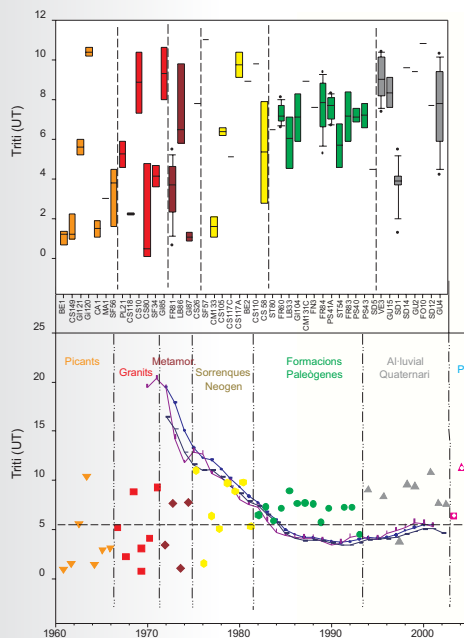




Universitat Autònoma
de Barcelona

ANÀLISI DELS SISTEMES DE FLUX A L'ÀREA GAVARRES-SELVA-BAIX EMPORDÀ

PROPOSTA DE MODEL HIDRODINÀMIC REGIONAL



TESI DOCTORAL

Presentada per:
Ester Vilanova Muset

Dirigida per:
Dr. Josep Mas Pla

2004

“As it is not in human record, but in natural history, that we are to look for the means of ascertaining what has already been, it is here proposed to examine the appearances of the earth, in order to be informed of operations which have been transacted in time past and are acting now; (...) thus we may form a rational opinion with regard to the course of nature, or to events which are in time to happen.”

J. Hutton, “Theory of the Earth” (1785)



. AGRAÏMENTS

Primerament, fer constar la meva gratitud envers el Dr. Josep Mas-Pla, director d'aquesta tesi doctoral, per molts aspectes diferents, però m'agradaria destacar especialment la seva involucració i la seva aportació contínua, enriquint el projecte amb suggerències, plantejaments i il·lusió. No és menys destacable el seu interès per la meva formació, en tots els àmbits, la oportunitat de deixar-me realitzar aquest treball és ja, per si sola, un important motiu d'agraïment.

A continuació vull fer extensius els meus agraïments a tots els membres de la Unitat de Geodinàmica Externa i Hidrogeologia per tot el suport material i instal·lacions que han posat a la meva disposició. Concretament, destacar el Dr. Josep Trilla, cap de la Unitat, per haver recolzat la realització d'aquest treball i facilitat el seu desenvolupament a la Unitat. Senyalar també l'ajuda rebuda de l'Anna Menció, tant en les tasques pròpies del desenvolupament del projecte com en el suport constant. Em plau desitjar-li el millor en la defensa de la següent tesi de la Unitat.

Agrair també, les constants aportacions de tantíssima altra gent, companys del grup o d'altres grups que no han dubtat a aportar els seus coneixements al meu estudi. Entre elles citar especialment, per les fructíferes discussions, als doctors P. Shand i M. Edmunds de British Geological Survey, el Dr C. Eastoe de la University of Arizona i els Drs. B. Steinkamp i D. Pool del United States Geological Survey, i em permeto estendre la mostra d'agraïment al centre al qual pertanyen i que ha posat tot de facilitats al meu abast. Destacar també les aportacions de R. Redondo i l'acolliment del departament de Ciències de la Terra de la Universitat de Torí. Altres hidrogeòlegs que no vull oblidar són en G. Tick, L. García, J. Callegary, G. Pogliano i P. Cortassa.

Testimoniar també, les facilitats que m'ha posat, en aquest darrer període, Enviros S.L. per compaginar la redacció de la tesi amb el treball, així com les aportacions científiques i personals de tots els companys de feina.

Mencionar els coneixements sobre el terreny aportats pels habitants de la zona que m'han obert, amablement, les portes de casa seva. També reconèixer la tasca duta a terme per la Fundació Mas Badia, en la constant recollida de mostres de precipitació, indispensables per la present tesi. Així mateix, mostrar l'agraïment al Servei de Datació per Triti i Carboni-14 de la Universitat Autònoma de Barcelona, dirigit pel Dr. Trilla, per l'anàlisi de les mostres recollides i per la cessió de dades isotòpiques històriques de la precipitació.

A tants companys i amics que m'han ajudat i donat suport i especialment als de Castellolí, als ànims i il·lusió contagiada per M. Herrera i als consells i motivacions compartits amb tots els companys de D-Recerca i investigadors en fase inicial. Moltes gràcies, per ser-hi, a tots els que hi han estat.

Finalment, a la meua família a qui els hi fa tanta il·lusió com a mi i els quals han compartit i patit les diferents fases de confecció de la tesi.

Aquesta tesi ha estat finançada pels projectes del Ministeri de Ciència i Tecnologia HID98-0366 i REN2002-04288-c02-01.

**. RESUM**

En la present tesi s'exposa una síntesi de la hidrogeologia del massís de les Gavarres i zones adjacents amb l'objectiu final d'identificar i descriure'n la dinàmica, ampliant el coneixement hidrogeològic d'aquesta zona sotmesa a una creixent demanda i avaluant la disponibilitat de recursos hídrics.

Concretament, l'estudi hidrogeològic defineix, en primer lloc, les formacions hidrogeològiques locals, en base a les seves característiques geològiques i hidrogeològiques.

A partir de la cartografia existent, s'ha realitzat un inventari de camp i posterior cartografia piezomètrica. Addicionalment, com a base per a l'estudi de les formacions hidrogeològiques i les seves propietats s'ha caracteritzat la dinàmica del sistema mitjançant l'estudi de les fàcies hidroquímiques i de les dotacions en isòtops estables i radiogènics que permeten integrar-les en un sistema hidrogeològic regional. Els resultats es corroboren amb una anàlisi multivariable, consistent en l'anàlisi de components principals, i amb un estudi de mescla de membres extrems.

També, s'estudien les fonts riques en CO₂, anomenades localment "picants", considerades com elements hidrològics singulars del sistema, mitjançant un seguiment de cabal i hidroquímic durant un període de 20 mesos. La finalitat és obtenir dades que permetin afinar el model conceptual hidrològic derivat de les dades anteriors.

El desenvolupament de la tesi ha posat de manifest, en primer lloc, la necessitat de diferenciar formacions hidrogeològiques en funció de la seva ubicació espacial respecte el massís de les Gavarres:

- En concret, a la zona nord, a la depressió del Baix Empordà o Baix Ter, les formacions hidrogeològicament interessants que s'hi diferencien són:
 - Els materials quaternaris: els sediments al·luvials del riu Ter, diferenciats en tres nivells, els del riu Daró i el glacis de Fonteta.
 - Els sediments paleògens de les Pregavarres: els seus rendiments hidràulics són molt variables espacialment i en funció de la profunditat de les captacions, com a conseqüència de la complexitat estructural. S'exploten bàsicament els nivells calcaris (Fm. Girona i Tram Calcari Basal de la Formació Rocacorba) i els sorrencs (Fm. Rocacorba i Igualada).
- Al sector sud, bàsicament a les depressions de la Selva i la Vall D'Aro, s'ha constatat que els materials més àmpliament explotats per les captacions són:
 - Les formacions quaternàries: al·luvials i col·luvials de poca entitat que ofereixen rendiments normalment modestos.
 - Els nivells detrítics grollers de les formacions neògenes de la depressió de la Selva.
 - Els nivells superiors d'alteració del granit en les zones on aquest aflora, els quals poden atènyer entre 30 i 40 m de profunditat.
 - El granit el qual presenta permeabilitat per fracturació, tant en les zones on aflora (a les vessants del massís i a la Vall d'Aro) com en els sectors on constitueix el sòcol de la depressió. En aquest material és on es concentren les captacions amb rendiments més elevats.

- Les formacions metamòrfiques i ígnies que configuren el massís són, en general, poc permeables, i, es comporten com aquítards o aquicludes. No obstant, presenten permeabilitat per fracturació.

La cartografia piezomètrica, sobre un inventari d'aproximadament 600 pous, ha evidenciat que el sistema de flux local es produeix en sentit divergent des del massís de les Gavarres i ha permès observar afeccions i particularitats locals relacionades amb la influència de fractures. Les dades hidroquímiques recolzen les observacions piezomètriques i permeten relacionar les formacions hidrogeològiques amb les àrees de recàrrega i avaluar qualitativament els temps de trànsit de les trajectòries descrites per a cada formació.

Al sector nord, a la depressió del Baix Ter, la composició hidroquímica respon a les reaccions del sistema carbonatat. La ràpida cinètica d'aquestes emmascara les característiques adquirides a l'àrea de recàrrega. També, les relacions hidroquímiques entre diferents mostres permeten establir mescles de diferents procedències. A la depressió de la Selva, les composicions hidroquímiques responen a les característiques dels medis granítics dominats per plagiòclasis sòdiques i permeten avaluar diferents temps de residència com a resultat de la interacció amb la roca. Es manifesta la baixa connectivitat, a l'escala d'estudi, entre diferents fractures.

L'anàlisi piezomètric i hidroquímic permet avaluar el comportament de les diferents formacions hidrogeològiques:

- Al sector nord, les formacions quaternàries presenten una superfície hidràulica contínua amb afeccions puntuals provocades per elevats cabals d'extracció, sobretot a l'aquífer inferior del riu Ter. Aquesta influència força, localment, la participació del riu Ter i el desenvolupament de cons salins verticals. Les formacions paleògenes presenten un nivell hidràulic superior a les de les al·luvials, indicant que la recàrrega d'aquestes procedeix del massís de les Gavarres a través d'un flux vertical de sentit ascendent.
- A la depressió de la Selva, les formacions quaternàries, tant de la depressió com dels vessants del massís, i els nivells de sauló també presenten una superfície piezomètrica regional contínua. En canvi, es diferencien els nivells de les formacions neògenes arcòsiques i dels granits. Es constata, consegüentment, una recàrrega d'àmbit local de les formacions neògenes des del massís, de sentit bàsicament horitzontal i una recàrrega vertical limitada. Al sòcol de la depressió, els materials granítics es relacionen amb dos sistemes de flux, un de local

procedent del massís i un sistema de flux de sentit vertical ascendent associat a un àmbit regional. Els elevats cabals d'extracció faciliten la participació d'aquests sistemes en els materials neògens sobrajacents.

Aquestes relacions hidrodinàmiques generals es detallen mitjançant l'aplicació de dades isotòpiques; les quals permeten, addicionalment, precisar les àrees de recàrrega i diferenciar sistemes de flux en base als temps de residència, a les alçades de recàrrega i a les característiques isotòpiques adquirides al llarg de la trajectòria.

