

HIDROGEOLOGIA DE LES ILLES BALEARS: LES MASSES D'AIGUA CÀRSTIQUES

per Jordi GIMÉNEZ¹, Alfredo BARÓN¹, Margalida COMAS¹, Concepción GONZÁLEZ¹,
Joana GARAU¹, Omar BEIDAS¹, Mateu OLIVER¹ i Francesc Xavier NADAL¹

Resum

Les aigües subterrànies suposen el 95% dels recursos hídrics de les Illes Balears. Degut a la configuració litològica de l'arxipèlag, la majoria de les aigües subterrànies es localitzen en aqüífers carbonatats que en gran part presenten característiques càrstiques més o menys desenvolupades. De fet 64 de les 90 masses d'aigua subterrànies definides en el Pla Hidrològic de les Illes Balears de 2011 tenen característiques càrstiques. Aquestes masses d'aigua ocupen el 69% de la superfície a Mallorca, el 68% a Menorca, el 67% a Eivissa i el 100% a Formentera. Les particularitats dels aqüífers càrstics fan que la seva gestió sigui més complexa que la dels aqüífers de flux difús. Així degut a que la velocitat d'infiltració i circulació de l'aigua dins d'un aqüífer càrstic sol ser elevada, quan es vol establir la vulnerabilitat a la contaminació d'un aqüífer càrstic és recomanable tenir en consideració el desenvolupament del carst. El mateix ocorre amb els perímetres de protecció de pous de proveïment, el càlcul dels quals s'ha de realitzar amb metodologies diferents a les dels aqüífers de flux difús. L'explotació dels aqüífers càrstics pot accelerar els processos naturals com l'aparició de col·lapses. A Mallorca l'explotació intensiva i estacional de l'aqüífer de Crestatx ha provocat l'aparició de col·lapses que han afectat infraestructures urbanes. D'altra banda a Menorca el descens continuat dels nivells freàtics a l'aqüífer d'Es Migjorn ha accelerat l'aparició de col·lapses que han afectat la qualitat de les aigües d'un pou de proveïment de Es Migjorn Gran.

Resumen

Las aguas subterráneas suponen el 95% de los recursos hídricos de las Baleares. Debido a la configuración litológica del archipiélago, la mayoría de las aguas subterráneas se localizan en acuíferos carbonatados con características kársticas más o menos desarrolladas. De hecho 64 de las 90 masas de agua subterráneas definidas en el Plan Hidrológico de las Islas Baleares de 2011 tienen características kársticas. Estas masas de agua ocupan el 69% de la superficie en Mallorca, el 68% en Menorca, el 67% en Eivissa y el 100% en Formentera. Las particularidades de los acuíferos kársticos hacen que su gestión sea más compleja que la del resto de acuíferos. Debido a la elevada velocidad de infiltración y circulación del agua en un acuífero kárstico, cuando se quiere establecer la vulnerabilidad a la contaminación de este tipo de acuíferos es recomendable considerar el grado de desarrollo del karst. Lo mismo ocurre con los perímetros de protección de pozos de abastecimiento, el establecimiento de los cuales debe realizarse con metodologías diferentes a las de los acuíferos de flujo difuso. La explotación de los acuíferos kársticos puede acelerar procesos naturales como la aparición de colapsos. En Mallorca la explotación intensiva y estacional del acuífero de Crestatx ha provocado la aparición de colapsos que han afectado infraestructuras urbanas. En Menorca el descenso generalizado de los niveles freáticos en el acuífero de Es Migjorn ha acelerado la aparición de colapsos que han afectado la calidad de las aguas de un pozo de abastecimiento de Es Migjorn Gran.

Abstract

Groundwaters account for 95% of the water resources in the Balearic Islands. Owing to the lithological configuration of the archipelago, the majority of groundwater aquifers are located in carbonate groundwater bodies with more or less developed karst features. In fact 64 of the 90 groundwater bodies identified in the Balearic Islands Hydrological Plan of 2011 have karst properties. These water bodies occupy 69% of the surface in Mallorca, 68% in Menorca, 67% in Eivissa and 100% in Formentera. The particularities of karst aquifers makes their management more complex than the other aquifers. Due to the high infiltration rate and water circulation in karst aquifers, when establishing the contamination vulnerability of these type of aquifers is recommended to consider the degree of karst development. The same occurs with the protection perimeters of supply wells, the establishment of which should be done with methods different from the used for diffuse flux aquifers. The exploitation of karst aquifers can accelerate natural processes such as the occurrence of collapses. In Mallorca the intensive and seasonal exploitation of the Crestatx aquifer has caused the appearance of collapses that have affected urban infrastructures. In Menorca the general decline of groundwater levels in the Migjorn aquifer has accelerated the occurrence of collapses that have affected the quality of the water from a well supply in Es Migjorn Gran.

