

HIDROLOGIA CÀRSTICA DE MALLORCA

KARST HYDROLOGY OF MALLORCA

A. BARÓN¹, C. GONZÁLEZ¹ & A. RODRÍGUEZ-PEREA²

Resum

Els aqüífers càrstics de Mallorca resulten d'importància essencial per a l'abastiment d'aigua de l'illa. Es poden distingir dos tipus d'aqüífers càrstics: els desenvolupats en materials dolomítics i calcaris del Juràssic inferior i els que es troben en els dipòsits tabulars del Miocè superior. Els primers representen materials fortament aixecats i estructurats on es presenta freqüentment una doble permeabilitat, que registra una circulació a través de grans cavitats i/o de petites fissures. Els aqüífers càrstics del segon tipus s'estenen sobre dipòsits subhorizontals, lleugerament aixecats i amb una intensa relació amb les oscil·lacions del nivell de la mar.

Abstract

Karstic aquifers of Mallorca are of vital importance for the water supply of the island. Two types have been distinguished: the first one corresponds to greatly structured and folded dolomites and limestones, early Jurassic in age, which usually develop a double permeability characterized by flows both through large karst conduits and through small fissures. The second type of karst aquifers develops in tabular upper Miocene deposits gently structured and uplifted, located in the coastal zones in southern Mallorca.

Introducció

A Mallorca les roques carbonatades representen la majoria dels materials aflorants; fins i tot els dipòsits terrígens estan freqüentment constituïts per fragments de litologies calcàries. Així, les dolomies i les calcàries formen bona part de la seqüència estratigràfica des del Triàsic mitjà al Miocè mitjà.

Les aigües subterrànies constitueixen la quasi totalitat dels recursos hídrics de Mallorca i encara que molts dels aqüífers es troben en els reblliments de les conques terciàries i quaternàries, bona part de les aigües provenen d'aqüífers càrstics. Així doncs, l'estudi de la hidrologia subterrània és d'importància capital per a la gestió dels recursos hidràulics de Mallorca.

Introduction

Carbonate rocks are one of the best represented lithologies outcropping in Mallorca. Limestones and dolomites built up the Majorcan stratigraphy from middle Triassic up to middle Miocene, moreover many of the terrigenous sediments are also formed by carbonate components. The island's water supply comes mainly from the underground and, although many of the water wells are located in the terrigenous filling of the Tertiary basins, the karstic reservoirs of the island are of essential importance.

Hydrology of karst terrains

Knowledge of karst hydrology has increased so much in the last years that many of the mysteries and legends dealing with karst and water in Mallorca, which have lasted throughout decades, could be explained nowadays in a scientific way. The

1 Secció d'Estudis. Junta d'Aigües de Balears. Palma de Mallorca.

2 Departament de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Ctra de Valldemossa km 7,5. E-07071 Palma de Mallorca.

Hidrologia dels terrenys càrstics

El coneixement de la hidrologia càrstica ha avançat suficientment en els darrers anys, per esbrar amb explicacions científiques els misteris i les llegendes que durant molts d'anys han envoltat el món de les aigües subterrànies. El desenvolupament del carst per la circulació de l'aigua que s'infiltra dins les roques carbonatades és ben conegut i depèn de molts de factors (Figures 1 i 2) entre els que destaquen la disposició estructural, la topografia, el clima, l'estratigrafia i la hidrologia (LA MOREAUX & POWELL, 1963).

development of karst as well as water circulation and storage in carbonate rocks are related to structure, topography, climate, stratigraphy and hydrogeology as well as other factors (LA MOREAUX & POWELL, 1963) (Figures 1 and 2).

The structural setting defines both the volume of rock capable of being karstified as well as their spatial arrangement. The first parameter is not independent from the second and both have to be correlated with the other factors; neither of them is totally independent from the others. In fact, carbonate rocks have to be removed from their depositional setting—where they cannot be dissolved effectively—to a new emplacement where enough water rich in carbon dioxide is available to get through the carbonate unit.

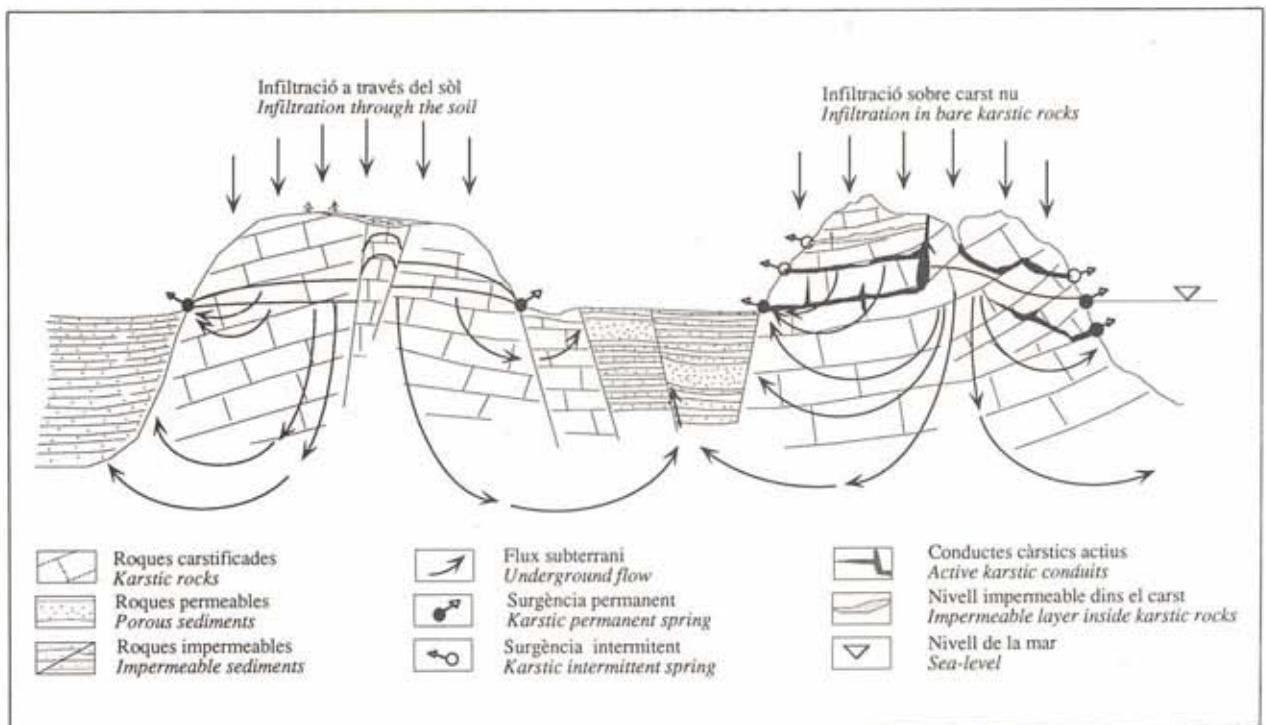


Figura 1: Diagrama esquemàtic de la infiltració i de la circulació subterrània en les àrees càrstiques. Modificat de BABUSHKIN *et al.* (1975).

Figure 1: Schematic diagram of infiltration and groundwater circulations in karstic areas. Modified from BABUSHKIN *et al.* (1975).

La disposició estructural defineix tant el volum de roca disponible per ésser carstificat com la seva disposició espacial. El primer paràmetre no és independent del segon, i al seu torn, tots dos estan interrelacionats amb molts altres factors; cap d'ells és absolutament independent. De fet, per a ser carstificades, les roques calcàries han de ser desplaçades del seu lloc de deposició —a on no poden ser dissoltes de forma efectiva— i situades en un nou emplaçament, a on es disposi de suficient aigua enriquida en diòxid de carboni per circular al seu través.