Els isòtops estables manifesten també, mitjançant diferents rectes meteòriques, l'estacionalitat de la recàrrega i assenyalen que la precipitació hivernal és la que contribueix majoritàriament a la recàrrega al massís de les Gavarres.

Així, les dotacions en oxigen-18 i deuteri han permès identificar àrees de recàrrega. A la zona del Baix Ter constaten que el massís de les Gavarres constitueix l'àrea de recàrrega local de les formacions paleògenes de les Pregavarres i s'hi reconeix una menor participació directa de la precipitació. Les formacions al·luvials també reflecteixen una component principal de flux procedent de les Gavarres, a través dels materials paleògens i s'identifiquen mescles puntuals induïdes amb les aigües del riu Ter, canals de rec, cons salins i la precipitació local. A la depressió de la Selva, en canvi, s'observa una dinàmica de recàrrega que respon a una recta meteòrica diferent i es constata el paper de les fractures d'àmbit regional en la dinàmica. Mentre que algunes captacions indiquen la participació d'aigua recent, d'altres suggereixen una àrea de recàrrega més elevada que el massís de les Gavarres, com la Serralada Transversal i el massís de les Guillerries. Les fonts picants, malgrat presentar un empobriment en oxigen-18 com a conseqüència de l'exsolució de CO₂, també apunten una àrea de recàrrega més elevada. Concretament, es proposa l'establiment de fluxos preferents des de la Serralada Transversal i les Guillerries, al llarg de fractures d'orientació NO-SE, els quals adopten un sentit vertical ascendent en les zones de descàrrega. Localment, s'hi afegeix CO₂ d'origen endogen que facilita l'ascens.

L'anàlisi del contingut en triti ha permès estimar quantitativament els temps de residència dels diferents sistemes de flux identificats diferenciant-hi dos rangs de valors que es relacionen amb dos sistemes de flux a diferent escala. Un sistema regional, infiltrat amb anterioritat al 1952 i que es manifesta als pous més profunds en el sòcol de la depressió de la Selva i a les fonts picants. Els materials neògens que reomplen la depressió presenten mescles entre aquest flux i un altre de més recent i de procedència local. Aquest segon sistema d'àmbit local es relaciona també amb

els aqüífers quaternaris de la depressió de la Selva. Als materials paleògens de les Pregavarres només s'hi identifica la component de recàrrega d'àmbit local, procedent del massís de les Gavarres, amb temps de residència superior a 20 anys. Als aqüífers al·luvials del Baix Ter, es constata una component també local procedent del massís que presenta temps de residència majors que els observats en les formacions paleògenes; atès que es produeix a través de les fractures dels materials paleògens.

D'altra banda, els isòtops d'estronci, informen de les característiques adquirides per l'aigua durant la seva trajectòria. Les captacions en els materials endògens del massís es relacionen amb un sistema de flux d'àmbit regional amb llargs períodes d'interacció amb la roca a través de materials de característiques similars on s'ubiquen actualment. A la depressió de la Selva es constata el control del flux per part de les fractures i el fet que no es produeix mescla, a escala de l'estudi, entre les diferents fractures. Similarment als isòtops estables, s'hi diferencien, concretament, dos sistemes de flux: un a través de fractures profundes (de sentit vertical ascendent i origen regional) i l'altre, d'origen local, és de sentit horitzontal procedent del massís a través de fractures menors. Al Baix Ter es reconeix la empremta de materials endògens en les aigües de les formacions paleògenes.

La relació entre captacions, formacions hidrogeològiques i diferents sistemes de flux s'avalua mitjançant una anàlisi de components principals dels elements químics majoritaris i minoritaris. Aquesta anàlisi multivariable ha permès determinar diferents grups d'aigua en funció dels processos dominants, la major part dels quals estan directament relacionats amb la litologia de l'aqüífer, recolzant processos i observacions presentades. La diferenciació de processos és més evident en els materials de composició silícica on s'han establert agrupacions en funció de la profunditat del pou granític, de la conca i el tipus de material, metamòrfic o granític. En canvi, als aqüífers sedimentaris del Baix Ter no hi ha una diferenciació tan clara de masses d'aigua atès que hi intervenen més processos de característiques i orígens diferents. Tanmateix, la ràpida cinètica dels processos carbonatats emmascara les característiques més particulars.

La mescla d'aigües de diferent procedència a les mostres corresponents al Baix Ter es caracteritza mitjançant una anàlisi de la mescla de membres extrems. Es comprova que les composicions responen a la mescla de tres pols, el riu Ter, el mar i les Gavarres i que la seva aplicabilitat depèn de la possibilitat de definir correctament els membres originaris en la mescla. A les formacions paleògenes, es constaten certs resultats il·lògics com a conseqüència del

context hidrogeològic i del tipus de reaccions hidroquímiques. A l'aqüífer al·luvial els percentatges estimats són coherents amb l'entorn hidrogeològic i els valors obtinguts es consideren representatius de les aportacions. La participació del riu Ter es produeix localment com a conseqüència d'elevats cabals d'extracció els quals també indueixen la formació de cons salins.

El seguiment de paràmetres físics i hidroquímics de les fonts picants permet integrar-les dins del sistema hidrogeològic local i regional relacionat amb les diferents sistemes de flux descrits i, addicionalment, avaluar el paper del CO₂ en la mineralització d'aquestes surgències. Concretament, s'observa que el cabal de les fonts respon a tres sistemes de flux. Un sistema regional, o cabal de base, notablement constant, amb temps de residència superiors als 50 anys. El seu quimisme respon a una efectiva interacció amb el medi i és anterior a la incorporació de CO₂. Es relaciona amb el sistema de flux regional esmentat i s'intueix una àrea de recàrrega més allunyada que les Gavarres. El seu percentatge és diferent a cada font. S'identifica un segon sistema de flux, de caire local el qual respon a un flux de tipus pistó. Aquest, s'incorpora al sistema de la font amb posterioritat al CO₂ i s'estima un temps de residència d'uns 30 anys. Finalment, es manifesta una component hipodèrmica de circulació molt ràpida després de les precipitacions més importants. El seu hidroquimisme reflecteix la incorporació de sals dipositades al sòl i contaminants d'origen antròpic.

En síntesi, l'estudi piezomètric, hidroquímic i multiisotòpic ha permès definir el funcionament del sistema hidrogeològic de les Gavarres. S'ha constatat el paper del massís en la recàrrega dels aqüífers adjacents i s'ha identificat també la relació hidrogeològica amb àrees geogràficament més allunyades. L'avaluació dels recursos hídrics que s'exploten actualment cal realitzar-la dins una àrea de recàrrega més àmplia, que inclogui la Serralada Transversal i les Guillerries, considerant-hi la presència d'aigües amb temps de residència molt elevats.

 **. ABSTRACT**

This dissertation is focussed on the hydrogeology of the Gavarres range and the surrounding basins of Selva and Baix Empordà. Its main objective consists on describing the hydrodynamics of the system based on geological field work, potentiometric data, hydrochemistry as well as isotopic data. The purpose is to determine a conceptual model that describes the main flow systems of the area as a useful tool to define future exploitation criteria for those related aquifers.

The occurrence of rich-CO₂ cold springs in the area provides an opportunity to investigate an specific hydrological behavior, which brings up interesting data about its details. In this way, a special emphasis has been given to the study of those springs as singular points of the hydrogeological system.

The data results are summarized as follows:

- Different hydrogeological formations has been identified and characterised:
 - The igneous and metamorphic rocks of the Gavarres range behave as aquitards because of their low permeability. The occurrence of fractures, both of large and

small scale, allows preferential flow paths from the mountain range, acting as a recharge area, to the surrounding basins.

- The Baix Empordà basin is constituted by the following aquifers:
 - The paleogene sedimentary formations, located at the Gavarres mountain-front. This area has a variable hydraulic efficiency due to the complex tectonic structure of these materials. Limestone as well as specific sandstone formations have the highest efficiencies among the stratigraphic layout.
 - The alluvial materials of the Baix Ter valley, and the piedmont materials as well, constitute good aquifers, with high extraction rates.
- In the Selva and the Vall d'Aro basins, the materials with best aquifers properties are located in:
 - The coarser sedimentary layers of the Neogene infilling of the basin.
 - The upper weathered layer of the underlying igneous rocks, which may reach a thickness up to 30-40 m.
 - The igneous rocks (granites) of the Selva basin, whether they outcrop or constitute its basement, show a fracture network that allows effective groundwater exploitation.
 - The alluvial and piedmont sediments from thin layers (<15 m) that permit a limited water extraction.
- Potentiometric data, based on a database up to 600 wells, show a divergent flux from the Gavarres range towards the Baix Empordà, Selva and Vall d'Aro basins. Hydraulic head data also indicate the influence of fractures in the local flow system. For instance, the paleogene formations in the Empordà area show a higher hydraulic head than the overlying alluvials, indicating a vertical ascending recharge. Such type of flow has also been identified between the deep granites of the Selva and its overlying neogene sediments.

