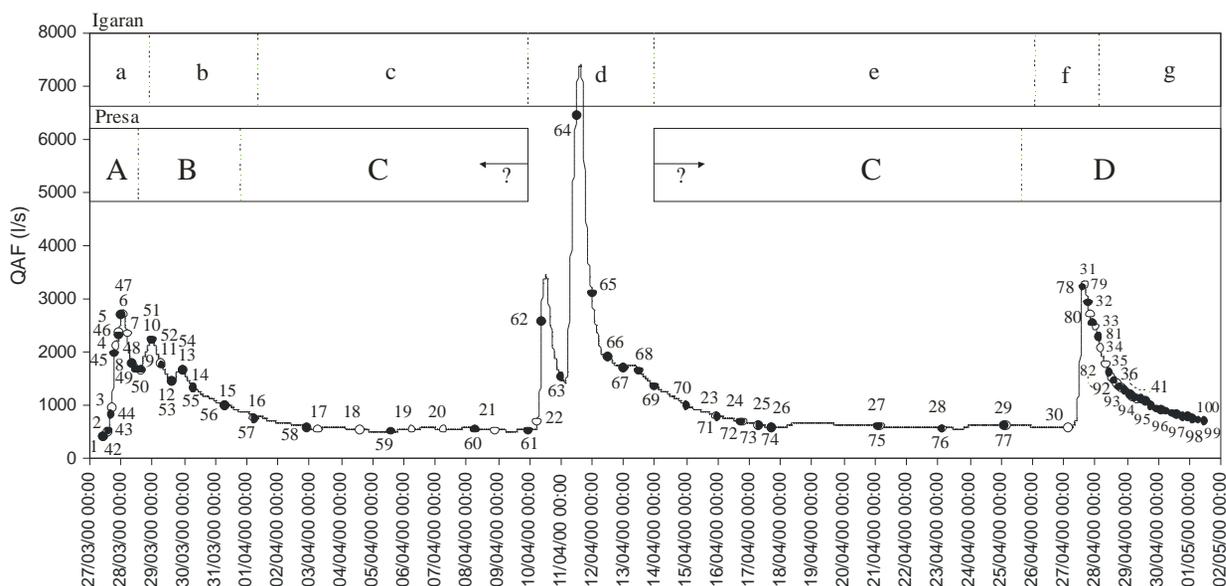
El factor I representa la **mineralización** y los factores II y III la influencia en el sistema de **componentes externos** diversos (meteóricos -  $Cl^-$  y usos del suelo -  $NO_3^-$ ). En los planos I-II y I-III (figura 5.17) se ha marcado esquemáticamente la evolución hidroquímica registrada en ambos grupos de aguas a lo largo del período de muestreo. En la figura 5.18 se localiza cada muestra sobre el hidrograma registrado en la estación de aforos (presa) con el fin de ver gráficamente la situación hidrológica de cada punto.

Tanto en el plano I-II como en el I-III salta a la vista la homogeneidad hidroquímica de las muestras de la presa en comparación con las de Igaran (apartado 5.9). La presa muestra aguas de menor mineralización (influencia del manantial de Salubita) cuya evolución se mantiene siempre paralela al eje II debido a la mayor influencia en la distribución del conjunto de muestras en los planos factoriales de las muestras de Igaran. Esto significa que su evolución está ligada al contenido en  $NO_3^-$  y  $Na^+$ .



**Figura 5.17:** Representación de los planos I-II y I-III del ACP realizado para las muestras de Igaran y la presa entre el 27 de Marzo y el 1 de Mayo de 2000 para las 9 variables.

Las muestras 1 a 29 de la presa abarcan las dos primeras crecidas (figura 5.18) y a pesar de que en el plano I-II definen un dominio neto (A-B-C) pasando a un segundo grupo (D: muestras 30 a 41) tras la última crecida, en el plano I-III se ve que esa evolución sigue otros pasos (A-B-C-D) en relación al contenido en  $\text{HCO}_3^-$  (aumenta a partir de la muestra 30),  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  (estos últimos disminuyen a partir de la muestra 30). La figura 5.17 muestra la evolución de las muestras y en la 5.18 se ha marcado el tramo de cada grupo de agua (A-B-C-D), referente a la presa. Notar que durante la segunda crecida no se tomaron muestras en la presa, de ahí los signos de interrogación de la figura.



**Figura 5.18:** Situación hidrológica de las muestras tomadas en el manantial de Igaran y en la presa entre el 27 de Marzo y el 1 de Mayo de 2000. Las letras A, B, C y D corresponden a la evolución del agua de la presa y las letras a, b, c, d, e, f y g al agua de Igaran (figura 5.17).

Respecto a la evolución del agua de la surgencia de Igaran, al iniciarse el muestreo su mineralización es mucho más alta que la de las aguas de la presa y, en general, a medida que se producen los aumentos de caudal los puntos se van desplazando hacia valores negativos de los ejes I y II, aunque las decrecidas generan un aumento de la mineralización y lógicamente, el desplazamiento de los puntos hacia valores positivos de los ejes I y II. La evolución hidroquímica de Igaran se ha marcado en 7 etapas claramente ligadas a las condiciones hidrológicas (a: muestras 42 a 50; b: muestras 51 a 57; c: muestras 58 a 61; d: muestras 62 a 69; e: muestras 70 a 77; f: muestras 78 a 91 y g: muestras de 91 a 100). Estas etapas se muestran también en la figura 5.18, donde se ve su relación con las crecidas, decrecidas y recesión.

**Igaran:** El primer pico, originado por la precipitación en forma de nieve, produce una evolución (desde a) hacia la parte positiva del eje II (aumenta el  $Cl^-$  y  $NO_3^-$ ) y negativa del eje I (disminuye la mineralización). Durante la primera parte de la decrecida los puntos se sitúan hacia el centro del eje II (b) y hacia valores más negativos del eje I. Durante la recesión que sigue a esa decrecida las aguas vuelven a experimentar una nueva mineralización desplazándose hacia valores positivos del eje I (c).

El segundo pico de caudal, provocado por la lluvia (no se produce nieve), produce la dilución más fuerte de las aguas, situándose los puntos en la parte más negativa del eje I y ligeramente

desplazados hacia valores negativos del eje II (d). La posterior decrecida y recesión vuelve a producir una mineralización de las aguas, desplazando otra vez los puntos hacia valores positivos del eje I (e). Las lluvias de finales de Abril originan el último pico del gráfico que produce una nueva dilución (con aumento de  $K^+$ ) y posterior decrecida (con aumento en  $HCO_3^-$ ) evolucionando los puntos hacia la parte negativa (f y g) del eje II.

### 5.6.9. ETXEBERRI

Para la realización de los ACP de la surgencia de Etxeberri se han utilizado los análisis de 15 muestras recogidas entre el 24 de Enero de 1997 y el 8 de Octubre de 1998. Se han considerado 9 variables ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ ).

Como se puede ver en la tabla 5.18 los tres primeros factores explican el 81.22% de la varianza total. La matriz de correlaciones pone en evidencia la buena correlación positiva existente entre el  $HCO_3^-$  y el  $Ca^{2+}$  y negativa de ambos con el  $Na^+$ . El  $K^+$  y el  $NO_3^-$  están también bien correlacionados positivamente aunque el  $NO_3^-$  está negativamente correlacionado con el  $Mg^{2+}$ . El  $SO_4^{2-}$  muestra su buena correlación, positiva, con  $Sr^{2+}$ ,  $Mg^{2+}$  y  $Cl^-$ .

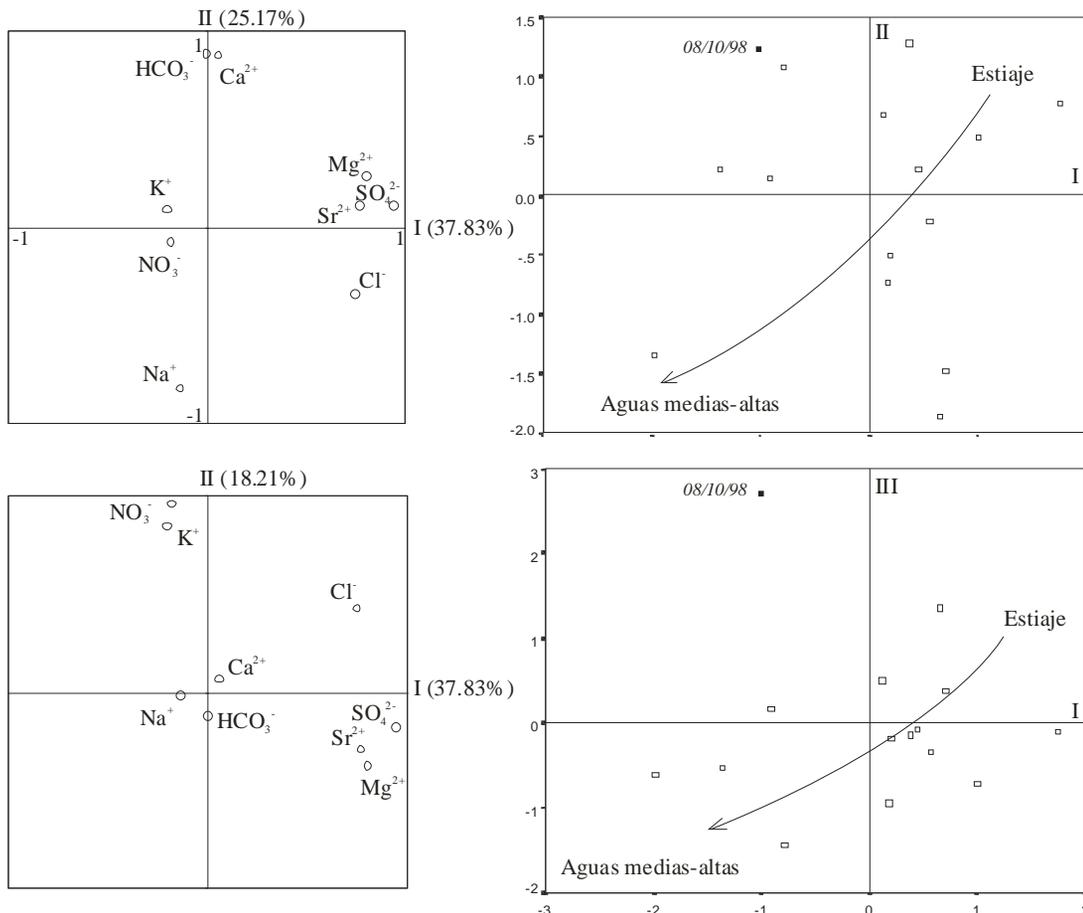
MATRIZ DE CORRELACIONES									
	HCO3	K	NA	MG	CA	CL	SO4	NO3	SR
HCO3	1								
K	0.125	1							
NA	<b>-0.548</b>	0.084	1						
MG	0.385	-0.300	-0.210	1					
CA	<b>0.656</b>	-0.020	<b>-0.690</b>	0.129	1				
CL	-0.377	0.045	0.097	0.244	-0.150	1			
SO4	0.140	-0.340	-0.195	<b>0.859</b>	0.146	<b>0.612</b>	1		
NO3	-0.233	<b>0.822</b>	0.041	<b>-0.533</b>	0.012	0.279	-0.371	1	
SR	0.078	-0.313	-0.168	0.747	0.119	0.289	<b>0.656</b>	-0.379	1

MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO3	-0.002	<b>0.881</b>	-0.124	1	3.40	37.83	37.83
K	-0.201	0.091	<b>0.849</b>	2	2.27	25.17	63.00
NA	-0.136	<b>-0.819</b>	-0.020	3	1.64	18.21	81.22
MG	<b>0.800</b>	0.259	-0.376	4	0.78	8.62	89.84
CA	0.057	<b>0.877</b>	0.067	5	0.45	5.00	94.84
CL	<b>0.746</b>	-0.336	0.431	6	0.31	3.45	98.29
SO4	<b>0.940</b>	0.110	-0.178	7	0.11	1.20	99.49
NO3	-0.183	-0.073	<b>0.963</b>	8	0.03	0.37	99.85
SR	<b>0.767</b>	0.109	-0.291	9	0.01	0.15	100.00

Tabla 5.18 Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=15) de las aguas del manantial de Etxeberri para las 9 variables  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Sr^{2+}$ .

En el campo de las variables del ACP (figura 5.19) y según la matriz de componentes de la tabla 5.16, se observa que el eje I está determinado por  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$  y  $Cl^-$  en su parte positiva. El eje II, por su parte, está caracterizado por  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$  en la parte positiva y  $Na^+$  en la negativa. Finalmente, el  $K^+$  y el  $NO_3^-$  caracterizan el eje III en su parte positiva.



**Figura 5.19: Representación de los planos I-II y I-III del ACP realizado para las muestras de Etxeberri para las 9 variables.**

A tenor de la relación entre las variables y los ejes, existe cierta diferencia con respecto a los ACP realizados para los manantiales anteriores. En este caso, el  $\text{Cl}^-$  forma parte de la mineralización principal caracterizando el eje I, cuando en el resto de los análisis su presencia mostraba siempre una importancia secundaria. El eje II representa también mineralización de origen interno, aunque los dos ejes corresponden a mineralizaciones de diferente origen, lo que indicaría que la surgencia de Etxeberri aporta aguas que drenen dos zonas diferentes (dos mineralizaciones). El eje III es ya habitual de los ACP realizados y representa las aguas que en diferentes momentos aparecen en la surgencia y que están caracterizados por elementos claramente externos.

Los planos I-II y I-III de la figura 5.19 muestran la evolución hidroquímica general que se produce entre las aguas de estiaje (más mineralizadas) y las aguas medias-altas (menos mineralizadas). La escasez de puntos hace que en este caso no se haya establecido el habitual reparto de grupos, sino

solamente la tendencia de la evolución. En ambos planos aparece un punto (08/10/98) desplazado hacia la parte positiva de los ejes II y III, que corresponde a la muestra tomada durante la primera crecida del año hidrológico 1998-99. Aunque el contenido en  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$  de esta muestra es alto, se caracteriza principalmente por el aumento de  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{K}^+$ .

Teniendo en cuenta el dato de temperatura media (12.6 °C) del manantial de Etxeberri (tabla 5.7), superior a las temperaturas medias de las surgencias de Salubita e Igaran, no es extraño que la mineralización que representa el eje I pueda ser el reflejo de la presencia en la surgencia de *aguas de origen más profundo* (no hay que olvidar que este manantial aparece muy cerca de una zona muy fracturada ligada a la Falla de Leiza). Esto explicaría, además, la homogeneidad hidroquímica de este manantial (apartado 5.4, figura 5.1). El segundo tipo de mineralización correspondería a la llegada al punto de descarga, en épocas de aguas medias-altas, de aguas menos profundas que drenan calizas ( $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Ca}^{2+}$ ) principalmente.

### 5.6.10. LEGORRETA

El ACP de la surgencia de Legorreta se ha desarrollado con 23 muestras tomadas entre el 8 de Octubre de 1998 y el 18 de Septiembre de 1999, para lo cual se han considerado 9 variables ( $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Sr}^{2+}$ ). La primera muestra recogida en este manantial coincide con la primera crecida del año hidrológico 1998-99.

La tabla 5.19 evidencia que los tres primeros factores explican el 78.79% de la varianza total. Las correlaciones son buenas y positivas entre  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{NO}_3^-$ . Por otra parte, la correlación entre  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{SO}_4^{2-}$  es también buena y positiva. El  $\text{Cl}^-$  aparece bien correlacionado con el  $\text{NO}_3^-$  y con el  $\text{SO}_4^{2-}$ .

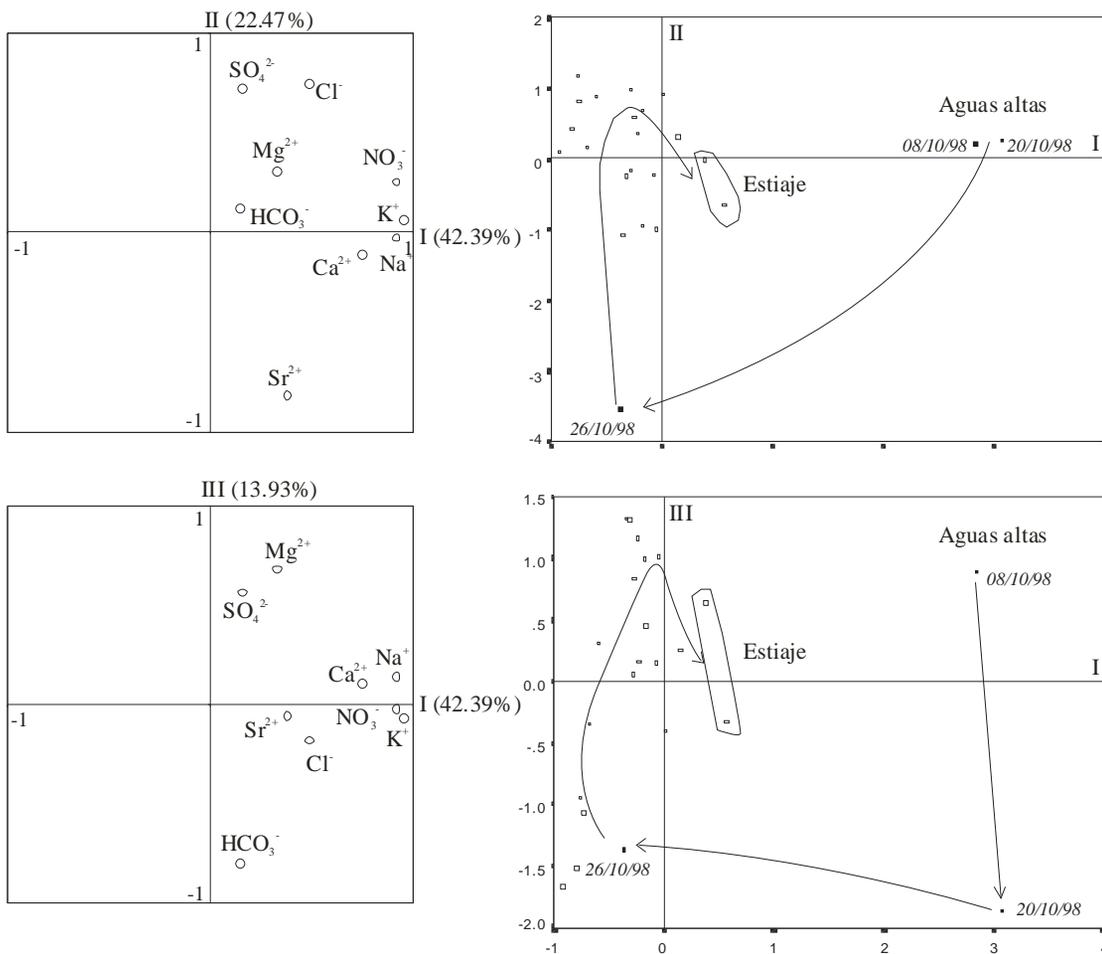
MATRIZ DE CORRELACIONES									
	HCO3	K	NA	MG	CA	CL	SO4	NO3	SR
HCO3	1								
K	0.132	1							
NA	-0.026	<b>0.856</b>	1						
MG	-0.170	0.197	0.324	1					
CA	0.191	<b>0.570</b>	<b>0.590</b>	0.481	1				
CL	0.169	0.496	0.389	0.160	0.217	1			
SO4	-0.320	0.184	0.192	<b>0.597</b>	0.012	<b>0.511</b>	1		
NO3	0.068	<b>0.944</b>	<b>0.818</b>	0.266	<b>0.537</b>	<b>0.627</b>	0.295	1	
SR	-0.014	0.328	0.321	-0.206	0.263	-0.304	-0.452	0.117	1

MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
HCO3	0.144	0.123	<b>-0.802</b>	1	3.81	42.39	42.39
K	<b>0.951</b>	0.059	-0.071	2	2.02	22.47	64.86
NA	<b>0.912</b>	-0.025	0.140	3	1.25	13.93	78.79
MG	0.328	0.308	<b>0.682</b>	4	0.96	10.63	89.41
CA	<b>0.749</b>	-0.113	0.104	5	0.34	3.78	93.19
CL	0.486	<b>0.743</b>	-0.183	6	0.31	3.39	96.58
SO4	0.153	<b>0.724</b>	<b>0.563</b>	7	0.16	1.79	98.37
NO3	<b>0.911</b>	0.254	-0.023	8	0.12	1.38	99.75
SR	0.379	<b>-0.815</b>	-0.057	9	0.02	0.25	100.00

Tabla 5.19: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=23) de las aguas del manantial de Legorreta para las 9 variables  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Na}^+$  y  $\text{Sr}^{2+}$ .

En el campo de las variables del ACP (figura 5.20) se observa que el eje I está determinado por  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$  y  $Na^+$ . El  $SO_4^{2-}$  y el  $Cl^-$  caracterizan el segundo factor en su parte positiva y el  $Sr^{2+}$  en la negativa. El eje III está representado por el  $HCO_3^-$  en su parte negativa y por el  $Mg^{2+}$  y el  $SO_4^{2-}$  en la positiva.



**Figura 5.20: Representación de los planos I-II y I-III del ACP realizado para las muestras de la surgencia de Legorreta para las 9 variables.**

El eje I está representado por elementos de origen mayoritariamente externos al sistema. El eje II y el III serían, en este caso, los representantes de la mineralización de origen interno, más sulfatada en un caso y más bicarbonatada en el otro. Este es el único manantial de los estudiados en el que el  $Sr^{2+}$  no se presenta bien relacionado con ningún otro elemento.

En los planos I-II y I-III de la figura 5.20 se ha marcado la evolución hidroquímica entre el período inicial de aguas altas y las aguas de estiaje. La primera muestra (08/10/98) se encuentra, en ambos planos, desplazada hacia valores positivos de los tres ejes. Esta muestra presenta concentraciones altas en  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Mg^{2+}$  y  $SO_4^{2-}$ . La primera crecida importante del año hidrológico movilizó hacia la surgencia fundamentalmente elementos externos cuya presencia en la surgencia durante el resto del año es, comparativamente, prácticamente inapreciable.

A medida que los caudales disminuyen (20/10/98) aumenta la concentración de  $HCO_3^-$  y  $Ca^{2+}$ , lo que podría deberse a la llegada de aguas procedentes de otras zonas del sistema menos profundas y relacionadas con materiales carbonatados. Posteriormente va disminuyendo el contenido en los elementos de origen externo y al final el agua adquiere su carácter normal caracterizado por los contenidos en  $SO_4^{2-}$  y  $Mg^{2+}$ .

Según la tabla 5.7 la temperatura media de este manantial es de 14 °C. Por otra parte, teniendo en cuenta que esta surgencia se halla asociada (figura 3.2) a una zona de importantes fracturas y cabalgamientos relacionados al sistema de fracturas de la Falla de Azkoitia, es posible que las aguas que afloran a través de este manantial posean, en gran parte, un origen profundo marcado por la presencia de otros tipos de agua de diversa procedencia. La escasa variación de caudales observada en este manantial durante los trabajos de campo apoyan la hipótesis de ese flujo profundo. Sin embargo, el número de análisis existentes no ha permitido un seguimiento más exhaustivo.

#### ***5.6.11. COMPARACIÓN DE TODOS LOS PUNTOS DE AGUA***

Se ha realizado un ACP conjunto de todas las muestras tomadas en los manantiales estudiados en los apartados anteriores (Salubita, Igaran, Legorreta, Etxeberri y cuaternario) y en el sumidero de Osinondo a los que se han sumado otras fuentes y manantiales de menor entidad existentes en la zona de estudio (Jangoain, Artutxe, Elola, Sta. Marina y Madariaga). El interés es reflejar en un único, ACP, global, buena parte de las observaciones realizadas a nivel individual. Se han utilizado 134 muestras, en las que se han considerado 10 variables ( $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Cl^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $HCO_3^-$ ,  $Na^+$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad).

En la tabla 5.20 se puede ver que los tres primeros factores explican el 77.51% de la varianza total. La matriz de correlación muestra las buenas correlaciones positivas existentes entre  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad. Los iones de origen principalmente externo a los sistemas ( $K^+$ ,  $NO_3^-$  y  $Na^+$ ) presentan buenas correlaciones positivas entre ellos. El  $Ca^{2+}$  y el  $HCO_3^-$  se correlacionan de forma positiva entre ellos y también se correlacionan positivamente con el primer grupo mencionado. El  $Cl^-$  no se correlaciona bien con ninguna otra variable. El eje I está determinado, sobre todo, por  $Mg^{2+}$ ,  $SO_4^{2-}$ ,  $Sr^{2+}$  y conductividad; el eje II por  $K^+$ ,  $NO_3^-$ ,  $Na^+$  y  $Cl^-$  y el eje III por  $Ca^{2+}$  y  $HCO_3^-$ .

MATRIZ DE CORRELACIONES										
	K	NA	MG	CA	CL	SO4	NO3	SR	C	HCO3
K	1									
NA	<b>0.501</b>	1								
MG	0.427	0.005	1							
CA	0.272	0.184	<b>0.634</b>	1						
CL	0.321	0.353	0.192	0.059	1					
SO4	0.216	-0.067	<b>0.844</b>	<b>0.695</b>	0.092	1				
NO3	<b>0.576</b>	0.244	0.112	0.104	0.397	0.043	1			
SR	0.203	-0.198	<b>0.716</b>	0.493	-0.026	<b>0.768</b>	-0.183	1		
C	0.426	0.317	<b>0.683</b>	<b>0.790</b>	0.343	<b>0.685</b>	0.225	<b>0.520</b>	1	
HCO3	0.219	0.327	0.318	<b>0.760</b>	0.052	0.255	0.055	0.098	<b>0.605</b>	1

MATRIZ DE COMPONENTES				VARIANZA TOTAL EXPLICADA			
	1	2	3	Factor	Total	% de la var.	% acum.
K	0.236	<b>0.779</b>	0.183	1	4.32	43.22	43.22
NA	-0.259	<b>0.562</b>	0.534	2	2.17	21.68	64.90
MG	<b>0.885</b>	0.210	0.187	3	1.26	12.62	77.51
CA	<b>0.594</b>	0.033	<b>0.737</b>	4	0.73	7.31	84.83
CL	0.064	<b>0.717</b>	0.008	5	0.66	6.60	91.43
SO4	<b>0.923</b>	0.046	0.179	6	0.31	3.09	94.52
NO3	-0.020	<b>0.808</b>	-0.015	7	0.23	2.30	96.82
SR	<b>0.908</b>	-0.102	-0.012	8	0.15	1.50	98.32
C	<b>0.625</b>	0.323	0.593	9	0.10	0.99	99.31
HCO3	0.136	0.006	<b>0.933</b>	10	0.07	0.69	100.00

**Tabla 5.20: Matriz de correlación, matriz de componentes y varianza total explicada del ACP efectuado con los datos hidroquímicos (n=134) de todos los manantiales, sumideros y fuentes muestreados (C: conductividad).**

Este ACP permite obtener una visión global, espacial y temporal, de las características de los manantiales de la zona en conjunto. En general, el factor I representa la **mineralización** más propia de las aguas que alimentan los puntos de descarga considerados. El factor II es el reflejo de la influencia en los sistemas de **elementos externos** cuyo origen está relacionado principalmente con procesos meteóricos y con las actividades agrícolas y ganaderas del entorno. El factor III marcaría la existencia de un segundo tipo de **mineralización** relacionado con aguas netamente bicarbonatadas, cuyo origen está en parte en relación con las formaciones carbonatadas y, en parte, con fenómenos meteorológicos adversos, como ya se ha comentado en los apartados anteriores.

El plano I-II de la figura 5.21 refleja claramente la situación hidroquímica de cada manantial. Se observa también la diferente respuesta de las aguas de Osinondo, Legorreta e Igaran ante el estiaje. Etxeberri y Legorreta ocupan prácticamente el mismo emplazamiento, aunque el estiaje en Etxeberri no ejerce una influencia importante. El agua que drenan los pequeños manantiales y fuentes es, en general, la menos mineralizada (valores más negativos del eje I, II y III). Las aguas de Igaran muestran su gran dispersividad hidroquímica con un importante desplazamiento, en estiaje, hacia valores más positivos del eje I.

El plano I-III únicamente permite distinguir 4 tipos de agua: las aguas que drenan los materiales cuaternarios de la depresión de Bidania (las menos mineralizadas pero con presencia de elementos externos), las aguas del manantial de Igaran (las más mineralizadas y variables), las aguas de los pequeños manantiales (menos de todo) y una nube de puntos que engloba el resto de las aguas (incluida Salubita).

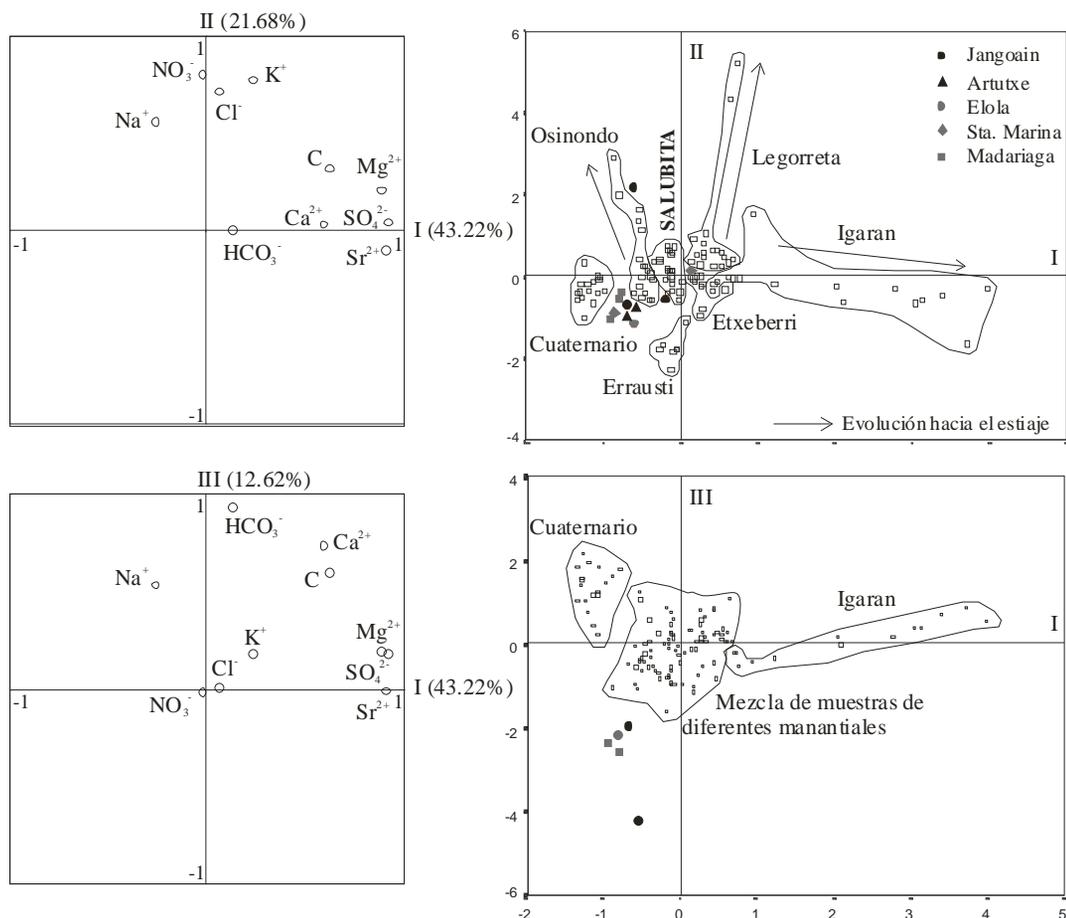


Figura 5.21: Representación de los planos I-II y I-III del ACP realizado para el conjunto de las muestras.