D'acord amb LE GRAND & LA MOREAUX (1975), es poden distingir tres categories d'aqüífers en relació a la seva disposició estructural: a) aquífers amb aixecament estructural suau o baixada del nivell

According to LE GRAND & LA MOREAUX (1975), there are three main categories of rising the carbonate rock from their depositional setting: a) gently structural uplifting or lowering of sea level; b) great structural uplifting; c) arching and erosion of the clastic cover. As we will describe later, the first and the second case applied quite accurately to some of the hydrologic units of Mallorca. The degree of karst activity is related to the importance of the uplift; it provides the potential energy that the water needs to move through the rock.

The dissolving potential of the carbonates correlates, among other factors, with the total amount of water that flows through the rock unit; thus, the uplift results in an increase of the water circulation

mari; b) aqüífers amb un gran aixecament estructural; i c) aqüífers per abombament i erosió de la seva cobertura. El grau d'activitat càrstica és proporcional, entre d'altres, a l'aixecament que hagin sofert les roques carbonatades, ja que aquest aixecament proporciona la diferència de nivell hidràulic —energia potencial— necessària per desenvolupar el carst. Tal i com descriurem més endavant, els aqüífers mallorquins s'adapten molt bé a les dues primeres categories.

D'igual forma, la potencialitat de dissolució dels carbonats depèn, entre altres factors, de la quantitat d'aigua que circula a través de la unitat carbonatada; així, l'aixecament estructural provoca un increment de la circulació d'aigües que inicia o augmenta la dissolució dels carbonats.

La topografia és un altre dels factors el qual, igual que la disposició estructural, condiona tant les zones de recàrrega de les unitats carbonatades, com les àrees de descàrrega. El potencial hidràulic depèn de fet, de la relació entre la topografia i la disposició estructural. L'encaixament de la xarxa fluvial proporciona el nivell de base de la descàrrega als tàlvegs principals; no obstant, és prou freqüent que hi hagi una certa circulació i dissolució per davall dels col·lectors principals.

No existeix una relació simple entre l'extensió dels afloraments carbonatats i el desenvolupament dels sistemes càrstics (Figura 1). Possiblement existeixen altres factors determinants, entre els que el factor temps resulta d'importància capital.

La permeabilitat és també un factor que determina el règim hidràulic dels aqüífers càrstics. El seu desenvolupament depèn, entre altres paràmetres, de la solubilitat de la roca, de la precipitació, la presència d'àcid carbònic (molt influenciada per l'existència de cobertura edàfica i per la vegetació), la porositat i la càrrega hidràulica. Els afloraments de roques carbonatades nues, sense cap tipus de cobertura, tendeixen a ser més resistents que els coberts pel sòl, tant a l'erosió física com a la química.

Les morfologies càrstiques no sols registren l'evolució del sistema càrstic, si no que també reflecteixen la seva permeabilitat i els elements més dinàmics de l'aqüífer càrstic. Les cavitats càrstiques tendeixen a desenvolupar-se aigües amunt tot i eixamplant-se, amb lo qual poden ser capturats els canals més petits de les zones altes del sistema. Les dolines, uvals o altres formes càrstiques semblants reflecteixen un descens de la superfície topogràfica que desplaça avall el nivell freàtic incrementant així la permeabilitat. Els diversos estadis a través dels que es desenvolupa un sistema càrstic influeixen molt clarament l'evolució de la permeabilitat. Les cavitats càrstiques es formen en relació amb el nivell freàtic local, però al descendir aquest queden desplaçades a la zona vadosa.

La presència de nivells edàfics i/o recobriments sedimentaris poc solubles damunt les unitats carbonatades, augmenta de forma important el desenvolupament

and as a consequence it starts or increases karst activity.

Topography, as well as structural setting, defines both the recharge and discharge areas of the carbonate units. Hydraulic head is also dependent on topography as much as on the structural setting. The stream incision provides excellent discharge opportunities in the river valleys although some circulation and solution would take place well below the level of the major streams.

There is not a simple relationship between the extent of the carbonate outcrops and the development of the karst system (Figure 1). Other factors like time will surely influence this development.

Permeability is also a factor that defines the hydraulic regime of karstic aquifers. Its development is a function of the rock solubility, precipitation, presence of carbonic acid (highly conditioned by the presence of soil cover and vegetation), rock porosity and hydraulic head. Bare carbonate rocks tend to be more resistant to physical and chemical erosion than soil-covered carbonates do.

Karstic morphologies not only record the karst history, they also reflect the permeability evolution of the karst system and the dynamic features of the karst aquifer. Karst cavities will develop in an upstream direction as they enlarge, leading to piracy on small solution channels. Morphologies like dolines and uvalas record a lowering of the upland topography, which place the water-table well below the land surface and increase the permeability. Stages in the development of karst are closely related to the development of permeability. Karstic subhorizontal caves form mainly at the phreatic level, but they will be placed in the vadose zone as the local water-table is lowered.

The presence of soil and/or a less soluble sedimentary cover on top of the carbonate units greatly increases the development of dolines or other subsuperficial karst features. They reduce the water run-off and increase both the vertical percolation and the water corrosion potential.

The relationship between recharge and discharge zones conforms a pattern which defines the setting and extent of the solution channels. When discharge takes place along a straight line, lateral channels tend to be parallel to each other and at a right angle to the line of discharge. Coastal discharges are dominated by the influence of sea-level changes. Lower Pleistocene base levels determine the presence of large caves nowadays flooded by sea water.

Water-tables are quite complex in karstic zones. As the carbonate rocks are almost impermeable, local water-tables will show a discontinuous pattern. Perched water-tables are also frequently present in karstic units; they record the fragmentation of karst aquifers. Variation in the recharge would also produce very rapid changes of the water-table.

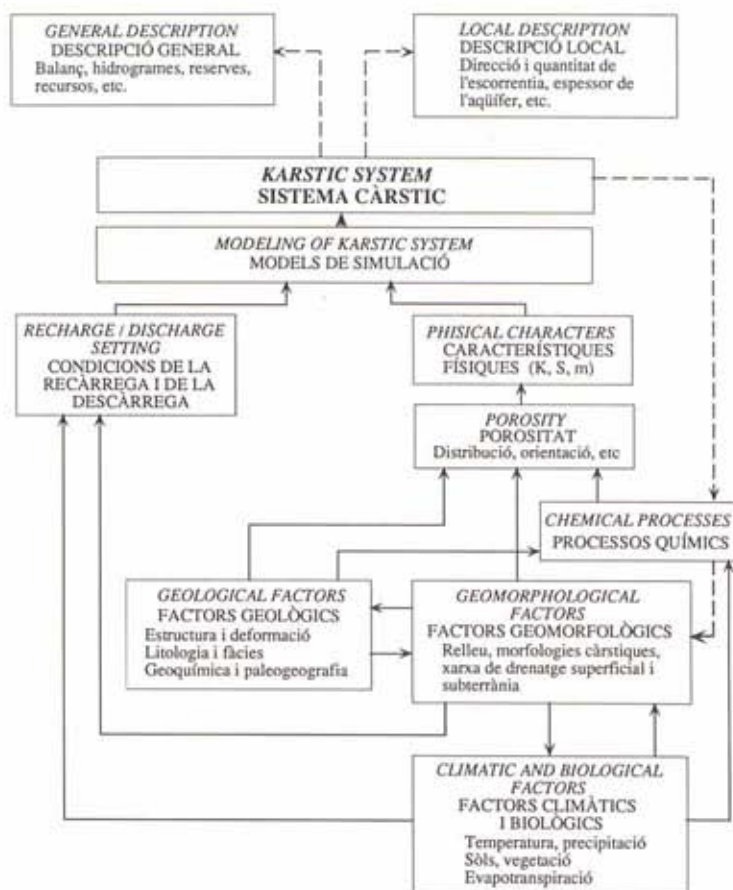


Figura 2: Esquema dels factors que condicionen el desenvolupament dels aqüífers càrstics i de les seves relacions. Modificat de KIRALY (1975).