- Furthermore, hydrochemical data support potentiometric observations, and they relate the basin water composition with that of its recharge area, considering the appropriate reactions according to the different lithologies. Hydrochemistry also suggests different residence times depending on flow path.
 - In particular, the hydrochemistry of the Baix Empordà area is governed by the carbonate system, acquired through the flow within the paleogene formations, and the alluvial sediments. The fast kinetics of carbonate dissolution masks previous hydrochemical facies derived from the Gavarres metamorphic areas.
 - In the Selva basin, however, water chemistry reflects the composition of granites, with a dominance of sodium plagioclase. Different water chemical compositions in granite rocks indicate low connectivity between observed fractures, as well as different residence times as a result of progressive water-rock interaction.
- Therefore, the hydrologic behavior of the defined hydrogeologic formations is as follows:
 - In the northern basin (Baix Empordà), the alluvial and recent sediments show a continuous water table distribution, with the exception of deep cones of depression generated by urban supply in the lowest alluvial layers. Those cones enhance the recharge of the alluvial sediments from the paleogene basement, through a vertical ascending flux, and from the Ter river.
 - In the southwestern area (Selva and Vall d'Aro basins), both alluvial, recent sediments and the surface weathered granite layer also show a continuous hydraulic distribution. Hydraulic relationships between the neogene infilling and the limiting geological formations, indicate a lateral recharge from the Gavarres mountain-front. In addition, hydraulic data from the deepest wells suggest that a vertical ascending flux also takes place in the Selva basin, enhanced by exploitation rates. Wells in this area show slower recovery rates compared to those of the Baix Empordà area, which points out the degree of water flux and recharge through fractures.
- A local meteoric line has been obtained from rainfall stable isotopes (oxygen-18 and deuterium). These data allow differentiating a winter local meteoric line, when the main recharge takes place according the meteorological information. In general, groundwater

stable isotope data follow the winter local meteoric line. Nevertheless, some data are clearly shifted from this line, and they suggest a different recharge area. For instance,

- Isotopic data from the Gavarres range and the Baix Empordà basin lay upon the winter local meteoric line, constituting a unique group of similar origin. Samples from the Baix Empordà paleogene formations place close to those of the metamorphic rocks of the Gavarres range, demonstrating a direct recharge relationship between both. Besides, ground water samples from the alluvial aquifers show a mixing process between such recharge, that of the Ter river and saltwater intrusion caused by intensive pumping.
- In the Selva area, however, some samples are consistent with the mentioned “Gavarres isotopic group”, whereas others are displaced towards the annual local meteoric line. This suggests a different recharge area on higher altitude than that of the Gavarres. In particular, CO₂-rich springs also agree with these displaced group of data, despite a modification of its $\delta^{18}\text{O}$ contents because of CO₂ exsolution. According to the geological setting, those recharge areas would be located at the Transversal and Guillerries range, which bound the Selva basin in its northern and western boundaries.
- Tritium content points out different residence times of water samples. Two different groups of tritium data are distinguished, which correlates with the observed differences using stable isotopes. For instance, the oldest group of data, infiltrated before 1952, occurs at the deepest wells of the Selva basin and at the CO₂-rich springs, and they belong to a regional flow system. A second, modern set of data correspond to the groundwater samples of the Baix Empordà paleogene and alluvial formations, which would have entered the system 20 years ago. The alluvial aquifer of the Baix Empordà area shows residence time slightly above 20 years, which confirms the mentioned recharge flow path over a larger distance. Obviously, mixing of both flow systems are identified in each aquifer.
- Strontium content and $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ ratios are used to trace the flow path because strontium isotopic compositions are correlated with lithology. Samples from Gavarres igneous rocks reflect an interaction with intrusive materials during long residence times. In the Selva basin, a mixing of this regional flow system and another of local extent originated in the Gavarres range has been observed. In the Baix Empordà, nonetheless, despite of the influence

of chemical reaction with carbonate paleogene materials, the isotopic content show a radiogenic signature acquired in the metamorphic recharge area.

- Principal component analysis (PCA) was applied to the hydrochemical (major and trace elements) and isotopical data to differentiate possible flow systems. Statistical grouping reflects bedrock lithology and supports some of the identified chemical reactions. Differentiation has been successful between variables and cases related to igneous and metamorphic rocks, and those derived from them. Poor results are obtained in the Baix Empordà samples, where similar chemical characteristics unallow differentiating waters from paleogen and alluvial aquifers.
- Subsequently, end-member mixing analysis has been applied to the Baix Empordà samples to verify mixing rates between the Gavarres recharge through the paleogene aquifers, the Ter river capture and salt water intrusion. Despite that the method needs to be carefully checked for consistency, its application to water samples from the alluvial aquifer demonstrates the major recharge from the underlying paleogene formations, a Ter river participation of about 20%, and a maximum percentage of 10% of salt water in specific wells.
- Finally, tracking physical and chemical parameters of the CO₂-rich springs with monthly frequency allows describing their response time, the influence of an endogen CO₂ gas in its water composition, and the mixing of the defined regional and local flow systems. Moreover, a hypodermic flow system is also identified.

In conclusion, the study of the hydrogeology of the Gavarres-Selva-Baix Empordà system has pictured two distinct flow systems with different chemical and isotopic content and characterised by different dynamics. Furthermore, it shows that the Gavarres range only acts as a local recharge area, and that groundwater from the Selva basin also gets its inflow from distant areas, namely the Transversal and Guillerries ranges.



1. INTRODUCCIÓ	1
1.1 OBJECTIU	3
1.2 EMMARCAMENT GEOGRÀFIC.....	4
1.2.1 CONTEXT MORFOLÒGIC	5
1.2.2 SISTEMA HIDROGRÀFIC	7
1.2.3 CONTEXT CLIMÀTIC.....	9
1.3 ANTECEDENTS	12
Massís de les Gavarres	12
Sector del Baix Ter.....	13
Sector de la Depressió de la Selva	14
1.4 METODOLOGIA	14
1.4.1- DADES BIBLIOGRÀFIQUES	15
1.4.2- TREBALL DE CAMP.....	15
1.4.3- TASQUES DE LABORATORI	16
1.4.4- ANÀLISI DE LES DADES.....	18
2. CONTEXT GEOLÒGIC I HIDROGEOLÒGIC	19
2.1 DESCRIPCIÓ GEOLÒGICA.....	21
2.2. CARACTERITZACIÓ DE LES UNITATS GEOLÒGIQUES	25
2.2.1. FORMACIONS PALEOZOIQUES.....	25
2.2.2. FORMACIONS PALEÒGENES	28
2.2.3. FORMACIONS NEÒGENES.....	34
Vessant sud-oest de les Gavarres	34
Vessant nord de les Gavarres	35
2.2.4. MATERIALS DEL QUATERNARI.....	36
Vall d'Aro.....	36

Depressió de la Selva	37
Vessant nord de les Gavarres i plana del Baix Empordà.....	38
2.3. DESCRIPCIÓ DE LES FORMACIONS HIDROGEOLÒGIQUES.....	39
3. DINÀMICA HIDROGEOLÒGICA.....	43
3.1 INVENTARI DE CAPTACIONS.....	45
3.2 CARTOGRAFIA PIEZOMÈTRICA.....	47
3.2.1 SECTOR DE LA VALL D'ARO.....	49
3.2.1.1 Formacions hidrogeològiques explotades	49
3.2.1.2 Dinàmica hidrogeològica	49
3.2.2 SECTOR ONYAR SUD-EST	50
3.2.2.1 Formacions hidrogeològiques explota.....	50
3.2.2.2 Dinàmica hidrogeològica	50
3.2.3 SECTOR ONYAR NORD-TER MITJÀ.....	52
3.2.3.1 Formacions hidrogeològiques explotades	52
3.2.3.2 Dinàmica hidrogeològica	52
3.2.4 SECTOR BAIX TER - DARÓ.....	53
3.2.4.1 Formacions hidrogeològiques explotades	53
3.2.4.2 Dinàmica hidrogeològica	53
3.3 VARIACIÓ TEMPORAL DEL NIVELL HIDRÀULIC	55
3.3.1 REGISTRES DELS PIEZÒMETRES DE L'ACA.....	58
3.3.2 TENDÈNCIES DE LES CAPTACIONS	59
4. CARACTERÍSTIQUES I DISTRIBUCIÓ ESPACIAL DE LES FÀCIES HIDROQUÍMIQUES	61
4.1 CARACTERITZACIÓ HIDROQUÍMICA.....	63
4.2 MODEL CONCEPTUAL DE LA HIDRODINÀMICA LOCAL.....	75
4.3 APLICACIÓ DE LES DADES HIDROQUÍMIQUES A L'ESTIMACIÓ DE LA RECÀRREGA.....	78
4.3.1 METODOLOGIA.....	78
4.3.2 ESTIMACIÓ DE LA RECÀRREGA.....	82
5. APLICACIÓ DELS ISÒTOPS AL CONEIXEMENT DEL SISTEMA.....	85
5.1 DOTACIONS EN ISÒTOPS ESTABLES: ^{18}O i ^2H	87
5.1.1 DOTACIÓ ISOTÒPICA DE LA PRECIPITACIÓ	87
5.1.1.1 Estimació de la recta meteòrica local	90
5.1.1.2 Variacions espacials i temporals	92
5.1.1.3 Altres línies meteòriques.....	95
5.1.2. DOTACIÓ ISOTÒPICA DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES:	96
5.1.2.1 Sector del Baix Ter.....	101
5.1.2.2 Sector de la Selva	105
5.1.3 OXÍGEN-18 I DEUTERI A LES AIGÜES PICANTS	114
5.2. ANÀLISI DEL CONTINGUT EN TRITI	119
5.2.1 PRESENTACIÓ DE LES DADES. RELACIÓ AMB EL MEDI.....	120
5.2.2- FUNCIÓ D'ENTRADA DEL TRITI	125
5.2.3 MÈTODE D'ESTIMACIÓ DEL TEMPS DE TRÀNSIT	127
5.2.4 RESULTATS: TEMPS DE TRÀNSIT MITJÀ.....	129
5.3 ANÀLISI DELS ISÒTOPS D'ESTRONCI.....	134
5.3.1 MARC CONCEPTUAL.....	134
5.3.2 PRESENTACIÓ DE LES DADES.....	136
5.3.2.1 El medi	136

5.3.2.2 Les aigües subterrànies.....	137
5.3.3 DISTRIBUCIÓ ESPACIAL.....	139
5.3.4 DINÀMICA DEL SISTEMA DE FLUX.....	141
5.4 AVALUACIÓ DEL PROCÉS D'INTRUSIÓ SALINA	146
5.5 SÍNTESI	151
6. ANÀLISI MULTIVARIABLE I DE MESCLES.....	155
6.1. ANÀLISI DE COMPONENTS PRINCIPALS.....	157
6.1.1. MARC CONCEPTUAL.....	158
6.1.2. CONSIDERACIONS PRÈVIES.....	160
6.1.3. RESULTATS	162
6.2. ANÀLISI DE MESCLA AMB MEMBRES EXTREMS.....	177
6.2.1. CONTEXT CONCEPTUAL.....	178
6.2.2 RESULTATS	180
7. HIDROQUIMISME DE LES FONTS PICANTS	197
7.1 DESCRIPCIÓ I SITUACIÓ.....	199
7.2 ANTECEDENTS METODOLÒGICS I LOCALS.....	202
7.3 METODOLOGIA	204
7.4 CARACTERÍSTIQUES HIDROQUÍMIQUES GENERALS.....	205
7.4.1 AIGÜES PICANTS FREDES.....	206
7.4.2 FONT DE LA MINA	209
7.4.3 CARACTERÍSTIQUES HIDROQUÍMIQUES DE LA PRECIPITACIÓ.....	211
7.5 VARIABILITAT HIDROQUÍMICA TEMPORAL.....	213
7.5.1 CABALS	213
7.5.2 TEMPERATURA	218
7.5.3 PH	220
7.5.4 CONDUCTIVITAT	221
7.5.5 SISTEMA CARBONATAT	223
7.5.6 NITRAT	230
7.5.7 CLORUR.....	231
7.5.8 BROMUR.....	235
7.5.9 FLUORUR	238
7.6 RELACIÓ ENTRE EL QUIMISME I EL CABAL.....	240
7.7 VARIABILITAT ISOTÒPICA TEMPORAL	246
7.7.1 TRITI.....	246
7.7.2 ¹³ C.....	249
7.7.3 ⁸⁷ Sr/ ⁸⁶ Sr	251
7.8 AVALUACIÓ QUANTITATIVA DE LES COMPONENTS DEL FLUX.....	251
7.9 SÍNTESI.....	255
8. CONCLUSIONS.....	259
9. BIBLIOGRAFIA.....	266
ANNEX 1: INVENTARI DE POUS	285
ANNEX 2: CARTOGRAFIA PIEZOMÈTRICA	300
ANNEX 3: DADES HIDROQUÍMIQUES	311