Las aguas del manantial de Salubita ocupan la zona central del plano I-II mostrando, comparativamente, una homogeneidad hidroquímica importante. Su emplazamiento respecto al eje I muestra valores más positivos que los de las aguas del cuaternario y Osinondo. La relación entre el sumidero de Osinondo y la surgencia de Salubita ha sido demostrada en varias ocasiones mediante ensayos con trazadores (apartados 4.8.4 a 4.8.6) aunque el caudal que se infiltra por ese sumidero es mucho menor que el caudal en Salubita (apartado 4.6) lo que significa que el agua procede de otras partes del sistema, de los afloramientos carbonatados precisamente.

### 5.7. ANÁLISIS TEMPORAL

Tanto el Análisis Espacial de los puntos de agua muestreados como los Análisis en Componentes Principales, comentados en los apartados precedentes (apartados 5.5 y 5.6), muestran claras diferencias entre unos manantiales y otros. En cada caso se manifiesta, además, la presencia de

aguas de diferente origen y/o trayectoria, y son palpables, como se comentó extensamente en el capítulo 4, las relaciones entre, sobre todo, el manantial de Salubita-presa (estación de aforos)-manantial de Igaran y Gain (Regata Albiztur en Benta Zaharra).

En este apartado se pretende proporcionar una visión, sobre todo gráfica, de la evolución temporal de los elementos mayoritarios, temperatura, conductividad y pH de los puntos de agua más importantes muestreados (Salubita, presa, Igaran, Gain, Osinondo, cuaternario, Etxeberri y Legorreta). Es un complemento a lo ya expuesto y tratado en los apartados anteriores de este capítulo. Se incluyen, a modo de referencia, los caudales en la estación de aforos de la Regata Albiztur y la precipitación registrada en la estación de Erdoizta. Los datos estadísticos de las variables analizadas se encuentran recopilados en la tabla 5.7 y comentados en el apartado 5.4. A pesar de que los análisis de las muestras de precipitación no se han considerado con anterioridad debido a los altos errores proporcionados por el balance iónico (siempre superiores al 30%), sí se consideran en este apartado ya que la evolución del resto de puntos de agua podría estar influenciada, en parte, por la hidroquímica de la precipitación.

### **5.7.1. SALUBITA**

La evolución temporal de los principales parámetros analizados se muestra en la figura 5.22. La temperatura y la conductividad presentan, en general, una evolución paralela, aumentando a finales del año hidrológico (estiaje) y disminuyendo a medida que éste avanza (aguas medias-altas). Lo mismo ocurre con el  $\text{SO}_4^{2-}$ , el  $\text{Mg}^{2+}$  y el  $\text{Ca}^{2+}$  y, en menor medida, con el  $\text{Sr}^{2+}$ . Aunque el  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{K}^+$  no presentan una tendencia temporal clara, ambos muestran un comportamiento común relacionado con la presencia en el manantial del flujo rápido en determinados momentos del año (apartado 4.9.1 y figura 4.54). La aparición en la surgencia de aguas de origen externo, principalmente al inicio del año hidrológico, hace que la concentración de estos dos elementos en las aguas aumente sustancialmente, coincidiendo con una disminución generalizada en los contenidos del resto de elementos.

El  $\text{HCO}_3^-$  y el  $\text{Cl}^-$  no muestran un comportamiento temporal definido debido, probablemente, a la influencia, poco conocida, que las condiciones atmosféricas podrían ejercer sobre estos elementos. Tampoco el  $\text{Na}^+$  presenta una evolución clara, aunque en ocasiones muestra un comportamiento inverso al del  $\text{K}^+$ , como se aprecia al comienzo de los años hidrológicos 1998-99 y 1999-00.

No existe un patrón en la evolución temporal del pH, ya que éste es un parámetro sujeto a múltiples influencias relacionadas con la actividad de bacterias y otros pequeños organismos difícilmente controlables, que repercuten en la alcalinidad de las aguas. No obstante, se aprecia que los valores máximos de este parámetro se obtienen a finales del año hidrológico 1997-98 disminuyendo tras las primeras precipitaciones (aumento importante del caudal en el manantial) del inicio del año

hidrológico siguiente. Puede resultar de interés el hecho de que a medida que el estiaje del año 1998-99 avanza, se aprecia una tendencia descendente en el pH. Para este mismo período se observa la misma tendencia en la presa y en el manantial de Igaran. Notar, además, que durante el final del año hidrológico 1996-97 y el año hidrológico 1997-98 su rango de fluctuación es mucho menor que para el año hidrológico 1998-99.

El hecho de que las determinaciones de elementos del sistema calco-carbónico ( $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ) no se hayan efectuado *in situ*, sino en el laboratorio unos pocos días después de la toma de la muestra, es el motivo por el que no se han realizado aquí los cálculos de pH de equilibrio e índices de saturación relativos a tal o cual elemento.

### 5.7.2. PRESA

La figura 5.23 muestra la evolución temporal de los principales parámetros analizados. Casi todo el agua (80-85%) que pasa a lo largo del año por la presa proviene del manantial de Salubita, por tanto no es extraño que el quimismo en ese punto sea muy similar y presente las mismas tendencias que el de dicha surgencia. La temperatura y la conductividad evolucionan prácticamente igual que en Salubita. Al igual que en el manantial, en general a mayor caudal menor temperatura y conductividad y menores son las concentraciones en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$  y  $\text{Sr}^{2+}$ .

El  $\text{NO}_3^-$  y el  $\text{K}^+$  muestran un comportamiento común, aunque sin una tendencia temporal clara, prácticamente igual a la de la surgencia. Notar que los picos más importantes de  $\text{NO}_3^-$  (inicio del año hidrológico) en la surgencia coinciden con los de la presa y con pequeños aumentos de  $\text{K}^+$ . Cabe destacar el hecho de que el único elemento que, en general, presenta mayores concentraciones en el manantial que en la presa es el  $\text{NO}_3^-$ .

El  $\text{HCO}_3^-$ , el  $\text{Cl}^-$ , el  $\text{Na}^+$  y el pH muestran un comportamiento similar al del manantial, sin evoluciones temporales claras, a excepción del estiaje de 1998-99 en el que a medida que el caudal disminuye, disminuye también el pH.

### 5.7.3. IGARAN

La evolución temporal de los principales parámetros analizados se muestra en la figura 5.24. Como ya se sabe la mineralización aquí es mayor y la variabilidad en el contenido en buena parte de los elementos es más amplia, siendo mucho más visible el incremento de los contenidos a lo largo del estiaje.

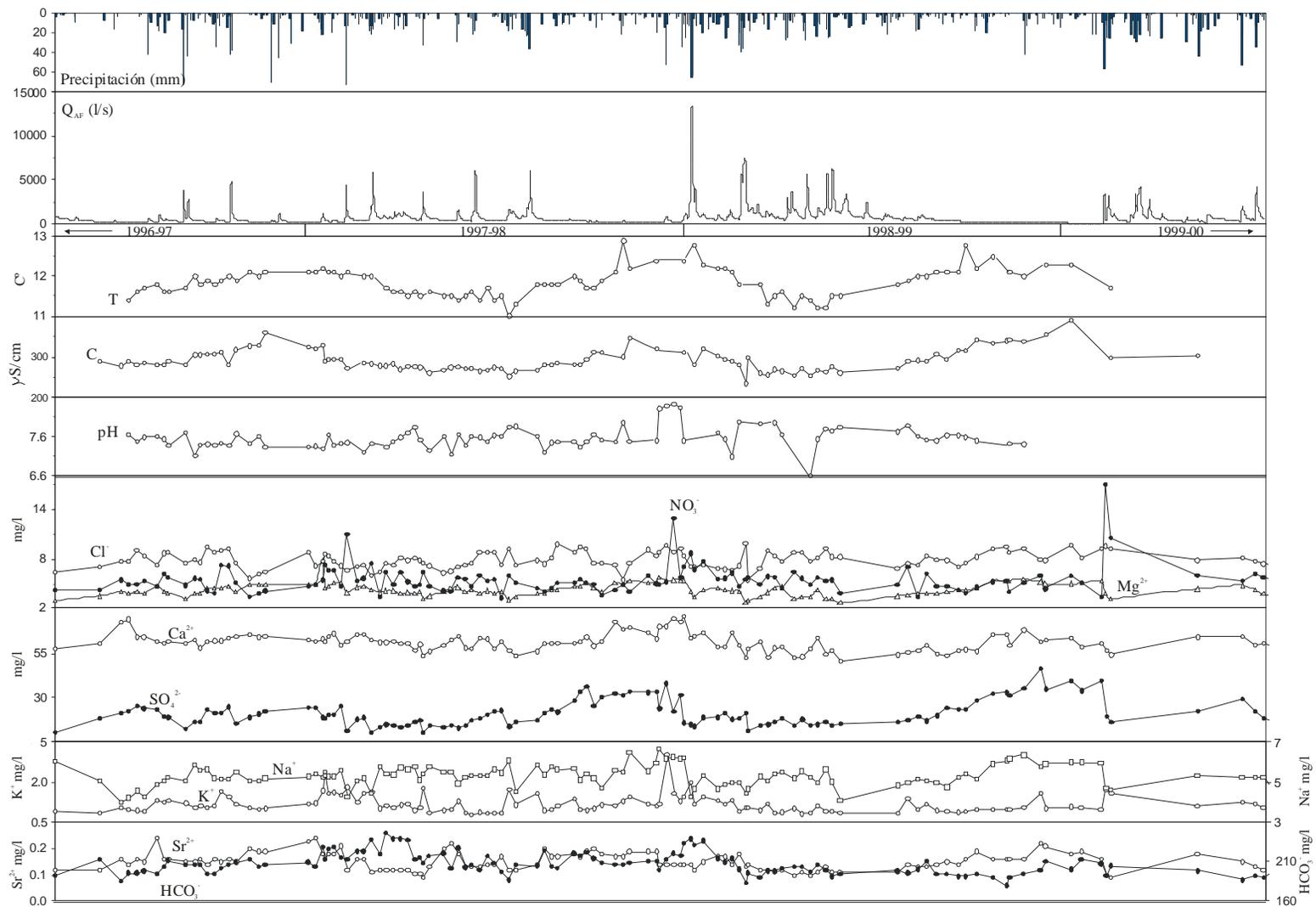


Figura 5.22: Evolución temporal de los principales parámetros analizados en el manantial de Salubita.

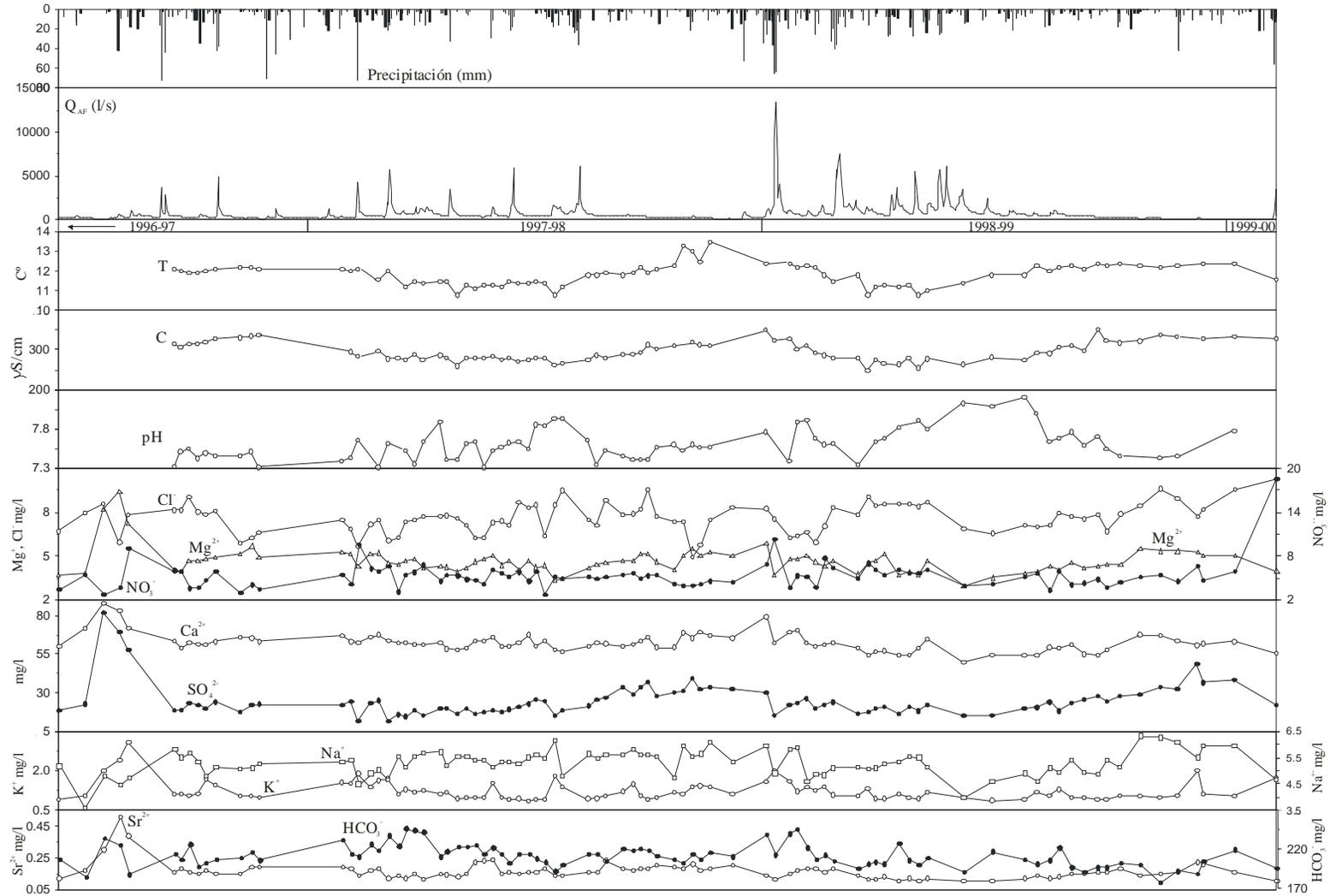


Figura 5.23: Evolución temporal de los principales parámetros analizados en la presa de la Regata Albiztur.

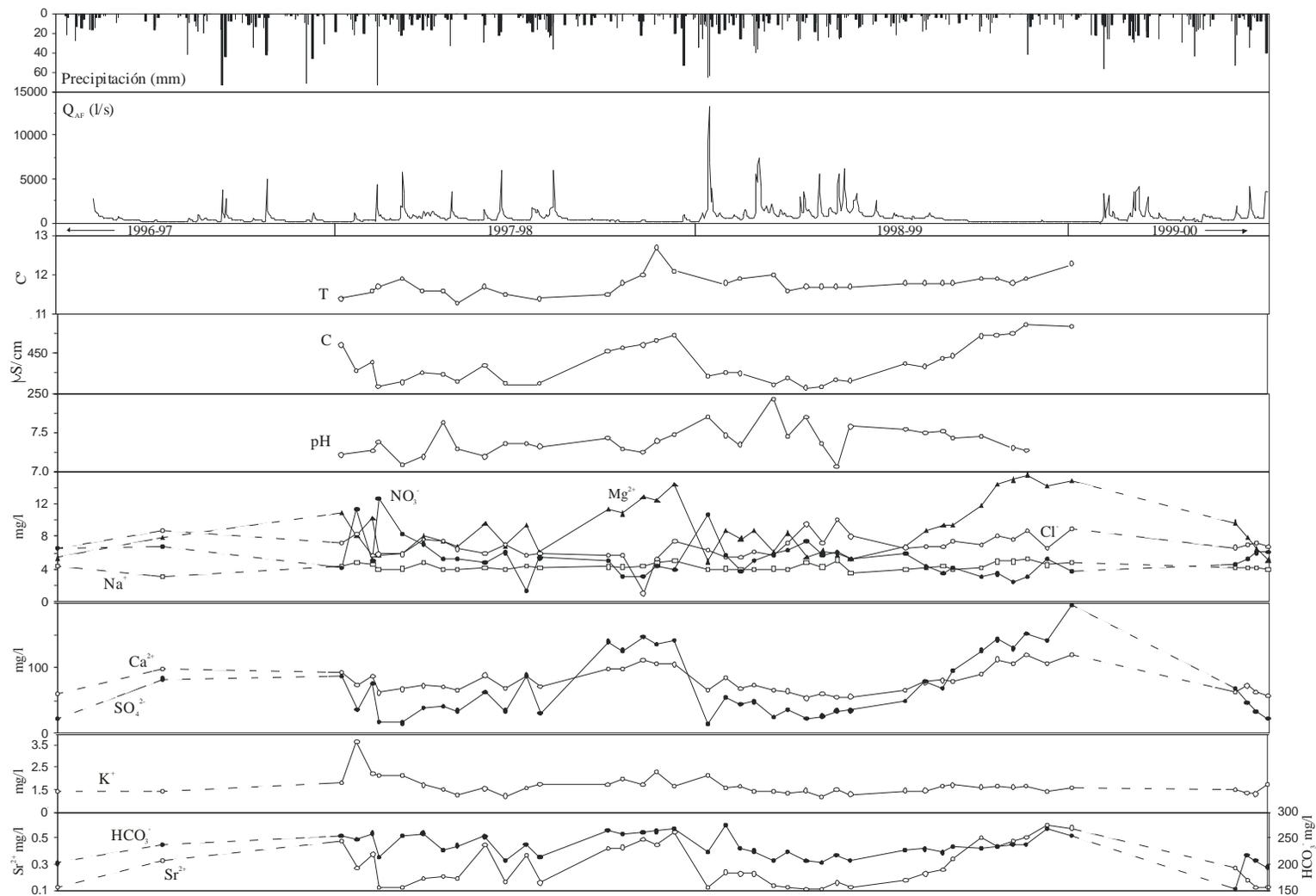


Figura 5.24: Evolución temporal de los principales parámetros analizados en el manantial de Igaran.

La temperatura y la conductividad presentan una tendencia similar, paralela, aumentando en estiaje y disminuyendo en aguas medias-altas. El  $\text{SO}_4^{2-}$ , el  $\text{Mg}^{2+}$ , el  $\text{Ca}^{2+}$  y el  $\text{Sr}^{2+}$  presentan la misma tendencia que la conductividad, y el  $\text{HCO}_3^-$  sigue esa misma evolución, apreciable con más nitidez durante el año hidrológico 1998-99.

Al aumentar la concentración de  $\text{NO}_3^-$  al inicio del año hidrológico, aumenta también la concentración en  $\text{K}^+$ , aunque la evolución en estos elementos no es estrictamente idéntica y no presentan una tendencia temporal clara.

El  $\text{Cl}^-$  no muestra una pauta de comportamiento bien definida, si bien los primeros aumentos importantes de caudal del año hidrológico provocan una ligera dilución de este elemento. El  $\text{Na}^+$  muestra una evolución temporal relacionada puntualmente con el  $\text{K}^+$ , aunque no puede decirse que la evolución de estos dos elementos sea paralela.

Por último, el pH no presenta relación alguna con el resto de los parámetros y su evolución parece ser impredecible, aunque para el estiaje del año hidrológico 1998-99 se observa una tendencia descendente en este parámetro.

#### **5.7.4. GAIN**

La figura 5.25 muestra la evolución temporal de los principales parámetros analizados. Se observa el notable condicionamiento ejercido por Igaran (figura 5.24)

Al igual que en los casos anteriores, la temperatura y la conductividad presentan una evolución paralela, aumentando a finales del año hidrológico y disminuyendo a medida que éste avanza. La mayor parte de los elementos mayoritarios analizados experimentan esa misma evolución que se aprecia de forma más clara durante el año hidrológico 1998-99, de recesión más prolongada. Así, puede decirse que, en general, cuanto mayor es el caudal en la Regata Albiztur, aguas arriba del manantial de Salubita, menores son las concentraciones en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Na}^+$ .

El comportamiento del  $\text{Cl}^-$  es incierto y su evolución no presenta similitudes generales con la de otros componentes, aunque puede apreciarse que, en ocasiones, ciertos aumentos en la concentración de  $\text{Cl}^-$  van unidos a aumentos en la concentración de  $\text{NO}_3^-$ . A pesar de que, en general, el  $\text{K}^+$  evoluciona paralelamente a la conductividad y a la temperatura, algunos picos de  $\text{K}^+$  coinciden con aumentos en la concentración de  $\text{NO}_3^-$ .

A pesar de que la evolución temporal del pH no muestra relación alguna con la evolución del resto de los parámetros, ésta muestra pequeñas fluctuaciones durante el final del año hidrológico 1996-97 y la totalidad del año hidrológico 1997-98. Sin embargo, el rango de valores de pH durante

1998-99 es mayor. Estas aguas también muestran para el estiaje del año hidrológico 1998-99 una ligera tendencia descendente del pH.

### 5.7.5. OSINONDO

La evolución temporal de los principales parámetros analizados se muestra en la figura 5.26. La evolución paralela de la temperatura y la conductividad, inversa a los caudales, coincide, en general, con la evolución temporal de  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$ . Las mayores similitudes en la evolución se producen entre  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{HCO}_3^-$  y  $\text{Sr}^{2+}$  por un lado, y  $\text{SO}_4^{2-}$  y  $\text{Mg}^{2+}$  por otro. Aunque el  $\text{Cl}^-$  muestra una tendencia general similar, puntualmente presenta un comportamiento inverso.

Al contrario que en el caso de las aguas ya comentadas, aquí el  $\text{NO}_3^-$  se presenta como un elemento aislado, sin relación con ningún otro componente, ni siquiera con el  $\text{K}^+$ . Esta observación queda patente a la vista de la matriz de correlación (tabla 5.14) del ACP realizado para este punto. Además de no presentar una tendencia clara en su evolución temporal, el aumento en la concentración de  $\text{NO}_3^-$  tampoco está unido a las primeras precipitaciones del año hidrológico, sino que a lo largo de su evolución aparecen numerosos picos difícilmente atribuibles a simples aumentos de caudal en el arroyo. La evolución del  $\text{NO}_3^-$  está, probablemente, relacionada con los usos del suelo, es decir, con la posible aplicación en el terreno de fertilizantes en momentos muy concretos. Notar que a finales de los años hidrológicos el  $\text{NO}_3^-$  muestra una evolución ascendente, es decir, a menor caudal, mayor concentración en  $\text{NO}_3^-$ .

El pH se muestra tan aleatorio como en los casos anteriores, sin ningún tipo de relación con la evolución del resto de los parámetros y su variabilidad es mayor para el año hidrológico 1998-99 que para el anterior año hidrológico.

### 5.7.6. CUATERNARIO

La primera parte (hasta la mitad del año hidrológico 1997-98) de la figura 5.27 muestra que la temperatura y la conductividad evolucionan prácticamente de forma paralela, registrándose los valores mínimos hacia la mitad del año hidrológico. La evolución de los elementos mayoritarios, sin embargo, presenta diferentes tendencias. Por una parte, el  $\text{Ca}^+$  y el  $\text{HCO}_3^-$  evolucionan de forma similar y, por otra parte el comportamiento del  $\text{Cl}^-$  parece asemejarse a la evolución del  $\text{SO}_4^{2-}$ . El ACP realizado para muestras tomadas en este punto había puesto en evidencia (tabla 5.15) las buenas correlaciones existentes entre los elementos de cada uno de estos grupos. El resto de los elementos no muestra tendencias claras en su evolución.









Ciertas precipitaciones caídas durante el estiaje producen un brusco aumento en la concentración de  $\text{NO}_3^-$  y de  $\text{K}^+$ . A partir de ese momento y hasta la primera crecida del año hidrológico 1998-99 tanto el  $\text{NO}_3^-$  como el  $\text{K}^+$  presentan un extraño comportamiento, sin ninguna relación ni entre ambos ni con el resto de elementos. La singular evolución temporal del pH es evidente notándose que su rango de variación aumenta para el año hidrológico 1998-99.

### **5.1.1. ETXEBERRI**

La evolución temporal de los principales parámetros analizados se muestra en la figura 5.28. Como puede observarse en la figura la mayor parte de las muestras fueron tomadas durante la segunda mitad del año hidrológico 1996-97, que se caracterizó por la presencia de abundantes precipitaciones a partir del mes de Mayo. Según la figura, parece reconocerse una situación próxima al estiaje a finales de Abril, que finalizó con las precipitaciones registradas a partir de la última semana de Abril. Se trata pues de una situación, no comparable con ninguna de los otros años hidrológicos considerados.

Las precipitaciones de finales de Abril provocan un notable descenso de la temperatura y pH, acompañado de un ligero aumento de la conductividad. En este momento aumenta la concentración de los elementos internos del acuífero ( $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$ ,  $\text{Sr}^{2+}$  y  $\text{Na}^+$ ) y disminuye la de  $\text{Ca}^{2+}$ ,  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ . Estas relaciones varían en cierta forma lo largo de las otras pequeñas crecidas presentando una evolución temporal general similar  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$  y  $\text{Cl}^-$ , inversa a la evolución del  $\text{Ca}^{2+}$  y del  $\text{HCO}_3^-$ , por una parte, y  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Sr}^{2+}$  por otra.

### **5.1.2. LEGORRETA**

La figura 5.29 muestra la evolución temporal de los parámetros analizados en este manantial. La primera muestra se tomó durante las intensas precipitaciones registradas al comienzo del año hidrológico 1998-99, con importante aumento de caudal en la Regata Albiztur, que presenta altas concentraciones de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , y  $\text{K}^+$ . A medida que la decrecida avanza, la concentración de estos tres elementos disminuye de tal forma que las posteriores precipitaciones registradas no ejercen en el manantial una influencia tan importante como las primeras.

El  $\text{SO}_4^{2-}$  y el  $\text{Mg}^{2+}$  muestran una evolución temporal similar y su concentración más baja coincide con las concentraciones más bajas de  $\text{NO}_3^-$ ,  $\text{Cl}^-$ , y  $\text{K}^+$ , y con la más alta del  $\text{Sr}^+$ .

La temperatura más alta registrada corresponde también al período de influencia de la primera crecida del año hidrológico. A partir de ese momento la temperatura va descendiendo hasta entrar en el período de estiaje, momento en el cual comienza a ascender. La conductividad evoluciona de forma similar. El pH coincide, a veces, con la conductividad aunque no mantiene un paralelismo permanente con ningún parámetro.





### 5.1.3. PRECIPITACIÓN

La evolución temporal de los principales parámetros analizados se muestra en la figura 5.30. Las muestras de agua de precipitación corresponden a la suma de ésta caída durante 7 días en la depresión de Bidania, y recogida en un recipiente de polipropileno de 5 l de capacidad enterrado en el suelo, a unos 100 m de distancia del caserío Osinondo. Esto significa que estas muestras no corresponden a eventos aislados sino que, por el contrario, son la mezcla de diferentes episodios de precipitación producidos durante una semana. En algunos casos se suman diferentes intensidades y tipos de precipitación, por lo que no es posible establecer relaciones entre éstas y la presencia de los diferentes elementos mayoritarios.

No se consideran aquí los datos de temperatura (y pH) debido a que el recipiente se encontraba cerca de la superficie del terreno, influenciado por la temperatura del aire, que podría haber originado modificaciones del pH. Aunque la influencia de la temperatura se habría notado también en la conductividad eléctrica, sí se incluyen los datos de ésta como referencia. En cualquier caso, es de esperar que las concentraciones determinadas se hayan visto afectadas por reconcentración del agua en el recipiente de muestreo, dando, por tanto, valores, en general, por exceso, en épocas de temperaturas altas, al menos.

A la vista de la figura 5.30, se pone de manifiesto la importante variación hidroquímica que el agua de precipitación experimenta, en comparación con las aguas de los manantiales estudiados anteriormente. Los contenidos son aquí, lógicamente, los más bajos. La evolución temporal de los elementos mayoritarios está jalonada de numerosos y agudos picos que no siempre coinciden en todos los elementos. En cualquier caso,  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$  y  $Na^+$  presentan una evolución temporal paralela, seguida casi siempre por  $K^+$  y el  $SO_4^{2-}$ , aunque no siempre.

Algunos picos del resto de los elementos ( $HCO_3^-$ ,  $Ca^{2+}$ ,  $Sr^{2+}$  y  $NO_3^-$ ) también coinciden con la evolución de  $Mg^{2+}$ ,  $Cl^-$  y  $Na^+$ , aunque no se trata de una tendencia clara y, en general, cada uno presenta su propia evolución. Resulta interesante que aunque el comportamiento de los  $SO_4^{2-}$  y de la conductividad no es paralelo, los picos más importantes de la conductividad coinciden siempre con picos en los  $SO_4^{2-}$ .





#### **5.1.4. OTROS ELEMENTOS: AMONIO Y HIERRO**

Como se ha podido comprobar, no se han incluido en este tratamiento las concentraciones de amonio y hierro, ya que en la mayoría de las ocasiones las muestras proporcionan concentraciones por debajo del límite de detección en ambos casos y el amonio solo se analizó hasta Octubre de 1998. Sin embargo se sobrepasan, en ocasiones, no solo los límites de detección sino también las concentraciones máximas admisibles (0.2 mg/l para el Fe y 0.5 mg/l para el  $\text{NH}_4^+$ ) en agua potable, según Real Decreto 1.138/1990. Esto ocurre con el hierro y el amonio en las aguas del sumidero de Osinondo, en la Regata Albiztur con el amonio y en el manantial de Salubita con el amonio y con el hierro (Anexo I).

En el manantial de Salubita este hecho es observable en 5 ocasiones con el amonio y en 1 ocasión con el hierro. El amonio sobrepasa la concentración máxima admisible en agua potable el 20/10/97 (0.51 mg/l), el 24/12/97 11:00 (0.68 mg/l), el 25/12/97 11:00 (0.64 mg/l), el 31/05/98 (0.68 mg/l) y el 16/06/98 (0.81 mg/l). Según la figura 4.15, el aumento producido en Octubre de 1997 coincide con la primera crecida del año hidrológico 1997-98 y los dos posteriores (Diciembre de 1997) con precipitaciones en forma de nieve. Los aumentos de concentración de Mayo-Junio de 1998 se producen a la vez que pequeños aumentos de caudal. En cualquier caso, estos aumentos en las concentraciones de amonio van acompañados de aumentos en la concentración de sulfatos.

El aumento en la concentración de hierro (19/11/99, 0.22 mg/l) no coincide con ninguno de los del amonio y se produce al inicio de la primera crecida del año hidrológico 1999-00 (figura 4.15), coincidiendo con intensas precipitaciones en forma de nieve y lluvia.

#### **5.2. ISÓTOPOS**

La determinación de las zonas de recarga de cualquier manantial proporciona información harto importante, sobre todo en el caso en que se deseen establecer perímetros de protección. Normalmente la zona de recarga se define teniendo en cuenta criterios geológicos, hidrométricos y utilizando ensayos con trazadores (BONACCI, 1987), de hecho han sido éstos los criterios utilizados en este trabajo de investigación para establecer los límites de la cuenca drenada por el Sistema Kárstico de Salubita.