Figure 2: Scheme of factors conditioning the development of karstic aquifers and their respective relationships. Modified from KIRALY (1975).

pament de dolines o altres morfologies càrstiques subsuperficials. Aquest fet s'explica perquè aquests recobriments disminueixen l'escorrentia superficial i incrementen la percolació vertical, augmentant el potencial corrosiu de l'aigua.

Els models de la distribució i de l'extensió dels canals de dissolució responen a la relació entre les zones de recàrrega i de descàrrega. Quan la descàrrega té lloc al llarg d'una línia més o menys recta, els canals de dissolució laterals tendeixen a distribuir-se paral·lelament entre si i perpendiculars a la línia de descàrrega. Les descàrregues que tenen lloc a la zona costanera són plenament controlades per la influència dels canvis en el nivell de la mar; així, els nivells de base del Pleistocè inferior determinen la presència de grans cavitats que es troben avui en dia inundades per l'aigua marina, en trobar-se el nivell de la mar actual clarament per damunt d'aquells nivells pleistocènics.

La disposició dels nivells freàtics dels sistemes càrstics és bastant complexa. Degut a que les roques carbonatades són pràcticament impermeables, els nivells freàtics locals poden presentar-se de forma discontinua; amb freqüència existeixen nivells freàtics penjats que reflecteixen la fragmentació dels aqüífers càrstics. Endemés, les variacions en les recàrreges dels aqüífers càrstics poden produir canvis ràpids dels nivells freàtics. Els canvis estacionals modifiquen també les piezometries i poden arribar a modi-

Seasonal variations change piezometries that would even affect the flow direction. Analysis of the water-table fluctuation would indicate the degree of variations of the karst permeability.

Another of the main parameters dealing with the study of karstic circulation is the streamflow analysis. Run-off waters are closely influenced by the permeability variations of karst terrains. Mature karst areas show very high permeable surface landforms which lead to place water-table well below the topographic surface; in this situation run-off and stream density tend to be very low. The main streams of these areas are mainly fed by karstic waters and they could flow higher than their water-tables. Peak-flows produced in zones with a well developed karst are usually lower than those taken place in non karstic areas; the rain-water infiltrates in great percentages and it runs slower than on the surface, thus, it takes more time to reach the main stream, smoothing the discharge. Moreover, waters from the major trunk stream might flow to lateral caves diminishing their flux.

The high permeability that characterizes most of the karstic zones also reduces the spring density. Most of the underground streams end down as big springs at the level of the major stream. In turn, major streams will act both as a discharge of the karstic network and as a recharge of the water-table when it is depressed below the stream-level. Streamflow

ficar fins i tot la direcció del flux. En aquest sentit, l'anàlisi de les fluctuacions del nivell freàtic ens pot indicar el grau de variació de la permeabilitat del sistema càrstic.

Un altre dels paràmetres importants per a l'estudi de la circulació dins els sistemes càrstics és l'anàlisi dels fluxos superficials. Les aigües d'escorrentia superficial estan fortament influenciades per les variacions en la permeabilitat dels terrenys càrstics pels que circulen. Els sistemes càrstics que han adquirit una certa maduresa presenten superfícies d'una alta permeabilitat, la qual cosa fa que els diversos nivells freàtics es trobin força enfonsats en relació a la superfície topogràfica; en aquesta situació l'escorrentia superficial i la densitat d'afluents acostumen a ser molt baixes. Els corrents principals d'aquestes zones es nodreixen fonamentalment d'aigües procedents del sistema càrstic i poden situar-se bastant per damunt dels seus nivells freàtics. Els cabals-punta que es produeixen en aquestes àrees solen estar per davall dels que tenen lloc a les zones equivalents que no presenten característiques càrstiques. Això és així degut a que l'escorrentia superficial s'infiltra ràpidament i en percentatges molt elevats, i després flueix més lentament en relació a com circularia en superfície, per dins del carst; per tant, en emprar més temps en el seu recorregut, suavitzava la punta de descàrrega. Més encara, les aigües de la descàrrega del col·lector principal poden derivar-se vers cavitats laterals disminuint el flux dels cabals de la revinguda.

L'elevada permeabilitat que caracteritza la major part de les zones càrstiques també té com efecte el reduir la densitat d'afluents. Molts dels cursos subterranis acaben en forma de grans surgències situades a nivell del col·lector principal. D'aquesta forma, aquests col·lectors actuen tant com una zona de descàrrega per al sistema càrstic, com recarregant el mateix sistema quan el nivell freàtic es troba per davall del nivell del col·lector. En aquest darrer cas, el cabal en superfície disminueix com a conseqüència de la infiltració, mentre que en el primer supòsit augmenta per efecte de les aportacions d'aigües provinents del sistema càrstic. Els canvis en el flux tendeixen a correlacions positives amb els contactes litològics entre els terrenys càrstics i els que no ho són.

De totes maneres, no sols els cabals augmenten o disminueixen en relació al tipus de circulació càrstica i a la seva extensió, també ho fan les conques de drenatge superficial. D'altra banda, les modificacions, tant artificials com naturals, dels sistemes de drenatge, tant superficials com subterranis, afecten al seu torn al desenvolupament del sistema càrstic.

Unitats hidrològiques càrstiques de Mallorca

Els caràcters fisiogràfics, climàtics, litològics i estructurals de Mallorca defineixen almenys tres unitats

would then decrease as a consequence of infiltration or increase by the output of the karst circulation; streamflow changes tend to correlate with rock boundaries between karst and non karst terrains.

Nevertheless, as well as the streamflow, catchment areas of the surface streams would be enlarged or reduced by their relationship with the extension and the pattern of karst circulation. On the contrary, artificial or natural modifications of the surface or underground drainage system would affect the development of karstic environment.

Karst hydrologic units of Mallorca

Lithology and topography of Mallorca define at least three main karstic hydrologic units. Two of them —Serra de Tramuntana and Serres de Llevant— are characterized by a relatively high relief and faulted and folded Mesozoic limestones. The third unit —Les Marines— corresponds to raised coastal plains of Tertiary carbonates. The recharge of Mesozoic carbonates comes mainly from rainfalls, that reach up to 1,200 mm per year in the central part of Serra de Tramuntana; the discharge of these units goes both to the sea and to the detrital basins of the island, as well to Les Marines units. In turn, Les Marines units recharge from Serres de Llevant and from precipitation, while their discharge takes place to the sea.

Those units are entrenched by ephemeral streams which could reach very high peak-flows from time to time. Some of the main streams show a karstic development and could be called canyons. Autumn rain storms are mainly responsible for these extreme rainfalls attaining more than 200 litres per hour; they lead to peak-flows up to 1,500 cubic metres per second, even though drainage basins are usually small, reaching only some tens of square kilometres (GRIMALT & RODRÍGUEZ-PEREA, 1990).

Serra de Tramuntana units

Serra de Tramuntana is a mountain range, running from SW to NE, that builds the NW side of Mallorca. It is 90 km long and 15 km wide and its peaks rise to 1,445 m in the central part of the range. The drainage pattern of the Serra shows subsequent streams running onto the thrust edges and the syncline structures and converging to antecedent canyons, that end towards the sea on the NW side of the range, and to the central plains of Mallorca, on the SE side.