1 Servei d'Estudis i Planificació de la Direcció General de Recursos Hídrics. Conselleria d'Agricultura, Medi Ambient i Mobilitat del Govern de les Illes Balears. C/ Gremi Corredors 10, 07009 Palma. jgimenez@dgrehid.caib.es

Característiques dels aqüífers càrstics

Des del punt de vista del seu funcionament es poden diferenciar tres tipus d'aqüífers. En un extrem se situen els aqüífers amb sistemes de flux difús, que es corresponen bàsicament amb aqüífers de naturalesa granular o detrítica. En l'altre extrem se situen els aqüífers amb sistemes de flux per conductes, que es corresponen amb els aqüífers típicament càrstics. El tercer tipus d'aqüífers es correspondria amb els que tenen propietats intermèdies entre ambdós extrems, per tant la frontera entre aquests aqüífers no està definida sinó que és gradual. A la Taula 1 es resumeixen les principals diferències entre aquests aqüífers (IGME, 2003).

	Flux per conductes (Càrstic s.s.)	Flux difús
Heterogeneïtat	Alta	Baixa
Emmagatzematge	Escàs	Elevat
Piezometria	Discontínua	Contínua
Hidrogrames	Pics	Rectes pendent \pm constant
Oscil·lacions piezomètriques	Importants	Regulars
Circulació	Per conductes	Flux difús
Infiltració	Punts localitzats	Uniforme
Morfologia càrstica	Abundant	Escassa
Regulació natural	Escassa	Elevada
Millora de la regulació	Difícil	Possible
Vulnerabilitat	Alta	Moderada-Baixa

Taula 1: Diferències entre aqüífers de flux per conductes (càrstics) i de flux difús.

Table 1: Differences between groundwater flow by conduits (karst) and diffuse flux aquifers.

Així els aqüífers càrstics ben desenvolupats es caracteritzen per ser molt heterogenis i amb un emmagatzematge limitat. La circulació de l'aigua pel seu interior es du a terme bàsicament mitjançant conductes preferents que tant poden ser verticals (avencs) o horitzontals (galeries). Aquests conductes provenen de la dissolució preferent seguint les línies de debilitat originals de la roca, és a dir fractures i/o discontinuïtats d'origen sedimentari. Aquestes característiques comporten que l'evolució piezomètrica d'aquests aqüífers

sigui discontínua, és a dir que sofreix pujades i baixades sobtades que poden ser importants (Fig. 1), que es corresponen amb l'entrada o sortida d'aigua a l'aqüífer a través de conductes verticals o horitzontals de manera sobtada. Aquestes pujades i baixades són les responsables que els hidrogrames que es puguin realitzar en aquests aqüífers tinguin pics de vegades molt pronunciats. Totes aquestes característiques fan que la regulació en els aqüífers càrstics sigui escassa i al mateix temps difícil de gestionar.

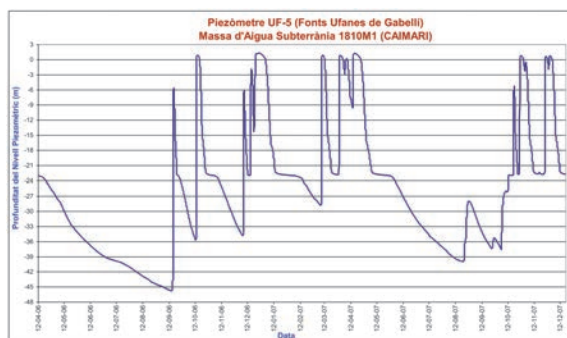


Figura 1: Evolució piezomètrica típica d'un aqüífer Càrstic.

Figure 1: Typical piezometric evolution of a karstic aquifer.

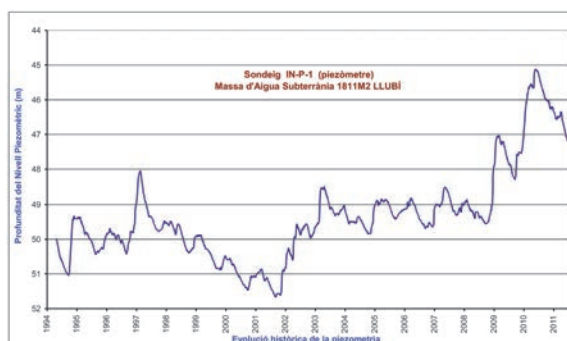


Figura 2: Evolució piezomètrica d'un aqüífer amb certes característiques càrstiques.

Figure 2: Piezometric evolution of an aquifer with some karstic characteristics.

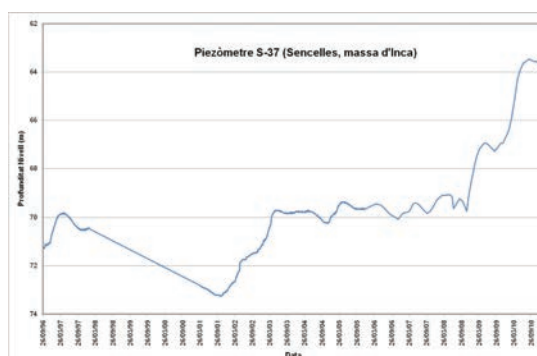


Figura 3: Evolució piezomètrica d'un aqüífer de flux difús.