Sin embargo, los sumideros existentes en la zona de estudio susceptibles de ser utilizados como puntos de inyección de trazadores son escasos y no están repartidos homogéneamente a lo largo del área. Además, no hay que olvidar que los ensayos con trazadores no son extrapolables a la totalidad de la cuenca sino que trazan únicamente la vía (o vías) existentes entre uno o varios puntos.

Así, en acuíferos kársticos de zonas montañosas con estructura geológica compleja y donde pueden existir aportes entre unos acuíferos y otros, el conocer la altitud media de la zona de recarga del manantial es importante aunque puede resultar difícil, para lo cual las técnicas isotópicas, mediante la utilización de los isótopos estables del agua  $^{18}\text{O}$  (oxígeno-18) y  $^2\text{H}$  (deuterio), resultan de gran ayuda (FRITZ y FONTES, 1980).

Por otra parte, las técnicas isotópicas ambientales sirven también como aproximación para definir el tiempo de permanencia del agua en el acuífero (MALOSZEWSKI y ZUBER, 1982), lo que proporciona una idea de las reservas del mismo. Desde el punto de vista medioambiental, el conocimiento del tiempo de permanencia puede servir, además, para predecir el movimiento de posibles contaminantes en el acuífero.

### ***5.2.1. INFORMACIÓN ISOTÓPICA RECOPIADA EN EL MARCO DE ESTE ESTUDIO***

Según el apartado 5.2.2.2, entre Noviembre de 1998 y Octubre de 1999 se realiza el muestreo, para análisis isotópicos, de 75 muestras de agua recogidas en los manantiales de Salubita (cota 120 m), Igaran (cota 325 m), Legorreta (cota 90 m) y un pequeño manantial que drena parte de los depósitos aluviales cuaternarios de la depresión de Bidania. También se analizó el agua de precipitación recogida junto al caserío Osinondo (depresión de Bidania), a una cota de 480 m. El agua de precipitación se recogió en un recipiente de polipropileno enterrado en el suelo protegido de posible evaporación con silicona. El  $^{18}\text{O}$  se analizó en todas las muestras mientras que el  $^2\text{H}$  únicamente en 23 de ellas. Las muestras se tomaron en recipientes de polipropileno de 5 ml de capacidad y se conservaron a  $4^\circ\text{C}$  hasta ser enviadas al Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad Autónoma de Madrid, donde se analizaron.

Los resultados de los análisis se expresan utilizando la notación  $\delta$  (‰),

$$\delta = \frac{Rm - Rs}{Rs} \times 1000$$

donde R es igual a  $^{18}\text{O}/^{16}\text{O}$  o  $^2\text{H}/^1\text{H}$ ,  $m$  corresponde a la muestra y  $s$  al estándar, siendo el estándar utilizado el VSMOW (Vienna Standard Mean Ocean Water).

El error analítico en la determinación de  $\delta^2\text{H}$  fue del  $0.9$  ‰ y en el  $\delta^{18}\text{O}$  de  $0.07$  ‰. En la tabla 5.21 se reflejan los datos isotópicos obtenidos así como un resumen estadístico de los datos.

Antes de proceder al análisis detallado de los valores de  $\delta^2\text{H}$  y  $\delta^{18}\text{O}$  obtenidos, resulta de interés conocer la posición de las muestras respecto a la Línea Meteorica Mundial (LMM) y a la Línea Meteorica Local (LML). Las muestras de los manantiales de Salubita (15 puntos) e Igaran (un único

punto) se ajustan mejor (figura 5.31) a la LML ( $\delta^2\text{H} = 6.35 \times \delta^{18}\text{O} + 1.83$ ) definida por IRIBAR y ANTIGÜEDAD (1993), que a la LMM ( $\delta^2\text{H} = 8.0 \times \delta^{18}\text{O} + 10$ ) de CRAIG (1961), ocupando un espacio reducido cuyo rango oscila entre  $-6.79$  y  $-7.06 \delta^{18}\text{O}/_{00}$  y  $-39.3$  y  $-41.4 \delta^2\text{H}/_{00}$ . Las aguas de precipitación, por su parte, muestran una variabilidad mucho mayor y resulta difícil asegurar si se ajustan mejor a la LML o a la LMM.

La precipitación muestreada corresponde a la acumulación aproximadamente semanal de la precipitación. Los datos de la misma incluidos en la tabla 5.21 reflejan el total de esa acumulación semanal (en mm) y pertenecen al registro de la estación de Erdoizta.

*Figura 5.31: Relación en  $\delta^{18}\text{O}$ - $\delta^2\text{H}$  de las muestras del agua de precipitación (7) y del manantial de Salubita (15) e Igaran (1) y su localización en torno a la Línea Meteorica Local (LML) y a la Línea Meteorica Mundial (LMM).*

La tabla 5.21 pone de manifiesto que en el caso de los manantiales los rangos oscilan entre 0.38 (cuaternario) y 0.55 (Igaran) para el  $\delta^{18}\text{O}$ , y para el  $\delta^2\text{H}$  el rango es de 2.1 en el caso de Salubita. La precipitación proporciona rangos considerablemente mayores tanto para el  $\delta^{18}\text{O}$  (7.54) como para el  $\delta^2\text{H}$  (58.4). En la figura 5.32 se muestra el hidrograma de la estación de aforos de la Regata Albiztur junto con las precipitaciones diarias registradas durante ese período en la estación de Erdoizta, así como la evolución temporal del  $\delta^{18}\text{O}$  en los puntos de descarga muestreados y en las lluvias.

	SALU		IGAR		PREC		LEGOR	CUAT	PREC
	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^2\text{H}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^2\text{H}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^2\text{H}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	mm
17/11/98	-6.83	-40.4			-4.02	-14.1	-6.60		48.4
30/11/98	-6.54				-5.57				125
14/12/98	-6.79	-39.4	-6.79		-5.65		-6.39		60.4
22/12/98	-6.96				-8.26	-48.2	-6.37		22.5
28/12/98			-6.94						
04/01/99	-6.99	-41.2					-6.64		
06/01/99			-7.21						
16/01/99	-6.95	-39.7			-10.7	-72.5			87.6
24/01/99							-6.71		
01/02/99	-6.81	-39.9	-6.99		-3.32		-6.56		55.7
08/02/99	-6.91				-4.65	-20.1			49.6
22/02/99	-6.86				-3.48				60.8
02/03/99	-6.89	-39.3	-6.91				-6.67		
09/03/99					-10.18	-65.2			7.4
17/03/99	-6.97							-6.67	
24/03/99	-7.05	-40.7	-7.12				-6.86		
01/04/99	-7.00				-9.18			-6.64	10.2
09/04/99	-7.04	-41.4	-7.18		-3.16	-14.6	-6.82		9
16/04/99	-6.93				-5.4			-6.64	37.7
27/04/99	-6.94	-40.3	-7.03		-6.42	-34.7	-6.79	-6.58	45.6
07/05/99	-6.86				-5.31				16.8
17/05/99	-6.98	-40.6	-7.06	-39.7			-6.75	-6.65	
25/05/99	-6.84	-40.1			-6.64				6.8
14/06/99	-7.00	-40.6	-7.07		-3.46		-6.80	-6.67	19.2
13/07/99	-7.00		-7.12				-6.82	-6.29	
14/08/99	-7.06	-40.9	-7.16						
18/09/99	-7.05	-41.3	-6.66				-6.72		
13/10/99	-7.06	-41.0	-7.17						
	SALU		IGAR		PREC		LEGOR	CUAT	
	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^2\text{H}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^2\text{H}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^2\text{H}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	$\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$	
N	24	15	14	1	16	7	14	7	
Media	-6.93	-40.62	-7.03	-39.7	-5.85	-41.8	-6.68	-6.59	
Mediana	-6.96	-40.65	-7.07	-39.7	-5.49	-34.70	-6.72	-6.64	
Desv. S.	0.12	0.62	0.16	-	2.45	25.48	0.15	0.14	
Rango	0.52	2.1	0.55	-	7.54	58.4	0.49	0.38	

**Tabla 5.21: Datos isotópicos obtenidos (SALU: Salubita; PREC: precipitación; IGAR: Igaran; LEGOR: Legorreta; CUAT: cuaternario) en el marco de este estudio y parámetros estadísticos. (N: número de muestras en las que se ha analizado  $\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$  o  $\delta^2\text{H}^0/_{00}$ , Desv. S.: desviación estándar). La columna de la derecha corresponde a la precipitación semanal acumulada en la estación de Erdoizta.**

El gráfico de la figura 5.32 correspondiente a la precipitación evidencia la alta variación del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  en el agua de lluvia. Los valores más negativos en  $\delta^{18}\text{O}$  (-10.70 y -10.18) coinciden con períodos en los que la precipitación se ha producido en forma de nieve (figura 4.15), lo que pone de manifiesto la influencia que el tipo de precipitación ejerce en el contenido isotópico.

Según esta figura, en general, la evolución del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  de las aguas de los cuatro puntos de descarga es prácticamente paralela situándose cada una de ellas a diferentes niveles. Teniendo en cuenta que a cotas de recarga más altas corresponden valores más negativos de  $\delta^{18}\text{O}$ , se observa claramente que las cotas de recarga que corresponden a cada punto de descarga son de más alta a más baja las de Igaran, Salubita, Legorreta y cuaternario.

***Figura 5.32: Precipitación diaria registrada en la estación de Erdoizta, hidrograma de la estación de aforos de la Regata Albiztur (presa), y evolución temporal del  $\delta^{18}\text{O}$  en los puntos de descarga muestreados (Salubita, Igaran, Legorreta y cuaternario) y en las lluvias.***

En el caso de las aguas del cuaternario, en general, los valores del  $\delta^{18}\text{O}$  se mantienen bastante constantes, con excepción de una única muestra.

En cuanto a las muestras del manantial de Salubita, llama la atención la muestra del 30/11/98 que proporciona el valor más alto de  $\delta^{18}\text{O}$ , coincidiendo con la importante crecida de finales de Noviembre. Este hecho se observa, menos claro, también en otras crecidas (Enero de 1999 y Mayo de 1999).

En la zona central de los Pirineos franceses BAKALOWICZ et al. (1974) observan en el manantial de Le Baget, tras muestreos realizados a intervalos de entre 1 y 12 horas, ligeros aumentos del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  tras precipitaciones registradas durante los meses de verano (anteriores al estiaje). Tanto este autor como FONTES (1976) atribuyen este comportamiento a dos posibles causas principales: 1) a la llegada al punto de descarga de la lluvia caída a menor altitud, lo que iría acompañado de una disminución en el contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  o 2) a la presencia en la surgencia de aguas procedentes del propio Sistema Kárstico, pero enriquecidas en isótopos pesados, lo que iría acompañado del aumento en el contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$ .

En la figura 5.33, en la que se ha representado conjuntamente la evolución temporal del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  y en  $\text{SO}_4^{2-}$ , se pueden observar momentos en los que al aumentar el contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  se produce una disminución en  $\text{SO}_4^{2-}$  y otras ocasiones en las que al aumentar el contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  el contenido en  $\text{SO}_4^{2-}$  también aumenta. Aunque las explicaciones aducidas por BAKALOWICZ (1974) y FONTES (1976) podrían ser factibles para el caso del manantial de Salubita, no es posible verificarlas debido a lo escaso de la información isotópica en este manantial. Esta comprobación requiere de un control isotópico mucho más exhaustivo, de muy alta frecuencia y que abarque situaciones hidrogeológicas diferentes.

*Figura 5.33: Precipitación diaria registrada en la estación de Erdoizta, caudales de la Regata Albiztur a su paso por la estación de aforos y evolución temporal del  $\delta^{18}\text{O}$  y de los sulfatos en el manantial de Salubita.*

Por otra parte, la figura 5.33 permite constatar que las aguas del manantial de Salubita muestran los valores más bajos en  $\delta^{18}\text{O}$  en la época de estiaje (de Agosto a Octubre de 1999) debido, seguramente, a la influencia de la infiltración, en esa época, de las aguas de la Regata Albiztur a lo largo de su lecho, que en estos momentos provienen casi en su totalidad de Igaran (mayor cota-valores más negativos de  $\delta^{18}\text{O}$ ). La influencia de la regata queda justificada en la figura por el aumento de la concentración en sulfatos que se registra en el estiaje y que muestra una tendencia creciente. Tanto esta tendencia creciente de la concentración en sulfatos en el manantial de Salubita como la tendencia decreciente de los valores de  $\delta^{18}\text{O}$ , parecen indicar que a medida que el estiaje del año 1998-99 avanza, la influencia de las aguas provenientes de Igaran en el manantial de Salubita es mayor.

En la figura 5.34 se ha plasmado la evolución del contenido en  $\delta^2\text{H}$  del agua del manantial de Salubita y del agua de precipitación, así como la única muestra en la que se han analizado simultáneamente  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$  en Igaran (Ig en la figura 5.34). Resaltan, al igual que para el  $\delta^{18}\text{O}$ , las importantes variaciones del contenido en  $\delta^2\text{H}$  en la lluvia, en relación con los valores obtenidos para los manantiales. El dato correspondiente al manantial de Igaran muestra un contenido en  $\delta^2\text{H}$  superior al contenido de Salubita para la muestra tomada el mismo día (17/05/99), aunque es posible que se trate de un valor erróneo. El manantial de Salubita muestra una evolución prácticamente paralela de sus valores de  $\delta^{18}\text{O}$  y  $\delta^2\text{H}$ .

*Figura 5.34: Precipitaciones diarias registradas en la estación de Erdoizta, hidrograma de la estación de aforos de la Regata Albiztur (presa), y evolución temporal del  $\delta H$  en Salubita y en la precipitación. El punto denominado Ig corresponde al manantial de Igaran.*

#### **5.2.1.1. DEFINICIÓN DE LAS ZONAS DE RECARGA DE LOS MANANTIALES**

IRIBAR y ANTIGÜEDAD (1996) definieron, a partir de datos isotópicos de lluvias de numerosas estaciones del País Vasco (359 pares de datos), los gradientes altimétricos existentes entre ellas. A pesar de que el resultado mostró una gran dispersión de los valores, la mediana de los gradientes altimétricos obtenidos fue de  $-0.21 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})/100 \text{ m}$ . En este estudio se ha utilizado este gradiente como pilar para el cálculo de las zonas de recarga.

El valor de referencia ( $\delta^{18}\text{O}$ ) utilizado para el cálculo ha sido el correspondiente al pequeño manantial ( $Q < 1 \text{ l/s}$ ) que drena depósitos cuaternarios de la depresión de Bidania (cuaternario). A tenor de los datos de temperatura de la tabla 5.7, esta surgencia está muy influenciada por las variaciones de temperatura en el exterior, lo que indica que estas aguas han de proceder de una zona próxima: los propios materiales detríticos cuaternarios. Esto significa que la cota de recarga de esas aguas debe ser próxima a 480 m (cota de la depresión de Bidania). De esta forma, tomando como referencia este par de valores (480 m y  $-6.59 \text{ ‰ } \delta^{18}\text{O}$ , tabla 5.21) y considerando el gradiente altimétrico citado ( $-0.21 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})/100 \text{ m}$ ), se han obtenido las siguientes cotas de recarga para el resto de puntos de descarga considerados: **Salubita 640 m, Igaran 690 m y Legorreta 520 m** (figura 5.35).

Las cotas de recarga obtenidas no son en modo alguno extrañas, habida cuenta de las características topográficas de la zona de estudio. El manantial de Salubita se sitúa a una cota de 120 m y aproximadamente el 75% de la cuenca que drena se encuentra entre los 400 y los 820 m (figuras 3.2 y 4.1), sobre todo la zona Oeste del Sistema. Aproximadamente el 70% de la cuenca drenada por el manantial de Igaran (cota 325 m) se encuentra a una cota ligeramente superior (entre 500 y 820 m), por lo que la diferencia de cotas (50 m) de recarga obtenida para estos dos manantiales parece razonable.

Las zonas de recarga del manantial de Legorreta (cota 90 m) no se han estudiado en detalle, por encontrarse fuera de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur. En cualquier caso, la orografía que circunda este manantial, sobre todo hacia el Oeste, hace factible la cota de recarga obtenida.

**En vista de las razonables cotas de recarga obtenidas considerando un gradiente altimétrico de  $-0.21 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})/100 \text{ m}$ , parece claro que este gradiente vale para el caso de la zona estudiada. CLARCK y FRITZ (1997) recopilan gradientes altimétricos calculados por diferentes autores, de los cuales los más parecidos a la zona de estudio son los de las montañas del Jura y la Selva Negra (Suiza), a los cuales les corresponden gradientes de  $-0.2$  y  $-0.19 \text{ ‰ } (\delta^{18}\text{O})/100 \text{ m}$ , muy similares al utilizado en nuestro caso.**

*Figura 5.35: Cotas de recarga obtenidas para los manantiales de Igaran, Salubita, Legorreta y cuaternario, calculadas a partir del contenido isotópico del agua de precipitación, en función del gradiente altimétrico establecido por IRIBAR y ANTIGÜEDAD (1996) de  $-0.21 \text{ }^0/_{00} (\delta^8\text{O})/100 \text{ m}$ .*

### 5.2.1.2. TIEMPO DE PERMANENCIA DEL AGUA EN EL ACUÍFERO

La estimación del tiempo de permanencia se suele llevar a cabo mediante **modelos de caja negra** (*lumped parameter models*), cuya idea básica se describe mediante la integral de convolución (RICHTER et al., 1993):

$$C_{out}(t) = \int_0^{\infty} C_{in}(t-t') \exp(-\lambda t') g(t') dt' \quad (1)$$

donde  $t$  es el tiempo real,  $t'$  es el tiempo de tránsito del trazador (isótopo),  $C_{out}(t)$  es el contenido de trazador a la salida del sistema acuífero,  $C_{in}$  es el contenido de trazador a la entrada del sistema y  $g(t')$  es la función de respuesta del sistema. Normalmente, al igual que en nuestro caso, se considera que,

$$\int_0^{\infty} g(t') dt' = 1 \quad (2)$$

En los manantiales kársticos existe, en general, una mezcla de dos componentes de agua: 1) el que fluye a través de las fisuras y poros de la matriz (mayor capacidad de almacenamiento) y 2) el sistema de conductos donde el agua viaja a mayor velocidad (menor tiempo de permanencia). De acuerdo con este funcionamiento la ecuación (1) se puede utilizar de dos formas diferentes:

1) Mediante el **modelo exponencial sencillo (MES)**, en cuyo caso se estima un tiempo de permanencia medio del conjunto del sistema (figura 5.36).

2) Mediante un **modelo exponencial de dos sistemas conectados en paralelo (EPM)**, EPM1 y EPM2 (figura 5.36). El sistema EPM1 corresponde al conjunto de conductos, mientras que el EPM2 corresponde al conjunto de fisuras y matriz porosa. Conociendo el tiempo de permanencia del sistema EPM1, se obtiene el tiempo de permanencia del EPM2 así como el porcentaje del sistema EPM1 en el conjunto.

*Figura 5.36: Esquema conceptual de los modelos utilizados.*

La conexión paralela entre estos dos modelos exponenciales se puede llevar a cabo de forma que:

$$C_{out} = \sum p_i C_{out(i)} \quad (3)$$

donde  $C_{out}$  es el contenido de trazador a la salida del sistema acuífero,  $C_{out(i)}$  es el contenido de trazador a la salida del subsistema  $i$ , y  $p_i$  es el porcentaje del subsistema  $i$  en la totalidad del sistema. Simplificando la ecuación 3 se obtiene que:

$$C_{out} = p_1 C_{out(1)} + (1 - p_1) C_{out(2)} \quad (4)$$

Para construir la función de entrada del  $\delta^{18}\text{O}$ , IRIBAR y ANTIGÜEDAD (1996) utiliza los datos pluviométricos de la estación de Aramotz (Bizkaia) y la concentración en  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación de esa estación completándolos con datos de otras estaciones. Utiliza un total de 64 datos mensuales que abarcan el período comprendido entre Enero de 1989 y Abril de 1994 (Anexo I). En el presente estudio se ha considerado esta misma función de entrada, ya que los datos obtenidos de las muestras de agua de lluvia recogidas entre 1998 y 1999 (16 datos, tabla 5.21) no son suficientes como para establecer una función de entrada fiable.

Para calcular el tiempo de permanencia del agua en el acuífero se ha utilizado el **modelo exponencial de dos sistemas conectados en paralelo** a partir de los datos isotópicos recopilados en la

surgencia de Salubita durante 1998-99, a lo largo de este estudio. Se ha utilizado el programa MULTIS v. 3.11. Se ha considerado para EPM1 (sistema de drenaje rápido) un tiempo de residencia de 1 mes, ya que el modelo no permite tiempos más cortos. La edad del agua joven (*young water*) utilizada, dato solicitado por el programa, ha sido también de 1 mes. Una vez incluidos estos valores se obtiene un **tiempo medio de permanencia del agua en el acuífero (EPM2, sistema de drenaje lento) de 7 años.**

El programa MULTIS exige un dato de entrada relativo al porcentaje que el sistema de drenaje rápido (EPM1) representa en el conjunto del sistema. Puesto que este dato no es conocido, se han realizado varios cálculos considerando que el sistema EPM1 constituye un 5%, un 10%, un 15% y un 20% del conjunto del sistema, y en todos los casos el valor del tiempo de permanencia del agua en el acuífero ha sido de 7 años.

A partir del tratamiento de los datos isotópicos de muestras tomadas en el manantial de Salubita y en el agua de precipitación de la estación de Bidania entre 1990 y 1994 (Anexo 1), IRIBAR (1996) estimó un tiempo de permanencia de 33 meses (2.75 años) del agua en el Sistema Kárstico de Salubita según el contenido en  $\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$  aplicando el MES del programa MULTIS v.3.11 (STICHLER et al., 1984; RICHTER, 1993) y superior a 5 años según el contenido en tritio. Este mismo autor calculó mediante el EPM, a partir del contenido en  $\delta^{18}\text{O}^0/_{00}$ , el valor del porcentaje que el sistema EPM1 constituye en la totalidad del sistema, el cual resultó ser de un 5%.

**En la tabla 5.22 se muestran los diferentes tiempos de permanencia obtenidos para el Sistema Kárstico de Salubita mediante diferentes métodos e isótopos y considerando muestreos diferentes.**

	MÉTODO	ISÓTOPO	Muestras	EPM1 en el sistema	TMP
IRIBAR y ANTIGÜEDAD (1996)	MES	Tritio	1990-1994		>5 años
		$^{18}\text{O}$			33 meses
	EPM	$^{18}\text{O}$	1990-1994	5%	5 urte
MUGUERZA	EPM	$^{18}\text{O}$	1998-1999	5-20%	7 años (EPM2)
BURGMAN (1987)	$\text{TMP}=0.5\pi(1-C)^{0.5}/C$ $C=B/A$	$^{18}\text{O}$	1998-1999		29.8 meses

**Tabla 5.22: Tiempos medios de permanencia (TMP) obtenidos para el Sistema Kárstico de Salubita mediante el modelo exponencial sencillo (MES), modelo exponencial de dos sistemas conectados en paralelo (EPM) y el método de BURGMAN (1987). Se incluye también el porcentaje que el sistema EPM1 constituye en el conjunto. En el método de Burgman A se refiere al rango del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  en la precipitación y B al rango del contenido en  $\delta^{18}\text{O}$  en las aguas del manantial. Para este cálculo se han utilizado las medias mensuales en el caso de que para el mismo mes se disponga de más de un dato, de tal forma que A: 7.24 y B: 0.37.**

Los ensayos con trazadores (apartado 4.8) aportaron información sobre el funcionamiento del sistema de drenaje rápido que constituye una parte del Sistema Kárstico de Salubita, con tiempos de

permanencia del trazador en la surgencia de entre 6 y 78 horas (tabla 4.18). El estudio isotópico (sobre todo de  $\delta^{18}\text{O}$ ) ha mostrado, por otra parte, que el tiempo de permanencia del agua en el conjunto del sistema es de entre 29.8 y 33 meses, mientras que el del sistema más lento (EPM2) es de alrededor de 7 años. Esto pone de manifiesto la importancia del conjunto de fisuras que constituyen la otra parte de este Sistema. Este conjunto de fisuras sería el que controla el flujo base en la surgencia de Salubita que, según el apartado 4.3.1, se mantiene prácticamente constante de un año a otro (286-309 l/s para los años hidrológicos 1986-87, 1997-98 y 1998-99) a pesar de que el volumen total de agua caída cada año haya sido diferente. El tiempo de permanencia para el conjunto del Sistema obtenido en función del tritio se realizó a partir de únicamente dos muestras, por lo que, a pesar de servir como dato de referencia, hay que considerarlo con cierto cuidado.

En cualquier caso, para la obtención de tiempos de permanencia más exactos, sería recomendable la realización de un seguimiento isotópico continuo (varios años) tanto de las aguas de precipitación de la cuenca drenada por el manantial de Salubita, que permitiera el establecimiento de una función de entrada específica para esa zona, como de la surgencia de Salubita, que permitiera controlar la evolución isotópica a lo largo de años hidrológicos húmedos, secos e intermedios.

### **5.3. MUESTREO ESPECÍFICO**

Para los análisis de elementos específicos, las muestras (surgencia de Salubita, manantial de Legorreta, sumidero de Osinondo y Regata Albiztur aguas arriba de Benta Zaharra) se tomaron en botellas oscuras de vidrio borosilicatado con tapón de polipropileno de 1 l de capacidad y se mantuvieron a 4°C hasta ser analizadas en un período inferior a 24 horas.

Los muestreos se realizaron en función de la situación hidrogeológica, ya que el propósito principal de esta campaña consistía en comprobar la influencia que los cambios en los caudales pudieran ejercer en la posible aparición de elementos específicos en las surgencias. Se tomaron muestras a lo largo de cuatro días, en los cuales se abarcaron tres situaciones: aguas medias-altas (02/03/99), aguas altas (09/03/99) y aguas bajas (30/07/99 y 20/09/99).

Los análisis se realizaron en el laboratorio de la empresa GAIKER (Zamudio, Bizkaia) determinándose los siguientes parámetros: Fenoles Totales, Hidrocarburos Halogenados (Diclorometano, 1,1,1-Tricloroetano, 1,1,2-Tricloroetano, Triclorometano, Tetracloroetileno), Plaguicidas Organoclorados (Dieldrin), Plaguicidas Nitrogenados (Atrazina) y Detergentes Aniónicos.

Los **Fenoles Totales** se determinaron por destilación, extracción en cloroformo del destilado y posterior clorimetría, con 4-aminoantipirina, SM 5530/B+D.

La determinación de los **Hidrocarburos Halogenados** se realizó en base al método SM 6220/D, que describe la determinación cuantitativa de las concentraciones de hidrocarburos aromáticos volátiles presentes, mediante la técnica de “purge & trap”, desorción térmica y cromatografía en fase gaseosa dotada de un detector de Captura de Electrones (GC/ECD).

El método empleado para la determinación del contenido en **Dieldrin** se basa en la norma EPA 525.1 que consiste en una primera fase de extracción con solvente apolar, concentración en corriente de nitrógeno y posterior “clean up” por columna de relleno. El extracto obtenido se analizó, utilizando cromatografía de gases con detector de Captura de Electrones (GC/ECD).

El contenido en **Atrazina** se determinó mediante Cromatografía Líquida de Alta Resolución con detección por UV (HPLC/UV).

Los **Detergentes Tensioactivos Aniónicos** se determinaron por reacción con azul de metileno, SM 5540/C.

Las metodologías especificadas con las siglas SM corresponden al “Standard Methods for the Examination of Water and Wastewater”. APHA-AWWA-WPCF.

La Incertidumbre de estos ensayos, calculada como Desviación Estándar Relativa, se estima en un 10%. Según los resultados obtenidos (Anexo I), se puede observar que prácticamente todos los componentes analizados se encuentran por debajo del límite de detección, a excepción de los detergentes de la muestra tomada en el sumidero de Osinondo, que alcanzan los 0.31 mg/l (20/09/99), durante un período de estiaje en el que el caudal en la estación de aforos de la Regata Albiztur ( $Q_{AF}$ ) es de 138 l/s. Aunque no se trata de un valor extremadamente alto, pone de manifiesto que el sumidero de Osinondo es una zona potencialmente peligrosa a través de la cual podrían entrar al acuífero diferentes tipos de contaminantes.

## **5.4. CONCLUSIONES**

### **5.4.1. ESTADÍSTICA DESCRIPTIVA**

La tabla 5.7 evidencia que las aguas del manantial de Salubita son las menos mineralizadas, en comparación con el resto de las aguas, y que sus homogeneidad hidroquímica es importante. Las aguas más mineralizadas son las de los manantiales de Igaran y Legorreta, las cuales presentan una gran variabilidad hidroquímica, sobre todo en el contenido en sulfatos y en la conductividad eléctrica. Aunque los manantiales de Igaran y Etxeberri se hallan en materiales de edad similar, llama la atención las diferencias hidroquímicas entre ambos y la gran homogeneidad hidroquímica de Etxeberri frente a la importante variabilidad hidroquímica de Igaran.

La escasa variabilidad de la temperatura del agua de la Regata Albiztur en la presa ( $\Delta T=2.7^{\circ}\text{C}$ ) (aguas abajo del manantial de Salubita) demuestra, una vez más, la influencia del agua del manantial de Salubita en las aguas de la regata, que aguas arriba del manantial muestran variaciones de temperatura mucho mayores ( $\Delta T=13^{\circ}\text{C}$ ).

El manantial de Salubita posee, en comparación con el manantial de Igaran, menores contenidos en casi todos los elementos menos en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  debido, probablemente, a su relación con el sumidero de Osinondo, donde las concentraciones en estos dos elementos son aún mayores.

Evidentemente las aguas que se infiltran en el sumidero de Osinondo y las aguas del cuaternario experimentan mayores fluctuaciones en las concentraciones de casi todos los elementos (no en el caso de los sulfatos), debido a su estrecha relación con la superficie, expuesta tanto a actividades agrícolas y ganaderas como a las aguas de precipitación.

#### **5.4.2. ANÁLISIS ESPACIAL**

A tenor de los diagramas de Schoeller-Berkaloff (figuras 5.2 a 5.5) se puede afirmar que las aguas de todos los manantiales considerados son bicarbonatadas cálcicas. Las aguas del manantial de Igaran también son de este tipo aunque en estiaje alcanzan el límite de las aguas de tipo bicarbonatado-sulfatado cálcico.

La figura 5.6 refleja la evolución hidroquímica de los sulfatos en los puntos de agua más importantes considerados, de los cuales a excepción de Igaran y Gain (influenciado por Igaran), el resto de los puntos de agua muestran una evolución hidroquímica unimodal muy marcada.

#### **5.4.3. ANÁLISIS EN COMPONENTES PRINCIPALES (ACP)**

El ACP conjunto en el que se han incluido todos los puntos de agua (apartado 5.6.11) muestra que, en general, el factor I representa la **mineralización**. El factor II es el reflejo de la influencia en los sistemas de **elementos externos**, de origen principalmente en procesos meteóricos y en las actividades agrícolas y ganaderas del entorno. El factor III indica la existencia de un segundo tipo de **mineralización** relacionado con aguas bicarbonatadas, cuyo origen está en parte en relación con las formaciones carbonatadas y, en parte, con fenómenos atmosféricos.