ANNEX 4: COMPOSICIÓ ISOTÒPICA DE LA PRECIPITACIÓ.....	321
ANNEX 5: COMPOSICIÓ ISOTÒPICA DE LES AIGÜES SUBTERRÀNIES	327
ANNEX 6: FONTS PICANTS.....	331

ÍNDIX DE FIGURES

1. INTRODUCCIÓ

Figura 1.1 Situació geogràfica i geomorfològica de l'àrea d'estudi	6
Figura 1.2 Conques hidrogràfiques.....	8
Figura 1.3 Precipitació mensual (1983-2001, a Mas Badia)	9
Figura 1.4 Mitjanes mensuals de precipitació, temperatura i precipitació eficaç	11

2. CONTEXT GEOLÒGIC I HIDROGEOLÒGIC

Figura 2.1 Mapa geològic de la zona d'estudi	22
Figura 2.2 Esquema litoestructural	24
Figura 2.3 Geologia del massís de les Gavarres	27
Figura 2.4 Geologia de l'àrea de Palau-Sator – Peratallada	30
Figura 2.5 Talls geològics a l'àrea de Palau-Sator – Peratallada	31
Figura 2.6 Tall geològic al límit nord-est de les Gavarres	32
Figura 2.7 Tall geològic al nord de Girona	33
Figura 2.8 Tall geològic al sud-oest de les Gavarres	35
Figura 2.9 Tall geològics a la Vall d'Aro	37

3. DINÀMICA HIDROGEOLÒGICA

Figura 3.1 Ubicació de les captacions inventariades	46
Figura 3.2 Cartografia piezomètrica general (març 2000)	48
Figura 3.3 Seccions interpretatives de la dinàmica hidrogeològica local	55
Figura 3.4 Evolució del nivell hidràulic de piezòmetres	56
Figura 3.5 Precipitació total anual (1984-2001, a Mas Badia)	57
Figura 3.6 Variació del nivell hidràulic de captacions inventariades	57
Figura 3.7 Evolució temporal del nivell hidràulic de captacions	58

4. CARACTERÍSTIQUES I DISTRIBUCIÓ ESPACIAL DE LES FÀCIES HIDROQUÍMIQUES

Figura 4.1 Ubicació dels punts de mostreig hidroquímic	65
Figura 4.2 Diagrames en caixa dels paràmetres estadístics descriptius	66
Figura 4.3 Diagrama de Piper	68
Figura 4.4 Diagrama dels camps d'estabilitat de l'albita	70
Figura 4.5 Relació entre el contingut de clorur i triti	71
Figura 4.6 Relació entre el contingut en clorur i principals cations	72
Figura 4.7 Relació molar entre el contingut en calci i en bicarbonat	73
Figura 4.8 Relació entre el pH i el bicarbonat (grups 2 i 3)	73
Figura 4.9 Tendències evolutives en el diagrama de Piper	74
Figura 4.10 Esquema interpretatiu de la dinàmica hidrogeològica local	77

5. APLICACIÓ DELS ISÒTOPS AL CONEIXEMENT DEL SISTEMA

Figura 5.1 Composició isotòpica de la precipitació (Mas Badia)	88
--	----

Figura 5.2 Recta meteòrica local i global	90
Figura 5.3 Histograma de l'excés en deuteri	91
Figura 5.4 Relació entre la precipitació, l'excés en deuteri i el contingut isotòpic	92
Figura 5.5 Valors mitjans de precipitació, temperatura i precipitació eficaç a Mas Badia..	95
Figura 5.6 Ubicació dels punts de mostreig	97
Figura 5.7 Contingut isotòpic de les aigües subterrànies	100
Figura 5.8 Dotacions isotòpiques diferenciades per campanyes	102
Figura 5.9 Dotacions isotòpiques al sector d'estudi meridional	106
Figura 5.10 Ubicació dels punts projectats a la Figura 5.9	107
Figura 5.11 Projectió dels grups isotòpics sobre la MWL-hivern	110
Figura 5.12 Relació cota de mostrig/temperatura de l'aigua	113
Figura 5.13 Sistemes de flux subterrani a diferents escales	114
Figura 5.14 Processos responsables de modificacions isotòpiques	115
Figura 5.15 Contingut isotòpic de les aigües picants i captacions de la Selva	117
Figura 5.16 Contingut en triti, oxigen-18 i deuteri	119
Figura 5.17 Continguts en triti a les diferents campanyes	121
Figura 5.18 Contingut en triti a la precipitació (Mas Badia)	126
Figura 5.19 Contingut mensual i anual de triti a la precipitació	126
Figura 5.20a Diagrames en caixa del contingut en triti i funcions de desintegració del triti de la precipitació (3 i 5 anys de mescla i recàrrega nul·la a l'estiu)	131
Figura 5.20b Llegendes de la Figura 5.20a	132
Figura 5.21 Relació $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a les aigües subterrànies i roques	139
Figura 5.22 Distribució espacial de la relació $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ a l'aigua	140
Figura 5.23 Relació entre la dotació isotòpica i la concentració d'Sr	143
Figura 5.24 Relació entre la dotació en ^{18}O i la relació $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	144
Figura 5.25 Relació entre el contingut en triti i la relació $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$	144
Figura 5.26 Tall geològic interpretatiu de la dinàmica hidrogeològica a la depressió de la Selva	146
Figura 5.27 Variació espacial de la concentració en clorur.....	147
Figura 5.28 Relació molar Br/Cl al sector nord	149
Figura 5.29 Relacions isotòpiques mitjanes al Baix Ter i mar Mediterrani	149
Figura 5.30 Contingut en clorurs i dotació isotòpica en ^{18}O	150

6. ANÀLISI MULTIVARIABLE I DE MESCLES

Figura 6.1 Distribució espacial dels factors i processos	165
Figura 6.2 Càrregues sobre els factors 1 i 2	166
Figura 6.3 Càrregues sobre els factors 1 i 3	166
Figura 6.4 Càrregues sobre els factors 2 i 3	167
Figura 6.5 Càrregues sobre els factors 2 i 4	167
Figura 6.6 Marques sobre els factors 1 i 2	168
Figura 6.7 Marques sobre els factors 2 i 3	168
Figura 6.8 Marques sobre els factors 2 i 4	169
Figura 6.9 Valors de les marques sobre les mostres	175
Figura 6.10 Membres extrems en funció de la concentració en Cl i Sr	182
Figura 6.11 Relació entre els continguts en Si i Cl	182
Figura 6.12 Diagrama de mescla dels isòtops estables	183
Figura 6.13 Concentració de Si i I a les mostres usades a l'EMMA	183
Figura 6.14 Diagrama de mescla en funció del Cl i el Br	183
Figura 6.15 Resultats d'aplicar l'EMMA amb 4 membres extrems	189
Figura 6.16 Contribucions relatives de cada membre extrem	189
Figura 6.17 Comparació resultats reals / simulats (3 membres)	193
Figura 6.18 Comparació resultats reals / simulats (4 membres)	193
Figura 6.19 Magnitud de la diferència entre valors reals i simulats	195

7. HIDROQUIMISME DE LES FONTS PICANTS

Figura 7.1 Ubicació dels punts d'aigua picant	201
Figura 7.2 Diagrama en caixa de les composicions hidroquímiques	207
Figura 7.3 Diagrama de Piper	208
Figura 7.4 Evolució dels cabals de les fonts (nov 00- ago 02)	214
Figura 7.5 Evolució del cabal de les fonts (des 87 – ago 02)	215
Figura 7.6 Hidrograma de la font picant de Bell-lloc	217
Figura 7.7 Variació del pH i la temperatura	219
Figura 7.8 Evolució de la conductivitat al llarg del temps	222
Figura 7.9 relació pH / bicarbonat	224
Figura 7.10 Variació de les concentracions en Ca i Mg	226
Figura 7.11 Evolució de la relació HCO_3/Ca i del contingut en HCO_3	227
Figura 7.12 Relació entre el contingut en Ca i HCO_3	228
Figura 7.13 Variació de la concentració en nitrats a BE2	231
Figura 7.14 Contingut en Cl a les fonts i a la precipitació	232
Figura 7.15 Variació del contingut en Cl a les fonts	233
Figura 7.16 Evolució del contingut en Cl i de la relació Cl/Br	237
Figura 7.17 Variació de la concentració en Figura a les fonts	239
Figura 7.18 Correlació de diferents paràmetres amb el cabal a BE1	241
Figura 7.19 Relació entre paràmetres hidroquímics i el cabal de BE2	242
Figura 7.20 Diagrames de la paràmetres hidroquímics enfront el cabal a CS149	243
Figura 7.21 Relació entre el cabal de MA1 i paràmetres hidroquímics	244
Figura 7.22 Evolució del contingut en triti a Mas Badia i a les fonts	247

ÍNDEX DE TAULES

1. INTRODUCCIÓ

Taula 1.1 Estacions meteorològiques on es calcula la precipitació eficaç	10
--	----

3. DINÀMICA HIDROGEOLOÒGICA

Taula 3.1 Característiques dels piezòmetres utilitzats a l'estudi	56
---	----

4. CARACTERÍSTIQUES I DISTRIBUCIÓ ESPACIAL DE LES FÀCIES HIDROQUÍMIQUES

Taula 4.1 Contingut en elements majoritaris (març 2000)	64
Taula 4.2 Grups hidroquímics segons els criteris d'Stiff	67
Taula 4.3 Informació dels punts emprats en el balanç de clorurs	81
Taula 4.4 Concentració de clorurs a la precipitació de Mas Badia (1996-2001)	82
Taula 4.5 Tasses de recàrrega en les diferents formacions hidrogeològiques	83