Figure 3: Piezometric evolution of a diffuse flux aquifer

Per contra els aqüífers no càrstics o poc carstificats presenten una saturació important dels porus o fissures de la roca important. La connexió entre aquests porus permet que l'aigua discorri d'una manera més homogènia i gradual, per la qual cosa en aquests tipus d'aqüífers l'emmagatzematge és més important. Aquest flux difús permet que la recàrrega i descarrega de l'aqüífer sigui lenta en comparació a la dels aqüífers típicament càrstics, per la qual cosa les gràfiques d'evolució piezomètrica son més suaus i regulars (Figs. 2 i 3).

Aquestes circumstàncies comporten que la gestió dels aqüífers càrstics sigui més complicada ja que bàsicament l'aigua discorre en el seu interior amb una major velocitat. Aquesta alta velocitat fa complicat utilitzar aquest tipus d'aqüífers com a reservoris ja que l'aigua es "perd" o se'n va de l'aqüífer. Una de les solucions per poder aprofitar aquests recursos és la captació o derivació de les surgències o fonts, tal i com s'ha dut a terme en moltes zones de les Balears.

Els recursos hídrics a les Illes Balears

Les aigües subterrànies constitueixen la quasi totalitat dels recursos hídrics de les Illes Balears. De fet les aigües per a consum humà provenen en el 95% de les aigües subterrànies. Tal i com s'observa a la Taula 2, del conjunt de les aigües distribuïdes a la població de les Balears l'any 2006 sols el 4,5% prové de les aigües superficials recollides als embassaments de la Serra de Tramuntana de Mallorca (SEP, 2011). Així, quasi el 70% de les aigües prové de l'extracció de pous d'aigua dolça, el 7% de fonts, que es correspon amb aigües subterrànies aflorades de manera natural, i el 18% prové de les dessaladores, les quals produeixen aigua a partir de l'extracció d'aigua salada dels aqüífers costaners.

Taula 2: Origen de l'aigua de proveïment urbà a les Balears a l'any 2006 (SEP, 2011).

Table 2. Origin of the urban water supply in the Balearic Islands in 2006 (SEP, 2011).

Illla	Aqüífers (hm ³)	Fo n t s (hm ³)	Embassaments (hm ³)	Dessaladores (hm ³)	TOTAL
Mallorca	75,15	9,96	6,19	20,25	111,55
Menorca	14,18	-	-	-	14,18
Eivissa	7,60	-	-	4,74	12,34
Formentera	-	-	-	0,47	0,47
TOTAL	96,93	9,96	6,19	25,46	138,53
%	69,97	9,96	4,47	18,37	100

Al mateix temps la gran majoria dels aqüífers de les Balears son de naturalesa carbonatada i una bona part d'ells tenen un funcionament càrstic. De fet els únics aqüífers pròpiament no càrstics són els que es troben a les conques sedimentàries terciàries i quaternàries. En aquest sentit l'estudi dels aqüífers càrstics és necessari a les Balears.

Característiques dels aqüífers de les Balears

Des del punt de vista geològic, les Illes Balears són la part emergida del promontori Balear el qual constitueix la prolongació nord-oriental de l'arc orogènic Bètic. Al mateix temps el promontori Balear està subdividit en dos blocs separats pel canal de Mallorca, quedant un bloc septentrional format per les illes de Mallorca i Menorca, i un bloc meridional format per les illes Pitiüses. Els materials que afloren a les Illes Balears són en gran part de naturalesa carbonatada, ja que a part dels carbonats pròpiament dits, gran part de les roques detrítiques tenen una composició carbonatada ja que provenen de l'erosió de calcàries. De fet, a part de les roques del Triàsic Inferior que afloren a Mallorca i sobretot a Menorca (fàcies Buntsandstein), les roques del Paleozoic (que bàsicament afloren a Menorca), i els guixos i argiles del Triàsic Superior (fàcies Keuper), la resta de roques que afloren a les Balears tenen una composició predominantment carbonatada.

Aquest predomini de les roques carbonatades implica que la naturalesa química de les aigües subterrànies de les Balears és bàsicament bicarbonatada - càlcica. Així mateix gran part dels aqüífers de les Balears es poden considerar com aqüífers càrstics, tot i que amb diferents graus de carstificació. De fet, exceptuant els aqüífers localitzats a les conques sedimentàries postalpines (del Miocè a l'actualitat), la gran majoria d'aqüífers d'interès