Carbonate rocks form most of the stratigraphy of Serra de Tramuntana. Dolomites build up the middle Triassic and the lowermost Jurassic, and limestones

hidrològiques de tipus càrstic. Dues d'elles —la Serra de Tramuntana i les Serres de Llevant— es caracteritzen per un relleu relativament enèrgic i una estructura geològica dominada per làmines encavalcants formades principalment per carbonats mesozoics. La tercera unitat —les Marines— correspon a plataformes tabulars, subhorizontals i aixecades, formades per calcàries i calcarenites terciàries i quaternàries. La recàrrega dels carbonats mesozoics es produeix principalment per la infiltració de l'aigua de pluja (les precipitacions arriben als 1.200 mm per any en la part central de la Serra de Tramuntana); la descàrrega d'aquestes unitats es produeix vers la línia de costa o vers les unitats veïnes (les unitats de les Marines i les conques detrítiques). En les unitats de les Marines la recàrrega es produeix per aportacions dels fluxos que provenen de les Serres de Llevant i per infiltració de la pluja, mentre que les descàrreges es produeixen a la mar.

Totes aquestes unitats es troben solcades per torrents en els que periòdicament es produeixen revingudes amb cabals punta força elevats. Alguns d'aquests torrents mostren caràcters càrstics que permeten considerar-los com a canyons. Les tempestes, que tenen lloc principalment a la tardor, són les causants de les principals revingudes ja que arriben a intensitats horàries superiors als 200 litres. En aquestes circumstàncies es poden produir puntes de revingudes superiors als 1.500 m³/s (GRIMALT & RODRÍGUEZ-PEREA, 1990), fins i tot a conques relativament petites d'unes poques desenes de quilòmetres quadrats.

Unitats de la Serra de Tramuntana

La Serra de Tramuntana és la serralada que orientada de SW a NE conforma el costat nord-occidental de Mallorca. Assoleix uns 90 km de longitud, la seva amplària mitjana és d'uns 15 km i arriba a elevacions de 1.445 m a la seva part central. La xarxa de drenatge de la Serra de Tramuntana presenta cursos conseqüents, els quals segueixen les estructures plegades i les traces dels encavalcaments fins a convergir en torrents anteriors que desaiçuen a la mar, en els vessants NW, i a les conques centrals de Mallorca en els vessants del SE.

Les litologies predominants a la Serra de Tramuntana són carbonatades. Les dolomies hi són presents al Triàsic mitjà i la part més baixa del Juràssic, mentre que les calcàries formen bona part del Lias i parts dels dipòsits del Dogger, del Malm i del Cretàcic; l'Eocè i el Miocè també estan representats amb alguns nivells carbonatats, mentre que l'Oligocè és margós i conglomeràtic. No obstant, els aqüífers càrstics de la Serra de Tramuntana es desenvolupen majoritàriament sobre les calcàries liàsiques; aquests

formen la Liassic and some of the Dogger and Malm deposits; Eocene and Miocene rocks are also represented, as well as the Oligocene conglomerates. In spite of that, lower Jurassic limestones build up most of the karst aquifers of Serra de Tramuntana; they reach more than 300 m in thickness and build most of the thrust sheets and folds of this mountain range. Many of these structures dip towards the SE and, as a consequence, the water circulation and discharges mainly take this direction. Impervious layers are formed by shales, marls and gypsum, late Triassic in age.

The complexity of the structure, that compartmentalizes the carbonate units in small pieces, results in a broad number of karstic hydrologic units. Some of them are too small for water exploitation purposes, others are very complex; so, few of them —Na Burguesa, fonts de la Vila i de na Pere, S'Estremera, fonts de Sòller, Sa Costera, Ses Ufanés de Gabellí and S'Almadrava— have been described nowadays (BARÓN & GONZÁLEZ, 1987) (Figure 3).

Na Burguesa unit is situated in the SW of Serra de Tramuntana, close to the city of Palma. Its area of recharge extends along 40 km² and corresponds to the SE limb of an asymmetrical anticline formed by limestones and dolomites early Jurassic in age. Infiltration has been estimated between 25 to 30 % of the rainfall (480 mm/year) which indicates an average of 5.5 hm³/year. The discharge of this unit takes place towards the Palma quaternary basin and to the sea, but, from the seventies, the heavy pumping for Palma's water supply brought the aquifer to a progressive saline intrusion. A conspicuous karst system outcrops on the SE side of the unit; it shows very large cavities, some of them placed in a rubbly dolomitic breccia very poorly cemented. Transmissivity tests show figures of 1,000 m²/day.

Fonts de la Vila i de na Pere unit is located on the Southeast side of Serra de Tramuntana, northwards of Palma. It is formed by limestones and dolomites from middle Triassic to lower Jurassic, placed in a complex structural setting that could be considered, in a broad sense, as an anticlinorium bordered by faults. The recharge of this unit comes mainly from the precipitation over 30 km² of carbonatic outcrops. According to the discharge data, the circulation of water through the unit is not simple. Discharge takes place by two big fault springs, one of them —Font de la Vila— is being used for Palma's supply and the other —Font de na Pere— is still used for irrigation. Figures from the outflow of Font de la Vila spring suggest the presence of a double permeability, one coming from a well-developed karst system of great permeability and another, less permeable, located below the first one. Discharge from the first system only correlates with the highest rain events, whereas

dipòsits presenten potències pròximes als 300 m i s'estructuren en diversos plecs i en làmines encavalcants. El cabussament principal de les estructures és vers el SE i, com a conseqüència, la circulació subterrània i les principals descàrregues es produeixen en aquesta direcció. Els nivells impermeables estan formats per les argiles, margues i guixos del Triàsic superior.

La complexitat estructural de la Serra compartimenta les unitats carbonatades en peces més petites, de les que resulten un gran nombre de subunitats hidrològiques de característiques càrstiques. Algunes d'elles són massa petites per a una explotació hidròlica de consideració, d'altres són extremadament complexes i no han estat estudiades fins ara; no obstant, algunes són prou conegudes i representen una part molt important dels recursos hidràulics de Mallorca. Entre elles descriurem les de *na Burguesa*, *les fonts de la Vila i de na Pere*, *s'Estremera*, *les fonts de Sóller*, *sa Costera*, *ses Ufanes de Gabellí* i *s'Almadrava*, seguint a BARÓN & GONZÁLEZ (1987) (Figura 3).

the second system presents a more continuous but less important circulation. A continuous pumping of water from wells close to Font de la Vila has depressed the water-table and reduced its discharge to a minimum.

S'Estremera unit is located on the southern side of the central part of Serra de Tramuntana. It is one of the most important aquifers for the supply of water for the city of Palma, and has been heavily pumped since 1974. The geologic structure of this unit is quite complex: it could be described as two thrust sheets facing the NW and slightly tilted towards the SE; the lower thrust sheet is built up by dolomites and limestones early Jurassic in age, whereas the upper one is formed by marly limestones, dolomites and limestones from the upper Triassic to the Liassic. The overlapping of the thrust sheets occurs in the southern part of the unit and is marked by the outcrop of shales and marls with gypsum, late Triassic in age. Thus, the hydrology of the unit does not correspond