5. APLICACIÓ DELS ISÒTOPS AL CONEIXEMENT DEL SISTEMA

Taula 5.1 Dades isotòpiques de la precipitació de Mas Badia	89
Taula 5.2 Rectes meteòriques locals en funció de les condicions climàtiques	94
Taula 5.3 Rectes meteòriques locals a diferents indrets de Catalunya	96
Taula 5.4 Dotació isotòpica de l'aigua subterrània	98
Taula 5.5 Rectes meteòriques i rectes de regressió al Baix Ter	101
Taula 5.6 Contingut en triti a les aigües subterrànies	122
Taula 5.7 Contingut en triti a les aigües picants	123
Taula 5.8 Estimacions de la desintegració del triti per diferents anys	130

Taula 5.9 Relació isotòpica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ en roques i minerals	136
Taula 5.10 Relació isotòpica $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ i contingut en Sr^{2+}	138

6. ANÀLISI MULTIVARIABLE I DE MESCLES

Taula 6.1 Valors propis	164
Taula 6.2 Càrregues dels factors	170
Taula 6.3 Marques sobre els factors diferenciant-hi les formacions hidrogeològiques	171
Taula 6.4 Concentracions dels elements emprats en els membres extrems	186
Taula 6.5 Resultats d'aplicar l'EMMA	188
Taula 6.6 Rectes de regressió i coeficients de correlació entre simulacions	194

7. HIDROQUIMISME DE LES FONTS PICANTS

Taula 7.1 Punts d'aigua picant	200
Taula 7.2 Dades disponibles corresponents a cada mostreig	205
Taula 7.3 Concentracions en Figura i Ca a la font de la Mina	211
Taula 7.4 Característiques hidroquímiques de les fonts i la precipitació	212
Taula 7.5 Estadística descriptiva dels cabals de les fonts	213
Taula 7.6 Coeficients de correlació entre els cabals de les fonts	214
Taula 7.7 Cabals 1987-1988 (Clotet, 1989)	215
Taula 7.8 Coeficients de correlació entre el pH de diferents fonts	220
Taula 7.9 Continguts en triti de les surgències	247
Taula 7.10 Contingut en ^{13}C a les fonts picants	250
Taula 7.11 Balanç de triti	253

Fotografia 7.1 Imatge de les fonts picants de Madremanya (MA1) i de Penedes (CS14)..	202
---	-----

1. INTRODUCCIÓ

1.1 OBJECTIUS

1.2 EMMARCAMENT GEOGRÀFIC

1.2.1 CONTEXT MORFOLÒGIC

1.2.2 SISTEMA HIDROGRÀFIC

1.2.3 CONTEXT CLIMÀTIC

1.3 ANTECEDENTS

Massís de les Gavarres

Sector del Baix Ter

Sector de la Depressió de la Selva

1.4 METODOLOGIA

1.4.1- DADES BIBLIOGRÀFIQUES

1.4.2- TREBALL DE CAMP

1.4.3- TASQUES DE LABORATORI

1.4.4- ANÀLISI DE LES DADES

Els recursos hidrogeològics subterranis han esdevinguts indispensables pel desenvolupament de les activitats agrícoles i ramaderes tradicionals i el manteniment del sector turístic a l'àrea d'estudi, el sector Baix Ter – Gavarres – La Selva. El manteniment d'un estat quantitatiu i qualitatiu sota criteris de sostenibilitat requereix d'un coneixement hidrogeològic del sistema explotat i de la disponibilitat de models conceptuals que permetin establir futurs escenaris de gestió.

En la present tesi es proposa una actualització de la informació disponible i la caracterització de paràmetres hidrogeològics de la zona per a establir un model conceptual de funcionament que inclogui la identificació de les àrees de recàrrega, una caracterització del flux subterrani i la hidrodinàmica general.

L'estudi s'emmarca en un context geològic caracteritzat per una baixa permeabilitat, el massís de les Gavarres, on es pretenen aportar noves tècniques d'estudi i avaluar el paper de les fractures en aquest tipus de sistemes. S'analitza també la connexió hidràulica amb les depressions sedimentàries limítrofs, la Selva i l'Empordà ambdues sotmeses a elevades tasses d'explotació. En aquest context, prendrà especial rellevància la caracterització de les trajectòries dels sistemes de flux, la

identificació i integració de característiques singulars i les afeccions antròpiques a les piezometries regionals.

Finalment, indicar que aquesta memòria forma part dels projectes de caracterització de la dinàmica del massís de les Gavarres i àrees adjacents, CICYT98-HID0366 i REN2002-04288-c02-01, que continuen la línia d'investigació iniciada amb el projecte CICYT-AMB95/0867.

1.1 OBJECTIUS

La finalitat d'aquesta tesi és l'estudi dels recursos hidrogeològics del sector Baix Ter-Gavarres-Selva. Es pretén caracteritzar la dinàmica hidrogeològica mitjançant l'aplicació de diferents tècniques que permetin integrar, dins el funcionament general, les peculiaritats locals. Es planteja la caracterització de la recàrrega i les àrees fonts, la identificació de les trajectòries de flux i l'avaluació del funcionament de les formacions hidrogeològiques que suposen els recursos hídrics de la zona.

Concretament, els diferents objectius que es pretenen assolir amb aquesta tesi són:

- Un coneixement més exhaustiu del sistema hidrogeològic local, Baix Ter – Gavarres - La Selva. Això comprèn:
 - Disposar d'un inventari de captacions que permeti reconèixer i avaluar el potencial hidrogeològic de les formacions explotades i les relacions entre elles.
 - Avaluar la disponibilitat dels recursos hídrics i estimar la influència antròpica.
 - Emfasitzar i aportar més dades a aquelles àrees que els estudis precedents han mostrat que estan sotmeses a una notable complexitat hidrogeològica. Concretament, avaluar el paper de les fractures dins la hidrodinàmica local i integrar-hi manifestacions singulars d'aquest sistema com les fonts picants.
 - Proporcionar una eina de suport a futures tasques de gestió derivades de la nova directiva marc europea.

- Caracteritzar la hidrodinàmica general del sistema des de diferents punts de vista, considerant-hi i avaluant-hi:
 - Les àrees de recàrrega.
 - Les trajectòries dels diferents sistemes de flux.
 - Les relacions hidràuliques entre les formacions hidràuliques i les seves propietats hidrogeològiques.
 - Les característiques hidroquímiques del sistema.
 - Les afeccions puntuals d'origen bàsicament antròpic.

- Identificar, descriure i avaluar de manera detallada diferents sistemes de flux reconeixent-hi:
 - Els temps de trànsit de cada un.
 - Diferents trajectòries i mescles entre elles.
 - L'àmbit en el que es produeixen.

Dels dos objectius anteriors es deriva la integració, dins un model hidrogeològic regional, de característiques singulars com les aigües picant i peculiaritats locals com composicions hidroquímiques diferenciades.

Com a conseqüència, es proposa actualitzar el model hidrogeològic conceptual a partir de l'anàlisi i interpretació tant de la informació prèvia disponible com de les dades i observacions aportades durant la recerca relacionada amb aquesta treball.

Les conclusions de la tesi s'empraran per contrastar les hipòtesis preliminars de funcionament hidrogeològic existents, plantejar noves hipòtesis mitjançant la recopilació i anàlisi de dades piezomètriques, químiques i isotòpiques, i finalment, emetre recomanacions davant possibles futurs escenaris d'explotació dels recursos hídrics.

1.2 EMMARCAMENT GEOGRÀFIC

L'àrea d'estudi, d'uns 650 km², se situa al sector nord-est de Catalunya, concretament a les comarques gironines de La Selva, el Gironès i el Baix Empordà. Morfològicament aquest sector comprèn la totalitat del massís de Les Gavarres i part de les depressions de la Selva i del Baix Empordà o Baix Ter (Figura 1.1) Els límits naturals venen definits pel riu Ter al nord, a l'oest el riu Onyar i la riera Gotarra que discorren per la depressió de la Selva, al sud per la vall del riu Riudaura i a l'est pel corredor de Palafrugell.

1.2.1 CONTEXT MORFOLÒGIC

Les Gavarres tenen una extensió d'uns 350 km² i constitueixen l'extrem septentrional de la Serralada Litoral Catalana. És un massís d'altituds moderades, no excedint generalment els 250 m d'alçada, el punt més alt compta amb 535 m i correspon al Puig de la Gavarra (o Puig d'Arques). Llinda amb les depressions de la Selva i del Baix Empordà, a l'oest i nord, respectivament. Al nord-oest es posa en contacte amb la Serralada Transversal, a migjorn limita amb la Vall d'Aro i pel vessant de llevant amb el corredor de Palafrugell.

La Vall d'Aro, ubicada al vessant sudoriental de les Gavarres, d'uns 11 km² d'extensió, constitueix la continuació de la depressió de la Selva fins al mar i s'ubica entre el massís de les Gavarres i el d'Ardenya.

La depressió de la Selva constitueix l'extrem septentrional de la depressió Prelitoral amb alçades mitjanes que es mouen entre els 80 i 140 m sobre el nivell del mar. La superfície de la part de la depressió estudiada comprèn uns 66 km² i és travessada pel riu Onyar i afluents seus a la meitat nord i est.