#### **5.4.4. ANÁLISIS TEMPORAL**

#### **5.4.5. ISÓTOPOS**

El estudio isotópico, sobre todo del  $^{18}\text{O}$ , ha permitido establecer las cotas medias de recarga de los manantiales de Salubita, Igaran y Legorreta en 640 m, 690 m y 520 m respectivamente,

considerando un gradiente altimétrico de  $-0.21 \text{ ‰} (\delta^{18}\text{O})/100 \text{ m}$ . Las razonables cotas obtenidas muestran que este gradiente altimétrico es válido para la zona de estudio.

Por otra parte, los tiempos de permanencia obtenidos a partir del  $^{18}\text{O}$  para el conjunto del acuífero oscilan entre 29.8 y 33 meses ( $>5$  años con tritio) y para el sistema más lento rondan los 7 años. Se pone así de manifiesto la complejidad del Sistema Kárstico de Salubita, en cuyo seno se suman dos tipos de comportamiento netamente diferentes; el correspondiente al flujo lento, que se propaga a través del sistema de fisuras (más inercial) y el correspondiente al flujo rápido, que viaja a través del sistema de conductos (sin capacidad reguladora).

#### ***5.4.6. ANÁLISIS ESPECÍFICOS***

Si bien los análisis específicos (apartado 5.9) han proporcionado casi siempre concentraciones por debajo de los límites de detección, la muestra tomada el día 20/09/99 en Osinondo, muestra que la concentración en detergentes es algo mayor (0.31 mg/l) que en el resto de las muestras tomadas en ese mismo punto en otros momentos, lo que pone en evidencia el riesgo puntual que esta zona de infiltración representa para el Sistema Kárstico de Salubita, cuya relación directa es clara en función de los ensayos con trazadores.

### **5.10. RESUMEN-CONCLUSIONES**

Entre Enero de 1997 y Julio de 2000 se analizaron un total de 1184 muestras (tabla 5.3) del área de estudio, una parte muy importante de las cuales se tomaron en la surgencia de Salubita (489; de ellas 360 lo fueron en muestreos de episodios concretos con una frecuencia de entre 4 horas y 3 días). El resto se tomaron, sobre todo, en la estación de aforos de la Regata Albiztur (presa, 163), en esta misma regata pero aguas arriba de la surgencia (Gain, 94), en el manantial de Igaran (107) y en el sumidero de Osinondo (88), puntos todos ellos relacionados de una u otra manera con Salubita. El resto corresponde a aguas de lluvia, pequeños manantiales y alguna muestra de lixiviados.

Los elementos que se determinaron en los análisis han sido los mayoritarios habituales (sodio, potasio, calcio, magnesio, cloruros, sulfatos, bicarbonatos, nitratos) con el añadido del estroncio que también ha sido determinado de forma sistemática. En el campo se midieron conductividad, pH y temperatura. El hecho de que las determinaciones se realizasen en el laboratorio varios días después de la toma de la muestra supone que no se hayan considerado aquí los aspectos referentes al pH de equilibrio y a los estados de saturación de las aguas en el sistema calco-carbónico.

#### ***Estadística descriptiva***

La tabla 5.7 recoge los parámetros estadísticos de las determinaciones realizadas en las aguas de Salubita, presa, Igaran, Gain, Osinondo, Cuaternario, Etxeberri y Legorreta. Se evidencia que las aguas de Salubita son las menos mineralizadas y con una buena homogeneidad hidroquímica. Las más mineralizadas son las de Igaran y Legorreta, que presentan además una gran variabilidad hidroquímica, sobre todo en sulfatos y en la conductividad eléctrica. Aunque los manantiales de Igaran y Etxeberri drenan, a priori, materiales similares, llama la atención las diferencias entre ambos y la gran homogeneidad hidroquímica de Etxeberri frente a la importante variabilidad de Igaran.

Es manifiesta la buena relación existente entre los parámetros estadísticos de Salubita y de la presa, por un lado, y de Igaran y Gain, por otro, lo cual confirma, ahora desde la hidroquímica, lo ya anteriormente deducido (capítulo 4) desde la hidrodinámica, es decir, la notable influencia que las aguas procedentes del manantial de Igaran tienen en la Regata Albiztur aguas arriba de Salubita (Gain) y la notable influencia que las aguas de Salubita tienen en la presa de la regata, aguas abajo de este manantial. También reflejan los datos, los valores máximos al menos, la influencia que la regata (Gain) tiene sobre Salubita en momentos de estiaje, que es cuando se dan esos máximos, sobre todo en lo que concierne a los sulfatos.

A la vista del conjunto de datos expuestos en la tabla se deduce que las aguas que alimentan de forma superficialmente difusa el acuífero drenado por Salubita (dejando aparte, por tanto, las procedentes del sumidero de Osinondo) tienen, en relación con las infiltradas en Osinondo, menores contenidos en  $\text{HCO}_3^-$ ,  $\text{K}^+$ ,  $\text{Na}^+$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Cl}^-$  (menor conductividad) y mayores contenidos en  $\text{SO}_4^{2-}$ . En este caso, sulfatos, la explicación no sólo hay que buscarla en la infiltración de aguas ricas en ese elemento desde la regata al acuífero, cerca de Salubita, en épocas de aguas bajas, sino que teniendo en cuenta los contenidos mínimos de  $\text{SO}_4^{2-}$  en Salubita, mucho mayores que los medidos en Osinondo en esos momentos, de aguas altas, hay que admitir que las otras aguas de infiltración al acuífero se cargan, efectivamente, con más sulfatos, dentro de los propios materiales carbonatados urgonianos.

En comparación, sin embargo, con las aguas de la regata procedentes de Igaran, es evidente que las aguas drenadas por Salubita presentan contenidos menores en casi todos los elementos y, de forma mucho más notoria en  $\text{SO}_4^{2-}$ ,  $\text{Mg}^{2+}$  y  $\text{Sr}^{2+}$ , elementos estos claramente marcadores del drenaje de las formaciones jurásicas. Solamente en  $\text{Na}^+$  y  $\text{Cl}^-$  son las aguas de Salubita más ricas, estando estos elementos más presentes aún en las aguas infiltradas en el sumidero de Osinondo.

La escasa variabilidad de la temperatura del agua de la Regata Albiztur en la presa ( $\Delta T=2.7^\circ\text{C}$ ) (aguas abajo del manantial de Salubita) demuestra, una vez más, la influencia del agua del manantial de Salubita en las aguas de la regata, que aguas arriba del manantial muestran variaciones de temperatura mucho mayores ( $\Delta T =13^\circ\text{C}$ ). Por otra parte, la temperatura es similar, en valor medio ( $11.7\text{-}11.8^\circ\text{C}$ ) y en rango ( $\Delta T=1.9\text{-}1.4^\circ\text{C}$ ), para Salubita e Igaran, a pesar de su diferencia de cota (Salubita a 120 m e Igaran a 325 m).

Evidentemente las aguas superficiales que se infiltran en el sumidero de Osinondo y las aguas del pequeño manantial del cuaternario muestran mayores fluctuaciones en las concentraciones de casi todos los elementos determinados, debido a su estrecha relación con la superficie del terreno, expuesta de forma directa tanto a actividades agrícolas y ganaderas como a los condicionantes meteorológicos, sin el efecto, mayor o menor, uniformizador que presentan los acuíferos.

### ***Análisis espacial***

En parte ya se ha hecho referencia a las variaciones espaciales en el apartado anterior; aquí se comentan los aspectos gráficos. A tenor de los diagramas de Schoeller-Berkaloff (figura 5.1) y Piper (figuras 5.2 a 5.5) se puede afirmar que las aguas de todos los manantiales y cursos superficiales considerados son bicarbonatadas cálcicas. Las aguas del manantial de Igaran también son de este tipo aunque en estiaje llegan a alcanzar el límite de las aguas de tipo bicarbonatado-sulfatado cálcico.

La figura 5.6 refleja las curvas de distribución de frecuencias del contenido en sulfatos en los puntos de agua más importantes considerados. A excepción de Igaran y Gain (influenciado por Igaran), el resto de los puntos de agua muestran una distribución unimodal muy marcada. Se pone de manifiesto que el sulfato es un muy buen marcador en este área kárstica, en la medida que es el elemento que más variabilidad presenta tanto en el espacio como en el tiempo para cada punto. Es por esta razón que este elemento ha sido utilizado a lo largo del capítulo 4 como herramienta para la descomposición de los hidrogramas.

### *Análisis en Componentes Principales (ACP)*

Este (ACP) ha sido el método que se ha aplicado a cada punto, y a su conjunto, con el fin de estudiar el grado de estructuración de la varianza contenida en la información de los datos analíticos, y de establecer los elementos que, en cada caso, mejor explican esa varianza (expresada por los factores que el ACP proporciona). En la interpretación de la situación de las muestras en los planos factoriales correspondientes se ha prestado especial importancia a la localización de las muestras en el hidrograma. Así, se han distinguido tres situaciones hidrológicas: *estiaje*, con caudales en la estación de aforos de la Regata Albiztur (que se ha tomado como hidrograma de referencia) menores a 200 l/s; *aguas altas*, mayores de 800 l/s, y *transición*, entre 200 y 800 l/s.

El % de varianza explicada ha sido siempre superior al 75% y eso se ha conseguido con 3 o, a lo sumo, con 4 factores. Los valores mayores se obtienen para Gain (91% con cuatro factores) y para Igaran (89% con tres), siendo estos los puntos que presentan una mayor estructuración de la varianza. De hecho, el primer factor explica, por sí solo, el 60% de la información en Igaran y el 55% en Gain. El resto de puntos presentan menores % para su primer factor, estando en el cuaternario (26%), en la presa (34.2% y en Salubita (34.6%) los valores más bajos. Tanto en Salubita como en la presa, de similar comportamiento, los tres primeros factores explican un 66%, y junto con el cuarto un 75%.

Respecto al significado de los factores en buena parte de los puntos considerados (Salubita, presa, Igaran, Gain) el factor I es claramente exponente de la **mineralización** de las aguas, siendo conductividad, sulfatos, magnesio, estroncio y, aunque con menor peso, calcio, los elementos, de origen interno, marcadores de esa mineralización. El factor II en esos puntos es exponente de la **influencia externa**, sobre todo en relación con los **usos del suelo**, marcados por nitratos y potasio. Estos dos factores son invariables y nítidos, no así el tercero y cuarto que cambian de un punto a otro, y que incluso no se mantienen en los grupos homogéneos Salubita-presa e Igaran-Gain.

En esos factores, tercero y cuarto, intervienen de forma individual cloro, sodio y bicarbonato, que habitualmente no presentan buenas correlaciones ni entre sí ni con el resto de elementos. En el

caso del cloro, de origen meteórico, no presenta evolución temporal clara alguna, aunque parece que sus contenidos aumentan en los momentos de lluvias y nieves intensas de otoño. Los bicarbonatos tampoco muestran evolución clara, aun siendo el elemento de mayor presencia en la mineralización, y parece que sus mayores contenidos estén asociados a periodos nivales.

En Etxeberri se mantiene el factor I en los términos anteriores, pasando ahora al factor III los elementos externos en relación con los usos del suelo (nitratos y potasio). El factor II es ahora otra **mineralización**, la evidenciada por bicarbonatos y calcio, que aquí presentan una buena correlación. La relativamente alta temperatura que presentan las aguas de este manantial y su escasa variabilidad hidroquímica (tabla 5.7), junto con su situación geológica, hacen pensar en la posibilidad de dos tipos de flujos, uno más profundo, al cual se relaciona la mineralización del factor I (sulfatada), y otro más superficial, en relación con la bicarbonatada (calizas urgonianas).

En el resto de puntos considerados (Osinondo, cuaternario y Legorreta) el primer factor está determinado por elementos varios, pero todos de **origen externo** fundamentalmente, bien de usos del suelo (nitratos, potasio, sodio) en Legorreta, o bien meteóricos (cloruros, sodio) en Osinondo y cuaternario. La aplicación del ACP en estos puntos evidencia una estructuración de la varianza que poco tiene que ver con la de los puntos anteriores; ahora las correlaciones obtenidas son indicativas de mezcla de procesos, sin que el seguimiento efectuado aporte claridad a tal complejidad. Hay que recordar que, al menos en Osinondo y cuaternario, los fenómenos externos (usos del suelo, meteorología) tienen una influencia notable. Por lo que parece, puede ser el caso en Legorreta.

En lo que a la distribución de muestras se refiere, en función de las tres situaciones hidrológicas citadas (estiaje, aguas altas y transición) la mineralización más alta se presenta en estiaje, sobre todo en el estiaje de 1999 que fue el más severo, (en relación con los marcadores propios del factor I) y va disminuyendo a medida que se pasa a situaciones de aguas altas, a través de la transición. A la escala del muestreo, al menos, es evidente la dilución generada en las crecidas (relación negativa mineralización-caudal). Ahora bien, se observa de forma generalizada un diferente comportamiento en la crecida y en la decrecida; en las crecidas aumentan los contenidos en los elementos de origen externo (nitratos y potasio), y más aun cuando de las primeras crecidas del año hidrológico se trata. Esto hace que estos elementos externos puedan ser utilizados como marcadores de la presencia del flujo rápido, superficial, en el punto de control. En el manantial del cuaternario no es posible distinguir las tres situaciones, debido a que su caudal se mantiene siempre muy bajo (< 1l/s).

El ACP conjunto en el que se han incluido todos los puntos de agua (134 muestras repartidas bastante uniformemente entre todos los puntos de control) muestra (figura 5.21) que el factor I (43%) representa la **mineralización** (sulfatos, magnesio, estroncio, conductividad y, con menos peso, calcio).

El factor II (22%) es el reflejo de la influencia de **elementos externos** (nitratos y potasio, sobre todo, y cloruros y sodio) de origen meteórico y de los usos del suelo. El factor III (13%) indica la existencia de un segundo tipo de **mineralización** (bicarbonatos y calcio) relacionado con aguas bicarbonatadas, cuyo origen está, en parte, en relación con el drenaje de formaciones calcáreas, flujos someros, y, en parte también, posiblemente, con fenómenos atmosféricos (mayores contenidos de bicarbonatos en épocas nivales).

### *Seguimiento hidroquímico de episodios concretos*

Determinados episodios hidrológicos concretos han sido controlados con un paso muy corto de muestreo, entre 3 y 8 horas. Las determinaciones efectuadas ponen en evidencia aspectos de interés que no pueden ser evidenciados con muestreos a mayores pasos de tiempo, lo que indica la importancia del efecto escala del muestreo en la interpretación de los datos analíticos.

Las primeras crecidas importantes del año hidrológico 1999-2000 fueron bien controladas en Salubita y la presa. Su ACP (figura 5.15) muestra para estos dos puntos una muy buena estructuración de la varianza, con un 85% explicado con sólo dos factores. El factor I (73%), claramente dominante en esa estructuración, representa la **mineralización** del agua y viene condicionado por sulfatos, magnesio, estroncio y calcio, sobre todo, mientras que el eje II (12%) representa la **influencia externa** condicionada por nitratos, potasio (usos del suelo) y cloruros (meteorología, sobre todo). Los bicarbonatos no participan, tampoco aquí, con nitidez en estos factores.

La figura muestra un mismo carácter químico para las aguas de Salubita y la presa en el estiaje (todo el agua de la regata procede ahora del manantial). En el momento de la fuerte crecida hay una clara dilución en elementos internos acompañada de un aumento en la concentración de los externos, indicativa de la presencia del flujo rápido. En la decrecida se hace patente la diferenciación química: mientras que en la presa se vuelve a la situación inicial en Salubita la mineralización se mantiene baja, la propia del acuífero en momentos de no influencia de la regata y de escasa presencia del flujo rápido. La crecida posterior, sin embargo, muestra un claro comportamiento de flujo pistón lo que evidencia un importante cambio en las condiciones del flujo en la red de conductos, llenos ahora de agua previa a la del flujo rápido generado por esas precipitaciones.

En Igaran y Gain también se hizo un seguimiento en un periodo de continuas crecidas de mitad de la temporada húmeda (figura 5.17). Los tres primeros factores explican el 86% de la varianza. El factor I (46%) representa la **mineralización** (sulfatos, magnesio, estroncio y calcio). El II (23%, sodio y cloruros) y el III (17%, nitratos y potasio) la **influencia externa**, la meteórica aquél y la de usos del suelo éste.

Todas las crecidas controladas presentan un mismo patrón, aunque con diferente grado de mineralización: mayor en Igaran. La crecida supone siempre una dilución en los elementos internos, que se recuperan progresivamente en los periodos de recesión, y un aumento en la presencia de externos (nitratos y potasio). Este patrón se repite sistemáticamente.

### ***Análisis temporal***

Las figuras 5.22 a 5.30 reflejan las variaciones temporales de todos los elementos determinados en todos los puntos de muestreo. Es una visión gráfica de lo expuesto en el análisis espacial y concretado en el Análisis en Componentes Principales. Solo decir aquí que las gráficas muestran cómo bicarbonatos, cloruros, sodio y pH no presentan similitud clara alguna en su evolución, ni entre ellos ni con el resto de elementos, lo que justifica que no hayan sido utilizados como marcadores hidroquímicos. Se muestra también la evolución en las aguas de lluvia, la cual es, con diferencia, obviamente, la menos mineralizada y la más variable.

### ***Análisis isotópico***

Se ha realizado un total de 75 análisis isotópicos (tabla 5.21), fundamentalmente del  $^{18}\text{O}$ , y en aguas de Salubita y lluvia, sobre todo. Se ha puesto de manifiesto que las aguas de Salubita se ajustan mejor a la Línea Meteórica Local, previamente establecida para el País Vasco, que a la Meteórica Mundial. Sin embargo, las aguas de precipitación, de notable variación isotópica, no se ajustan a ninguna. Las figuras 5.32 y 5.34 reflejan las variaciones temporales en oxígeno-18 y deuterio.

Considerando un gradiente altimétrico de  $-0.21 \text{ }^{\circ}/_{\text{oo}} (\delta^{18}\text{O})/100 \text{ m}$ , establecido anteriormente para el País Vasco, y tomando como referencia de la cota de recarga la del pequeño manantial del cuaternario (480 m), el estudio ha permitido establecer las cotas medias de recarga de los otros manantiales controlados: Salubita (640 m), Igaran (690 m) y Legorreta (520 m). Las razonables cotas obtenidas muestran que ese gradiente altimétrico es válido para la zona de estudio.

Por otra parte, aplicando un modelo exponencial de dos sistemas (red de conductos y matriz fisurada) conectados en paralelo los tiempos de permanencia obtenidos a partir del  $^{18}\text{O}$  para el conjunto del acuífero de Salubita oscilan entre 29.8 y 33 meses, y para el sistema más lento, matriz fisurada, rondan los 7 años. Se pone así de manifiesto la complejidad del Sistema Kárstico de Salubita, en cuyo seno se suman dos tipos de comportamiento netamente diferentes; el correspondiente al flujo lento, que se propaga a través del sistema de fisuras (más inercial) y el correspondiente al flujo rápido, que viaja a través del sistema de conductos (sin capacidad reguladora).

### *Análisis específicos*

Se han analizado elementos específicos en cuatro puntos del área de estudio (Salubita, Legorreta, Osinondo y Regata Albiztur aguas arriba de Salubita, en Benta Zaharra) y en cuatro situaciones hidrológicas concretas, desde el estiaje hasta aguas altas. El objetivo se encaminaba, sobre todo, a evidenciar la posible afección del vertedero de Santutxo en los puntos posibles de descarga (Salubita, regata, Legorreta) y la posible contaminación de las aguas que se sumen en Osinondo una vez atravesada la depresión de Bidania en la que se dan actividades humanas de diverso tipo.

Se determinaron los siguientes parámetros: Fenoles Totales, Hidrocarburos Halogenados (Diclorometano, 1,1,1-Tricloroetano, 1,1,2-Tricloroetano, Triclorometano, Tetracloroetileno), Plaguicidas Organoclorados (Dieldrin), Plaguicidas Nitrogenados (Atrazina) y Detergentes Aniónicos.

Si bien los análisis han proporcionado casi siempre concentraciones por debajo de los límites de detección, la muestra tomada, en estiaje avanzado, el día 20/09/99 en Osinondo, muestra que la concentración en detergentes es algo mayor (0.31 mg/l) que en el resto de las muestras tomadas en ese mismo punto en otros momentos, lo que pone en evidencia el riesgo puntual que esta zona de infiltración concentrada en la depresión de Bidania representa para el Sistema Kárstico de Salubita. La relación directa de este sumidero con la surgencia es clara en función de los ensayos con trazadores, si bien el estudio hidrodinámico (capítulo 4) ha puesto de manifiesto que las aguas de Osinondo nunca llegan a ser predominantes en el manantial de Salubita.

### **6.1. INTRODUCCIÓN: Sobre la vulnerabilidad del medio kárstico**

El medio kárstico es altamente vulnerable debido a su particular estructura del drenaje. El devenir de una contaminación será bien diferente según el lugar y modo por donde el contaminante entre al acuífero. Si es en el **eje del drenaje** el contaminante se va a transmitir directa y masivamente hacia la surgencia, sufriendo una cierta dilución, pero sin depuración; el agua de la surgencia recupera rápidamente su calidad inicial una vez que cesa la contaminación. En aguas altas puede ocurrir que el eje del drenaje, los conductos, tenga más carga hidráulica que los bloques capacitivos de manera que haya inversión de gradiente y el contaminante pueda pasar a los bloques, para ser de nuevo drenado al eje pero en una posterior situación de aguas más bajas.

Si el contaminante es introducido en las **zonas de almacenamiento**, se va a transmitir mucho más lentamente; puede llegar a darse depuración, pero será sobre todo la dilución por mezcla con aguas no contaminadas la que va a contribuir a reducir la contaminación en la surgencia. En estos casos, si los bloques capacitivos son independientes entre sí sólo alguno de ellos se verá afectado. Finalmente, el contaminante, diluido, será descargado, desfasado en el tiempo, bien a través de alguna surgencia conectada directamente al bloque, o bien por la surgencia principal a través del eje principal de drenaje. Por tanto, para la protección de los recursos hídricos en el karst es necesario un estudio detallado, determinando la posición de las zonas más sensibles, vulnerables, a la contaminación (el eje del drenaje) y de las zonas mejor protegidas (los bloques capacitivos).

El concepto de vulnerabilidad es muy utilizado en el contexto de la protección de los recursos hídricos subterráneos, pero, al mismo tiempo, es poco claro en cuanto a su significado concreto, los parámetros que la caracterizan y las formas de su representación cartográfica. La Acción Europea COST 620 (Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate -karst- aquifers), en curso, trata precisamente de clarificar estas cuestiones y de proponer una metodología específica para la elaboración del mapa de vulnerabilidad en terrenos kársticos; siempre bajo la premisa de que ese mapa debe de ser **coherente con un modelo conceptual de acuífero kárstico que describa adecuadamente el funcionamiento real del sistema que se quiere proteger**. Entre los términos que se han fijado en la COST 620 están los siguientes:

**Vulnerabilidad intrínseca.** Representa *las características geológicas e hidrogeológicas inherentes al medio, que determinan la sensibilidad de las aguas subterráneas a la contaminación por actividades humanas.*

**Vulnerabilidad específica.** Representa *la vulnerabilidad de las aguas subterráneas ante un contaminante, o grupo de contaminantes, particular.* Tiene en cuenta las propiedades de los

contaminantes y su relación con los diferentes componentes de la vulnerabilidad intrínseca. Considera todos los procesos que condicionan la migración (transporte, almacenamiento, intercambio y transformación) del contaminante. Ni que decir tiene que estos procesos varían mucho en función del tipo concreto de contaminante y de su relación con el medio. De ahí la complejidad de su concreción para el caso de algunos contaminantes (hidrocarburos, pesticidas...).

En el COST 620 se considera que las aguas objeto de protección son todas las del acuífero kárstico (zona saturada), debido a la especificidad de este medio, de manera que los procesos a considerar en la vulnerabilidad son todos aquéllos que actúan desde la superficie del suelo hasta el límite superior de la zona saturada, por tanto, los del *dominio vertical* (suelo, zona no saturada). Se distingue así entre el mapa de vulnerabilidad (objeto de protección: las aguas de la zona saturada; *resource protection*) y el perímetro de protección de captaciones (objeto de protección: las aguas de la captación, surgencia o pozo; *source protection*), de forma que este último considera también el *dominio horizontal*, es decir, los procesos de la zona saturada.

Limitándonos a la vulnerabilidad hay que señalar que recientemente se ha desarrollado en la Universidad de Neuchâtel, Suiza (DOERFLIGER, 1996) un método de cartografía de la vulnerabilidad intrínseca (método EPIK) elaborado específicamente para su aplicación al medio kárstico. Este método implica la cartografía separada de cuatro factores intrínsecos al medio: **E**pikarst, cubierta **P**rotectora, condiciones de **I**nfiltración, desarrollo de la red **K**árstica. La cartografía final se obtiene por superposición y ponderación de esas cartografías específicas. Resultan varias categorías de vulnerabilidad, desde la muy alta hasta la baja, cuya distribución es luego considerada para definir las zonas de protección de las captaciones.

En el marco de las discusiones de la COST 620 se ha considerado que el método EPIK no resulta adecuado para condiciones de terrenos kársticos bastante diferentes de aquéllas para las cuales el método fue creado, sobre todo cuando hay presencia de terrenos no kársticos en cuencas vertientes a sumideros, de manera que se está elaborando una propuesta de método *suficientemente general* como para ser aplicado en cualquier terreno kárstico, pero *suficientemente flexible* como para que se pueda ajustar a las condiciones locales.

Son dos los factores que el nuevo método considera como núcleo (*core factors*) para la estimación de la vulnerabilidad: la cubierta protectora (factor O, **O**verburden) y la concentración del flujo (factor C, flow **C**oncentration). El primero, con una u otra denominación, común a todos los métodos de vulnerabilidad, considera todo el medio existente entre el suelo y la superficie piezométrica (suelo, paquete no carbonatado, si lo hubiese, y paquete carbonatado no saturado) que,

recordemos, es el objeto de protección considerado (*resource protection*). Los atributos de interés en la estimación de este factor son el espesor de cada paquete y su permeabilidad vertical.

El factor C, por su parte, expresa el grado de *bypass* de la cubierta protectora, es decir, la mayor o menor posibilidad que el flujo tiene de atravesar esa cubierta por caminos preferenciales, rápidos, despreciando así su función protectora. Es éste un factor propio de la especificidad del karst. En esta concentración del flujo juega un papel primordial la existencia del epikarst, la parte más superficial de la roca carbonatada, muy karstificada y de gran permeabilidad, cuya función hidrológica más importante es la de favorecer la infiltración concentrada del flujo hacia el acuífero.

Estos dos factores núcleo del modelo propuesto se complementan con otros dos, en curso de discusión: el factor R (**R**ainfall/ **R**echarge), de difícil consideración por su extremada variabilidad temporal, que caracterizaría la influencia de las condiciones antecedentes del suelo en la recarga al acuífero, y el factor K (red **K**árstica) que caracteriza la funcionalidad de la red de conductos en la zona saturada y que, por tanto, es a tomar en consideración en la protección de captaciones (*source protection*).

En el presente capítulo se han aplicado los dos métodos a la zona objeto de estudio: el método EPIK, desde un punto de vista crítico y poniendo el énfasis en sus carencias en determinadas condiciones, y el nuevo método en desarrollo, el método OC (COST 620), que se aplica aquí como uno de los primeros lugares, sino el primero, a modo de test. Se establece finalmente una comparación entre ambos métodos y se relacionan sus resultados con los conocimientos previamente adquiridos, en capítulos anteriores, del funcionamiento hidrogeológico del Sistema Kárstico de Salubita.

## **6.2. MÉTODO EPIK**

### **6.2.1. GENERALIDADES**

El método desarrollado por el Centre d'Hydrogéologie de l'Université de Neuchâtel (CHYN) para evaluar la vulnerabilidad intrínseca de los acuíferos kársticos, y, como consecuencia, para delimitar las zonas de protección de las captaciones, es un método multifactorial. De hecho, el acrónimo EPIK hace referencia a los cuatro factores considerados: **E**pikarst, cubierta **P**rotectora (Protective cover), condiciones de **I**nfiltración (Infiltration conditions) y desarrollo de la red **K**árstica (Karst Network) (DOERFLIGER & ZWAHLEN, 1995; DOERFLIGER, 1996).

Estos cuatro factores corresponden a cuatro características específicas del sistema kárstico que permiten aplicar un *modelo determinístico* para calcular la vulnerabilidad. Se habla de *modelo determinístico* cuando un modelo matemático puede ser utilizado para la determinación exacta de

todas las situaciones que se pueden producir en un sistema concreto. Este modelo supone que un sistema funciona de tal forma que la aparición de una serie de acontecimientos produce una consecuencia definible. Las ecuaciones que lo gobiernan definen de forma precisa las relaciones *causa-efecto* o *entradas-salidas* en cada punto del sistema

Por otra parte, cada factor es una combinación de varios subfactores, cuya determinación se puede realizar a través de métodos directos o indirectos como pueden ser ensayos con trazadores, métodos geofísicos, análisis de hidrogramas, fotografía aérea, rasgos geomorfológicos o información espeleológica.

El Método EPIK consiste básicamente en la realización de un mapa para cada factor y en la posterior superposición ponderada de todos ellos mediante la utilización de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la obtención del grado de vulnerabilidad de cada zona del área estudiada. Cada factor (E, P, I, K) se divide en varias clases, dependiendo de sus condiciones o grado de desarrollo, y toma un valor (i, j, k, l, respectivamente) que varía entre 1 y 4; y en función de la importancia que se le atribuye, cada una de las clases se multiplica por un valor de ponderación ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ , respectivamente), que hace referencia al peso del factor en el conjunto del método (tabla 6.1).

Finalmente, la suma total (fórmula 1) permite calcular una serie de valores que corresponden al factor de protección (Fp) correspondiente a cada zona o área. La distribución espacial de estos valores constituye el mapa de vulnerabilidad. Posteriormente, se asocia las zonas de protección (S) a las zonas de vulnerabilidad definidas mediante una equivalencia (apartado 6.2.4) que puede ser ajustada para cada caso. El resultado es un mapa de zonas de protección en cuatro rangos (S1, S2, S3 y SA) que se pueden adaptar a los planes cadastrales para su uso en el planeamiento. De hecho, uno de los objetivos de los creadores del EPIK era precisamente el que fuese una herramienta válida a nivel local para la protección de los recursos hídricos subterráneos en regiones kársticas.

Aunque todos los aspectos específicos relacionados con el desarrollo de este método se encuentran ampliamente explicados en la Tesis Doctoral “Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)” (DOERFLIGER, 1996), en las siguientes páginas se comentan las bases de esta metodología.

## **6.2.2. SUBDIVISIÓN DE LOS FACTORES**

### **6.2.2.1. EPIKARST: E**

Puesto que el epikarst no suele ser uniforme y en numerosas ocasiones se encuentra enmascarado por suelo o por materiales detríticos, no resulta fácil saber si existe o no, y si se trata de un epikarst muy desarrollado y conectado a la red kárstica funcional o desarrollado pero no conectado

a la red kárstica mediante conductos verticales (vertical shafts). Los ensayos con trazadores, por ejemplo, pueden resultar útiles para discernir entre el primer caso y el segundo pero no resultan de gran ayuda para poder delimitarlo, por lo que su cartografía resulta una tarea realmente difícil.