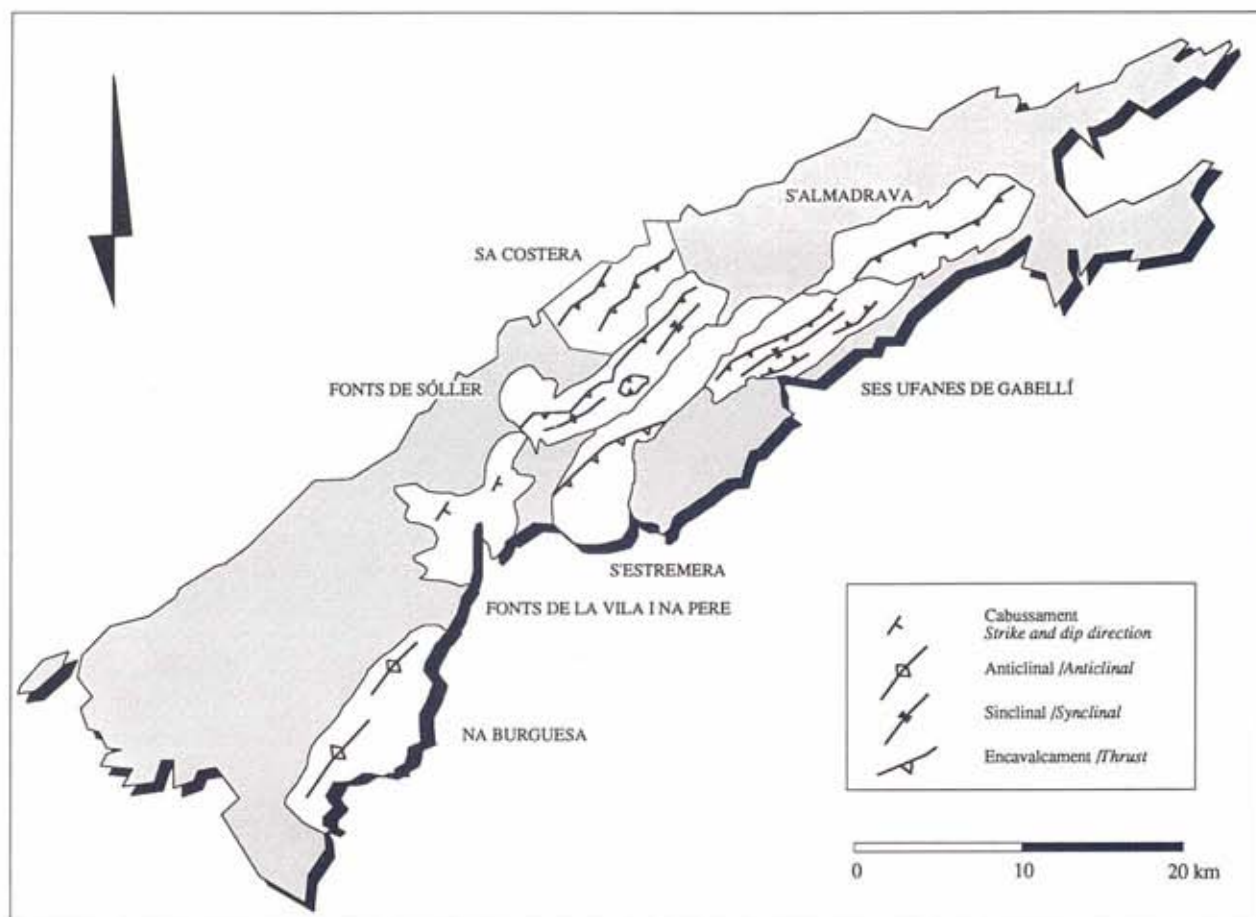


Figura 3: Unitats hidrològiques càrstiques de la Serra de Tramuntana, segons BARÓN & GONZÁLEZ (1987). Vegeu la Figura 6 per a la situació d'aquesta àrea geogràfica.

Figure 3: Karstic hydrologic units of Serra de Tramuntana, after BARÓN & GONZÁLEZ (1975). See Figure 6 for location.

La unitat de na Burguesa es localitza al SW de la Serra de Tramuntana, en les proximitats de la ciutat de Palma. La seva àrea de recàrrega s'estén al llarg

to a single aquifer: the water-table of the lower thrust sheet is located up to 300 m higher than the one of the upper thrust sheet. Moreover, transmissivity of the

d'uns 40 km², i ocupa el flanc SE d'un anticlinal asimètric format per calcàries i dolomies del Juràssic inferior. La infiltració s'estima entre un 25 i un 30 % de la pluja (480 mm/any) el que significa un total d'uns 5,5 hm³/any. La descàrrega tenia lloc vers la conca de Palma i a la mar; no obstant, l'intens bombeig a que ha estat sotmès aquest aquífer per a l'abastiment de Palma des dels anys setanta, ha produït una salinització progressiva de la unitat. A l'extrem NE d'aquesta unitat, el sistema càrstic de na Burguesa es presenta per mitjà de cavitats obertes a la superfície i excavades en bretxes dolomítiques sense matriu i poc cimentades. Les proves de transmissivitat donen valors força elevats pròxims als 1.000 m²/dia.

La unitat de les fonts de la Vila i de na Pere se situa al sud-est de la Serra de Tramuntana, al nord de la ciutat de Palma. Està constituïda per calcàries i dolomies del Triàsic mitjà i del Lias inferior. Estructuralment constitueixen una estructura complexa, que a grans trets conforma un monoclinal cabussant al SE i limitat per fractures. La recàrrega es produeix principalment per infiltració de la pluja sobre uns 30 km² d'afloraments carbonatats. Les dades de la descàrrega tradueixen un funcionament hidràulic relativament complex: en efecte, la descàrrega es produeix a través de dues surgències càrstiques relacionades amb les fractures que limiten la unitat. La primera —la Font de la Vila— es ve utilitzant per a l'abastiment de Palma, mentre que la segona —la Font de na Pere— s'utilitza per al reguiu. Els registres de les sortides de la Font de la Vila suggereixen la presència d'una doble permeabilitat en la unitat; aquest fet podria explicar-se per l'existència d'un aquífer doble: un superior, en el que se situaria un sistema càrstic ben desenvolupat, i un altre, inferior, molt menys permeable. La descàrrega del nivell superior es correlacionable amb els episodis de pluja més intensos, mentre que la del nivell inferior donaria lloc a una circulació menys important, però més contínua. El bombeig continuat de la Font de la Vila ha provocat un descens molt important del seu nivell piezomètric que redueix les seves descàrregues al mínim.

La unitat de s'Estremera està situada en el vessant meridional de la part central de la Serra de Tramuntana. S'Estremera és un dels aquífers més importants per a l'abastiment de Palma de Mallorca, i ha estat intensament explotat des de 1974. La seva estructura geològica és força complicada i pot ser descrita com formada per dues làmines encavalcants al NW i lleugerament basculades vers el SE; la làmina encavalcant inferior està formada per dolomies i calcàries liàsiques, mentre que la superior presenta dolomies, calcàries i margocalcàries d'edats que van del Triàsic superior al Cretàcic. Les argiles i les margues amb guixos del Triàsic superior assenyalen, en la part sud de la unitat, la superposició de les dues làmines. Ai-

upper thrust sheet aquifer is exceptionally high (50,000 m²/day). Some perched aquifers also exist. The recharge of the unit comes from the infiltration of the rainfall (27 %) over 44 km² of carbonatic outcrops, whereas the discharge takes place by karstic springs (about 10 %) and by pumping for Palma's supply. Before the seventies some underground discharges are supposed to have taken place towards the Palma basin through a fault boundary; nowadays, the continuous pumping keeps the water-table well below this boundary and the discharge does not occur any more.

Fonts de Sóller unit is located in the central part of Serra de Tramuntana, northwards of S'Estremera unit. Its extension reaches 46 km² of permeable carbonate outcrops. It is formed by dolomites and limestones from the upper Triassic to the Cretaceous; they conform a complex structure described as a hangingwall anticlinal and synclinal set. Although some perched aquifers exist, this unit could be considered as a single aquifer; recharge takes place through rainfall infiltration (25 %) and discharge by several karstic springs.