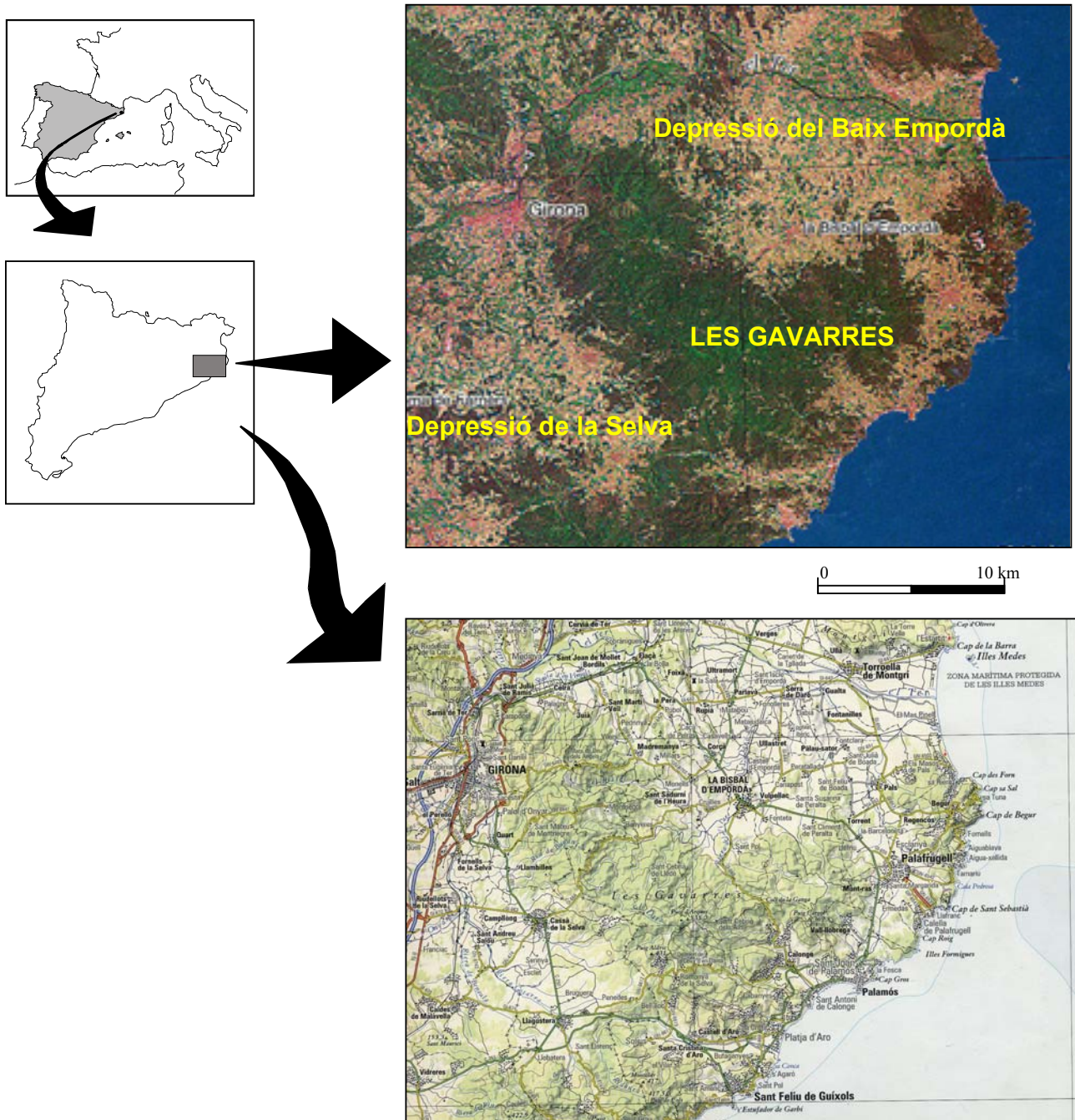


Figura 1.1. Situació geogràfica i geomorfològica de l'àrea d'estudi (ICC, 1994).

La plana del Baix Empordà, o del Baix Ter, amb una superfície total d'uns 200 km², és formada per les planes al·luvials del riu Ter i del riu Daró. Al nord, el massís del Montgrí la separa de la plana de l'Alt Empordà. Des de Jafre fins al mar, la cota topogràfica és inferior als 20 m d'alçada sobre el nivell del mar.

En el contacte de les Gavarres amb la plana del Baix Empordà es localitzen els turons que constitueixen les Pregavarres els quals no sobrepassen els 110 m d'altitud. Són els turons de Peralta, Ullastret i Llabià, entre d'altres.

1.2.2 SISTEMA HIDROGRÀFIC

El sistema hidrogràfic està format per una densa xarxa de torrents de cabal intermitent, amb marcat caràcter estacional. Els únics cursos principals que presenten un cabal més o menys mesurable al llarg del temps són el Ter i l'Onyar, i en menor grau el Daró i el Ridaura (Figures 1.1 i 1.2). El període d'estudi (1999-2002) ha estat notablement sec i s'ha reflectit en cabals anòmalament baixos.

El riu Ter té un recorregut d'uns 208 km sent la seva conca de drenatge d'uns 3010 km². A l'alçada de Flaçà rep, per l'esquerra, el riu Terri i després d'un ampli meandre comença a discórrer per la depressió empordanesa. A la població de Gualta rep les aigües del Daró i posteriorment desemboca a la platja de Pals. Aquest riu presenta derivacions per a rec, concretament el rec dels Molins, a l'alçada de Colomers i el rec del Molí de Gualta.

El Daró actualment és un afluent del Ter degut a modificacions antròpiques recents. Aquest drena el vessant septentrional de les Gavarres recorrent un total de 43.5 km i recollint l'aigua d'una àrea d'uns 319.81 km². Neix a ponent del Puig d'Arques. A la plana, rep cursos que alimentaven l'antic estany d'Ullastret, dessecat al segle XIX.

El Rissec, afluent del Daró, neix al vessant meridional de la Mare de Déu dels Àngels i recorre 13.8 km, drenant una superfície de 38.19 km².

El riu Onyar, per la seva banda est, compta amb afluents com la riera de la Gotarra la qual drena la part sud del Massís de les Gavarres, la riera de Bugantó drena la part central de les Gavarres i la riera de Celré que recull l'aigua de bona part de l'àrea nordoccidental d'aquest massís. En el cabal

d'aquesta riu cal tenir en compte l'aportació antròpica en l'EDAR de Cassà de la Selva. A la comarca de la Selva aquest riu, sofreix un colze adoptant una direcció nord-nord-est. Recorre un total de 34 km amb una superfície de 340 km².

La conca del Ridaura (73.8 km²) s'origina a la Serralada Litoral i desemboca a l'alçada de Platja d'Aro després de creuar tota la vall d'Aro i havent recorregut 73.8 km. Els seus afluents són petits torrents provinents de les Gavarres i de la Serra de la Selva Marítima. Els recursos hídrics d'aquesta àrea es veuen afectats pels processos de recàrrega artificial amb l'aigua de la depuradora.

La riera de Calonge, amb una conca de drenatge de 56 km², recull les aigües d'un ampli sector oriental de les Gavarres i desemboca al cap de 9.5 km al sector meridional de la badia de Palamós.

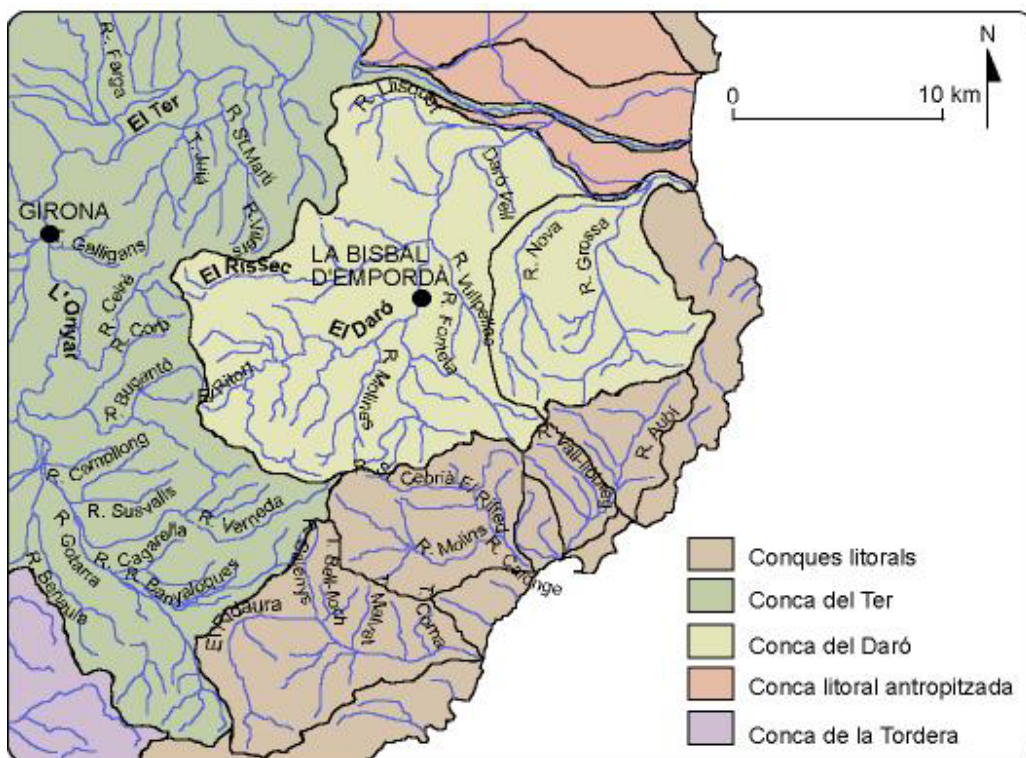


Figura 1.2. Conques hidrogràfiques de l'àrea d'estudi (Vehí *et al.*, 1996)

1.2.3 CONTEXT CLIMÀTIC

Aquest sector de la geografia catalana per la seva latitud i posició propera al Mediterrani pertany al tipus de clima temperat-subtropical anomenat Mediterrani amb petites variacions locals. Les dades utilitzades en aquesta classificació corresponen a la xarxa d'observatoris del Servei Meteorològic de Catalunya (SMC) i del Instituto Nacional de Meteorología (INM).

La plana del Baix Empordà es classifica com a clima mediterrani subhúmit, amb una mitjana tèrmica de 15 °C i una precipitació mitjana anual de 571 mm (Figura 1.3). La sequera estival comprèn els mesos de juliol i agost i el màxim pluviomètric se situa a la tardor, sovint de característiques torrencials. El mes més sec sol ser el juliol.

La depressió de la Selva presenta un caràcter Mediterrani humit on la secada estival hi queda més atenuada. La temperatura mitjana anual és de 14.5 °C mentre que les precipitacions anuals registrades volten els 760.5 mm.

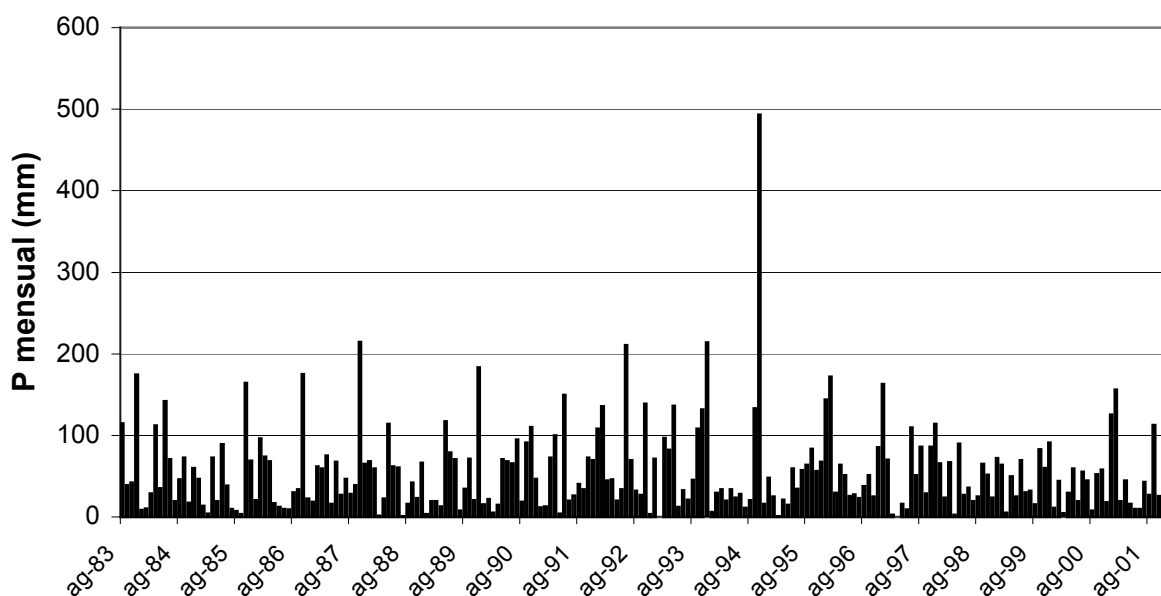


Figura 1.3 Precipitació mensual registrada a Mas Badia durant el període 1983-2001.