Por este motivo, y para evitar esas dificultades, el Método EPIK divide el epikarst, conforme a las características geomorfológicas observables en superficie, en tres clases diferentes que se comentan a continuación:

- E1** - sumideros y depresiones cerradas donde desaparece un curso de agua
  - dolinas
  - simas
  - lapiaz
  - zonas muy fracturadas (visibles en cortes de carreteras)
- E2** - zonas entre dolinas
  - valles ciegos (dry valleys)
- E3** - el resto del sistema

Los valles ciegos suelen ser valles alargados, en cuyo fondo puede haber dolinas y todo tipo de cavidades. Raramente suelen albergar cursos de agua permanentes, aunque con frecuencia aparecen riachuelos intermitentes que se activan como consecuencia de precipitaciones intensas. Los valles ciegos están relacionados con zonas de alto grado de karstificación ya que el agua se pierde hacia el medio subterráneo directamente a partir de los arroyos. Según varios autores (BONACCI, 1987; FORD y WILIAMS, 1989; BÖGLI, 1980), sin embargo, los valles ciegos no están relacionados con el epikarst. El Método EPIK considera los valles ciegos como E2.

#### **6.2.2.2. CUBIERTA PROTECTORA: P**

Este factor no solo abarca el suelo sino también otro tipo de cubiertas como pueden ser los depósitos cuaternarios y otras capas o estratos no karstificados, como lutitas y areniscas.

El suelo posee una capacidad de atenuación (ZAPOROZEC, 1985) de la contaminación debido a parámetros específicos tales como textura y estructura, capacidad de intercambio iónico, contenido en materia orgánica y minerales de la arcilla, potencia, grado de saturación y conductividad hidráulica. Estos parámetros del suelo están estrechamente unidos a propiedades físicas, químicas y biológicas que permiten esa atenuación (autofiltración natural, retardo o degradación de contaminantes). No obstante, aunque las características comentadas son realmente importantes y afectan, de un modo u otro, a la vulnerabilidad intrínseca, los estudios edafológicos completos son

escasos (no solo en Suiza) por lo que es prácticamente imposible poseer el conocimiento relativo a todos esos parámetros del suelo. Por esta razón, el Método EPIK considera únicamente la potencia del suelo como parámetro básico del factor cubierta protectora.

Se diferencian dos casos de acuerdo con la presencia de capas de suelo, u otro tipo de material que cubre el karst, y con su conductividad hidráulica. El primer caso engloba tres clases y el segundo dos:

A. Suelo sobre el karst o sobre materiales detríticos con conductividad hidráulica alta.

**P1** - 0-20 cm de suelo

**P2** - 20-100 cm de suelo

**P3** - >100 cm de suelo

B. Estratos de baja permeabilidad con o sin suelo.

**P3** - >100 cm (total) de suelo y/o estratos de baja permeabilidad

**P4** - suelo con espesas formaciones de muy débil permeabilidad (8 m mínimo)

### **6.2.2.3. CONDICIONES DE INFILTRACIÓN: I**

Las condiciones de infiltración hacen referencia al tipo de recarga que se produce en las diferentes zonas del sistema. Que la recarga sea difusa o concentrada repercute en unas consecuencias específicas de cara a la vulnerabilidad del acuífero. El Método EPIK diferencia varias clases de condiciones de infiltración que varían entre **difusa** y **concentrada**, aunque considera también un caso intermedio en el que la escorrentía superficial puede ser importante.

Se diferencian cuatro clases repartidas en dos casos que representan la localización (A) dentro o (B) fuera de la cuenca vertiente a un sumidero:

A. Dentro de la cuenca vertiente de un curso de agua que se infiltra.

**I1** - cursos de agua que se infiltran (perennes o temporales)

- lecho y orillas de los cursos de agua

- cursos de agua perennes o temporales que alimentan sumideros o dolinas

- zonas drenadas artificialmente

**I2** - zonas no drenadas artificialmente con pendiente superior al 10% en zonas de cultivo y al 25% en pastos, praderas y bosques.

**I3** - zonas no drenadas artificialmente con pendiente inferior al 10% en zonas de cultivo y al 25 % en pastos, praderas y bosques.

B. Fuera de la cuenca vertiente de un curso de agua que se infiltra.

**I3** - zonas bajas de las pendientes, que recogen la escorrentía de arroyada, y zonas que generan esa escorrentía con pendiente superior al 10% en zonas de cultivo y al 25% en pastos, praderas y bosques

**I4** - el resto del área.

#### **6.2.2.4. RED KÁRSTICA: K**

Una red kárstica es una red de huecos de anchura superior a 1.5 cm originados como consecuencia de procesos de disolución. Esta medida es la apertura necesaria para que el flujo sea turbulento. Por otra parte, de acuerdo con la Unión Espeleológica Internacional, una cueva es una apertura natural en la roca lo suficientemente grande como para permitir la entrada del ser humano. Las redes kársticas albergan formas muy complejas que se desarrollan a favor de una gran variedad de patrones tridimensionales. Están sujetas a factores hidroquímicos que dependen de la litología, la tectónica, el clima y las condiciones biológicas y edafológicas.

Existe una relación entre el grado de desarrollo de la red kárstica y el número de puntos de descarga del sistema. Los sistemas de redes kársticas bien desarrolladas suelen poseer un único punto de descarga mientras que aquellos cuyas redes kársticas están poco o mal desarrolladas suelen

presentar varios puntos de descarga. Esta no es una ley general y parte de la idea de que las redes kársticas son sistemas jerarquizados (MANGIN, 1985). En el Método EPIK se diferencian tres clases de K de acuerdo con el grado de desarrollo global de la red kárstica:

**K1** - Red kárstica bien desarrollada (conductos bien conectados con diámetros de escala decimétrica a métrica y raramente taponados).

**K2** - Red kárstica poco desarrollada (conductos mal conectados y/o taponados con diámetros de escala decimétrica e inferior).

**K3** - Acuífero fisurado o zona de descarga de un acuífero kárstico en terreno poroso con un posible efecto de filtrado.

A pesar de que esta subdivisión podría parecer subjetiva, existen diferentes métodos cuantitativos que permiten llegar hasta ella. El análisis de hidrogramas, la hidroquímica o los ensayos con trazadores son métodos que se pueden utilizar para este fin. Un aumento brusco del caudal tras un período de intensas lluvias, por ejemplo, indica la existencia de una red kárstica bien desarrollada. Por otra parte, si tras fuertes precipitaciones se producen variaciones importantes en la hidroquímica, podríamos estar también ante una red kárstica bien desarrollada.

No suele ser necesaria la realización de un mapa para este factor puesto que un único valor suele ser suficiente para describir el grado de desarrollo de la red kárstica de un acuífero en su conjunto. Sin embargo, frecuentemente aparecen interconectados acuíferos cuyas redes kársticas presentan grados de desarrollo diferentes. En estos casos sí es necesario asignar clases diferentes de K. Además, es también común la aparición de lentejones de lutitas entre los materiales kársticos que forman el acuífero. A estos lentejones se les atribuirá la subclase K3.

### ***6.2.3. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD. EVALUACIÓN DEL FACTOR DE PROTECCIÓN***

El cálculo cuantitativo del grado de vulnerabilidad o, lo que es lo mismo, del factor de protección (Fp) para cada zona se realiza a partir del cálculo numérico en función de los factores E, P, I y K como se indica en la siguiente fórmula:

$$F_p = (\alpha \cdot E_i) + (\beta \cdot P_j) + (\gamma \cdot I_k) + (\delta \cdot K_l) \quad (1)$$

Para asignar un valor de ponderación para  $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$  y  $\delta$ , y para evaluar también las condiciones de cada factor (i, j, k y l) se realizaron varias pruebas. Evidentemente, de acuerdo con la definición de cada factor, los casos más desfavorables de cara a la vulnerabilidad del agua subterránea son los

sumideros, el karst desnudo y las zonas en que la infiltración es concentrada. Se consideran, además, otros aspectos que pueden resultar cruciales para la vulnerabilidad:

- Las dolinas cubiertas de suelos potentes (E1-P3) son más vulnerables que una zona llana con un suelo poco potente cubriendo el karst (E3-P1).
- Una corriente de agua que se infiltra en un sumidero (I1) presenta un alto grado de vulnerabilidad, independientemente de la cubierta protectora.
- Los valles ciegos (E2) son tan vulnerables como las zonas de poca pendiente donde se recoge la escorrentía.

Cada factor se multiplica por un valor de ponderación ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) que reflejara la importancia de cada uno de los factores en el cálculo del grado de vulnerabilidad. Esos valores de ponderación oscilan entre 1 (más significativo) y 3 (menos significativo). Se considera que el epikarst (E) y las condiciones de infiltración (I) poseen la misma importancia relativa y les corresponde un valor de 3. Por otra parte, el método atribuye a la cubierta protectora (P) una importancia mayor que a E e I, y se le adjudica un valor de 1. Al factor K le corresponde un valor de 2, ya que se considera que su importancia es intermedia entre los otros factores.

También se modificaron las clases del factor E de la siguiente manera: E1: 1, E2: 3, en lugar de 2, y E3: 4, en lugar de 3. Esta modificación se llevó a cabo con el fin de enfatizar la sensibilidad de las dolinas y para moderar la vulnerabilidad de las clases E2 y E3 en comparación con I2. Los valores definitivos se muestran en la tabla 6.1. La tabla resume los valores numéricos que el Método EPIK atribuye a cada factor, en función de su tipo o grado de desarrollo, y los valores de ponderación correspondientes a cada uno de ellos.

<b>E1</b>	<b>E2</b>	<b>E3</b>	<b>P1</b>	<b>P2</b>	<b>P3</b>	<b>P4</b>	<b>I1</b>	<b>I2</b>	<b>I3</b>	<b>I4</b>	<b>K1</b>	<b>K2</b>	<b>K3</b>
1	3	4	1	2	3	4	1	2	3	4	1	2	3
<b><math>\alpha</math></b>			<b><math>\beta</math></b>				<b><math>\gamma</math></b>				<b><math>\delta</math></b>		
3			1				3				2		

*Tabla 6.1: Valores correspondientes a los factores considerados en el Método EPIK y sus correspondientes valores de ponderación.*

#### **6.2.4. RELACIÓN DEL GRADO DE VULNERABILIDAD CON LAS ZONAS DE PROTECCIÓN**

Los mapas de vulnerabilidad se utilizan para delimitar las zonas de protección del agua subterránea de acuerdo con su definición. Teniendo en cuenta el grado de desarrollo de la red kárstica,

el método establece posibles equivalentes entre los valores del grado de vulnerabilidad (Fp) y las zonas de protección (S) del agua subterránea para cada caso. Las relaciones son las siguientes:

S1 para sumideros y cursos de agua que se infiltran

S1 o S2 para dolinas y lapiaz

S2 preferente a S3 para zonas con E2 o I3

AS para factores de protección superiores a 28, asumiendo la presencia de P4

No existe correlación automática alguna entre los factores de protección (Fp) y las zonas de protección (S) y por el momento el Método EPIK utiliza las siguientes correlaciones:

S1:  $Fp \leq 18 \pm 2$

S2:  $19 \pm 2 \leq Fp \leq 24 \pm 2$

S3:  $25 \pm 2 \leq Fp \leq 28$

AS:  $Fp > 28$

La inexistencia de una correlación automática que relacione cada factor de protección calculado con una zona de protección determinada permite ajustar el método a diferentes zonas de estudio de forma específica.

### ***6.2.5. APLICACIÓN DEL MÉTODO EPIK A LA UNIDAD KARSTICA DE ALBIZTUR (SISTEMA KÁRSTICO DE SALUBITA)***

#### ***6.2.5.1. EPIKARST: E***

Teniendo en cuenta tanto estas consideraciones como las observaciones de campo, el Mapa correspondiente al factor E (Mapa 6.1) en la Unidad Kárstica se ha realizado atribuyendo las tres clases a los materiales que afloran en la zona de la siguiente manera:

**E1:** Calizas y calcarenitas urgonianas y calizas jurásicas. Las observaciones de campo muestran que los materiales carbonatados que afloran en la zona de estudio están muy karstificados en superficie. El lapiaz se hace visible tanto en praderas como bosques y las simas y dolinas son numerosas, sobre todo en la mitad occidental del área.

**E2:** Cuaternarios. No se incluyen aquí los materiales de Albiztur ya que esta depresión no corresponde a un valle ciego.

**E3:** Resto de los materiales. Se incluyen las depresiones de Bidania y Santutxo.

#### **6.2.5.2. CUBIERTA PROTECTORA: P**

En el Mapa 6.2 referente al factor P se puede observar que la clase P4 no aparece puesto que en esta zona no existe una potencia de suelo superior a 100 cm sobre estratos de baja permeabilidad. Las medidas de potencia del suelo llevadas a cabo en Agosto de 1999 (apartado 2.2) arrojaron valores que fluctuaban de forma importante en distancias cortas. Los suelos no mostraban continuidad alguna, sobre todo en zonas de lapiaz, por lo que la realización de una cartografía de la potencia del suelo en base a esos datos resultaba prácticamente imposible. Por este motivo, la subdivisión del factor P en tres clases se ha realizado en función de otros criterios comentados aquí:

**P1:** 0-20 cm de suelo. Se ha incluido en este rango toda la superficie que en el mapa de suelos y capacidad de uso del Gobierno Vasco a escala 1:25.000 aparece como afloramientos rocosos y pedregal.

**P2:** 20-100 cm de suelo. La mayoría de las medidas de potencia del suelo proporcionaron valores correspondientes a este rango por lo que se han considerado los valores que no son ni P1 ni P3.

**P3:** >100 cm de suelo y/o estratos (materiales geológicos). Los materiales detríticos cuaternarios de las depresiones de Bidania, Santutxo y Albiztur y las areniscas supraurgonianas que afloran junto al límite Sur de la Unidad.

#### **6.2.5.3. CONDICIONES DE INFILTRACIÓN: I**

La composición del Mapa correspondiente al factor I (Mapa 6.3) requiere la combinación de tres características por lo que su obtención resulta un trabajo algo más arduo en comparación con la obtención de los dos mapas precedentes (E y P). Es necesario combinar el tipo de vegetación (praderas y bosques) y las pendientes e incluso considerar si la zona en cuestión se encuentra dentro o fuera de la cuenca vertiente de un sumidero.

Puesto que el tipo de vegetación (mapa de vegetación del Gobierno Vasco a escala 1:25.000) predominante en la zona de estudio se compone básicamente de bosques, praderas y pastos, se han diferenciado los bosques, por un lado, y las praderas y pastos, por otro. Las zonas de cultivo, escasas, se han incluido en el segundo tipo. Por otra parte, para la subdivisión del factor I se ha utilizado como

base el mapa de pendientes del Gobierno Vasco a escala 1:25.000. Este mapa presenta ocho rangos de pendientes (0-3%, 3-5%, 5-10%, 10-20%, 20-30%, 30-50%, 50-100% y >100%) a partir de los cuales no es posible diferenciar una pendiente del 25%, como propone EPIK. Por este motivo, la subdivisión del factor I se ha realizado considerando una pendiente límite de un 30% de forma que la subdivisión utilizada en la zona de estudio es la siguiente:

**A. Dentro de la cuenca vertiente de un curso de agua que se infiltra.**

**I1:** - cursos de agua que se infiltran (perennes o temporales)

- lecho de los cursos de agua

- cursos de agua perennes o temporales que alimentan sumideros o dolinas

- zonas drenadas artificialmente.

**I2:** - zonas drenadas de forma natural cuya pendiente es superior al 30% en pastos, praderas y bosques.

**I3:** - zonas drenadas de forma natural cuya pendiente es inferior al 30 % en pastos, praderas y bosques.

**B. Fuera de la cuenca vertiente de un curso de agua que se infiltra.**

**I3:** - zonas de baja pendiente que recogen la escorrentía y pendientes que generan esa escorrentía (pendientes >30%).

**I4:** - el resto del área (pendientes <30%).

**6.2.5.4. RED KÁRSTICA: K**

El Método EPIK atribuye a la existencia de una red kárstica velocidades medias superiores a 15 m/h en períodos de estiaje y superiores a 75 m/h en períodos de aguas altas. En el caso del Sistema Kárstico de Salubita los ensayos con trazadores han facilitado los datos necesarios como para conocer el grado de desarrollo de la red kárstica. Según la tabla 4.18, los trazados llevados a cabo en el Sistema Kárstico han proporcionado velocidades modales de entre 49 y 250 m/h, lo que pone de manifiesto que el Sistema posee una red kárstica, en general, bien desarrollada.

Además, tanto la hidroquímica como el análisis de los hidrogramas apoyan también esta afirmación, de forma que se ha considerado que el Sistema Kárstico de Salubita es, en general, de clase K1. De acuerdo con estas observaciones, los valores correspondientes a Fp en la zona de estudio

serían los que aparecen reflejados en la tabla 6.2, obtenidos mediante la fórmula (1)  $F_p = (\alpha.E_i) + (\beta.P_j) + (\gamma.I_k) + (\delta.K_l)$ .

K1: 1	I1: 1			I2: 2			I3: 3			I4: 4		
	E1: 1	E2: 3	E3: 4	E1: 1	E2: 3	E3: 4	E1: 1	E2: 3	E3: 4	E1: 1	E2: 3	E3: 4
P1: 1	9	15	18	12	18	21	15	21	24	18	24	27
P2: 2	10	18	19	13	19	22	16	22	25	19	25	28
P3: 3		17	20	14	20	23	17	23	26	20	26	29

**Tabla 6.2: Valores obtenidos para el valor de protección (Fp) en la Unidad Kárstica de Albiztur.**

El Mapa 6.4 refleja los resultados obtenidos a partir de la superposición de los mapas E, P e I y la combinación de éstos con el factor K. Se trata del mapa de vulnerabilidad final obtenido mediante la aplicación directa del Método EPIK cuyos rangos son:

S1:  $F_p \leq 18$  VULNERABILIDAD EXTREMADAMENTE ALTA

S2:  $F_p$  19-23 VULNERABILIDAD ALTA

S3:  $F_p$  24-29 VULNERABILIDAD MEDIA

A la vista del Mapa 6.4, las calizas y calcarenitas urgonianas (figura 3.2) se encuentran casi íntegramente en el dominio S1, a excepción de una parte situada al Oeste de Bidegoian y algunas zonas cubiertas por depósitos cuaternarios (Norte de la depresión de Bidania, una parte de la depresión de Santutxo y Albiztur) que se encuentran en el dominio S2. Las calizas de edad Jurásico-Neocomiense forman parte también de los dominios S1 y S2. Por otra parte, aunque la mayor parte de los materiales lutítico-margosos constituyen el dominio S3, una parte de ellos constituye también un sector del dominio S2.

Llama la atención el hecho de que la parte Sur de la depresión de Bidania, cubierta por depósitos cuaternarios porosos de potencia superior a 50 m en esa zona, asentada sobre calcarenitas urgonianas, forme parte del dominio S1, al igual que otras zonas sin ningún tipo de protección. Por otro lado, teniendo en cuenta que las aguas superficiales que llegan a los materiales lutítico-margosos (mayoritariamente S3) no se van a infiltrar a través de ellos, y sí a través de los materiales carbonatados karstificados (una vez que han llegado hasta ellos mediante escorrentía superficial) resulta paradójico asumir un rango de S3 para esas zonas, sabiendo que al menos parte de esa agua va a alcanzar el medio subterráneo a través del karst. De acuerdo con estas consideraciones, parece claro que el Método EPIK debiera ser revisado y ajustado. En el apartado 6.2.6 se comentan varias reflexiones que podrían servir como ayuda en la mejora del método.

En la tabla 6.3 se muestra un resumen de las características de cada clase aplicadas para la evaluación de la vulnerabilidad en la Unidad kárstica de Albiztur.

Formas kársticas relacionadas con el epikarst	E1	Sumideros y depresiones cerradas donde desaparece algún curso de agua, dolinas, simas, lapiaz
	E2	Zonas entre dolinas y valles ciegos
Ausencia de formas kársticas	E3	El resto del Sistema
		Suelo directamente sobre las calizas que forman el acuífero o capas de materiales detríticos de alta permeabilidad.
	P1	0-20 cm de suelo. Afloramientos rocosos y pedregal en el mapa de suelos del Gobierno Vasco a escala 1:25.000
	P2	20-100 cm de suelo.
	P3	>100 cm de suelo y/o estratos (materiales geológicos)
Infiltración concentrada	I1	Cursos de agua perennes o temporales que se infiltran a lo largo de sus lechos y aquellos que alimentan sumideros. Cauces de esos cursos de agua y sus cuencas vertientes. Se incluyen también los sistemas de drenaje artificial
	I2	Zonas drenadas de forma natural y designadas como I1 pero cuya pendiente es superior al 30% en pastos, praderas y bosques
	I3	Zonas drenadas de forma natural y designadas como I1 pero cuya pendiente es inferior al 30 % en pastos, praderas y bosques. Zonas de baja pendiente que recogen la escorrentía y pendientes que generan esa escorrentía (pendientes >30%).
Infiltración difusa	I4	El resto del área
Red kárstica bien desarrollada	K1	Red kárstica bien desarrollada (conductos bien conectados con diámetros de escala decimétrica a métrica y raramente taponados)
Red kárstica mal desarrollada	K2	Red kárstica poco desarrollada (conductos mal conectados y/o taponados con diámetros de escala decimétrica e inferior)
Acuífero fisurado	K3	Acuífero fisurado o zona de descarga de un acuífero kárstico en terreno poroso con un posible efecto de filtrado

**Tabla 6.3: Características asociadas a cada clase que han sido consideradas en el establecimiento del mapa de vulnerabilidad en la Unidad Kárstica de Albiztur a partir del Método EPIK.**

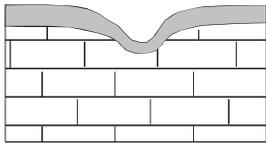
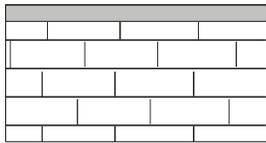
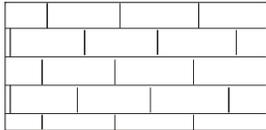
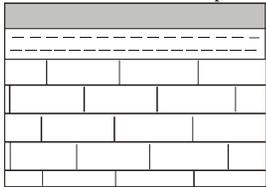
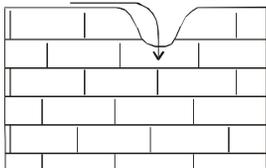
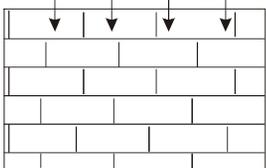
### 6.2.6. CONSIDERACIONES ACERCA DEL MÉTODO EPIK

Aunque se trata de un método práctico y de fácil aplicación en regiones kársticas, su utilización en zonas muy concretas puede conducir a error debido a que algunos aspectos importantes que condicionan la entrada de agua en el acuífero no se consideran apropiadamente. Los inconvenientes o aspectos a revisar se comentan en los siguientes puntos, a partir de las observaciones que al respecto hizo en su día GOLDSCHIEDER (documentos internos) en el marco de la COST 620.

#### 6.2.6.1. EL MÉTODO DE PONDERACION ES CONTRADICTORIO

Cuanto más importante se considera un atributo (E, P, I, K) para el cálculo del factor de protección (Fp), el valor de ponderación asignado a ese atributo es menor y, consecuentemente, también es menor su contribución en el cálculo final del factor de protección.

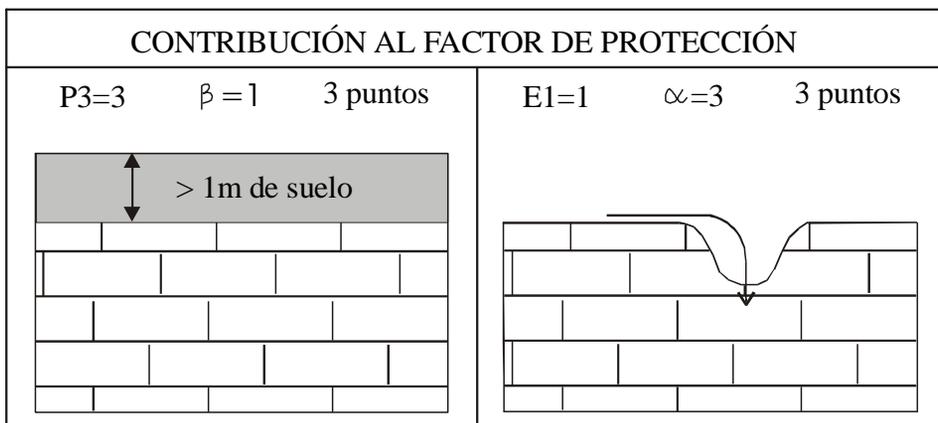
Por una parte, la importancia relativa de cada factor es diferente siendo baja para E e I, media para K y alta para P (tabla 6.1). Sus valores de ponderación ( $\alpha$ ,  $\beta$ ,  $\gamma$ ,  $\delta$ ) quedan reflejados en esa misma tabla. En la figura 6.1 se muestra una serie de condiciones que pone de manifiesto la necesidad de un reajuste en el Método EPIK. La ausencia de formas exokársticas, por ejemplo, contribuye en 12 puntos incluso cuando no existe suelo. Esto significa que según este método en una zona con ausencia de formas exokársticas (que no significa que el epikarst no esté desarrollado) y desprovista de suelo, donde la infiltración puede producirse de forma rápida, la vulnerabilidad será menor que en una zona con formas exokársticas (cuyo funcionamiento hidráulico puede haber quedado obsoleto) y provistas de suelo.

FACTOR	CONTRIBUCIÓN AL FACTOR DE PROTECCIÓN	
a) EPIKARST $\alpha = 3$	E1=1 3 puntos 	E3=4 12 puntos 
b) CUBIERTA $b = 1$	P1=1 1 punto 	P4=4 4 puntos 
c) CONDICIONES DE INFILTRACIÓN $g = 3$	I1=1 3 puntos 	I4=4 12 puntos 

**Figura 6.1: Incongruencia del Método EPIK: Las situaciones a y c contribuyen de la misma forma en el factor de protección.**

**6.2.6.2. NO SE CONSIDERA EL EFECTO BYPASS EN LOS SUMIDEROS**

El valor de los factores es igual a 1 siempre que su efecto sobre la protección sea nulo y aumenta a medida que su efecto sobre la protección aumenta. Frecuentemente, sumideros existentes en el seno de algunos poljes rellenos de materiales aluviales cuyo espesor (potencia) es importante, no suelen presentar suelo alguno, por lo que el efecto protector de esa cubierta en el sumidero se ve anulado totalmente, en ese caso se dice que se ha producido *bypass* en el efecto protector de la cubierta. Sin embargo el Método EPIK no considera este posible *bypass* de forma que la combinación de un factor con su valor de ponderación en ocasiones conduce a resultados inconsistentes. La figura 6.2 muestra un caso en el que un sumidero contribuye con 3 puntos sobre el factor de protección, de la misma forma que un suelo de potencia superior a 1 m.



**Figura 6.2: Se muestran dos situaciones de muy diferente repercusión sobre la vulnerabilidad intrínseca. Una zona cubierta con un suelo de potencia superior a 1 m influye, según el Método EPIK, de la misma forma que un sumidero activo sin ningún tipo de cubierta.**

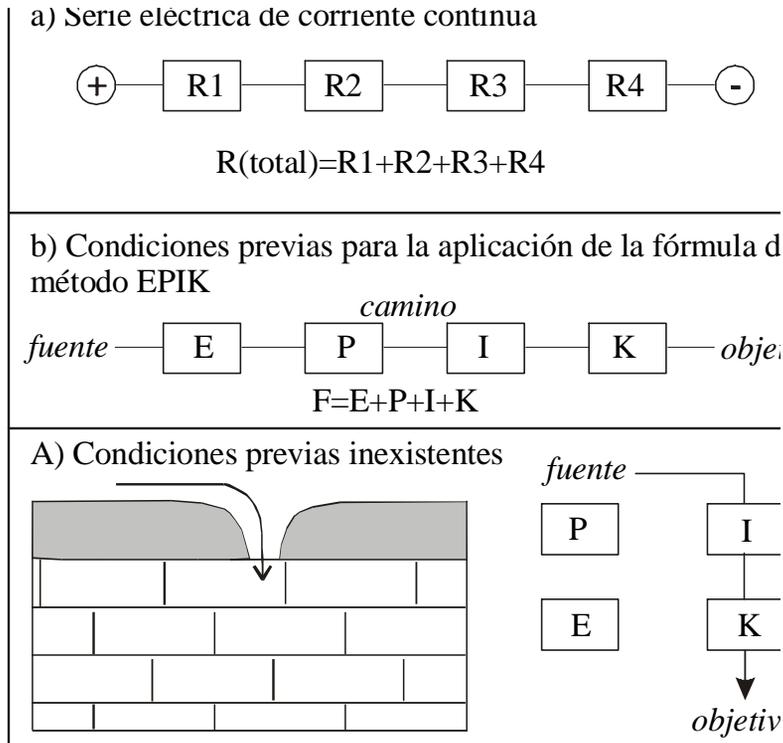
**6.2.6.3. LAS CONDICIONES PREVIAS PARA LA APLICACIÓN DEL MÉTODO NO SIEMPRE SE CUMPLEN**

El factor de protección se obtiene mediante la suma de cuatro factores ajustados mediante su valor de ponderación correspondiente. En electricidad sería comparable a una conexión en serie. No obstante, los factores del EPIK no siempre forman una conexión de ese tipo.

La infiltración difusa (I), por ejemplo, contribuye a la protección del agua subterránea únicamente si existe cubierta protectora (P). Si ésta no existe la infiltración difusa no contribuye en

esa protección. Además, la cubierta contribuye en la protección solamente si la infiltración es difusa. En los sumideros, por ejemplo, el efecto protector de la cubierta queda anulado (*bypass*). Es decir, los factores, atributos, P e I no forman una conexión en serie.

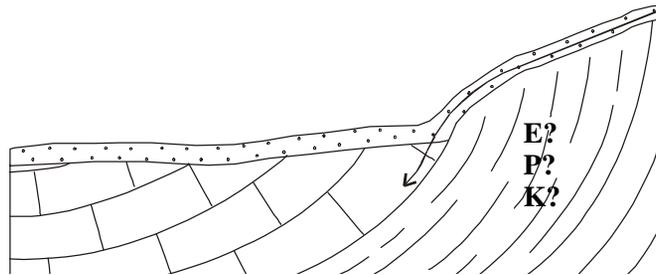
La figura 6.3 muestra las condiciones necesarias para la aplicación del Método EPIK, así como un ejemplo en el que esas condiciones no se cumplen.



*Figura 6.3: Caso en el que no se cumplen las condiciones previas de aplicación del método EPIK, puesto que los factores P y E son inexistentes.*

#### **6.2.6.4. EL MÉTODO NO ESTÁ DEFINIDO PARA TODAS LAS SITUACIONES HIDROGEOLÓGICAS**

Se asume que los cuatro factores están definidos para cualquier punto de la cuenca lo que no es cierto. En el caso de una zona no karstificada cuyas aguas se infiltran en una zona kárstica, ya sea por escorrentía superficial o a través de algún flujo subterráneo, únicamente está definida por el factor I, mientras que E, P y K no están claros. La figura 6.4 es fiel reflejo de esta situación, en la que el agua procedente de materiales lutíticos se infiltra en el Sistema Kárstico.