Sa Costera unit is located on the northern side of the central part of Serra de Tramuntana, North of Sóller. Although their limits are not known precisely, it is defined by a big karstic spring (Font des Verger) that has a very rapid response to the rainfall (more than 1,000 mm/year). Its outflow varies from 10 l/s up to 1,100 l/s in terms of hours. The catchment area of this unit shows one of the most spectacular karstic sceneries of Mallorca: karren fields are widely represented in the landscape, as well as a conspicuous joint system, dolines, pits, other karst depressions and canyons. Karstic circulation is not clearly understood, but according to the spring outflow regime and the almost absence of surface run-off, infiltration has to be extremely high (more than 50 % of the precipitation). Actually, the karst network almost replaces the surface drainage and the spring discharge has the same behaviour as a surface stream. The permanence of some outflow for long periods records the presence of a double permeability in the karstic system: large conduits collect the main circulation of the karstic network, whereas small fissures are responsible for the permanence of a residual discharge

Ses Ufanes de Gabellí unit is located on the southern side of Serra de Tramuntana, north-eastwards of S'Estremera. Its structure corresponds to a folded and faulted thrust sheet facing NW. Dolomites, dolomitic breccias and limestones from uppermost Triassic to lower Jurassic form the pervious lithologies of this unit. The recharge of this unit comes from the rainfall infiltration (up to 37 % of a precipitation close to 1,000 mm/year) on 43 km² of

xí, la hidrologia de s'Estremera no correspon a la d'un únic aquífer: el nivell freàtic de la làmina inferior es troba uns 300 m per damunt del de la làmina superior. Endemés, la transmissivitat de l'aquífer superior és excepcionalment alta (50.000 m²/dia) i existeixen diversos aquífers penjats. La recàrrega de la unitat es produeix a través de la infiltració (24%) de la precipitació que té lloc sobre uns 44 km² d'afloraments carbonatats. La descàrrega es produeix per algunes surgències (un 10%) i sobretot per un elevat bombeig. Amb anterioritat als anys setanta —quan encara no s'havia iniciat el bombeig intensiu— una part important de la descàrrega es produïa vers la conca de Palma a través d'un contacte tectònic; en l'actualitat el nivell freàtic es troba permanentment per davall d'aquest umbral i ja no hi ha lloc per aquesta descàrrega subterrània.

La unitat de les fonts de Sóller està localitzada en el vessant septentrional de la part central de la Serra de Tramuntana, al nord de s'Estremera. L'extensió dels afloraments carbonatats, on es produeix la seva recàrrega, arriba a uns 46 km². Està formada per calcàries i dolomies del Triàsic superior al Cretàcic, que conformen un conjunt anticlinal-sinclinal de bloc superior. La unitat és considerada com un aquífer únic, malgrat l'existència d'alguns aquífers penjats; la recàrrega es produeix per infiltració (25%) de la pluja i les descàrreges tenen lloc per diverses surgències.

La unitat de sa Costera es troba situada al vessant nord de la part central de la Serra de Tramuntana, al nord de Sóller. Encara que els seus límits no han estat clarament definits, pren el seu nom del paratge (sa Costera) on es localitza la Font des Verger, una surgència càrstica situada pràcticament al nivell de la mar i en una zona d'una gran pluviositat (més de 1.000 mm/any). La descàrrega de la Font des Verger es caracteritza per la ràpida resposta a la precipitació, amb variacions de cabal des de 10 l/s a 1.100 l/s en molt poques hores. La zona de recàrrega de la unitat de sa Costera mostra un dels paisatges càrstics més espectaculars de Mallorca: els camps de rellar són omnipresents arreu, juntament amb un sistema de diàclasi, avencs, dolines i alguns espectaculars canyons càrstics. La circulació de la unitat de sa Costera no és gaire coneguda, però les dades de la descàrrega de la font i la pràctica absència d'escorrentia superficial suggereixen una infiltració extremadament elevada (més del 50 % de la precipitació). En realitat, el sistema càrstic substitueix el drenatge superficial i la surgència presenta un comportament similar al d'un curs superficial. La permanència d'un cert cabal durant llargs períodes reflecteix la presència d'una doble porositat en el sistema càrstic: els conductes majors recullen la circulació principal, mentre que les fissures més petites són les responsables de l'existència d'una descàrrega residual.

permeable outcrops and the discharge is made through several karstic springs. One of them, Ses Ufanes that could be described as an overflow-spring, is responsible for most of the discharge (79 %) with maximum values of 20-30 m³/second. An underground discharge also exists, but the way it is made is not well understood yet. The lower carbonates of the unit show karst features filled with clays which lead to a low permeability. On the other hand, the upper parts of the unit have a large quantity of karst voids with a very high permeability that extends to tens of metres below the surface. This high permeability together with a small storage coefficient could explain the very fast response of Ses Ufanes spring to the rainfall (Figure 4); actually, there is not so much difference between the response from the surface waters and the discharge of this spring.

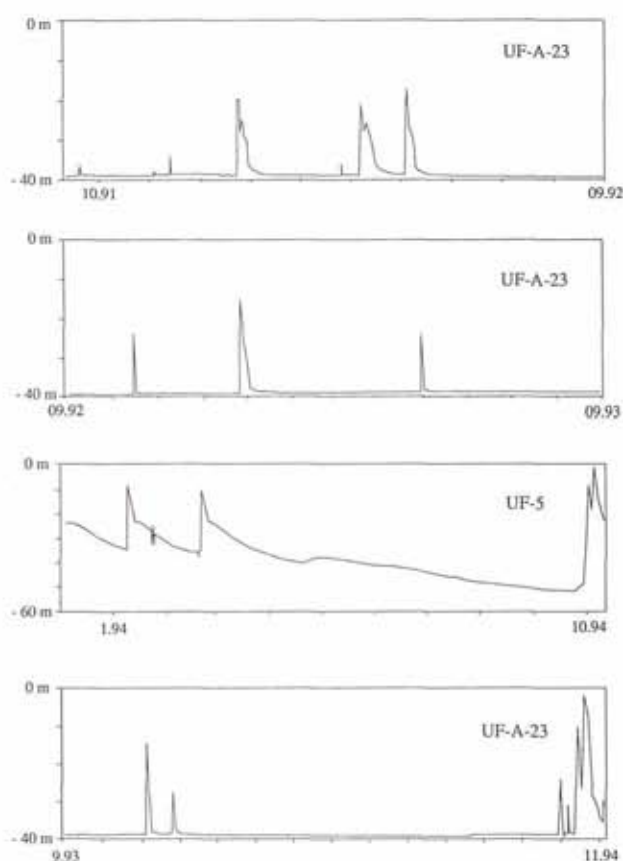


Figura 4: Variacions piezomètriques a la unitat de ses Ufanes.

Figure 4: Piezometric variations in Ses Ufanes unit.

S'Almadrava unit is located at the NE end of Serra de Tramuntana. It is built up by two thrust sheets facing the NW; their internal structure is made by slightly folded dolomites and limestones late Triassic to Cretaceous in age, plus calcarenites and marls from lower Miocene. The hydrology of this unit is poorly known and some problems still remain unsolved: the recharge takes place through a high

La unitat de ses Ufanos de Gabellí es localitza al vessant meridional de la Serra de Tramuntana, al nord-est de s'Estremera. Correspon a una estructura plegada encavalcant al NW. La seva litologia està formada per dolomies, bretxes dolomítiques i calcàries des del Triàsic fins al Juràsic inferior. La recàrrega de la unitat prové de la infiltració de les precipitacions (fins al 37% d'una pluja que arriba als 1.000 mm/any) sobre uns 43 km² d'afloraments carbonatats. La seva descàrrega té lloc a través de diverses surgències, entre les que destaquen les fonts de ses Ufanos que donen nom a la unitat. Es pot descriure aquesta font com una important surgència temporal que endemés és responsable de la major part de la descàrrega (79 %), la qual assoleix cabals màxims de 20-30 m³/segon. Encara que poc coneguda, existeix una altra part de la descàrrega que es produeix de forma subterrània. Els carbonats que conformen la part inferior de la unitat presenten fissures càrstiques reomplertes per argiles, per la qual cosa la seva permeabilitat és baixa; en canvi, la part superior presenta una porositat tipus caverna molt abundant, amb una permeabilitat molt alta que s'estén desenes de metres per davall de la superfície topogràfica. És aquesta permeabilitat la responsable d'una baixa capacitat d'emmagatzematge que explica, al seu torn, la resposta tan ràpida de ses Ufanos a la pluja (Figura 4); en realitat, no hi ha moltes diferències entre el comportament de la font i el que tendrien aigües d'escorrentia superficial equivalents.