Les Gavarres disposen també d'un clima mediterrani subhúmit, de règim tèrmic suau amb mitjana anual de 16 °C. Les precipitacions, si bé sovint més abundants que a la plana, són moderades, voltant els 700 mm segons els sectors amb màxims a la tardor i primavera.

Els anys de l'estudi en concret foren notablement secs. L'estació de Mas Badia, amb una mitjana anual de 651.5 mm per període 1983-2002 registrà 500.9 mm el 1998, 533.5 mm el 1999 i 517.2 mm l'any 2000. El règim pluviomètric local també s'ha analitzat als observatoris meteorològics de la zona amb un nombre de dades anuals superior a 20 (Taula 1.1). En aquests, la variabilitat pluviomètrica total anual registra valors d'entre 400 i 1000 mm. Es representa en la Figura 1.4 la temperatura i precipitació mitjana mensual i el valor estimat de la precipitació eficaç. Aquest darrer es calcula restant a la precipitació el valor de l'evapotranspiració potencial (segons el mètode de Thornwaite). És una indicació de la quantitat d'aigua disponible per a la recàrrega i l'escorriment superficial. Més endavant s'apliquen mètodes hidroquímics per calcular específicament la recàrrega, no obstant, l'estimació de la pluja eficaç ja indica un dèficit al sòl durant els mesos estivals.

Taula 1.1. Estacions meteorològiques en les que s'ha calculat la precipitació eficaç. S'indica el nombre d'anys utilitzat per calcular les dades mitjanes.

ESTACIÓ METEOROLÒGICA	UTM X	UTM Y	Z (m)	Núm. anys
PLATJA D'ARO	501950	4628830	20	23
BEGUR	515575	4642500	185	65
LA BISBAL D'EMPORDÀ(turó)	503100	4646125	70	20
SANT FELIU DE GUÍXOLS	502750	4625450	4	73
GIRONA	485250	4646950	94	88
AEROPORT GIRONA COSTA-BRAVA	479850	4638750	129	27
MAS BADIA (La Tallada d'Empordà)	505225	4656000	20	19
TORROELLA	510250	4654050	22	88

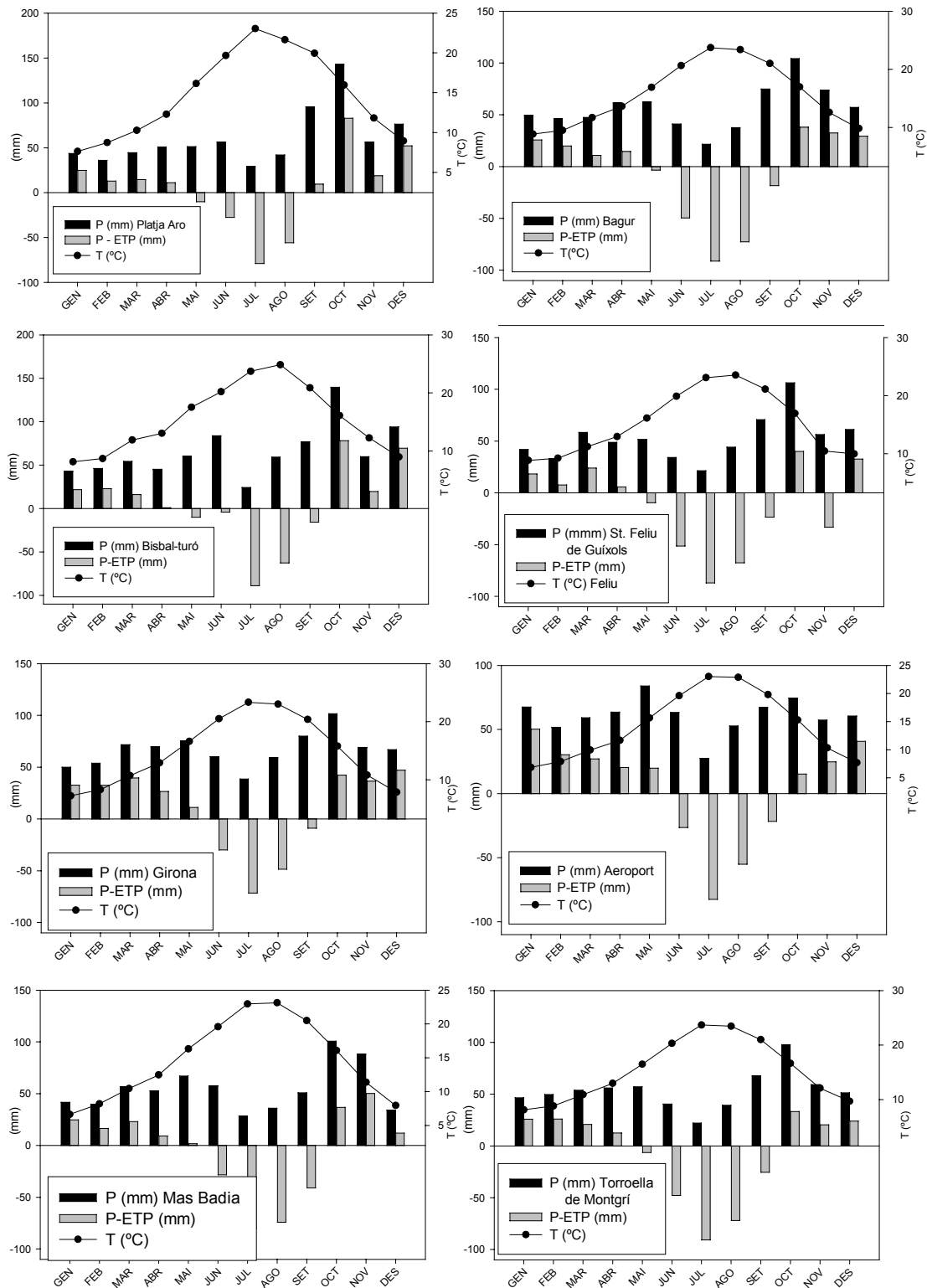


Figura 1.4 Mitjanes mensuals de Precipitació (P), Temperatura (T) i Precipitació eficaç (P-ETP).

1.3 ANTECEDENTS

Els primers estudis geològics de la zona daten de principis del 1900 però la seva caracterització hidrogeològica no arribà fins als anys 70. Amb tot, es disposa d'un nombre d'estudis considerable que permeten un notable coneixement del medi. Es presenten a continuació els estudis que s'han considerat més rellevants per a la realització d'aquest treball. Per una informació més àmplia dels antecedents, es remet al recull bibliogràfic del treball "Dinàmica del sistema hidrogeològic del massís de les Gavarres i àrees adjacents" que descriu el model hidrogeològic preliminar (Vilanova, 2001).

Massís de les Gavarres

Els primers autors en descriure i datar aquestes roques foren Vidal (1886), Marcet Riba (1947, 1948 i 1949) i Solé i Sabarís (1949). Posteriorment, Pallí (1976a) descriu detalladament la geologia i Barnolas *et al.* (1980) presenta una nova interpretació de la sèrie estratigràfica, la qual és ampliada per Solé Flores (1986), Barnolas i García-Sanseguendo (1992). Finalment, Roqué (1993) i Pallí i Roqué (1994) presenten una extensa descripció de tots els materials que configuren el massís, les característiques petrològiques, petrogenètiques i estructurals i es refereix també als materials sedimentaris de les conques adjacents.

La primera cartografia data de 1953, quan l'IGME¹ publica el full 1:50000 de la sèrie del "Mapa Geológico Nacional" corresponent a Sant Feliu de Guíxols. Posteriorment, la Unitat de Geologia de la Universitat de Girona publica diversos mapes geològics que engloben aquesta àrea: el mapa de Castell d'Aro – Platja d'Aro (Pallí, 1980), de Cassà de la Selva (Pallí i Trilla, 1982), de Girona (Pallí, 1982), de Sta. Cristina d'Aro (Pallí *et al.*, 1985), de Palamós (Pallí i Brusi, 1987), de Palafrugell (Pallí i Roqué, 1990a) i de Calonge (Pallí i Roqué, 1992a). També, l'IGME (1983) publica els fulls de Palafrugell (335), Torroella de Montgrí (296) i de Sant Feliu de Guíxols (366)

¹ Durant el període 1988-2000 l'acrònim que denominava el Instituto Geológico y Minero de España era ITGE. S'utilitzarà en endavant l'abreviatura actual, IGME.

d'escala 1:50000. El full corresponent a les Girona (334) es publica a finals del 2003 i no ha estat utilitzat en el aquest treball

Sector del Baix Ter

Els primers estudis de datació i descripció dels sediments paleògens arriben amb Vidal (1886), Faura i Sans (1923), Ashuer (1934), Solé Sabarís i Llopis Lladó (1939) i Marcet Riba i Solé Sabarís (1949). Aquest darrer i el treball de Faura (1923) identifiquen també els diferents nivells dels sediments quaternaris.

Pallí (1972) realitza la primera descripció sistemàtica dels sediments paleògens de l'Empordà, de les Pregavarres i de les seves zones limítrofs, diferencia les formacions litoestratigràfiques i les interpreta sedimentològicament i paleogeogràfica.

Martínez Gil (1972) presenta una cartografia més simple que Pallí (1972) i caracteritza hidrogeològicament els materials paleògens i els quaternaris.

Caracteritzacions hidrogeològiques posteriors són les de Montaner *et al.* (1995), Montaner *et al.* (1996), Mas-Pla *et al.* (1998), Vilanova i Mas (2001) i Vilanova (2001).