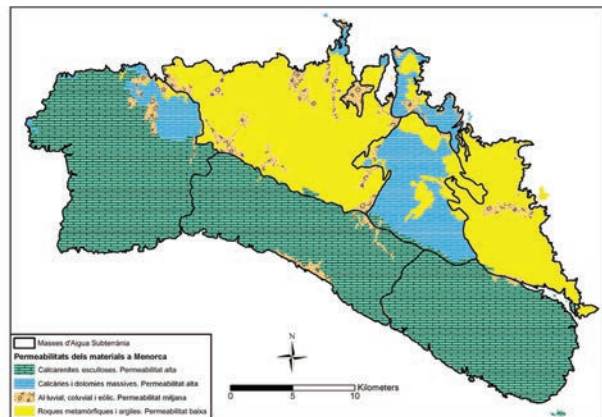
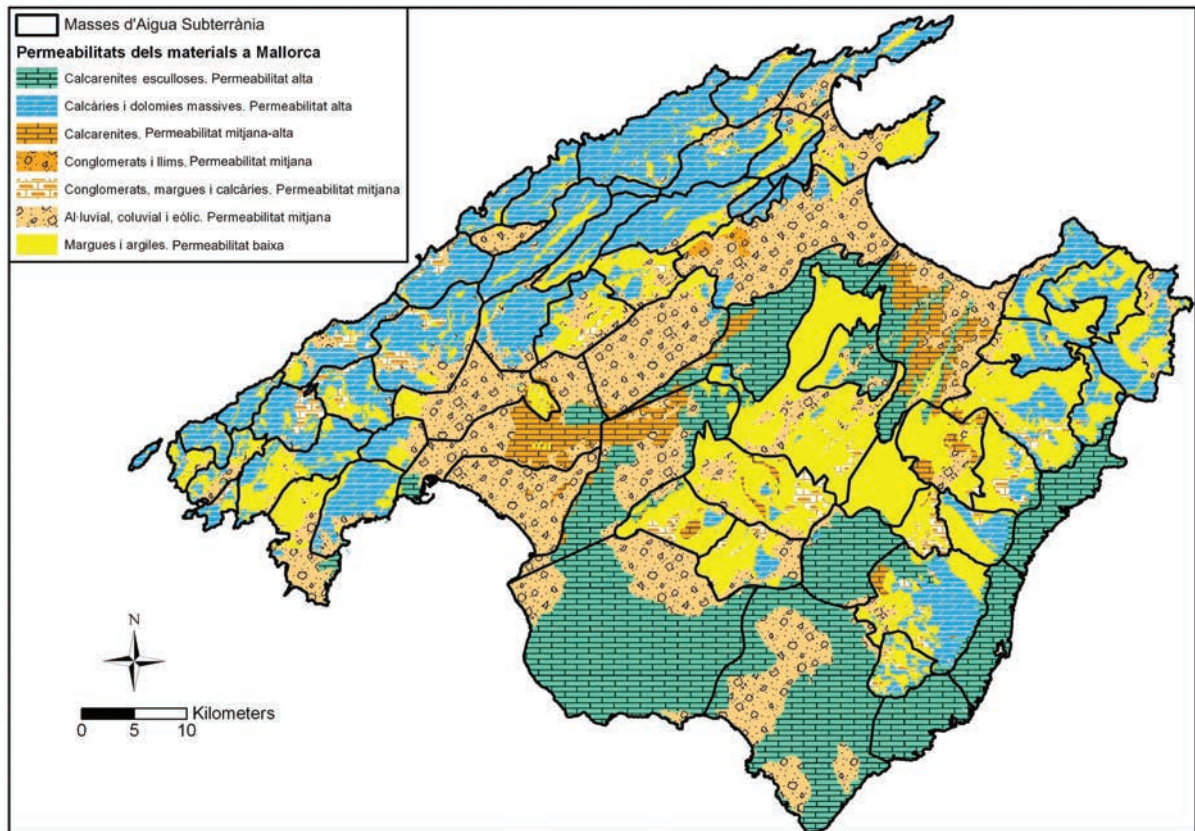


Figura 4: (Superior) Masses d'aigua subterrània definides en base als criteris de la DMA a l'illa de Mallorca, amb indicació dels materials aflorants i agrupats per la seva permeabilitat.

Figure 4: (Top) Water bodies defined in Mallorca according to WMD. Main rock materials are also indicated according to its permeability.

Figura 5: (Izquierda) Masses d'aigua subterrània definides en base a la DMA a Menorca, amb indicació dels materials aflorants i agrupats per la seva permeabilitat.

Figure 5: (Left) Water bodies defined in Menorca according to WMD. Main rock materials are also indicated according to its permeability.