*Figura 6.4: Agua procedente de materiales no kársticos (lutíticos en este caso) llega hasta ellos por escorrentía superficial y se infiltra.*

**6.2.6.5. LOS ASENTAMIENTOS HUMANOS NO SE CONSIDERAN**

Los asentamientos e infraestructuras (núcleos urbanos, zonas industriales, aparcamientos, carreteras etc.) constituyen áreas caracterizadas por constituir superficies impermeables para el agua debido al uso de cemento, breya etc. Evidentemente, la aplicación de estos elementos impermeables sobre la superficie del terreno modifica las características hidrogeológicas del sistema acuífero. El Método EPIK carece de algún valor numérico que permita la inclusión de estas situaciones al método.

**6.2.6.6. LA TRANSFORMACIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD EN ZONAS DE PROTECCIÓN ES DUDOSA**

Los valores numéricos del factor de protección obtenidos se subdividen directamente en cuatro rangos (tres en la Unidad Kárstica de Albiztur-Sistema Kárstico de Salubita) y proporcionan el grado de vulnerabilidad y las zonas de protección (tabla 6.4). Para el cálculo final de la vulnerabilidad no se tienen en cuenta otros aspectos adicionales como distancias o tiempos de tránsito.

Factor de protección (Fp)	Vulnerabilidad	Zona de protección
$Fp \leq 18$	Extremadamente alta	S1
$19 \leq Fp \leq 23$	Alta	S2
$24 \leq Fp \leq 29$	Media	S3
$Fp > 29$	baja	SA

*Tabla 6.4: Asignación de grado de vulnerabilidad y zona de protección a los rangos de valores del factor de protección, según el Método EPIK.*

Si la red kárstica está bien desarrollada es razonable no considerar la distancia como criterio esencial para evaluar las zonas de protección ya que las altas velocidades de flujo hacen que el agua recorra rápidamente largas distancias. Por el contrario, si la red kárstica no está bien desarrollada y las velocidades son pequeñas, la importancia de la distancia y los tiempos de tránsito es mucho mayor y esa información podría modificar considerablemente la asignación del grado de vulnerabilidad.

**6.2.6.7. FUNCIONALIDAD DEL EPIKARST**

Como ya se ha comentado, la inexistencia de formas exokársticas no implica la inexistencia de un epikarst activo. Sin embargo, aunque la existencia de formas exokársticas sí supone la existencia de un epikarst, más o menos desarrollado, poco dicen, a priori, sobre su funcionalidad. Podría tratarse de un epikarst desarrollado tiempo atrás, que por haber sido modificadas las condiciones hidráulicas iniciales, hubiera dejado de ser activo. Podría tratarse de un epikarst bien desarrollado aunque relleno de arcillas u otro tipo de materiales que dificultan el paso del agua. Estas consideraciones ponen en evidencia que, aun estando presente el epikarst, su influencia en la

vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea puede ser bien diferente, lo que debiera ser tomado en consideración.

#### **6.2.6.8. SUGERENCIAS PARA LA REVISIÓN DEL MÉTODO**

##### **El sistema de evaluación debería ser modificado**

Cuanto más importante se considera la influencia de un factor sobre la vulnerabilidad de un sistema kárstico, se le debería asignar un factor de ponderación mayor.

##### **Es necesario introducir tanto el valor cero como valores negativos**

Si la contribución de un factor a la protección del sistema kárstico es nula o negativa, esa influencia debería ser evaluada como cero o negativa. A la ausencia de cubierta protectora, por ejemplo, debiera asignársele un valor de cero mientras que a las zonas de recarga concentrada se les debería atribuir un valor negativo, ya que no solo no contribuyen a la protección del sistema sino que además son zonas de mucha mayor vulnerabilidad.

##### **El Método EPIK no es aplicable cuando**

- un factor es eludido (ejemplo: el factor P en una zona de escorrentía superficial).
- alguno de los factores no puede ser claramente definido (ejemplo: E, P y K en un área no kárstica cuyas aguas de escorrentía se infiltran en el karst).
- la vulnerabilidad se encuentra fuertemente influenciada por parámetros que no han sido considerados, como puede ser la extremadamente alta o baja profundidad del nivel piezométrico.

La subjetividad de este método junto con la serie de dudas razonables que surgen en el momento de su aplicación lo convierten en un método controvertido que, aunque práctico y relativamente fácil de aplicar, resulta un dudoso instrumento a la hora de utilizarlo como base en la protección del agua subterránea. Se trata del primer método de cálculo de la vulnerabilidad intrínseca del agua subterránea pensado específicamente para el karst, hecho que no hay que olvidar. No se trata aquí de criticar o desvirtuar un método, sino de encontrar la forma de mejorarlo. Sirvan para este fin las críticas y sugerencias del apartado 6.2.6.

Al hilo del desarrollo de un nuevo método para el establecimiento de Mapas de Vulnerabilidad intrínseca y Riesgo en regiones kársticas, la **Acción Europea COST 620** (Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate -karst- aquifers), constituida por 16 países, lleva trabajando, desde 1997, en un método denominado EUROPEAN APPROACH (Método

Europeo), fundamentado en el **Método PI** desarrollado por GOLDSCHIEDER et al., (1999) en Alemania, que ha de servir como herramienta para la realización de mapas de vulnerabilidad intrínseca, y mapas de riesgo, en las regiones kársticas a nivel europeo.

Este método, cuyo desarrollo aún no ha finalizado (2002), está siendo aplicado en varias “áreas piloto” de diferentes países y ha sido aplicado en el Sistema Kárstico de Salubita, siendo esta zona el primer lugar en el que este método se ha aplicado íntegramente.

### **6.3. MÉTODO EUROPEO (MÉTODO OC)**

#### **6.3.1. GENERALIDADES**

Al igual que el Método EPIK, también el Método OC es un sistema para cartografiar la vulnerabilidad intrínseca mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y, aunque está pensado fundamentalmente para la especificidad de los acuíferos kársticos, puede aplicarse también, salvando las distancias, en otro tipo de acuíferos.

Este método considera dos factores: 1) El factor **O** describe la efectividad de la cubierta protectora (**o**verburden), y 2) el factor **C** describe las condiciones de infiltración (si el agua entra en el Sistema de forma concentrada o no) y especialmente el grado de *bypass* (anulación del efecto protector de la cubierta) debido a la existencia de flujos concentrados, superficiales o subsuperficiales.

El método está basado en un modelo del tipo *fuentes-camino-objetivo* (source-pathway-target). Se asume que la superficie del terreno es la fuente (source), es decir, el origen de la contaminación, mientras que la superficie de la zona saturada es el objetivo (target) a proteger. Es decir, el método considera que las aguas a proteger son todas las aguas del acuífero kárstico y no sólo aquéllas de la surgencia o de la captación.

Consecuentemente, el camino (pathway) incluye todo lo que se encuentra entre la superficie del terreno y la zona saturada: el *dominio vertical*. El método no tiene en cuenta los procesos que puedan darse dentro de la zona saturada (*dominio horizontal*) por el hecho de considerar la propia superficie de esta zona como objetivo a proteger.

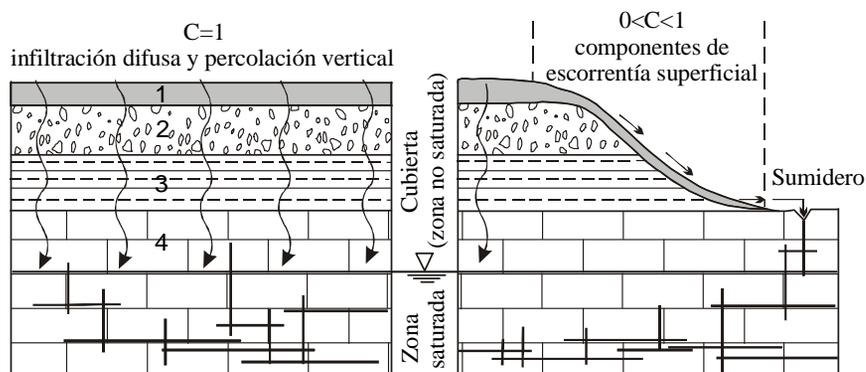
La principal ventaja de este método es que se puede realizar un mapa de vulnerabilidad intrínseca para la protección de los *recursos* de la zona saturada (**resource protection**) que, en combinación con el tiempo de tránsito a través de esa zona, se puede transformar en un mapa de vulnerabilidad para la protección de las *captaciones* (**source protection**) considerando ahora las

aguas de la captación como objetivo a proteger (figura 6.8). De esta forma, cada mapa tiene su propia escala de aplicación: mayor el de los recursos (región, país) y menor el de las captaciones (municipalidad).

Aunque este método incluye únicamente dos factores (O y C) la evaluación y cartografía de ambos resulta bastante más complicada que la de los factores considerados en el Método EPIK. Esta complicación se debe al hecho de que para cada factor se consideran, además de los aspectos considerados en el método anterior, otros tales como la zona no saturada, el efecto *bypass*, el subsuelo etc., lo que hace que este método posea una mayor verosimilitud. En los párrafos siguientes se explican las características del método así como los aspectos que engloba cada factor y la forma de evaluarlos.

Para la elaboración del Mapa **O** (Mapa 6.5) a partir del **Método OC** se han seguido aquí las pautas exactas de elaboración del mapa P del **Método PI**, alemán (GOLDSCHIEDER, 1999), aunque simplificadas, ya que en el momento de realizar este mapa estaba bajo discusión en el marco de la Acción COST 620 la forma en la que iban a elaborarse en el detalle los mapas del Método OC.

El factor **O** describe la efectividad protectora de la cubierta debida principalmente a la potencia y a la conductividad hidráulica de todas las capas existentes entre la superficie del terreno y la zona saturada, es decir, el suelo más superficial, entre 0 y 1 m de profundidad (topsoil), el subsuelo (subsoil), otras formaciones por encima de la formación carbonatada, en su caso, y la zona no saturada de la propia formación carbonatada-kárstica (figura 6.5). El cálculo del factor **O** se fundamenta en el método GLA (HÖLTING et al., 1995) y se divide en cinco clases donde  $O=1$  hace referencia a una función protectora extremadamente baja y  $O=5$  se asigna a una cubierta protectora muy efectiva.



**Figura 6.5:** Concepto general del Método OC. La cubierta protectora (factor O) consiste en cuatro capas: 1. suelo (topsoil), 2. subsuelo (subsoil), 3. formación no kárstica, 4. zona no saturada de la formación kárstica.

*El factor C expresa el grado de “bypass” de la cubierta protectora debido a flujos superficiales o subsuperficiales, especialmente en la cuenca vertiente de cursos de agua que desaparecen en sumideros.*

Si la infiltración se produce de forma difusa, sin un flujo concentrado significativo, sobre una superficie horizontal, el factor **C** será igual a 1 (figura 6.5). Por otra parte, en los sumideros el efecto protector de la cubierta es, prácticamente, nulo y el factor **C** toma un valor de 0. Cuando ésto ocurre se dice que se ha producido *bypass*. Los valores de **C** (entre 0 y 1) se asignan a las diferentes zonas del interior de la cuenca vertiente al sumidero, según el grado de *bypass* de la cubierta protectora.

La figura 6.6 muestra esquemáticamente la estructura del Método OC. El primer paso consiste en la realización del Mapa O, que describe la efectividad protectora de la cubierta, basado en las características geológicas y edafológicas (potencia de los suelos principalmente) del área. La combinación del Mapa O con el Mapa C da como resultado el mapa de vulnerabilidad, aunque la realización de ese segundo mapa requiere un mayor volumen de información.

El Mapa C describe el grado de *bypass* de la cubierta protectora, y se realiza combinando el mapa del factor **C'**, referente al tipo de flujo dominante (sub-superficial, o no), y el mapa de las cuencas superficiales. Para desarrollar la cartografía correspondiente al Mapa **C'** es necesario poseer valores numéricos de las pendientes y conocer el tipo de vegetación (bosques o praderas) y los tipos de suelo existentes en la zona. El mapa de las cuencas superficiales, por su parte, se basa en la topografía y muestra la cuenca de los cursos de agua superficiales que desembocan en sumideros, y las áreas más cercanas a esos cursos (buffer zones). Una vez combinados el Mapa **C'** y el de las cuencas superficiales se obtiene el Mapa C, que se combina con el Mapa O para obtener el **mapa final de vulnerabilidad (intrínseca)**.

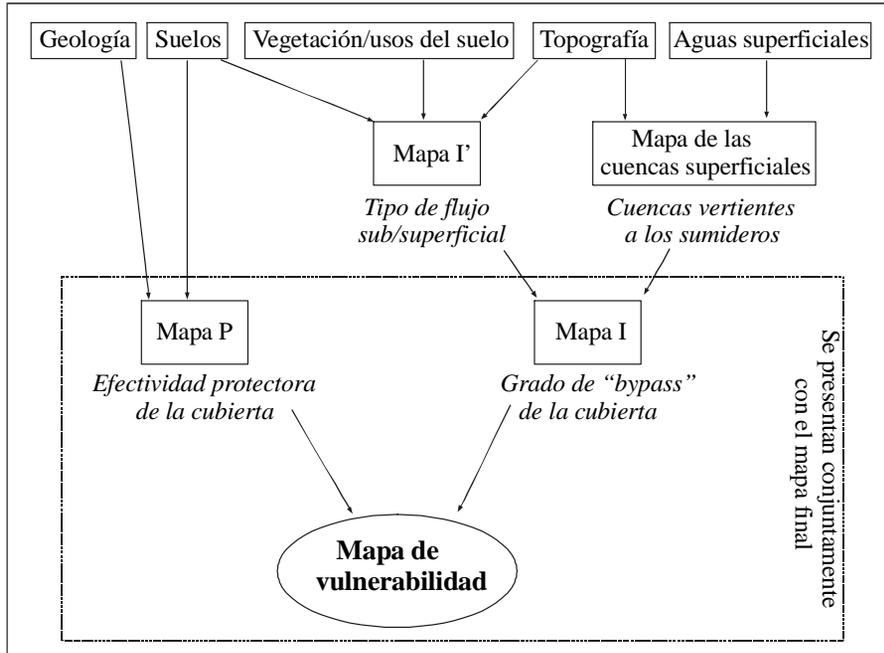


Figura 6.6: Estructura del Método OC.

**6.3.2. MAPA O**

Las tablas 6.5 a 6.8 muestran la forma de evaluar el factor O a partir del Método PI (tablas y fórmula modificada según HÖLTING et al., 1995), sistema utilizado en nuestro caso. Se trata de evaluar, mediante puntuación, los factores incluidos en las tablas e integrar esos puntos en la fórmula (2) para obtener un valor (Pts) que representa la función protectora total.

**Suelo (topsoil)-T**

Capacidad de campo (mm) a una profundidad de 0-1 m	
>250	750
200-250	500
140-200	250
90-140	125
50-90	50

**Recarga-R**

Recarga (mm/año)	R
0-100	1.75
100-200	1.5
200-300	1.25
300-400	1.00
>400	0.75

**Tabla 6.5: Asignación de puntos para la capacidad de campo del suelo (entre 0 y 1 m de profundidad) y la recarga anual.**

**Subsuelo - S**

Tipo de subsuelo (según tamaño de grano)	S	Tipo de subsuelo (según el tamaño de grano)	S
Arcillas	500	Arenas muy arcillosas, arenas arcillosas, arenas limosas orgánicas	140
Arcillas limosas orgánicas poco plásticas	400	Limos arenosos poco plásticos, arenas orgánicas muy limosas	120
Arcillas ligeramente arenosas	350	Arenas orgánicas, arenas limosas poco plásticas	90
Arcillas limosas, limos orgánicos arcillosos poco plásticos	320	Arenas ligeramente arcillosas, arenas limosas, gravas arenoso-arcillosas	75
Limos orgánicos arcillosos	300	Arenas ligeramente orgánicas, gravas arenosas ligeramente plásticas	60
Arcillas muy limosas, arcillas arenosas	270	Arenas ligeramente plásticas, arenas ligeramente plásticas con gravas	50
Limos muy orgánicos	250	Arenas	25
Limos orgánicos ligeramente arcillosos, limos orgánicos arcillosos poco plásticos	240	Arenas con gravas, gravas arenosas	10
Limos muy arcillosos poco plásticos, limos poco plásticos	220	Gravas, gravas con brechas	5
Arcillas muy arenosas, limos orgánicos arenosos poco plásticos, limos orgánicos ligeramente arenosos, limos orgánicos poco plásticos, limos arcillosos poco plásticos	200	Material volcánico (piroclástico) sin litificar	200
Limos orgánicos arenosos, limos poco plásticos ligeramente orgánicos	180	Turba	400
Limos ligeramente arcillosos poco plásticos, limos arenosos ligeramente orgánicos poco plásticos, limos orgánicos muy arenosos	160	Sapropel	300

**Tabla 6.6: Asignación de puntos para el subsuelo según la distribución del tamaño de grano.**

**Litología-L**

Litología	L
Lutitas, pizarras, margas	20
Areniscas, cuarcitas, rocas volcánicas, plutónicas y metamórficas	15
Areniscas y rocas volcánicas porosas	10
Conglomerados, brechas, calizas, dolomías, evaporitas	5

**Fracturación-F**

Fracturación	F
No fracturado	25.0
Ligeramente fracturado	4.0
Moderadamente fracturado, ligeramente karstificado o formas kársticas totalmente tapadas	1.0
Moderadamente kárstico o formas kársticas tapadas en su mayor parte	0.5
Muy fracturado o muy karstificado y desnudo	0.3

Epikarst muy desarrollado, desnudo	0.0
No conocido	1.0

**Tabla 6.7: Asignación de puntos para la litología y la fracturación.**

**Potencia de cada capa en  
metros - M**

**Substrato - B**  
B = L . F

$$\text{Función protectora total } P_{TS}: P_{TS} = \left[ T + \left( \sum_{i=1}^m S_i . M_i + \sum_{j=1}^n B_j . M_j \right) \right] . R \quad (2)$$

Valor de P <sub>TS</sub>	efectividad protectora de la cubierta	Factor O
0-10	muy baja	1
10-100	baja	2
100-1000	media	3
1000-10000	alta	4
>10000	muy alta	5

**Mapa O**

**Tabla 6.8: Asignación de los cinco rangos de puntos obtenidos para la función protectora (Pts) y sus equivalentes en el Mapa O.**

La función protectora del suelo (**T**) se evalúa de acuerdo con la capacidad de campo efectiva correspondiente a una profundidad de 0-1 m. La evaluación de la función protectora del subsuelo (**S**), por su parte, depende de la distribución del tamaño del grano. El factor **R** se evalúa a partir de la recarga estimada (mm/año) y el valor de **B**, referente a las formaciones rocosas, se obtiene multiplicando el factor **L** (litología) por el factor **F** (grado de fracturación y karstificación).

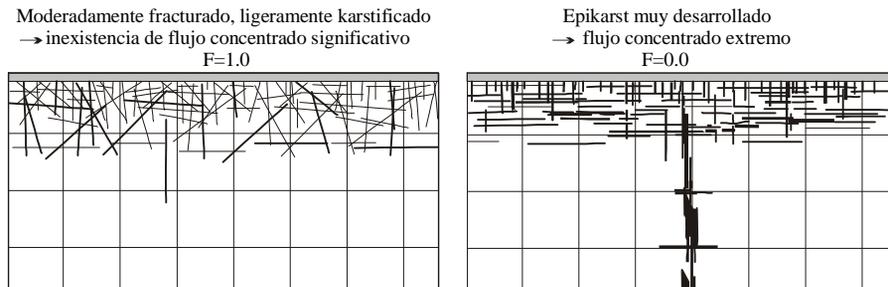
De acuerdo con lo visto hasta el momento, queda claro que para la obtención del Mapa O es necesario disponer de los mapas del subsuelo (S), de la litología (L), de la fracturación (F) y de la potencia de las capas (M). No es necesario realizar los mapas T (suelo) y R (recarga), puesto que, en general, a estos dos factores se les puede asignar un único valor en toda la zona, a no ser que la zona cubra una gran extensión en la que el régimen de recarga pluviométrica y la capacidad de campo de sus suelos difiera de un lugar a otro.

**6.3.2.1. ASPECTOS A TENER EN CUENTA PARA LA CONSTRUCCIÓN DEL MAPA O**

El epikarst (o zona subcutánea) puede definirse como la “zona externa, o más cercana a la superficie del karst desnudo, donde la permeabilidad motivada por la fisuración y por la karstificación

difusa es considerablemente mayor y está distribuida de forma más uniforme que en la masa de roca compacta situada por debajo” (KLIMCHOUK, 1997). Sus posibles funciones hidrológicas son el almacenamiento y la concentración del flujo (FORD y WILLIAMS, 1989). Si el epikarst se ha desarrollado de forma que permite una concentración extrema del flujo (ej: lapiaz desnudo conectado con chimeneas verticales), al factor estructural F (fracturación) se le asigna un valor de 0 ya que la función protectora de la zona no saturada por debajo del epikarst es totalmente nula (figura 6.7).

La geomorfología kárstica observable en superficie es solamente una expresión del epikarst pero la mayor parte de él puede no ser visible en superficie. El epikarst puede estar muy bien desarrollado sin ninguna forma kárstica visible en superficie que lo indique. Consecuentemente, se asume que el epikarst está presente (aunque no sea visible) si se encuentran condiciones favorables para el desarrollo del mismo como pueden ser la existencia de un substrato calizo puro y muy fracturado o la aparición de indicadores geomorfológicos (dolinas, lapiaz) del desarrollo intensivo de un epikarst (DREW et al., 1999).



**Figura 6.7: El flujo concentrado de agua en un epikarst muy desarrollado puede hacer que la función protectora de la zona no saturada sea anulada. En este caso, al factor F se le asigna un valor de 0 (modificado según DREW et al., 1999).**

Según la opinión de los autores, es engañoso asignar una vulnerabilidad baja a una zona donde el acuífero que está siendo considerado se encuentra cubierto por otra unidad o sistema acuífero superior; en este caso es el acuífero superior el que necesita protección. Por eso, el método PI siempre considera como objetivo (target) la superficie de la zona saturada del acuífero más superficial. Como consecuencia, se considera que el acuífero superior no ejerce ninguna función protectora con respecto al acuífero que existe debajo.

El valor obtenido para cada capa del subsuelo (**S**) y de las formaciones rocosas (**B = L.F**) se multiplica por su potencia en metros (**M**). Las capas (o estratos) de poca potencia y baja permeabilidad pueden sufrir *bypass*, si lateralmente no son continuas y aparecen como lentejones. Por

consiguiente, debe tenerse en cuenta la continuidad lateral de cada capa con el fin de evitar una sobrestimación de la función protectora (DALY et al., 2000). La evaluación de la efectividad total de la cubierta protectora ( $P_{TS}$ ) se calcula de acuerdo con la fórmula (2).

Finalmente, los valores obtenidos para la función protectora total ( $P_{TS}$ ) se subdividen en cinco clases (tabla 6.8) que corresponden al factor O (Mapa O) del Método OC. Cada clase de O cubre un rango de valores de la misma magnitud. Se considera que un  $P_{TS} \leq 10$  proporciona una protección muy baja y es extremadamente vulnerable ( $O=1$ ), mientras que a una protección natural muy alta y una vulnerabilidad muy baja ( $O=5$ ) le corresponde un valor de  $P_{TS} > 10000$ .

En áreas horizontales de drenaje natural (figura 6.5) el factor O se multiplicaría por un factor  $C=1$ , de forma que en estos casos el mapa final de vulnerabilidad será idéntico al Mapa O para esa área. A áreas situadas fuera del acuífero pero que descargan sus aguas en él mediante componentes del flujo (sub)superficial (escorrentía) se les asigna un valor de 5 para el factor O.

### **6.3.3. MAPA C**

La cubierta protectora (O) puede proteger el agua subterránea únicamente si la infiltración y la percolación se producen de forma difusa, a través de pequeños poros o fisuras, sin procesos significativos de concentración del flujo. En zonas kársticas aparecen, frecuentemente, cursos de agua superficiales que se infiltran de forma concentrada a favor de sumideros (figura 6.5). En estos casos la cubierta ejerce un efecto protector nulo en el sumidero y casi nulo en la cuenca vertiente al sumidero. Por ese motivo, para la consecución del mapa de vulnerabilidad intrínseca final es necesario considerar el factor C.

El factor C expresa la falta de efectividad protectora de la cubierta debida a la concentración del flujo (sub)superficial, teniendo en cuenta las cuencas de los cursos de agua que desaparecen en sumideros. Si la infiltración ocurre de forma difusa sobre una superficie horizontal drenada de forma natural, sin procesos significativos de flujo concentrado, C es igual a 1 expresando que la cubierta protectora no es anulada y es efectiva al 100%. Por el contrario, en las zonas en las que el efecto protector de la cubierta se ve completamente anulado (sumideros) el valor del factor C es 0. Las cuencas vertientes a flujos de agua superficiales que se infiltran a través de sumideros se subdividen en valores de entre 0 y 1, en función de los componentes del flujo (sub)superficial (figura 6.5).

Hay que enfatizar el hecho de que el factor C no está definido precisamente en términos hidrológicos. Es una herramienta semicuantitativa que expresa la vulnerabilidad de las aguas

subterráneas derivada del bypass de la cubierta protectora debido a los componentes del flujo (sub)superficial.

La vulnerabilidad de una zona depende del camino que recorra un contaminante desde la superficie del terreno hasta la zona saturada. Como habitualmente es el agua la que transporta los contaminantes, es necesario describir las posibles trayectorias que el agua puede seguir. Se pueden distinguir tres procesos hidrológicos principales: infiltración con consecuente percolación, flujo superficial y flujo subsuperficial. El proceso hidrológico dominante dependerá de los condicionantes físicos del lugar y de las características de las precipitaciones, considerando también los eventos lluviosos antecedentes y el grado de saturación de los suelos.

Si la intensidad del evento lluvioso es menor que la capacidad de infiltración del suelo y si la conductividad hidráulica del perfil del suelo es lo suficientemente alta como para permitir el movimiento del agua hacia abajo, percolación, el proceso hidrológico dominante será la infiltración difusa. Las pendientes suaves, la densa vegetación, sobre todo bosque, y los suelos de textura grosera con horizontes gruesos de materia orgánica favorecen este tipo de infiltración (DYCK y PESCHKE, 1995).

La propuesta (GOLDSCHIEDER, 2000) para definir el factor C en el Método OC, aún sin establecer de forma definitiva, considera la pendiente, las propiedades del suelo, el tipo de vegetación y las características hidrológicas de la zona. Las tablas 6.9 a 6.11 muestran los aspectos considerados y sus valores correspondientes para el desarrollo del Mapa C.

PROPIEDADES DEL SUELO	EJEMPLOS	PROCESOS DE FLUJO DOMINANTES	TIPO
Suelo muy permeable sobre substrato permeable	Rendzina sobre karst, suelo arenoso profundo	Infiltración	A
Suelo muy permeable sobre substrato poco permeable	Material detrítico de grano grueso sobre lutitas	Flujo subsuperficial	B
Suelo poco permeable (o suelo poco potente) sobre substrato poco permeable	Suelo arcilloso	Flujo superficial	C

**Tabla 6.9: Procesos de flujo dominantes dependientes de las propiedades del suelo.**

El primer paso consiste en combinar el tipo de suelo, en función de sus propiedades (tabla 6.9), con el tipo de vegetación (bosque o praderas y pastos) y las pendientes, de donde se obtienen una serie de valores que corresponden al factor C' (tabla 6.10 y figura 6.6). En caso de que existan zonas en las que el agua se vea artificialmente imposibilitada de infiltrarse en el terreno por la existencia de carreteras o núcleos urbanos, a estas zonas se les atribuye un valor para C' de 0.8.

BOSQUES			
TIPO DE SUELO	PENDIENTES		
	< 3.5 %	3.5 – 27 %	> 27 %
A	1.0	1.0	0.8
B	1.0	0.8	0.6
C	0.8	0.6	0.4
PRADOS Y PASTOS			
TIPO DE SUELO	PENDIENTES		
	< 3.5 %	3.5 – 27 %	> 27 %
A	1.0	0.8	0.6
B	0.8	0.6	0.4
C	0.6	0.4	0.2

**Tabla 6.10: Determinación del factor C´.**

Por último, la combinación del Mapa C´ con el mapa de las cuencas superficiales (figura 6.6) da como resultado el Mapa C, cuyos valores generales se muestran en la tabla 6.11.

MAPA DE LAS CUENCAS VERTIENTES	Factor C´				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Sumideros, cursos superficiales que se infiltran y 10 m a ambos lados de esos cursos superficiales	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100 m a ambos lados de los cursos superficiales que se infiltran	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Área de descarga en el interior del karst	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0
Área de descarga fuera del karst	1.0	1.0	1.0	1.0	1.0

**Mapa C**

**Tabla 6.11: Determinación del factor C.**

### 6.3.4. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD

El mapa de vulnerabilidad representa la vulnerabilidad intrínseca o, lo que es lo mismo, el grado de protección natural ante la contaminación del acuífero superior. El mapa muestra la distribución espacial del factor de protección  $\pi$  que se obtiene combinando los factores O y C:

$$\pi = O \cdot C$$

Se ha mantenido aquí el término utilizado en el método alemán ( $\pi=P.I$ ) ya que todavía este extremo no ha sido establecido en el método europeo, en elaboración. El factor  $\pi$  oscila entre 0 y 5, donde los valores altos representan una alta protección natural y una baja vulnerabilidad. Debido a que el mapa final de vulnerabilidad es el resultado de la superposición de los mapas O y C (cubierta, flujo), es posible saber a cual de esos factores se debe la vulnerabilidad en una zona concreta, es decir, se puede saber si es debida a una cubierta poco potente o a la infiltración concentrada de agua en un punto.

Cada uno de los tres mapas ( $\pi$ , O y C) se subdivide en 5 clases diferentes a las que se han adjudicado cinco colores distintos cuyos extremos son el rojo para un riesgo alto y el azul para un riesgo bajo, de forma que se puede utilizar una leyenda común para cada mapa. La tabla 6.12 refleja los valores asociados a cada factor (O, C) y su correspondiente descripción, así como su relación con el mapa final de vulnerabilidad.

color	Mapa de Vulnerabilidad Vulnerabilidad del acuífero superior		Mapa O Efectividad protectora de la cubierta		Mapa C Grado de "bypass"	
	descripción	factor $\pi$	descripción	Factor O	descripción	Factor C
rojo	extrema	0-1	muy baja	1	muy alto	0-0.2
naranja	alta	>1-2	baja	2	alto	0.4
amarillo	moderada	>2-3	moderada	3	moderado	0.6
verde	baja	>3-4	alta	4	bajo	0.8
azul	muy baja	>4-5	muy alta	5	muy bajo	1.0

**Tabla 6.12: Rangos de los valores correspondientes a cada factor y su descripción.**

Este método considera la vulnerabilidad de la zona saturada más cercana a la superficie, es decir, si existe más de un acuífero superpuesto se considera la vulnerabilidad del acuífero superior. Si no es éste el acuífero principal, el método recomienda que los límites de los posibles acuíferos existentes sobre el acuífero principal se marquen en la cartografía mediante una línea gruesa.