La unitat de s'Almadrava se situa a l'extrem NE de la Serra de Tramuntana. Està formada per dues làmines encavalcants vers el NW de dolomies i calcàries del Triàsic superior al Cretàcic lleugerament plegades i per margues i calcarenites del Miocè inferior. La hidrologia d'aquesta unitat és poc coneguda i encara resten per resoldre diversos problemes. La recàrrega té lloc per una elevada infiltració (37%) sobre uns afloraments calcaris que ocupen uns 41 km², mentre que la descàrrega es produeix per la surgència de la Font de s'Almadrava. No es coneix com està connectada aquesta font amb la làmina encavalcant, encara que el volum de la descàrrega (17 hm³/any) requereix l'existència de la mencionada connexió. Endemés, l'aigua de la font es troba contaminada per clorurs d'origen marí (fins a 9.000 mg/l), desconeixent-se també el mecanisme necessari pel seu emplaçament. L'aqüífer càrstic es desenvolupa en la làmina més septentrional que cap el sud, en situar-se per davall de la làmina meridional, adquireix caràcters d'aqüífer confinat; tots dos presenten permeabilitat alta, encara que només hi ha dades de transmissivitat (de 5 a 200 m²/dia) per a l'aqüífer superior.

rainfall infiltration (37 %) over 41 km² of permeable outcrops, whereas the discharge is supposed to be made by the S'Almadrava spring. There is not an explanation for the way this spring is connected to the karstic aquifers developed in the thrust sheets, although the amount of the spring discharge (17 hm³/year) requires such connection; moreover, the water is highly contaminated by sea water chlorides (up to 9,000 mg/l) whose mechanism of emplacement still remains unknown. Karst aquifer developed in the northern thrust sheet seems to evolve to a confined aquifer below the southern sheet; both aquifers show a high permeability, but there are transmissivity data (5 to 200 m²/day) only for the upper one.

Serres de Llevant units

The Serres de Llevant is a mountain range that extends in a SW-NE direction in the eastern part of Mallorca. It is built up by highly structured Mesozoic and Tertiary rocks. Several thrust sheets form a range of hills and peaks characterized by small cliffs of Jurassic limestones and hilly areas of crushed dolomites early Jurassic in age, and thin bedded limestones and marls from middle Jurassic to Cretaceous. The main aquifers of Serres de Llevant are developed in the crushed dolomites, but their behaviour is similar to the isotropic aquifers and cannot be considered as a karstic unit. The Jurassic limestones thrust sheets show small and very compartmented karstic aquifers (Figure 5). Nevertheless, huge caves exist, like Coves d'Artà ones; some of them are located in the coastal zone, but their relationship with the present-day water-table or with mixing marine waters is not still clear. The recharge of these units comes from the rainfall infiltration and their discharge takes place by pumping and underground flux to the neighbour units, and to the sea.

Les Marines units

Les Marines units are formed by tabular calcarenites, calcisiltites and reefal limestones, upper Miocene in age, located in the southern parts of Mallorca (Marina de Lluçmajor, Marina de Migjorn and Marina de Llevant). They unconformably overlap the central part of Mallorca and the southern and eastern part of Serres de Llevant (Figure 6). At least in the inner parts of the unit, their behaviour is similar to an isotropic aquifer, but in the coastal zones, particularly in Marina de Llevant, an important karst network exists. Karstic cavities develop at the present-day phreatic level; some of them are located in the coastal zone and are flooded by sea-water,

Les unitats de les Serres de Llevant

Les Serres de Llevant constitueixen una alineació muntanyosa que s'estén de SSW a NNE al llevant de Mallorca. Estan formades per dipòsits mesozoics i terciaris deformats de forma prou complexa. Constitueixen un paisatge de turons i valls, estructurat per nombroses làmines encavalcants, de forma que les calcàries juràssiques defineixen els relleus més enèrgics i les dolomies trinxades del Lias inferior els més suaus, mentre que les valls es conformen damunt les margocalcàries del Juràssic mitjà al Cretàcic. Els principals aqüífers de les Serres de Llevant es desenvolupen en les dolomies trinxades, però el seu comportament hidrològic és similar al d'un aqüífer isotròpic, pel que no poden ser considerats com a aqüífers càrstics. Les làmines encavalcants amb calcàries juràssiques es presenten com aqüífers calcàris poc extensos i molt compartimentats (Figura 5). No obstant, localment existeixen grans cavitats —com les Coves d'Artà— localitzades prop de la costa, encara que les seves relacions amb el nivell freàtic i el nivell de la mar no són prou conegudes. La recàrrega de les unitats de les Serres de Llevant es produeix per infiltració de la precipitació, mentre que la descàrrega té lloc per bombeig i fluxos subterranis a la mar i a les unitats veïnes.

Les unitats de les Marines

Les Marines estan formades per dipòsits tabulars de calcarenites, calcilitites i calcàries esculloses del Miocè superior que es localitzen bàsicament en les parts meridionals de Mallorca (Marina de Lluçmajor, Marina de Migjorn i Marina de Llevant). Aquests dipòsits es disposen discordantment damunt les parts centrals de l'illa i damunt els vessants oriental i meridional de les Serres de Llevant (Figura 6). El seu comportament hidrològic és similar als aqüífers isotròpics en les parts més llunyanes de la costa; en canvi, al litoral, en especial a les Marines de Migjorn i de Llevant, s'han desenvolupat importants sistemes càrstics. Les cavitats més espectaculars —algunes com les Coves del Drac i les Coves des Hams, amb un elevat interès turístic— es troben situades al nivell freàtic actual i algunes d'elles han estat inundades per la mar; no obstant això, no està suficientment aclarida la influència de la zona de mescla sobre el desenvolupament de les cavitats. Tot el que pot dir-se és que durant el Quaternari en aquestes cavitats han predominat els processos de precipitació; també s'han detectat processos de dissolució però de molt menor importància. La recàrrega d'aquestes unitats prové tant de la infiltració de la pluja com de les aportacions de les unitats veïnes; la descàrrega es produeix per bombeig i per sortides a la mar.

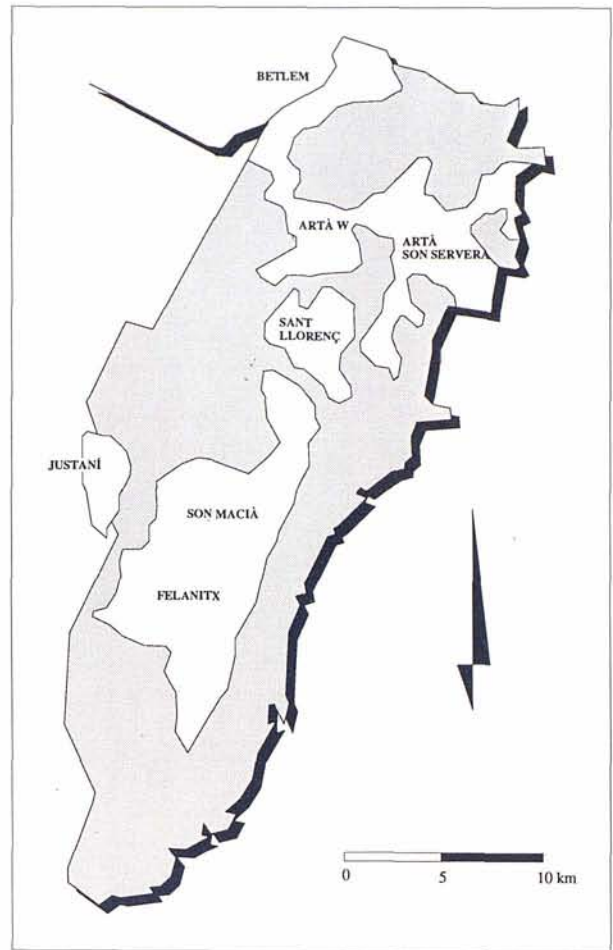


Figura 5: Unitats hidroliques càrstiques de les Serres de Llevant. Vegeu la Figura 6 per a la situació d'aquesta àrea geogràfica.