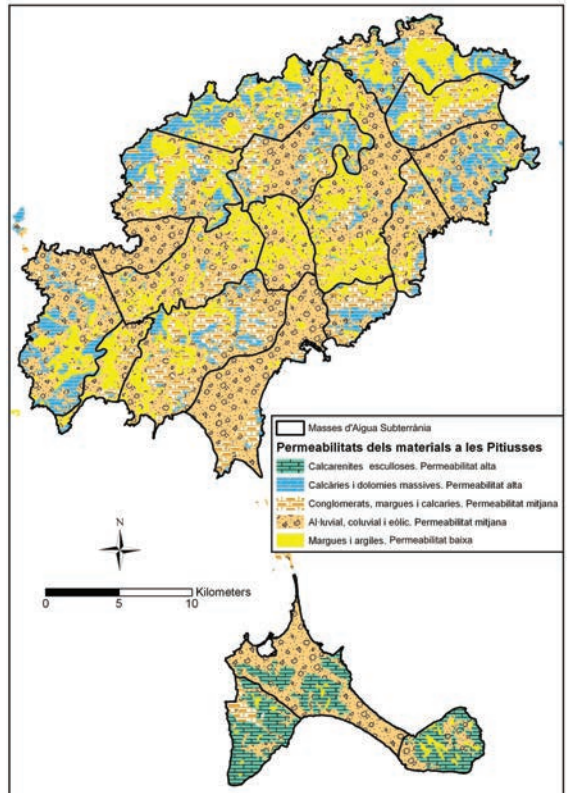


Figura 6: (Derecha) Masses d'aigua subterrània definides en base als criteris de la DMA a les Pitiüses, amb indicació dels materials aflorants i agrupats per la seva permeabilitat.

Figure 6: (Right) Water bodies defined in Pitiüses islands according to WMD. Main rock materials are also indicated according to its permeability.

de les Balears tenen una naturalesa càrstica més o menys desenvolupada.

Les Figures 4, 5 i 6 mostren els esquemes geològics de les diferents illes en els quals s'han diferenciat els terrenys aflorants en base a la seva permeabilitat. En aquestes figures també es mostra la divisió hidrogeològica duta a terme per a l'elaboració del Pla Hidrològic de les Illes Balears (PHIB) en base a la Directiva Marc de l'Aigua (DMA). La DMA, entre altres aspectes, indica que s'han de diferenciar els cossos o masses d'aigua amb propietats semblants que poden ser aprofitats per l'home. De fet 45 de les 65 masses d'aigua definides a Mallorca es poden considerar com aqüífers càrstics ja que estan formades en la seva gran majoria per calcàries o dolomies massives o fissurades (bàsicament Triàsic superior i Juràssic inferior) i calcarenites o calcàries esculloses (bàsicament del Miocè superior i Pliocè). La superfície aflorant d'aquestes 45 masses ocupa el 69 % de l'àrea de Mallorca. Pel que fa a l'illa de Menorca 5 de les 6 masses definides es poden considerar càrstiques, la superfície de les quals representa el 68 % de l'àrea de l'illa de Menorca. Igual que a Mallorca, a Menorca els aqüífers càrstics també es desenvolupen en calcàries i dolomies massives o fissurades del Triàsic superior o Juràssic inferior, i en calcàries esculloses del Miocè superior. A l'illa d'Eivissa es poden identificar 11 masses amb característiques càrstiques més o menys desenvolupades d'entre les 16 masses definides. Aquestes 11 masses suposen una superfície del 67 % de l'extensió de l'illa. A Eivissa, però, els aqüífers càrstics es desenvolupen en les calcàries i dolomies del Triàsic superior i Juràssic inferior, i en els carbonats massius Cretàcics presents en algunes zones d'aquesta illa. A l'illa de Formentera les 3 masses d'aigua definides es poden considerar aqüífers càrstics i tots ells es desenvolupen en calcàries escullose.

Els aqüífers càrstics de Mallorca

A l'illa de Mallorca es poden diferenciar diverses regions geològiques condicionades per l'estructuració postalpina. Aquesta estructuració configurarà l'illa en tres àrees muntanyoses (Serra de Tramuntana, Serres Centrals i Serres de Llevant) que limiten dues conques sedimentàries o depressions (conca de Palma - Inca - Sa Pobla i conca de Campos - Manacor). Així mateix, encerclant gran part de les Serres Centrals i les

de Llevant, durant el Miocè superior s'instal·laren unitats esculloses que avui en dia conformen les Marines (Marina de Lluçmajor, de Llevant i Marineta). Exceptuant els aqüífers localitzats a les depressions terciàries, a la resta de regions geològiques hi predominen els aqüífers formats en roques carbonatades els quals en la majoria dels casos presenten processos de carstificació. Algunes de les masses d'aigua càrstiques que s'han explotat intensament o més representatives de Mallorca es mostren a la Taula 3.

A la Serra de Tramuntana s'han definit 33 masses d'aigua subterrània, de les quals 25 són càrstiques i ocupen el 77% de l'àrea de la Serra. Els aqüífers càrstics de la Serra de Tramuntana es desenvolupen majoritàriament sobre les calcàries del Juràssic Inferior (Liàsic) que presenten potències que poden assolir els 300m i s'estructuren en diversos plecs i en làmines encavalcants. La Serra de Tramuntana està formada bàsicament per plecs i encavalcaments vergents al NO, per la qual cosa la majoria d'estructures tenen un cabussament cap al SE. Les aigües de pluja que s'infiltra en superfície van assolint profunditat fins que topen amb els nivells impermeables, que majoritàriament són les argiles, guixos i margues del Triàsic Superior (fàcies Keuper). L'estructuració dels materials implica que la majoria de circulacions subterrànies i de descàrregues tenen lloc a favor del cabussament dominant, és a dir cap al SE. Tot i així, a la banda NO de la Serra de Tramuntana també hi ha descàrregues que poden tenir certa importància. Moltes de les masses subterrànies càrstiques de la serra s'exploten intensament, per aquesta raó aquelles que estan en contacte amb el mar han sofert processos d'intrusió marina, mentre que les que estan aïllades del mar han registrat descensos dels nivells piezomètrics importants.