### **MEJORAS AL METODO OC**

Si bien el cuerpo fundamental del método OC, en preparación, son los dos factores citados (factor **O** y factor **C**) en las discusiones actualmente existentes en el marco de la Acción COST 620 se está tratando de completar ese cuerpo con otros dos factores, adicionales, que reflejan también aspectos de importancia de cara a la vulnerabilidad del medio kárstico. Uno de estos factores sería el factor **R** (Rainfall-Recharge?) que consideraría la intensidad de las precipitaciones, ya que ello influencia el proceso de flujo dominante en caso de que se sobrepase la capacidad de infiltración del suelo; se trataría de considerar, en mapa, las intensidades de lluvias extremas en función de las series de datos disponibles y de un periodo de retorno previamente establecido. En cualquier caso, la consideración de este factor no es sencilla al tratarse de un proceso de notable variabilidad espacio-temporal.

El otro factor sería el factor **K** que reflejaría la influencia de la red de conductos kársticos de la zona saturada en la vulnerabilidad de las aguas en la surgencia, o en el punto de captación. Es decir, como se ha comentado en el apartado 6.3.1, el objetivo fundamental a proteger en el método OC es toda la zona saturada del acuífero kárstico, por lo que el método, hasta aquí, no ha considerado los procesos que pueden darse en la propia zona saturada (dominio horizontal): el mapa así obtenido es un mapa de protección del acuífero (*resource protection map*). La consideración del factor K, sin

embargo, supone la toma en cuenta de la función transmisiva de la red kárstica activa en ese dominio horizontal permitiendo así establecer un mapa donde el objetivo a proteger son las aguas en el punto de captación (surgencia, pozo): *source protection map*.

La figura 6.8 esquematiza lo ahora comentado. Tampoco en el caso del factor K se ha llegado aún a un establecimiento claro de cómo considerarlo en la elaboración del mapa respectivo. Esta figura incluye también una última cuestión: el Karst System. Se trata de considerar el sistema kárstico en su conjunto estableciendo una serie de métodos (técnicas), de campo, que permitieran verificar *in situ* los grados de vulnerabilidad que el solapamiento de los mapas factoriales hubieran finalmente proporcionado. Aunque la discusión continua es evidente que los ensayos con trazadores (inyectando desde sumideros, pozos o directamente en fisuras del terreno) se presentan como una herramienta muy eficaz para esta comprobación del acierto o desacierto del resultado final del método.

*Figura 6.8: Posible esquema final del método europeo una vez considerados los factores nucleares y los adicionales (preparado por I. Antigüedad).*

### **6.3.5. APLICACIÓN DEL MÉTODO OC A LA UNIDAD KARSTICA DE ALBIZTUR (SISTEMA KÁRSTICO DE SALUBITA)**

Se explican de forma simplificada los pasos seguidos para la obtención de los mapas 6.5 (Mapa O), 6.6 (Mapa C) y 6.7 (Mapa final de vulnerabilidad).

#### **6.3.5.1. MAPA O**

En función de los valores de las tablas 6.5 a 6.8, a los diferentes factores se les han adjudicado los siguientes valores:

- T (suelo, *topsoil*): 10. Este valor corresponde a una capacidad de campo de entre 0 y 50 mm para una profundidad de suelo de entre 0 y 1 m (*topsoil*) y puesto que en el capítulo 4.11 se consideró

una capacidad de campo de 50 mm (para el suelo en su totalidad) para el cálculo de la ETR, se ha considerado oportuno atribuir a T un valor de 10 para todo el área.

- R (recarga): 0.75. Teniendo en cuenta el balance hídrico realizado en el apartado 4.11, la recarga anual al Sistema es claramente superior a 400 mm (tabla 6.5) por lo que a R se le ha adjudicado un valor de 0.75 para toda el área.

- Para la realización del mapa S (subsuelo), a partir de las observaciones de campo, y a partir de la tabla 6.6, se han considerado únicamente dos tipos de subsuelo que se describen en la tabla 6.13, donde se incluyen las zonas que abarcan y su valor de S:

DESCRIPCIÓN DEL SUBSUELO	ZONAS	S
Arenas ligeramente arcillosas, arenas limosas y gravas arenoso-arcillosas	Depresiones de Bidania, Santutxo y Albiztur	75
Limos arenosos poco plásticos y arenas orgánicas muy limosas	Resto del área representado principalmente por un suelo de tipo luvisol	120

**Tabla 6.13: Valores utilizados para el factor S en el Sistema Kárstico de Salubita.**

- El mapa referente a la litología (L) se ha construido considerando tres litologías principales (tabla 6.7) cuyas características y valores atribuidos se resumen en la tabla 6.14:

DESCRIPCIÓN DE LA LITOLOGÍA	L
Lutitas y margas	20
Areniscas	15
Calizas y calcarenitas	5

**Tabla 6.14: Valores asignados al factor L en el Sistema Kárstico de Salubita.**

- Para la realización del mapa relativo a la fracturación (F) se ha utilizado la descripción de la tabla 6.7. Las observaciones de campo han permitido distinguir tres situaciones diferentes, que se muestran en la tabla 6.15.

De acuerdo con los afloramientos visibles en el campo, queda claro que las calizas y calcarenitas urgonianas presentan, en general, un buen desarrollo del epikarst con numerosas formaciones exokársticas, sobre todo hacia el Oeste de la zona de estudio, y un lapiaz visible en la zona central. Además, considerando la rápida respuesta del manantial durante las crecidas motivada, seguramente, por la existencia de conductos verticales asociados al epikarst (capítulo 4) y la escasez de suelo justifica el valor de F atribuido a las calizas y calcarenitas urgonianas.

DESCRIPCIÓN DEL GRADO DE FRACTURACIÓN	MATERIALES	F
Moderadamente fracturado, ligeramente karstificado o formas kársticas totalmente selladas	Resto de los materiales	1.0
Muy fracturado o muy karstificado y desnudo	Calizas no urgonianas	0.3

Epikarst muy desarrollado, desnudo	Calizas y calcarenitas urgonianas	0.0
------------------------------------	-----------------------------------	-----

**Tabla 6.15: Valores asignados al factor F en el Sistema Kárstico de Salubita.**

En cuanto al resto de los materiales calizos que afloran en la zona de estudio, las formas exokársticas son escasas, al igual que el suelo. Además, los ensayos con trazadores realizados en calizas jurásicas mostraron (apartado 4.8) que los trazadores se mueven con mucha menor lentitud en estos materiales, lo que sugiere, sobre todo, el movimiento del agua a través de fracturas. Estas observaciones justifican el valor de F atribuido a las calizas no urgonianas.

Por último, teniendo en cuenta la localización del área de estudio, en una zona tectónicamente activa entre dos fallas (Falla de Errezil al Norte y Falla de Azkoitia al Sur), y de acuerdo con las fracturas visibles en los cortes de carretera y canteras, se ha considerado que al resto de los materiales les corresponde un valor de F igual a 1.0 (un valor de 0.5 resultaría demasiado bajo).

- Debido a la inexistencia de sondeos a lo largo del área, ha sido un tanto controvertido el establecimiento de los valores de M, sobre todo en lo que se refiere a los materiales que afloran hacia el Norte, ya que hacia esta zona los estratos presentan cambios importantes de potencia por acuñamientos. Los datos de las potencias atribuidas a las diferentes capas se han obtenido principalmente de la bibliografía (apartado 3.2), a excepción de las potencias de las depresiones kársticas de Bidania y Albiztur, para las cuales existen datos geofísicos fiables. La tabla 6.16 muestra las potencias atribuidas a cada capa:

SUBSTRATO ROCOSO	POTENCIAS ATRIBUIDAS
Lutitas y areniscas (Albiense-Aptiense)	125 m
Calizas y calcarenitas urgonianas	400 m, al Norte 90 m (junto a la Falla de Errezil)
Lutitas y margas (Barremiense)	190 m, al Norte 90 m
Margas (Aptiense-Albiense)	50 m
Calizas (Malm-Neocomiense)	100 m
Margas y calizas (Dogger)	90 m
Brechas, carniolas, calizas y dolomías (Lías)	40 m
CUATERNARIOS DE LAS DEPRESIONES	POTENCIAS ATRIBUIDAS
Cuaternario de Bidania	35 m (promedio, geofísica)
Cuaternario de Albiztur	15 m (promedio, geofísica)
Cuaternario de Santutxo	10 m (no hay datos)
SUBSUELO	POTENCIAS ATRIBUIDAS
Calizas y calcarenitas urgonianas (en general) y calizas del jurásico terminal-neocomiense	0.1 m
Substrato lutítico, margoso y arenoso. Calizas y calcarenitas urgonianas al Oeste de la depresión de Bidania.	0.6 m

**Tabla 6.16: Potencias (M) atribuidas a los diferentes tipos de substrato rocoso y a los depósitos aluviales cuaternarios.**

La combinación de todos estos factores (ecuación 2) ha dado como resultado la obtención de 3 rangos que definen la efectividad de la cubierta protectora como baja, media, alta (Mapa 6.5). Esto significa que no se ha obtenido ningún valor de Pts inferior a 10 ni superior a 10000.

**6.3.5.2. MAPA C**

De acuerdo con la tabla 6.9, para el Sistema Kárstico de Salubita se han considerado dos tipos de suelo (tabla 6.17). El suelo que cubre los materiales carbonatados, ya sean urgonianos o jurásicos-neocomienses, se ha considerado de tipo A, y el resto de tipo C. Este segundo tipo se justifica por el hecho de que el suelo aparece sobre materiales poco permeables (margas y arcillas sobre todo) y es, según observaciones de campo, bastante arcilloso.

PROPIEDADES DEL SUELO	EJEMPLOS	PROCESOS DE FLUJO DOMINANTES	TIPO
Suelo muy permeable sobre substrato permeable	Rendzina sobre karst, suelo arenoso profundo	Infiltración	A
Suelo poco permeable (o suelo poco potente) sobre substrato poco permeable	Suelo arcilloso	Flujo superficial	C

**Tabla 6.17: Tipos de suelo considerados para el Sistema Kárstico de Salubita y procesos de flujo dominantes.**

Esos dos tipos de suelo se han combinado con el tipo de vegetación y las pendientes (tabla 6.18). Si se comparan las tablas 6.10 y 6.18 se observa una diferencia en los límites de las pendientes. Ésto se debe a que el mapa de pendientes del Gobierno Vasco a escala 1:25.000 (utilizado como referencia en este estudio) presenta ocho rangos de pendientes (0-3%, 3-5%, 5-10%, 10-20%, 20-30%, 30-50%, 50-100% y >100%). Se ha tomado el límite inferior como 5% puesto que la zona presenta pendientes importantes y el 3% resulta demasiado bajo. Para el límite superior no es posible diferenciar una pendiente del 27% por lo que se ha tomado una pendiente del 30%. La tabla 6.18 muestra los valores de C' obtenidos para el Sistema Kárstico de Salubita.

BOSQUES			
TIPO DE SUELO	PENDIENTES		
	< 5 %	5 – 30 %	> 30 %
A	1.0	1.0	0.8
B	1.0	0.8	0.6
C	0.8	0.6	0.4
PRADOS Y PASTOS			
TIPO DE SUELO	PENDIENTES		
	< 5 %	5 – 30 %	> 30 %
A	1.0	0.8	0.6
B	0.8	0.6	0.4
C	0.6	0.4	0.2

**Tabla 6.18: Determinación del factor C' para el Sistema Kárstico de Salubita.**

Por último, la combinación del Mapa C' con el mapa de las cuencas superficiales da como resultado el Mapa C, cuyos valores generales se muestran en la tabla 6.19. Se ha considerado que todo el agua, tarde o temprano, descarga en el interior del karst, es decir, no existe ninguna zona con área de descarga fuera del karst, por lo que, en comparación con la tabla 6.11, para el Sistema Kárstico de Salubita únicamente se tienen tres posibilidades dentro del mapa de las cuencas vertientes (tabla 6.19).

MAPA DE LAS CUENCAS VERTIENTES	Factor C'				
	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Sumideros, cursos superficiales que se infiltran y 10 m a ambos lados de esos cursos superficiales	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0
100 m a ambos lados de los cursos superficiales que se infiltran	0.2	0.4	0.6	0.8	1.0
Área de descarga en el interior del karst	0.4	0.6	0.8	1.0	1.0

**Mapa C**

**Tabla 6.19: Determinación del factor C.**

El Mapa C obtenido para el Sistema Kárstico de Salubita (Mapa 6.6) muestra 5 clases, de las cuales la de menor valor (0-0.2, grado de *bypass* muy alto) corresponde, en general, a los sumideros y a las dolinas, y a los cursos de agua que se infiltran por los sumideros, coincidiendo con la tabla 6.19. El grado de *bypass* más bajo (valor del factor C igual a 1.0), por su parte, coincide, prácticamente, con las zonas donde afloran los materiales carbonatados.

**6.3.6. CONSTRUCCIÓN DEL MAPA DE VULNERABILIDAD PARA LA UNIDAD KÁRSTICA DE ALBIZTUR (SISTEMA KÁRSTICO DE SALUBITA)**

Una vez realizados los mapas O y C se observa una cosa clara y es que los valores generales de  $\pi$  asignados en la tabla 6.12 no sirven en nuestro caso, ya que para el factor O únicamente se han obtenido tres rangos. En la tabla 6.20 se muestran los rangos de valores para el factor  $\pi$  empleados en nuestro caso.

color	Mapa de Vulnerabilidad Vulnerabilidad del acuífero superior		Mapa O Efectividad protectora de la cubierta		Mapa C Grado de "bypass"	
	descripción	factor $\pi$	descripción	Factor O	descripción	Factor C
rojo	extrema	0-0.8	muy baja	-	muy alto	0-0.2
naranja	alta	>0.8-1.6	baja	2	alto	0.4
amarillo	moderada	>1.6-2.4	moderada	3	moderado	0.6
verde	baja	>2.4-3.2	alta	4	bajo	0.8
azul	muy baja	>3.2-4	muy alta	-	muy bajo	1.0

**Tabla 6.12: Rangos de los valores correspondientes a cada factor y su descripción.**

La combinación del Factor O igual a 2 con el Factor C de entre 0 a 0.4 da como resultado un Factor  $\pi$  de entre 0 y 0.8, es decir, una vulnerabilidad extrema. En cambio, combinando el Factor O igual a 4 con el Factor C de entre 0.8 y 1 se obtiene un Factor  $\pi$  de entre 3.2 y 4 (una vulnerabilidad muy baja). El resto de los rangos de valores para  $\pi$  se han obtenido mediante la combinación de todos los valores del Factor O con los del Factor C. El resultado final de la vulnerabilidad intrínseca (factor  $\pi$ ) se refleja en el Mapa 6.7.

### **6.3.7. CONSIDERACIONES ACERCA DEL MÉTODO OC**

En principio, la mayor parte de las dudas comentadas acerca del Método EPIK quedan resueltas en este nuevo método. Sin embargo, existe una nueva consideración que merece la pena comentar como posible problema que habría que solventar. Se trata de la potencia de las capas. El esquema de la figura 6.5 muestra una situación en que las capas (suelo, paquetes rocosos...) se encuentran en posición horizontal. No obstante, en zonas como la nuestra, donde la estructura del substrato difícilmente suele ser horizontal, y con frecuencia es muy pronunciada, no tiene demasiado sentido dar un valor de potencia a un estrato cuando éste, en el extremo, esté en posición vertical.

En la zona de estudio, por ejemplo, los materiales encaramados a la Falla de Errezil (cortes de la figura 3.2) aparecen en posición vertical y aunque para el desarrollo del mapa de vulnerabilidad mediante el Método OC se les ha dado unos valores concretos de potencias (tabla 6.16), no poseen un significado físico puesto que el agua se infiltra de arriba hacia abajo y la potencia, en este caso es perpendicular.

### **6.4. COMPARACIÓN DE AMBOS MÉTODOS: RESUMEN Y CONCLUSIONES**

El Método OC hace que la mayoría de los aspectos dudosos en el Método EPIK desaparezcan. No existen ya las dudas acerca de los valores de ponderación, puesto que el nuevo método da la misma importancia a todos los factores, a los que considera independientes. Por otra parte, el efecto *bypass* queda suficientemente bien caracterizado por el Factor C. También están considerados los casos en los que existe escorrentía superficial y las aguas provenientes de otros materiales se infiltran hacia el interior del karst. Además, a los asentamientos e infraestructuras que constituyen superficies impermeables para el agua, el Método OC les atribuye un valor de C' igual a 0.8.

Aunque hasta el momento en el desarrollo de los mapas de vulnerabilidad mediante el Método OC no se ha hecho mención de los tiempos de tránsito, en la Acción COST 620 se está buscando la forma de combinar ese dato con los factores de protección (Pts) obtenidos para mejorar el mapa de

vulnerabilidad y poder establecer, incluso, la vulnerabilidad no ya de los recursos (resource protection map) sino de las aguas en los puntos de captación (source protection map) (figura 6.8).

La simple comparación de los mapas de vulnerabilidad realizados mediante estos dos métodos (Mapa 6.4, EPIK y Mapa 6.7, OC) permite establecer ciertas diferencias:

- El Método EPIK proporciona, en nuestro caso, tres rangos de vulnerabilidad (baja, media, y alta), donde casi la totalidad de los materiales urgonianos, exceptuando aquéllos sobre los que la potencia del suelo es algo mayor, se encuentran dentro del rango de vulnerabilidad alta. Este método no distingue entre zonas de mayor (sumideros, infiltración concentrada) y menor (lapiaz, infiltración más difusa) vulnerabilidad dentro de los mismos materiales. Las zonas de vulnerabilidad más baja coinciden, sobre todo, con materiales menos permeables.

- El Método OC ha dado como resultado un mapa de vulnerabilidad intrínseca dividido en cinco rangos (muy baja, baja, moderada, alta y extrema) que proporciona una información mucho más detallada de la vulnerabilidad de cada zona. Salta a la vista las diferencias del interior de los propios materiales carbonatados urgonianos, con vulnerabilidades extremas para los sumideros, dolinas, y cursos de agua que desaparecen en sumideros, y altas para el resto.

- Aunque, en general, la vulnerabilidad baja del EPIK coincide con la moderada-baja del OC y la alta-media del EPIK con la alta-extrema del OC, existen algunas zonas en las que los grados de vulnerabilidad obtenidos mediante cada uno de los métodos poco tienen que ver. Esta observación queda evidenciada, sobre todo, en la depresión de Bidania, para la cual el Método EPIK proporciona una vulnerabilidad entre media (Norte) y alta (Sur) mientras que el método OC proporciona una vulnerabilidad muy baja-baja, excepción hecha, obviamente, de las zonas próximas a sumidero y dolinas en las que la componente del flujo (sub)superficial es importante (factor C, mapa 6.6).

Las diferencias entre los dos métodos aplicados para el cálculo de la vulnerabilidad intrínseca en la zona de estudio reflejan la subjetividad del Método EPIK ante una **mayor objetividad y exactitud del Método OC**. A pesar de que el Método OC plantea ciertas dudas acerca de la potencia del sustrato, por el momento éste parece proporcionar los mejores resultados, a tenor de los cinco rangos obtenidos. No hay que olvidar que este método está aún en proceso de desarrollo en el seno de la Acción Europea COST 620.

Hay una última observación a hacer respecto a lo esquematizado en la figura 6.8. Se comentó allí (apartado 6.3.4.1) que la incorporación del factor K, relativo a la función transmisiva de la red kárstica, posibilitaría la elaboración del mapa de vulnerabilidad de las aguas en el punto de captación.

En nuestro caso, el punto a considerar es la surgencia principal del Sistema: Salubita. Se dijo también que había que buscar técnicas que permitiesen verificar *in situ* (Karst System) la bondad de los grados de vulnerabilidad establecidos por el método.

En nuestro caso, hay que recordar aquí las conclusiones hidrogeológicas derivadas en los anteriores capítulos, que pueden servir como esa prueba de verificación de lo finalmente recogido en el Mapa 6.7. El estudio sobre el origen del flujo rápido hacia la surgencia de Salubita, a partir de su hidrograma y de su hidroquímica, mostró (apartado 4.3.2) que el área de procedencia de ese flujo, que se asoció con un epikarst activo, debía corresponder a los afloramientos carbonatados de las cuencas vertientes a las depresiones, sobre todo de Bidania y Santutxo. Esta área en ambos métodos (EPIK y OC) aparece como de vulnerabilidad alta, aunque, como se ha dicho, en el método OC hay mayor detalle (alta-extrema).

Otra fuente importante de información la han proporcionado los numerosos trazados efectuados en el área de estudio. Se ha puesto de manifiesto la mayor rapidez de tránsito (efecto “bypass” de las formaciones rocosas) en las calizas y calcarenitas urgonianas (EPIK generaliza una vulnerabilidad alta a todas las formaciones carbonatadas, sean urgonianas o jurásicas; OC discrimina, más en las jurásicas, según el factor C, Mapa 6.6).

Los ensayos también han evidenciado la buena, y rápida, conexión entre el sumidero de Osinondo, y la cueva de Leizeaundia, con Salubita, no así entre sumideros esporádicos de la depresión de Santutxo y Salubita (figura 4.51). En consecuencia, ya se comentó en el apartado 4.8.14 (figura 4.53) que esta depresión (Santutxo) no presentaba buena conexión con la surgencia de Salubita, sin que se pueda saber con la información disponible si la conexión es buena con la zona saturada del acuífero. Obviamente, esto influye si el objetivo a proteger con el mapa de vulnerabilidad es el acuífero, en su totalidad, o sólo las aguas de la surgencia.

EPIK asigna vulnerabilidad alta-media al total de las depresiones. El método OC, por su parte, discrimina mucho más, y en el caso de Santutxo da vulnerabilidad extrema a las dolinas y sumideros allí existentes (debido al factor C), que son precisamente los sitios ensayados, si bien no en todos ha sido posible la inyección. Según esto, el efecto “bypass” en estas zonas haría que el flujo alcance con rapidez la zona saturada del acuífero kárstico, de ahí su alta vulnerabilidad. Sin embargo, visto desde la surgencia, es evidente que la conexión, dentro, al menos, de la zona saturada no es buena con la surgencia, por lo que desde el punto de vista práctico esa depresión, sin sumideros permanentes, no parece que ofrezca un riesgo notable para la contaminación de las aguas de Salubita. La analítica específica realizada en las aguas del manantial en diferentes momentos (capítulo 5), habida cuenta de

la existencia de un vertedero antiguo de residuos varios justo en esa depresión, no mostró ningún tipo de afección, lo que corrobora lo antes dicho.

El método OC asigna una vulnerabilidad baja-muy baja a la depresión de Bidania, fuera de las bandas establecidas en torno a las dolinas y el curso superficial (buffer zones), mientras que para EPIK la vulnerabilidad es media-alta. En aquél método el factor O (Mapa 6.5) asigna una protección alta a los potentes materiales limo-arcillosos de la depresión, lo que junto al bajo efecto de “bypass” (Mapa 6.6) del factor C, debido a la baja pendiente, justifica el resultado final, a pesar de la visión que *a priori* se puede tener de asignar directamente alta vulnerabilidad a todas las depresiones en regiones kársticas. En este caso, no ha habido posibilidad de inyectar trazadores directamente sobre la depresión, lejos del curso superficial, por lo que no hay verificación *in situ*. Los sondeos manuales ahí realizados (apartado 3.2.4.1) mostraron presencia de materiales de muy baja permeabilidad.

Se ha tratado a lo largo de este capítulo de profundizar en los aspectos de la vulnerabilidad en regiones kársticas, tanto conceptuales como de elaboración de los mapas respectivos, tomando un método previo (EPIK) como punto crítico de partida y basándose en el nuevo método europeo OC, en elaboración, como más fiable y coherente. Los resultados que éste proporciona se ajustan bien a los datos de campo, aunque lógicamente hay resultados que hoy por hoy no son verificables con la información de campo disponible. Se ha seguido un camino en el que habrá que profundizar aún más en nuevos estudios.

## 7. CONCLUSIONES

*Los capítulos más importantes de esta Memoria de Tesis Doctoral, en lo que se refiere a las aportaciones metodológicas y de conocimiento del área objeto de investigación que presenta, son el 4 (Hidrogeología), el 5 (Hidroquímica) y el 6 (Mapas de Vulnerabilidad). Cada uno de ellos presenta al final un apartado detallado de resumen-conclusiones en el que se recogen los aspectos y los resultados más notables de la investigación desarrollada a lo largo del capítulo. En consecuencia, en el presente capítulo se resume, de forma articulada, esos apartados, con una breve exposición previa de los factores físicos que condicionan la zona objeto de estudio.*

La Unidad Hidrogeológica Kárstica de Albiztur (27 km<sup>2</sup>) se encuentra representada, en su mayor parte, por materiales carbonatados urgonianos, en la parte central, y, en menor extensión, jurásicos, hacia el Norte. Afloran también materiales lutítico-margosos que, al igual que los materiales anteriores, presentan edades entre el Jurásico y el Cretácico Medio. Al Sur de la zona de estudio afloran las areniscas Supraurgonianas.

Las calcarenitas y calizas urgonianas que forman el principal acuífero de la Unidad (Sistema Salubita, 21 km<sup>2</sup>) muestran una mayor karstificación que las calizas jurásicas, a tenor de los resultados de los ensayos con trazadores, y a la vista de las formas exokársticas sobre los materiales urgonianos, sobre todo en el sector Oeste, en torno a las depresiones de Bidania y Santutxo. Sin embargo, la red de drenaje kárstico activa afecta de forma clara únicamente a ciertas zonas de la depresión de Bidania y otros sectores (Leizeaundia), dejando otras (depresión de Santutxo) apartadas de los drenes principales en conexión con la principal surgencia del Sistema: Salubita. Se estima que el epikarst activo ocupa unos 12 km<sup>2</sup> de afloramientos urgonianos. Las formas exokársticas escasean en las calizas jurásicas.

La precipitación anual media en el área es de 1400 mm, si bien no hay registros directos dentro del área por lo que los valores se han deducido a partir de los registrados en estaciones próximas. Resultan así extremos entre 1030 y 1709 mm para la serie de años que, de una u otra manera, se han considerado en esta investigación. La temperatura media anual es de 12.6 °C. La única estación de aforos existente se encuentra en la presa de la Regata Albiztur, justo unos metros abajo de la surgencia de Salubita, de la que recibe la mayor parte del caudal; el resto procede del drenaje de las formaciones jurásicas (manantial de Igaran) y de la escorrentía de la propia cuenca vertiente a la regata en momentos de precipitaciones. En momentos de aguas bajas el agua de la regata se infiltra y alimenta la surgencia de Salubita.

El manantial de Salubita constituye el principal, y prácticamente único, punto de descarga de las calizas y calcarenitas urgonianas. Sus hidrogramas han sido deducidos, a partir de los hidrogramas

registrados en la estación de aforos de la regata, mediante datos de aforos diferenciales y mediante datos hidroquímicos, tomando los sulfatos como criterio discretizador. El caudal medio anual resultante, con varios años hidrológicos observados, es de 670 l/s, con extremos de 491 y 902 l/s. Son aguas de tipo bicarbonatado cálcico, poco mineralizadas, en comparación con las aguas circundantes, y de buena homogeneidad hidroquímica temporal.

Tanto los caudales como la hidroquímica del agua de la Regata Albiztur, aguas abajo de la surgencia de Salubita, se encuentran totalmente controlados por ésta, habida cuenta que el caudal de Salubita supone entre un 77 y un 85% del caudal total anual circulante por la estación de aforos. Esta influencia del acuífero en la regata es mayor en los años secos (1997-98).

También los hidrogramas de Salubita se han descompuesto para deducir sus componentes, a partir del contenido en sulfatos. Así, el caudal medio anual del flujo base (FB) del acuífero de Salubita se mantiene prácticamente constante en términos absolutos (286-309 l/s) durante los años considerados, mientras que el flujo rápido (FR) fluctúa considerablemente (210-443 l/s) aumentando con la precipitación anual. El FB oscila entre 41 y 58%, siendo mayor en el año seco (1997-98), lo que refleja la capacidad reguladora del acuífero. Durante los meses húmedos, el caudal diario del FB se mantiene en 350-380 l/s.

A partir del hidrograma de flujo rápido en Salubita se ha estimado la superficie necesaria para generarlo, unos 12.6 km<sup>2</sup>, que se ha relacionado con la presencia de un epikarst activo en las cuencas vertientes a las depresiones de Bidania y Santutxo, principalmente. En esta deducción ha tenido importancia el seguimiento químico en Salubita, sobre todo en nitratos, de crecidas concretas.

A final de estiaje las aguas procedentes de cabecera de la Regata Albiztur, surgencia de Igaran, controlan la hidroquímica de las aguas de Salubita. Cuando los caudales en la presa son inferiores a 200-225 l/s en la regata las aguas se infiltran totalmente y salen por Salubita originando un notable aumento en sulfatos. Aguas arriba de Salubita, las aguas de la regata están controladas en un 78-80%, anual, por el manantial de Igaran, que drena calizas del Jurásico terminal, con un muy alto contenido en sulfatos. Es ésta la razón de usar el sulfato en los balances de masa para la descomposición de los diversos hidrogramas. Con caudales en la presa entre 200 y 800 l/s la infiltración en la regata va disminuyendo hasta anularse con caudales superiores a los 800 l/s en la presa, donde está la estación de aforos.

El acuífero drenado por Salubita tiene dos principales fuentes de recarga: las aguas que se infiltran de forma superficialmente difusa a través de los amplios afloramientos carbonatados, y las que lo hacen de forma concentrada en el único sumidero permanentemente activo de toda el área: Osinondo, en la depresión de Bidania. Estas últimas tienen menores contenidos en sulfatos que las que habitualmente salen

por Salubita, incluso en momentos de aguas altas, lo que indica que el resto de las aguas que se infiltran en el sistema, las de forma superficialmente difusa, en relación con el epikarst, ganan sulfatos dentro de los propios materiales carbonatados urgonianos.

El Arroyo Bidania, que se sume en Osinondo, ha sido objeto de registro temporal. Las crecidas en el sumidero se producen casi al mismo tiempo que los aumentos de caudal en Salubita. Significa ésto que las crecidas en Salubita no son consecuencia de las crecidas en Osinondo, como cabría pensar *a priori*, sino que ambas son producidas por el mismo evento. La unimodalidad general de los picos en la descarga indica que las crecidas en Osinondo se amortiguan en el acuífero, ya que su tiempo de tránsito debe ser de 20-50 horas, como lo han evidenciado los trazados. Aunque en aguas altas, muy puntualmente, las aguas infiltradas en Osinondo pueden suponer hasta un 40% del caudal drenado después por Salubita (habida cuenta del desfase citado), en aguas medias ese porcentaje oscila entre 5-16% y en aguas bajas entre 1-2%. Así, queda claro que aunque el agua infiltrada en Osinondo sale por Salubita, el agua de esta surgencia procede mayoritariamente de otras zonas, ajenas al sumidero de Osinondo: la infiltración difusa.