Figure 5: Karstic hydrologic units of Serres de Llevant. See Figure 6 for location.

having a great interest as a touristic resort (Coves del Drac, Coves des Hams). The influence of the mixing zone between continental and marine waters is not clear concerning the development of karst system; although dissolution events have been recorded, carbonate precipitation seems to be the main process during their Quaternary history. The recharge of these units comes partially from the rainfall infiltration and partially from the underground flux of the neighbour units; the discharge takes place by pumping and towards the sea.

Conclusions

Mallorca's karst hydrology has an enormous importance in the water supply of the island. Many of the main aquifers are of karst origin and the major rainfall episodes infiltrate into them. Two types of karst aquifers may be distinguished: the first type

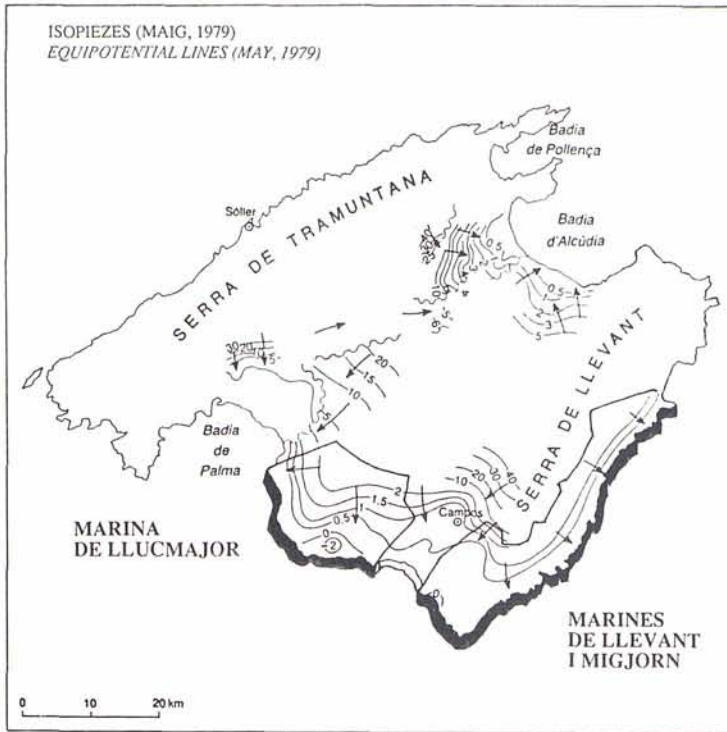


Figura 6:
Unitats hidrològiques càrstiques de les Marines.

Figure 6:
Karstic hydrologic units of Les Marines.

Conclusions

La hidrologia càrstica de Mallorca ha tingut i té una enorme importància per a l'abastiment d'aigua de l'Illa, ja que bona part dels aqüífers presenten caràcter càrstic i en ells s'hi produeix la major infiltració de l'aigua de pluja. Poden distingir-se dos tipus d'aqüífers càrstics; el primer es desenvolupa en els dipòsits carbonatats, predominantment calcàries i dolomies, del Juràssic inferior. Correspon a molts dels aqüífers de la Serra de Tramuntana, els quals es caracteritzen per àrees de recàrrega d'unes poques desenes de quilòmetres quadrats, formades per afloraments de roca nua. Les seves descàrreges es produeixen per mitjà de surgències càrstiques. Aquestes unitats presenten un aixecament estructural i topogràfic important i estan solcades per torrents íntimament relacionats amb la dinàmica dels aqüífers. Malgrat que els seus models de circulació solen ser complexos i poc coneguts encara, pot distingir-se clarament la presència d'una doble permeabilitat: la circulació principal es produeix a través de les grans obertures del sistema càrstic i ve a reemplaçar de qualche manera l'escorrentia superficial, mentre que el flux de base de les surgències respon a la presència d'una segona porositat de caràcter fissural.

El segon tipus d'aqüífers càrstics es localitza en els dipòsits tabulars, lleugerament aixecats, del Miocè (les Marines). Funcionen com a aqüífers isotròpics en les parts més internes, i com a càrstics en les proximitats del litoral. De totes maneres, no està ben establerta, encara, la relació entre el seu desenvolupament i els canvis de nivell de la mar produïts durant el Pliocè i el Quaternari.

develops in dolomites and limestones, early Jurassic in age; they are located in Serra de Tramuntana. Frequently their recharge areas extend by tens of square kilometres of bare carbonate rocks and their discharge takes place by karstic springs. A great structural uplifting characterized these units which are commonly entrenched by temporary streams. Although karst circulation tends to be complex and poorly known, a double permeability distinguishes their behaviour: the main circulation is made through large conduits and it replaces in some way the surface run-off, whereas small fissures are responsible for the basal outflow of karstic springs.

The second type of karst aquifers of Mallorca develops in gently structured Miocene tabular deposits (Les Marines). They work as an isotropic aquifer in the inner parts of these units, and simultaneously as a karst aquifer close to the coastal zone. The relationship between the development of karstic cavities and the sea level changes produced during Pliocene to Quaternary times is not well-established.

Agraïments

Treball finançat pel projecte CICYT AMB93-0178.

Bibliografia / References

- BABUSHKIN, V.D.; BÖCKER, T.; BOREVSKY, B.V. & KOVALEVSKY, V.S. (1975): Regime of subterranean water flows in karst regions. In: BURGER, A. & DUBERTRET, L. (Eds.): *Hydrogeology of Karstic Terrains*. International Association of Hydrogeologists. 69-78. Paris.
- BARÓN, A. & GONZÁLEZ, C. (1987): *Hidrología de la Isla de Mallorca*. Servei Hidràulic. Govern Balear. 83 pàgs. Palma de Mallorca.
- GRIMALT, M. & RODRÍGUEZ-PEREA, A. (1990): Caudales punta de avenida y morfología de cuencas en Mallorca. In: GUTIÉRREZ, M.; PEÑA, J.L. & LOZANO, M.V. (Eds.): *Actas de la I Reunión Nacional de Geomorfología*. 427-436. Teruel.

Acknowledgement

This work is part of the CICYT project AMB93-0178.

- KIRALY, L. (1975): Rapport sur l'état actuel des connaissances dans le domaine des caractères physiques des roches karstiques. In: BURGER, A. & DUBERTRET, L. (Eds.): *Hydrogeology of Karstic Terrains*. International Association of Hydrogeologists. 53-67. Paris.
- LA MOREAUX, P.E. & POWELL, W.J. (1963): Stratigraphic and structural guides to the development of water wells and well fields in a limestone terrane. *Alabama Geol. Survey*. ser. 6 : 363-375.
- LE GRAND, H. & LA MOREAUX, P.E. (1975): Hydrogeology and Hydrology of Karst. In: BURGER, A. & DUBERTRET, L. (Eds.): *Hydrogeology of Karstic Terrains*. International Association of Hydrogeologists. 9-19. Paris.