A la Taula 3 s'observa que les masses d'aigua subterrània de la Serra de Tramuntana més explotades han estat aquelles que estan més properes a Palma, com la de La Vileta (part de la Unitat Hidrogeològica de Na Burgesa) de la qual l'any 2006 se n'extragueren 5,1 hm³/any dels 5,9 que hi entren de mitjana, la d'Esporles de la que s'aprofitaren 9,3 hm³/any dels 9,6 que hi entren, i la de Bunyola (part de la Unitat Hidrogeològica de S'Estremera) de la que s'extragueren 6,0 dels 9,1 hm³/any que hi entren de mitjana (SEP, 2011). És destacable també la massa de Crestatx (part de la Unitat Hidrogeològica d'Inca-Sa Pobla) de la qual

s'extragueren l'any 2006 2,3 hm³/any dels 2,6 que hi entren de mitjana (SEP, 2011). La resta de masses han estat relativament poc explotades degut sobretot al seu aïllament geogràfic. És destacable que la massa de Sa Costera ha passat a ser una de les masses que

alimenta a Palma, des de la posada en marxa de la captació de la font des Verger l'any 2010.

A les Serres de Llevant, 9 de les 13 masses d'aigua definides tenen un comportament més o menys càrstic, ja que estan formades en la seva gran majoria pels materials carbonatats

	Codi	Nom	Àrea permeable (km ²)	Infiltració pluja (hm ³ /any)	Suma entrades (hm ³ /any)	Extracció ús urbà (hm ³ /any)	Altres extraccions (hm ³ /any)	Sortida fonts (hm ³ /any)	Fonts captades (hm ³ /any)	Total usos (hm ³ /any)
Calcàries massives Liàsiques (Serra de Tramuntana)	18.02-M2	Banyalbufar	30,5	4,8	5,1	0,2	0,1	4,4	1,1	1,4
	18.02-M3	Valldemossa	32,8	4,8	4,9	0,2	0,1	3,2	0,3	0,7
	18.03-M2	Lluc	70,0	16,3	16,3	0,0	0,2	3,1	0,4	0,6
	18.04-M1	Ternelles	31,6	4,0	4,3	0,5	0,2	1,6	0,3	1,0
	18.05-M2	Aixartell	13,3	2,3	7,8	0,3	0,5	6,0	0,0	0,8
	18.06-M1	S'Olla	41,5	8,0	8,3	0,3	0,0	4,2	1,6	1,9
	18.06-M2	Sa Costera	24,8	7,4	7,4	0,0	0,0	6,7	6,0	6,0
	18.07-M1	Esporles	69,1	8,1	9,6	0,3	1,0	8,0	8,0	9,3
	18.08-M1	Bunyola (S'Estremera)	44,2	8,0	9,1	5,8	0,3	0,2	0,0	6,0
	18.08-M2	Massanella	17,1	4,3	5,6	0,0	0,0	2,5	0,1	0,1
	18.10-M1	Caimari (Ufanes)	44,0	14,3	16,5	0,4	0,0	13,0	0,0	0,4
	18.11-M5	Crestatx	5,1	1,0	2,6	2,2	0,2	0,0	0,0	2,3
	18.13-M1	La Vileta	17,8	2,4	5,9	3,7	1,5	0,0	0,0	5,1
Calcàries massives i fissurades (Serres de Llevant)	18.17-M1	Capdepera	36,6	5,0	7,2	3,1	1,0	0,3	0,1	4,2
	18.17-M2	Son Servera	10,5	2,5	4,0	2,7	0,6	0,0	0,0	3,3
	18.19-M1	Sant Salvador	69,5	5,4	6,3	4,3	0,9	0,0	0,0	5,3
Calcàries Esculloses i Calcarenites (Marines de Llevant, Migjorn, Maríeta, i altres)	18.11-M2	Llubí	89,1	17,5	21,5	7,8	2,6	0,0	0,0	10,4
	18.14-M1	Xorrigo	122,8	10,2	12,9	3,5	1,8	0,0	0,0	5,3
	18.14-M3	Pont d'Inca	103,7	8,1	18,2	9,3	4,8	0,0	0,0	14,1
	18.16-M2	Son Real	129,0	12,9	15,4	1,9	0,5	0,0	0,0	2,3
	18.20-M1	Santanyí	49,1	6,9	7,7	0,9	0,2	0,0	0,0	1,1
	18.20-M2	Cala d'Or	40,5	5,3	7,3	0,7	0,3	0,0	0,0	1,0
	18.21-M1	Marina de Lluçmajor	294,8	20,2	21,2	1,1	3,6	0,0	0,0	4,7
	18.21-M2	Pla de Campos	253,0	15,7	18,7	0,6	4,8	0,0	0,0	5,4
	18.21-M3	Son Mesquida	61,7	4,1	5,1	1,2	2,4	0,0	0,0	3,6