Els treballs de Roqué (1993) i Roqué i Pallí (1994) inclouen una descripció dels materials sedimentaris d'aquesta zona. Mas i Vilanova (2000) presenten una correlació d'aquests en el subsòl paleògen de les Pregavarres.

Els esdeveniments tectònics i l'evolució geodinàmica neogena d'aquesta zona són tractats per Donville (1976), Saula *et al.* (1994) i Picart *et al.* (1996).

Aportacions destacables al coneixement de les terrasses i sediments al·luvials del riu Ter són les de Pallí (1976b), Mas-Pla *et al.* (1989), Montaner *et al.* (1995), Solà *et al.* (1996), Mas-Pla *et al.* (1999) i Montaner *et al.* (1999).

L'ICC al 1994 publica el mapa geològic 1:25.000 de Torroella de Montgrí (296-2-2), el 1997 el de Sarrià de Ter (296-1-2), el de Palafrugell (335-1-1) el 2000, el de la Bisbal de l'Empordà (334-2-1) el 2001 i el full de Girona (334-1-1) el 2003.

Sector de la Depressió de la Selva

Solé Sabarís (1948) descriu els materials sedimentaris d'aquesta àrea. L'evolució geodinàmica de la depressió i les característiques estructurals són analitzades per Donville (1976), Pous *et al.* (1990) i Saula *et al.* (1994).

Solé Sabarís (1939, 1946, 1962 i 1966) estudia el vulcanisme i les característiques hidrogeològiques de les aigües riques en carboni. Les característiques generals de les surgències hidrotermals de Catalunya i la seva gènesi també són tractades per Albert (1974, 1975). París i Albert (1976) se centren en la gènesi de les aigües carbòniques de la província de Girona i hi apliquen geotermòmetres. Clotet (1989) realitza un estudi més exhaustiu de les característiques de les fonts picants de la Vall d'Aro i posteriorment Clotet i Pallí (1998) les daten amb el mètode del ^{14}C . Les aigües ferruginoses foren el motiu d'estudi de Font, (1981 i 1983), en realitzà un descripció i es referí a la seva gènesi. Clotet, Pallí i Roqué publiquen, el 1999, l'estudi "Les Fonts de les Gavarres" on elaboren un exhaustiu recull de totes les surgències naturals existents a aquest massís. Vilanova (2001) integra les aigües riques en carboni dins un model hidrogeològic conceptual.

Les característiques dels materials al·luvials del Ridaura són estudiades per Llamas i Domènec (1967) i Domènec *et al.* (1979).

1.4 METODOLOGIA

La realització d'aquest treball ha comptat amb quatre etapes diferenciades, una inicial recerca bibliogràfica, després es procedí a les tasques de camp, posteriorment als treballs de laboratori per finalitzar en l'anàlisi de les dades mitjançant diferents tècniques i la redacció de l'estudi preliminar "Dinàmica del sistema hidrogeològic del massís de les Gavarres i àrees adjacents" i del present treball, el qual inclou tots els resultats i conclusions. Amb aquest ordre es detallen a continuació els procediments seguits.

1.4.1- DADES BIBLIOGRÀFIQUES

La primera etapa fou la de la recerca i recopilació bibliogràfica, tant l'específica i conceptual com la referida a dades regionals existents. Aquesta darrera inclou informació sobre el medi (Institut Cartogràfic de Catalunya), l'aigua (Agència Catalana de l'Aigua²) i els registres pluviomètrics i de temperatura del Servei Meteorològic de Catalunya i de l'Institut Nacional de Meteorologia. També, es recolliren columnes i informacions dels sondejos arxivats, el 1999, a la Secció de Mines de la Direcció General d'Energia del Departament d'Indústria, Comerç i Turisme de la Generalitat de Catalunya (Delegació Territorial de Girona).

La cartografia de base utilitzada ha estat:

- mapes geològics 1:25000 de l'ICC (1997 - 2003)
- mapa geològic 1:250000 de l'ICC (1989 i 2002)
- fulls cartogràfics 1:25000 i 1:50000 del Servicio Geográfico del Estado i de l'ICC
- mapa 1:40000 de les Gavarres (ICC, 1996)
- fotografies aèries escala 1:18000 i 1:33000 i ortofotomapes d'escala 1:25000 de l'ICC.

1.4.2- TREBALL DE CAMP

El treball sobre el terreny comptà amb un reconeixement geològic, la realització d'un inventari de captacions i fonts existents, la mesura bianual dels nivells piezomètrics dels aproximadament 600 pous escollits, amb una sonda Nordmeyer, i un mostreig hidroquímic sistemàtic dels 36 punts considerats com a més representatius. A l'Annex 1 es presenten punts inventariats i les mesures piezomètriques realitzades.

La metodologia analítica emprada tant sobre el terreny com al laboratori, és la descrita en els Standard Methods (Greenberg *et al.*, 1992). Per recollir les mostres, es feu bombar prèviament el pou, en funció de les seves característiques de profunditat i ús i es tancaren hermèticament per evitar el contacte amb l'aire. El seu emmagatzemament i transport al laboratori es realitzà en ampolles de polietilè que es mantingueren a 4°C, acidificades i filtrades. La determinació dels valors de pH, Eh,

² Aquesta entitat fins al 1999 s'anomenava Junta d'Aigües de Catalunya. En endavant es referirà com a ACA.

conductivitat, concentració d'O₂, alcalinitat, nitrat, nitrit i amoni es realitzà *in situ*. L'aparell de mesura de pH i Eh ha estat l'Orion model 250A, el de l'oxigen el Orion model 810 i el conductímetre emprat ha estat el Crison 524. L'alcalinitat s'ha calculat per titració amb H₂SO₄ i els compostos de nitrogen s'han calculat per espectrofotometria.

Les mostres de precipitació (desembre 1996-actualitat) es recullen a la Fundació Mas Badia situada a la plana del Baix Ter a una altitud de 20 m. sobre el nivell del mar. Les anàlisis a aquestes mostres de precipitació s'han realitzat als laboratoris de la Universitat Autònoma de Barcelona (UAB) excepte els isòtops estables oxigen-18 i deuteri.

Els registres pluviomètrics utilitzats han estat diversos, tal i com s'ha indicat anteriorment, pertanyen a les xarxes del SMC i del INM. L'estació meteorològica de referència ha estat la de la Bisbal d'Empordà, gestionada pel Servei de Meteorologia de Catalunya i és la que compta amb les sèries de dades més completes (www.meteocat.es). No obstant, la ponderació dels valors isotòpics mitjans anuals s'ha realitzat amb les dades de precipitació corresponents a la mateixa estació de recollida de les mostres.

També s'ha disposat de les dades dels piezòmetres gestionats per l'ACA a la zona d'estudi i els registres dels cabals dels rius Onyar i Ter.

1.4.3- TASQUES DE LABORATORI

Els resultats de les anàlisis que es presenten en aquest treball han estat realitzats en diferents laboratoris.

- Als laboratoris de la UAB (Universitat Autònoma de Barcelona), s'estimaren d'acord amb els Standard Methods for Examination of Water and Waste Water (Greenberg *et al.*, 1992):
 - El Cl, F, Ca, Mg, SO₄ i duresa de les aigües subterrànies de les campanyes del 1996, 1997 i 2000. Els clorurs es calcularen mitjançant la tècnica de titració (amb nitrat de plata) de la primera derivada amb l'electrode de sulfur Thermo Orion 960

- Totes les dades hidroquímiques de les fonts picants durant el mostreig del període novembre 2000-juliol 2002.
- El contingut en triti de les mostres d'aigua subterrània, de la precipitació de Mas Badia i de Terrassa s'analitzà, en concret, al Servei de Datació per Triti de la Universitat Autònoma de Barcelona. L'anàlisi del contingut en triti s'hi realitza mitjançant enriquiment electrolític de la mostra i mesura de l'activitat en un comptador de centelleig líquid de baix fons (LKB-Quantalus).
- Als laboratoris de la UB (Universitat de Barcelona):
 - Elements majoritaris i minoritaris de les aigües subterrànies de les campanyes 1996, 1997 i 2000; mitjançant la tècnica de plasma d'inducció acoblat (ICP) en un aparell multicanal Thermo Jarrel Ash model 61E Polyscan, en condicions estàndard. S'ha calibrat amb 5 patrons preparats amb HNO₃ 1%.
 - Contingut isotòpic en oxígen-18 i en deuteri de les aigües subterrànies i de la precipitació de Mas Badia.
- Serveis analítics de la UAM (Universitat Autònoma de Madrid):
 - Dotació isotòpica en ¹³C de les aigües picants. Aquesta estimació s'ha realitzat en un espectròmetre de masses VGPrism.
- Laboratoris de la UPV/EHU (Universitat del País Basc)
 - Valor de la relació isotòpica ⁸⁷Sr/⁸⁶Sr. La cromatografia de l'Sr s'ha realitzat segons el mètode descrit por Pin i Bassin (1992) i les mesures s'han dut a terme en un espectròmetre de masses Finnigan MAT-262.

1.4.4- ANÀLISI DE LES DADES

En la tasca de tractament de les dades del medi es construí una base de dades integrada en un Sistema d'Informació Geogràfica (MiraMon©). La base cartogràfica es complementà amb la projecció geològica i la informació associada obtinguda de les publicacions geològiques de l'Institut Cartogràfic de Catalunya (www.icc.es). Les captacions i surgències referenciades en aquesta aplicació contenen les dades registrades durant la campanya de camp i de laboratori esdevenint doncs una eina cartogràfica georeferenciada digital per a consultes futures.

Aquesta base de dades es projectà sobre la cartografia geològica i es traçaren els mapes piezomètrics, els quals inclouen també els registres dels piezòmetres de l'ACA. En base a la bibliografia regional i al treball de camp, en l'estudi preliminar es reconegueren les diferents formacions hidrogeològiques, el seu potencial com a aqüífers i les relacions hidrodinàmiques entre aquestes formacions.

El tractament de les dades hidroquímiques del sistema s'ha realitzat a partir de l'ús de diferent software específic. Per a la classificació de les fàcies hidroquímiques s'ha disposat de AquaChem 3.7 (Calmbach, 1997) mentre que els càlculs dels índexs de saturació (SI) i balanços s'han realitzat mitjançant Phreeqc2 (Parkhurst i Appelo, 1999).

Per l'estudi estadístic de les dades s'ha utilitzat el programari STATISTICA 6.0 (Statsoft, 2001) i el tractament gràfic de les dades en general s'ha realitzat amb el SigmaPlot 6 (SPSS, 2000).