El nitrato, cuando se hace un seguimiento detallado del quimismo (quimiograma), es un buen indicador de la presencia del flujo rápido en Salubita procedente de Osinondo y permite deducir el tiempo de tránsito para las primeras aguas de infiltración rápida (unas 20 h) y para el “pico” máximo de infiltración (unas 28 h), lo que da como resultado velocidades de entre 145 m/h y 205 m/h, similares a las obtenidas mediante los trazados artificiales. El nitrato sirve como trazador natural, en las primeras crecidas del año, sobre todo, aunque asimilable a una inyección continua de concentración decreciente.

Estos trazados, por su parte, han evidenciado una mayor karstificación funcional en las calizas urgonianas que en las jurásicas (mayores tasa de restitución, flujos más rápidos, curvas unimodales...). Se muestra una muy buena conexión entre el sumidero de Osinondo y Salubita (20-50 h, según el momento), y parecida entre el sector de Leizeaundia y Salubita. Sin embargo, la depresión de Santutxo no está bien relacionada con el punto de descarga (Salubita), aunque sí pueda estarlo con el acuífero; este aspecto es de gran importancia para su consideración en los mapas de vulnerabilidad. Se concluye que la red de drenaje kárstico del Sistema Salubita está muy dispersa espacialmente, aunque en su cabecera juega un muy importante papel hidráulico el epikarst, acumulando y concentrado el flujo.

Los trazados también han permitido una mejora sustancial en la delimitación de los límites de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur: la Falla de Errezil constituye el límite Norte (más al Norte los flujos se dirigen hacia el Este: río Oria), y los materiales lutíticos del Complejo Supraurgoniano el límite Sur (a pesar de que se ha detectado un flujo insignificante hacia el sector de Legorreta, en el Sureste).

Se ha contado con algunos datos previos de piezometría, si bien sólo un piezómetro está actualmente operativo. Los gradientes resultantes son de 0.01-0.04 (todos los pozos están muy cerca de la surgencia Salubita). De la comparación de la evolución de niveles con la de los caudales en Salubita se ha podido, al menos, deducir la presencia de niveles más transmisivos a determinadas cotas, que justificaría el mantenimiento observado de los niveles. Lamentablemente, la información es escasa. A pesar de ello, se evidencia la influencia en los niveles de la infiltración desde la regata en aguas bajas.

El Sistema de Salubita presenta una importante inercialidad, como lo indica el Análisis Correlatorio y Espectral de las crónicas de caudales y lluvias. El efecto memoria es de 28-60 días y el tiempo de regulación de 15-35 días, correspondiendo los menores valores al año más seco de entre los considerados. Se ha evidenciado la diferente respuesta según los años y la importancia de no limitar estos Análisis a un año concreto. Así, en el año seco (1997-98) el sistema tiende a comportarse como si de un año húmedo se tratase, inercia, aunque las diferencias son visibles.

El estudio de las curvas de recesión ha proporcionado un coeficiente de agotamiento medio ( $\alpha$ ) de  $0.0107 \text{ d}^{-1}$  y la clasificación i-k de MANGIN sitúa el Sistema de Salubita en el dominio III caracterizado por un buen desarrollo de la karstificación en la zona no saturada y retardo de la infiltración. Un mayor detalle en el estudio de la recesión permite fijar, en caudales en Salubita y en niveles en los pozos, el momento en el que se produce el paso de una forma de vaciado a otra más regulada. En todos los análisis efectuados con las crónicas de caudales se ha evidenciado la importancia de considerar adecuadamente las condiciones de las precipitaciones, ante el error posible de relacionar con el comportamiento propio del acuífero aspectos que están implícitos en la señal de entrada. Se ha hecho un razonamiento crítico de estos aspectos.

El estudio isotópico ha proporcionado para la totalidad del Sistema Kárstico de Salubita tiempos de permanencia del orden de 29.8-33 meses y para el sistema lento del orden de 7 años. Esta misma fuente de información ha facilitado una cota media de recarga para Salubita de 640 m (690 m para Igaran y 520 m para Legorreta) y ha permitido verificar que el gradiente altimétrico válido para el País Vasco en general ( $-0.21^{0/00} \delta^{18}\text{O}/100 \text{ m}$ ) se mantiene para esta zona, y que la composición isotópica de los manantiales se sitúa más próxima a la Línea Meteorica Local que a la Línea Meteorica Mundial.

El cálculo del Balance Hídrico ha demostrado que los métodos de Thornthwaite y Primault no son idóneos para aplicar en el cálculo de la evapotranspiración real (ETR) en el Sistema de Salubita, mientras que Allen y Penman proporcionan mejores resultados. El balance hídrico ha permitido establecer los límites de la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur ( $27 \text{ km}^2$ ) y del Sistema Kárstico de Salubita ( $21 \text{ km}^2$ ).

El análisis de sensibilidad efectuado ha puesto de manifiesto la influencia que en el cálculo de la ETR pueden llegar a tener imprecisiones en la estimación de las lluvias o de los caudales. Estas imprecisiones son mayores aún en los años húmedos.

Se ha establecido una relación plurianual entre precipitaciones y aportaciones, tanto en el Sistema de Salubita como en la Cuenca Vertiente a la Regata Albiztur, con un muy buen ajuste matemático (altos  $R^2$ ), lo que permite una buena aproximación a las aportaciones en función de las precipitaciones, todo ello a escala anual. Sin embargo, los resultados no indican buena relación entre precipitaciones y ETR anual, manteniéndose ésta bastante estable, es el caso del Sistema de Salubita, entre 300 y 400 mm (20-28%), aunque en años anómalos, secos, puede alcanzar el 43%. Para los 6 km<sup>2</sup> de Cuenca Vertiente a la regata que no pertenecen al Sistema de Salubita se deduce una ETR anual un 55-75% mayor que para el área de alimentación a Salubita, lo que hay que poner en relación con la capacidad de infiltración.

Todos los manantiales muestreados presentan aguas bicarbonatadas cálcicas. A pesar de que las aguas de Igaran también son de ese tipo, en estiaje llegan al límite de las aguas de tipo bicarbonatado-sulfatado-cálcico. A excepción de las aguas de Igaran y Gain (Regata Albiztur aguas arriba de Salubita), el resto de las aguas presentan evoluciones hidroquímicas unimodales. Además, el sulfato es el elemento que más variabilidad presenta en todos los puntos de agua muestreados, tanto en el espacio como en el tiempo.

El análisis temporal de la hidroquímica refleja, para todos los puntos de agua incluido Salubita, la inexistencia de similitud alguna en la evolución del bicarbonato, cloruro, sodio y pH, ni entre ellos ni con el resto de los elementos. No obstante, conductividad, temperatura, sulfatos, magnesio y estroncio evolucionan de forma paralela. Evidentemente, las aguas de lluvia son menos mineralizadas que las aguas de los manantiales y muestran una evolución mucho más variable que éstas.

En general, a excepción de las aguas estrechamente ligadas a las variaciones superficiales (Osinondo y cuaternario), el Análisis en Componentes Principales pone de manifiesto que el factor I representa la **mineralización** (sulfato, magnesio, estroncio, conductividad y calcio), el factor II es indicativo de la **influencia externa** (nitrato, potasio, cloruro y sodio) debida a los usos del suelo y/o a eventos meteorológicos, y el factor III se relaciona con la **mineralización** (bicarbonato y calcio) aunque debida ahora al drenaje de formaciones estrictamente calcáreas.

Los análisis específicos realizados en varios puntos de agua, incluido Salubita, y en todas las situaciones hidrológicas posibles para la determinación de compuestos contaminantes de diversos orígenes ha dado resultados siempre por debajo de los respectivos límites de detección, a pesar de la existencia en

el área de algunas, pocas, actividades industriales y un vertedero clausurado de residuos varios (depresión de Santutxo).

La estimación de la vulnerabilidad intrínseca a la contaminación de las aguas subterráneas de la zona de estudio se ha realizado a partir de dos métodos: el Método EPIK y el Método OC. La mayor parte de las dudas surgidas en el Método EPIK quedan solventadas en el ahora en elaboración Método OC. Este segundo método atribuye la misma importancia a todos los factores y considera el efecto *bypass* y los casos en los que la escorrentía superficial proveniente de otros materiales se infiltra en el karst. Tiene en cuenta también los asentamientos e infraestructuras que constituyen superficies impermeables para el agua, aspectos todos ellos de no coherente consideración en el método EPIK.

Las diferencias entre los dos métodos aplicados para la estimación de la vulnerabilidad intrínseca en la zona de estudio reflejan la subjetividad del Método EPIK ante una mayor objetividad y coherencia del Método OC. Por el momento, en función de los resultados obtenidos, el OC parece ser un método más fiable para la realización de mapas de vulnerabilidad intrínseca en medios kársticos. No hay que olvidar que este método está aún en proceso de desarrollo en el seno de la Acción Europea COST 620.

Este Método (OC) ha dado finalmente un Mapa de Vulnerabilidad Intrínseca dividido en cinco rangos (muy baja, baja, moderada, alta, extrema) con rango extremo para las dolinas y sumideros, alta para el resto de los afloramientos carbonatados, y, en el otro lado, muy baja para las potentes formaciones limo-arcillosas de las depresiones, lejos de la banda de influencia de los cursos superficiales. Este resultado final es coherente con lo que hasta ahora se conoce sobre el funcionamiento del Sistema Kárstico de Salubita, si bien deja incertidumbres sobre la verosimilitud de la vulnerabilidad deducida ante la imposibilidad de verificación con técnicas de campo. En cualquier caso, se abre una vía de investigación para ir profundizando en los aspectos de estimación y cartografía de la vulnerabilidad.

## **8. BIBLIOGRAFIA**

ADAN DE YARZA, R. (1884).- “ Descripción física y geológica de la provincia de Guipúzcoa. Mem. com. mapa geol. de España, 175 p.

ALLEN, R.G., SMITH, M. & PEREIRA, L.S. (1994).- “An update for the definition - calculation- of reference evapotranspiration”. ICID Bull. 43 (2). 1-92.

ANSTRÖM, A. (1924).- “Solar and terrestrial radiation”. Quart. J. Royal Meteorological Soc. 50, 121-125.

ANTIGÜEDAD, I. (1986).- “Estudio hidrogeológico de la cuenca del Nervión Ibaizabal. Contribución a la investigación de los sistemas acuíferos kársticos”. Tesis Doctoral. UPV-EHU. Dpto. Geomorfología y Geotectónica. 338 p. + anexos.

ANTIGÜEDAD, I. (1997).- “Systèmes aquifères karstiques du Pays Basque”. Karst Hydrology (Proceedings Workshop Rabat, Morocco) IAHS Publ. No 247, 127-136.

ANTIGÜEDAD, I., IRIBAR, V., LLANOS, H. & MORALES, T. (1997).- “Karst aquifer regionalization in the Basque Country (Northern Spain)”. Karst Waters & Environmental Impacts (Günay & Johnson Eds). Balkema. 443-450.

ANTIGÜEDAD, I., MORALES, T., FERNANDEZ DE VALDERRAMA, I., MUGUERZA, I., ARRATE, I. BEZARES, I. (in print).- “Traçages au Pays Basque: vers une meilleure connaissance de la structure et de la dynamique d'écoulement et de transport des aquifères karstiques dans la perspective de leur protection”. Hydrogéologie.

ARRATE, I., (1994).- “Estudio hidrogeológico del acuífero cuaternario de Vitoria-Gasteiz (Araba, País Vasco)”. Tesis doctoral. UPV.-EHU. Dpto. Geodinámica. 251 p. + anexos.

ATKINSON, T.C. (1977).- “Diffuse and conduit flow in limestone terrain in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)”. J. Hydrol. 35, 93-110.

BAKALOWICZ, M. (1974).- “Géochimie des eaux d'aquifères karstiques. Relation entre minéralisation et conductivité”. Ann. Spéléol. 29(2). 167-173.

BAKALOWICZ, M. (1979).- “Contribution de la géochimie des eaux á la connaissance de l'aquifère karstique et de la karstification”. Thèse. Univ. Paris VI. 269 p.

BARANDIARAN, J.M. (1961).- “El Castro de Inchur”. Publicaciones de la Excm. Diputación Provincial de Guipúzcoa. Imprenta de la Diputación de Guipúzcoa, San Sebastián 44 p.

BEHRINGER, J. (1988).- “Hydrochemische kurz- und langzeitstudien im malmaquifer der mittleren Schwäbischen Alb”. Thesis. Univ. Tübingen. 222 p.

BÖGLI, A. (1960).- “Kalklösung und karrenbildung”. Z. Geomorph, Supp/bd. 2, 4-21.

BÖGLI, A. (1980).- "Karst hydrology and physical speleology". Springer, Berlin, Heidelberg, New York.

BONACCI, O. (1987).- "Karst Hydrology: with special reference to the Dinaric Karst". Springer-Verlag. 184 p.

BONACCI, O. (1993).- "Karst spring hydrograph as indicators of karst aquifers". *Hydrol. Sci. J.* 38(1/2). 51-62.

BONACCI, O. (1995).- "Ground water behaviour in karst: Example of the Ombla spring (Croatia)". *J.Hydrol.* 165. 113-134.

BONACCI, O. & MAGDALENIC, A. (1993).- "The catchment area of the Sv. Ivan karst spring in Istria (Croatia)". *Ground Water* 31(5). 767-773.

BOX, G.P. & JENKINS, G.M. (1976).- "Time series analysis: forecasting and control". Holden-Day. San Francisco. 575 p.

BRILLINGER, D.R. (1975).- "Time series data analysis and theory. International series in decision processes". Holt. Rinehart & Winston. New York. 500 p.

BUENO-ERRANDONEA, R., (1991).- "Estudio sedimentológico del sector oriental del cuerpo carbonatado, de edad Aptiense-Albiense, cartografiado por Rat en 1959 en la localidad de Albiztur". Dpto. Estratigrafía y Paleontología. UPV/EHU. Inédito.

BURGMAN, J. O., CALLES, B. & WESTMAN, F., (1987).- Conclusions from a ten year study of oxygen-18 in precipitation and runoff in Sweden. In: *Isotope Techniques in water Resources Development*, IAEA Symposium 299, March 1987, Vienna: 579-590.

BURMAN, R. & POCHOP, L.O. (1994).- "Evaporation, evapotranspiration and climate data". *Developments in Atmospheric Science* 22. Elsevier. 278 p.

BURMAN, R., CUENCA, R.H. & WEISS, A. (1983).- "Techniques for estimating evapotranspiration". *Advances in Irrigation*, vol. 2, Academic Press, New York. 335 p.

CLARCK, I. & FRITZ, P. (1997).- "Environmental isotopes in hydrogeology". Lewis Publishers.

COST-65 (1995).- "Hydrogeological aspects of groundwater protection in karstic areas". Final Report. Europ. Comm. DG-XII. EUR 16526, 446 p.

COST-620 (1997-2002). "Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonates (karst) aquifers". Europ. Comm. DG-XII. Documentos internos.

CRAIG, H. (1961).- "Isotopic variation in meteoric waters". *Science* 133. 1702-1703.

CUSTODIO, E. & LLAMAS, M.R. (1983).- “Hidrología subterránea”. 2 tomos. Omega. Barcelona. 2359 p.

DALY, D. & DREW, D. (1998).- “The role of karst and karst vulnerability in the Irish groundwater protection scheme”. *Vulnérabilité et protection des eaux karstiques*, Workshop 18-20 May 1998: 4 p.: Neuchâtel.

D.F.G. (1971).- “Estudio hidrogeológico de la provincia de Guipúzcoa”. Diputación Foral de Gipuzkoa.

DOERFLIGER, N. (1996).- “Advances in karst groundwater protection strategy using artificial tracer tests analysis and multiattribute vulnerability mapping (EPIK method)”. Thesis. Univ. Neuchatel.

DOERFLIGER, N. & ZWAHLEN, F. (1995).- “EPIK: a new method for outlining of protection areas in karstic environment. Antalya, Nov. 1995; International Symposium on karst groundwater.

DOORENBOS, J. & PRUITT, W.O. (1977, reimpresión 1986).- “Las necesidades de agua de los cultivos”. Estudio FAO, Riego y Drenaje 24. Roma. 194 p.

DREW, D. , GOLDSCHIEDER, N., & PUECH, V. (1999).- “Epikarst and groundwater vulnerability, recommendations to COST 620”. WG Meeting “Epikarst”, Neuchâtel, 8-11 Sept. 1999; Neuchâtel.

DROGUE, C. (1972).- “Analyse statistique des hydrogrammes de décrues des sources karstiques. Statistique analysis of hydrographs of karstic spring”. *J. Hydrol.* 15. 49-68.

EGUÍLUZ, L., MARTÍNEZ-TORRES, L.M., RAMÓN-LLUCH, R. & ZUAZO, J. A., (1988).- “Deformación y estructuras asociadas en el área de Tolosa (Cuenca Vasca)”. *Boletín Geológico y Minero.* 59-64.

EISENLOHR, L. (1995).- “Variabilité des réponses naturelles des aquifères karstiques. De l’identification de la réponse globale vers la connaissance de la structure de l’aquifère”. Thèse. Univ. Neuchatel. 121 p. + annexes.

EVE (1987).- “Condiciones de sol en el País Vasco”. Ente Vasco de la Energía.

EVE (1988).- “Cartografía 1:10.000 Régil-Tolosa”. Ente Vasco de la Energía (E.V.E.). Inéd.

EVE (1992).- “Mapa geológico del País Vasco a escala 1:25.000”. E.V.E. y C.G.S. (Compañía General de Sondeos).

EVE (1996).- “Mapa hidrogeológico del País Vasco a escala 1:100.000”. Ente Vasco de la Energía. 377 p. + planos.

EVE-DFG (1987).- “Estudio hidrogeológico del Area de Tolosa Occidental”. Ente Vasco de la Energía-Diputación Foral de Gipuzkoa. Inédito.

EVE, GIGSA, 1988. Cartografía 1 :10.000 Regil-Tolosa. Inéd.

FONTES, J. Ch., (1980).- “Environmental isotopes in groundwater hydrology”. In: Fritz & Fontes Eds.

FORD D.C. & EWERS R.O. (1978).- “The development of limestone cave systems in the dimensions of length and breadth”. Can. J. Earth Sci. 15, 1783-1798.

FORD, D. & WILLIAMS, D. W. (1989).- “Karst geomorphology and hydrology”. Boston (Unwin Hyman). 601 p.

FRITZ, P. & FONTES, J. CH. (Eds) (1980).- “Handbook of environmental isotope geochemistry”. Vol. 2. The Terrestrial Environment. B. Elsevier, Amsterdam, The Netherlands, 545 p.

GARCIA-MUÑIZ, J. & ANTIGÜEDAD, I. (1991).- “Análisis de la sequía en el País Vasco: Su contexto climático y repercusiones en las aguas superficiales y subterráneas”. Rev. Real Acad. Ciencias Exac. Fís. Y Nat. Madrid. T-LXXXV. Jornadas sobre las sequías. 499-506.

GOLDSCHIEDER, N., BROSEMER, M., UMLAUF, N. und HÖTZL, H. (1999).- “Karstenwässerung im Gebiet der Alpspitze (Wettersteingebirge, Bayerische Kalkhochalpen)”.

GOLDSCHIEDER, N. und HÖTZL, H. (1999).- “Hydrogeological characteristics of folded alpine karst systems exemplified by the Gottesacker Plateau (German-Austrian Alps)”. Acta Carsologica, 28 (1): 87-103, 11 Abb, Ljubljana.

GOLDSCHIEDER, N., KLUTE, M., STURM, S. and HÖTZL, H. (2000).- “The PI method – a GIS-based approach to mapping groundwater vulnerability with special consideration of karst aquifers”. Z. angew. Geol., 46 (2000) 3.

GRASSO, D. A. & JEANNIN, P-Y. (1994).- “Etude critique des méthodes d’analyse de la réponse globale des systèmes karstiques. Application au site de Bure (Jura, Suisse)”. Bull. d’Hydrogéologie. Neuchatel. 13. 87-113.

GRUPO HIDROGEOLOGIA UPV-EHU (1994).- “Aspectos del agua subterránea en relación con los suelos contaminados en la Comunidad Autónoma del País Vasco”. Memoria inédita para IHOBE-Gobierno Vasco.

HANNA, E.J. (1970).- “Multiple time series”. Wiley. New York. 536 p.

HEMME, H. (1970).- “Die Stellung der “lassivierten” terra fusca in der Bodengesellschaft der Schwäbischen Alb”. Thesis. Univ. Hohenheim. 77 p.

HÖLTING, B., HAERTLE, T., HOHBERGER, K.H., NACHTIGALL, K.H., VILLINGER, E., WEINZIERI, W. und WROBEL, J. P. (1995).- “Konzept zur Ermittlung der Schutzfunktion der Grundwasserüberdeckung”. Geol. Jb., C63: 5-24; Hannover.

IGME (1971).- “Estudio geológico de la provincia de Guipuzcoa”.

IGME (1986).- “Cartografía geológica 1:50.000”. Hoja TOLOSA (89). Serie MAGNA.

IRIBAR, V. (1996).- “Estimación del tiempo de permanencia de manantiales kársticos mediante técnicas isotópicas ambientales”. Recursos hídricos en regiones kársticas (Congress). País Vasco. 281-291.

IRIBAR, V. & ANTIGÜEDAD, I. (1993).- “Caracterización isotópica de las precipitaciones del País Vasco”. V Congreso de Geoquímica de España. Soria. 152-157.

IRIBAR, V. & ANTIGÜEDAD, I. (1996).- “Definición de zonas de recarga de manantiales kársticos mediante técnicas isotópicas ambientales”. Recursos hídricos en regiones kársticas (Congress). País Vasco. 271-279.

JENKINS, G.M. & WATTS, D.G. (1968).- “Spectral analysis and its applications”. Holden-Day. San Francisco. 525 p.

JEANNIN, P.-Y. & GRASSO, D. A. (1995).- “Recharge respective des volumes de roche peu perméable et des conduits karstiques, rôle de l'épikarst”. Bull. d'Hydrogeologie. Neuchatel. 14. 95-111.

JEANNIN, P. & SAUTER, M. (1998).- “Analysis of karst hydrodynamic behaviour using global approaches: a review”. Bull. d'Hydrogéologie. Neuchatel. 16. 31-48.

JENNINGS, J.N. (1985).- “Karst geomorphology”. Oxford. Basil Blackwell.

KÄSS, W. (1992).- “Geohydrologische markierungstechnik”. Gebrüder Borntraeger, Berlin. 519 p.

KIRALY, L. & MOREL, G. (1976).- “Remarques sur l'hydrogramme des sources karstiques simulé par modèles mathématiques”. Bull. d'Hydrogeologie. Neuchatel. 1, 37-60.

KLIMCHOUK, A. (1997).- “The nature and principal characteristics of epikarst”. 12<sup>th</sup> International Congr. Of Speleol. La Chaux-de-Fonds, Switzerland, 10.-17.8 1997, Proceed. Vol. 1.

KULLMAN, K. (1990).- “Krasovo-puklinové vody –Karst-fissure waters-“. Geologický ústav Dionýza Stúra. Bratislava. 184 p.

LOMBIDE, L. (1995).- “Estudio del medio físico de la localidad de Bidegoian. Protección de acuíferos subterráneos.” Ayuntamiento de Bidegoian. 118 p. Inéd.

LLAMAS, J. (1993).- “Hidrología general: Principios y aplicaciones”. Servicio Editorial UPV-EHU. Bilbao. 635 p.

LLANOS, H. (1992).- “Estudio hidrogeológico de la Unidad de Urbasa-Montes de Vitoria-Treviño y sectores adyacentes”. Tesis UPV-EHU. 334 p. + anexos.

LLANOS, H., MAMADOU, K. & CASTIELLA, A. (1999).- “Modelación hidrológica de la cuenca alta del río Ega (País Vasco y Navarra)”. Ingeniería del Agua. Vol 6(3). 241-250.

MALOSZEWSKI, P., & ZUBER, A. (1982).- “Determining the turnover time of groundwater systems with the aid of environmental tracers”. J. Hydrol. 57(1), 207-231.

MANGIN, A. (1970).- “Contribution à l'étude des aquifères karstiques à partir de l'analyse des courbes de décrue et tarissement”. Ann. Spéléol. 25(3). 581-610.

MANGIN A. (1975).- “Contribution à l'étude hydrodynamique des aquifères karstiques”. Thèse Univ. Dijon. Ann. Spéléol. 29(3) 283-332, 29(4) 495-601, 30(1) 21-124.

MANGIN A. (1982).- “L'approche systémique du karst. Conséquences conceptuelles et méthodologiques”. Reunión monográfica sobre el Karst de Larra (Navarra). 141-157.

MANGIN, A. (1983).- “Probabilités et statistiques: leur emploi en géologie. Laboratoire de Géologie-Petrologie. Université Paul Sabatier, Toulouse. 141 p.

MANGIN, A. (1984).- “Pour une meilleure connaissance des systèmes hydrologiques à partir des analyses corrélatoires et spectrales”. J. Hydrol. 67. 25-43.

MANGIN, A. y PULIDO-BOSCH, A. (1983).- “Aplicación de los análisis de correlación y espectral en el estudio de los acuíferos kársticos”. Tecniterrae 51. 53-65.

MAX, J. (1980).- “Méthodes et techniques du traitement du signal et ses applications aux mesures physiques”. Masson, Paris. 379 p.

MEGIAS, A.G. (1988).- “La tectónica pirenaica en relación con la evolución alpina del margen noribérico”. Rev. Soc. Geol. de España, 1, 3-4, 365-372.

MILANOVIC, P. (1981).- “Karst hydrogeology”. Water Resources Publ. Colorado. 434 p.

MILANOVIC, P. (2000).- “Geological engineering in karst”. Zebra, Belgrade. 347 p.

MORALES, T. (1991).- “Estudio hidrogeológico de la zona Norte de Vizcaya”. Tesis. UPV-EHU. 520 p.

MORALES, T., OLAZAR, M., ARANDES, J. M., ZAFRA, P., ANTIGÜEDAD, I. & BASAURI, F. (1997).- “Application of a solute transport model under variable velocity conditions in a conduit flow aquifer: Olalde karst system, Basque Country, Spain”. Environmental Geology 30, 143-151.

MUDRY, J. (1987).- “Apport du traçage physico-chimique naturel à la connaissance hydrocinématique des aquifères carbonatés”. Thèse. Univ. F. Comte-Besançon. Géologie 4. 1-383.

MUGUERZA, I., MORALES, T., ANTIGÜEDAD, I., URIARTE, J.A., FERNANDEZ DE VALDERRAMA, I., GONZALO, J.M. & BEZARES, P. (1999).- “ Trazados en la Unidad Hidrogeológica Izarraitz (País Vasco): Consideraciones sobre la complejidad estructural y dinámica del medio kárstico”. Contribución del estudio científico de las cavidades kársticas al conocimiento geológico (Eds: Andreo, Carrasco y Duran). Patronato de la Cueva de Nerja (Málaga). 451-461.

PADILLA, A. & PULIDO-BOSCH, A. (1993).- “Application of a reservoir model to simulate the Torcal deAntequera karstic aquifers (Malaga)”. In “Some Spanish Karstic Aquifers”, Pulido Bosch, A. Edt., 51-66.

PADILLA, A. & PULIDO-BOSCH, A. (1995).- “Study of hydrographs of karstic aquifers by means of correlation and cross-spectral analysis (France, Spain)”. J. Hydrol. 168. 73-89.

PADILLA, A., PULIDO-BOSCH, A. & MANGIN, A., (1994).- “Relative importance of baseflow and quickflow from hydrographs of karst spring”. Ground Water 32(2). 267-277.

PAYROS, A., (1991).- “Sector occidental del Urgoniano Azkoitia-Tolosa”. Dpto. Estratigrafía y Paleontología. UPV/EHU. Inédito.

PENMAN, H.L. (1948).- “Natural evaporation from open water, bare soil and grass”. Proceedings of the Royal Society of London 139(A), 120-146.

PLAGNES, V. (1997).- “Structure et fonctionnement des aquifères karstiques. Caractérisation par la géochimie des eaux”. Thèse. Univ. de Montpellier II.

PLUHAR, A. & FORD, D.C. (1970).- “Dolomite karren of the Niagara Escarpment, Ontario, Canada”. Zeitschrift fur Geomorphologie 14(4), 392-410.

PULIDO-BOSCH, A. (1996).- “Los métodos de exploración de acuíferos kársticos y su aplicación a la explotación”. Recursos hídricos en regiones kársticas V-2 (Congress). País Vasco. 45-64.

PRIMAULT, B. (1963).- “Du calcul de l'évapotranspiration”. Arch. Met. Geoph. Biokl. B., Bd. 12, H. 1, Zürich. 124-150.

RANK, D., VÖLKL, G., MALOSZEWSKI, P. & STICHLER, W. (1992).- “Flow dynamics in an alpine karst massif studied by means of environmental isotopes. Isotope Techniques in Water Resources Development 1991, IAEA Symposium 319, March 1991, Vienna: 327-343.

RAT, P. (1959).- “Les pays crétaqués basco-cantabriques”. Thèse Univ. Dijon. 545 p.

RICHTER, J., SZYMCZAK, P., ABRAHAM, T. & JORDAN, H. (1993).- "Use of combinations of lumped parameter models to interpret groundwater isotopic data". J. Contam. Hydrol. 14. 01-13.

ROSENBERG, N.J., BLAD, B.L. & VERMA S.B. (1983).- "Microclimate-The biological environment". 2<sup>nd</sup> Ed., John Wiley & Sons, New York. 495 p.

SANCHO, V. & ANTIGÜEDAD, I., (1988). "Estudio de las transferencias en medio kárstico: Aportación de la hidroquímica al conocimiento hidrogeológico del Karst". Convenio con el EVE. UPV-EHU. Inédito. 231p.

SAUTER, M. (1992).- "Quantification and forecasting of regional groundwater flow and transport in a karst aquifer (Gallusquele, Malm, SW.Germany)". TGA. C13. Univ. Tübingen. 151 p.

SNYDER, R. L. (1997).- "Basic irrigation scheduling". Department of Land, Air and Water Resources. University of California. 21 p.

STICHLER, W., MOSER, H. & SCHRODER, M. (1984).- "Measurements os seepage velocity in a sand lysimeter by means of 18-0 content". Recent investigations in the zone of aeration (Proceedings of the Inter. Symp. Munich). 191-204.

TEUTSCH, G. (1988).- "Grundwassermodele im karst: Praktische ansätze am beispiel zweier einzugsgebiete im tiefen und seichten malmkarst der Schwäbischen Alb". Thesis, Univ. Tübingen. 205 p.

THOMPSON, S.A. (1999).- "Hydrology for water management". Balkema. 362 p.

THORNTHWAITE, C.W. (1948).- "An approach towards a rational classification of climate". Geographical Review 38, 55-94.

TUÑÓN, J. (2000).- "Determinación experimental del balance hídrico del suelo y evaluación de la contaminación asociada a las prácticas agrícolas". Tesis Doctoral. Universitat Jaume I, Castellón. 372 p.

WHITE, W. B. (1988).- "Geomorphology and hydrology of karst terrains". Oxford University Press.

ZAPOROZEC, A. (1985).- "Groundwater pollution potential of Baron County, Wisconsin". Wis. Geological and Natural History Survey, Madison, WI, Map 87-2i. Scale 1:100.000.