Taula 3: Balanç hídric resumit d'algunes de les masses subterrànies amb comportament més o menys càrstic de Mallorca. Les extraccions urbanes indicades es corresponen a dades de l'any 2006 (excepte per la massa de Sa Costera que indica la mitjana que es preveu captar), mentre que les entrades i infiltració s'han obtingut en base a la permeabilitat del terreny, la pluviometria mitjana històrica i la transferència entre masses subterrànies (SEP, 2011).

Table 3: Summarised water balance of some of the groundwater bodies with a more or less karst behavior in Mallorca. The indicated urban extraction corresponds to 2006 year data (except for Sa Costera body where the average expected catchment is indicated). Inputs and infiltration were obtained based on terrain permeability, average historical rainfall and mass transfer between bodies (SEP, 2011).

del Triàsic superior i Juràssic inferior. Cal indicar però que el funcionament d'aquestes masses no és tant càrstic com el dels aquífers de la Serra de Tramuntana. D'entre les masses amb característiques càrstiques de les Serres de Llevant es poden destacar, pel seu grau d'explotació les masses de Capdepera (l'any 2006 se n'extragueren 4,2 hm³ dels 7,2 que hi entren de mitjana), Son Servera (se n'extragueren 3,3 hm³ dels 4,0 que hi entren) i Sant Salvador (s'extragueren 5,3 hm³ dels 6,3 que hi entren) (SEP, 2011). Les masses de les Serres de Llevant també han sofert descensos de nivells importants en els casos en els que no hi ha connexió amb el mar, i intrusió salina en els casos en que hi ha connexió amb el mar.

La resta de masses amb comportaments o característiques càrstiques de Mallorca es localitzen bàsicament a les plataformes carbonatades miocenes (Marines) que encerclen les Serres Centrals i les Serres de Llevant. En aquestes masses s'hi ha desenvolupat un carst que és visible en superfície mitjançant macroformes de relleu com poden ser canyons càrstics i àrees deprimides endorreiques. També s'hi han desenvolupat importants sistemes càrstics subterranis que bàsicament aprofiten la porositat primària dels materials, al temps que segueixen els sistemes de fractures i les discontinuïtats sedimentàries. Aquests

sistemes de galeries solen estar doncs orientats en direccions preferents i poden tenir longituds quilomètriques com en el cas de la cova des Pas de Vallgornera, a Lluçmajor.

Pel seu grau d'explotació, d'entre les masses conformades per materials calcaris del Miocè superior i Pliocè a Mallorca es pot destacar la massa de Llubí, de la qual l'any 2006 se n'extragueren 10,4 hm³, i la massa de Pont d'Inca, de la qual se n'extragueren 14,1 hm³ (SEP, 2011). La transmissivitat elevada d'aquestes masses i el fet que totes elles estan connectades amb el mar fan que la seva explotació sigui molt delicada. Aquesta circumstància, juntament amb l'explotació intensiva d'alguns sectors d'aquestes masses contingudes en els materials de les plataformes neògenes, han provocat que moltes d'elles estiguin afectades per processos d'intrusió marina.

Els aquífers càrstics de Menorca

A l'illa de Menorca es distingeixen dues grans unitats geomorfològiques: Tramuntana i Migjorn. A la regió de Tramuntana hi trobem materials paleozoics i Mesozoics deformats durant l'orogènia Alpina, mentre que la regió de Migjorn està formada per materials Miocens i Quaternaris disposats en una situació quasi

	Codi	Nom	Àrea permeable (km ²)	Infiltració pluja (hm ³ /any)	Suma entrades (hm ³ /any)	Extracció ús urbà (hm ³ /any)	Altres extraccions (hm ³ /any)	Sortida fonts (hm ³ /any)	Fonts captades (hm ³ /any)	Total usos (hm ³ /any)
Calcàries Esculloses (Migjorn)	19.01-M1	Maó	116,7	18,9	22,0	5,5	2,5	0,0	0,0	8,0
	19.01-M2	Migjorn Gran	110,4	12,1	13,6	1,9	0,8	0,0	0,0	2,8
	19.01-M3	Ciutadella	156,6	25,9	29,0	5,1	3,8	0,0	0,0	8,9
Calcàries Trias i Lias (Tramuntana)	19.02-M1	Sa Roca	58,4	4,5	4,7	1,5	0,8	0,7	0,5	2,7

Taula 4: Balanç hídric resumit d'algunes de les masses subterranies amb comportament més o menys càrstic de Menorca. Les extraccions urbanes indicades es corresponen a dades de l'any 2006, mentre que les entrades i infiltració s'han obtingut en base a la permeabilitat del terreny, la pluviometria mitjana històrica i la transferència entre masses subterranies (SEP, 2011).

Table 4: Summarised water balance of some of the groundwater bodies with a more or less karst behavior in Menorca. The indicated urban extraction corresponds to 2006 year data. Inputs and infiltration were obtained based on terrain permeability, average historical rainfall and mass transfer between bodies (SEP, 2011).

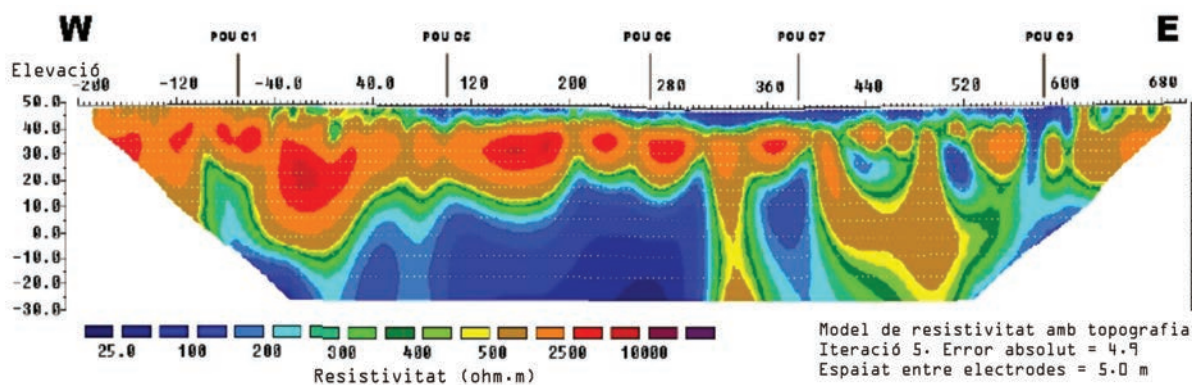


Figura 7: Perfil de tomografia elèctrica a Ciutadella on s'observen zones d'alta resistivitat (colors vermells) amb formes més o menys cilíndriques que es relacionen amb cavitats horitzontals buides o conductes.

Figure 7: Electric tomography profile realized in Ciutadella. High resistivity cylindrical shapes (red zones) are related to horizontal karstic caves.

horizontal. En la divisió hidrogeològica realitzada per a l'adaptació del PHIB a la DMA una gran part de Tramuntana s'ha classificat com una "no massa", ja que els materials que constitueixen aquesta zona no permeten l'existència d'aqüífers d'importància econòmica o aprofitables. Així, a Tramuntana s'han definit tres masses d'aigua, de les quals sols la massa de Sa Roca és de certa importància (veure Taula 4).

La massa de Sa Roca està formada en la seva gran majoria per carbonats del Triàsic Superior i del Juràssic Inferior, fissurats i plegats durant l'orogènia Alpina. En aquesta massa el carst no està ben desenvolupat tot i que existeixen evidències de carst en superfície. Es tracta, però d'una massa estratègica a Menorca ja que és la única massa d'importància que no està connectada amb el mar i presenta una transmissivitat bona.

La regió del Migjorn, està formada gairebé en la seva totalitat per formacions esculloses del Miocè Superior (calcàries i calcarenites) en disposició subhoritzontal. En aquesta regió s'han diferenciat tres masses d'aigua en les quals trobem la gran majoria de pous de proveïment urbà de Menorca.

Les masses del Migjorn de Menorca presenten un comportament semblant a les de les masses de les Marines de Mallorca. En aquest sentit el carst desenvolupat en elles és visible en les formes de relleu en superfície (conques endorreiques, canyons càrstics, ...) a part de la presència de coves i galeries (Fig. 7) que, com en el cas de Mallorca, presenten unes direccions preferents dominades per la fracturació i les estructures sedimentàries de



Figura 8: Imatge aèria de la zona central del Migjorn de Menorca on s'observa el desenvolupament dels canyons càrstics damunt materials calcarenítics del Miocè Superior. Les traces sinusoidals dels barrancs no han de ser atribuïdes a meandres sinó que s'atribueixen a la presència de dues lineacions dominants: fracturació (NNE-SSO) i estructures sedimentàries (ONO-ESE).

Figure 8: Aerial image of the central Migjorn area of Menorca where one can observe the development of karst canyons on the Miocene reef carbonates. The sinusoidal course of canyons should not be assigned to river meanders but attributed to the presence of two dominant lineations: fracturing (NNE-SSW) and sedimentary structures (WNW-ESE).

la roca (Fig. 8). Les masses del Migjorn de Menorca són i han estat els principals aquífers de l'illa ja que d'elles s'extreu gairebé el 90% de l'aigua subterrània a Menorca. Aquesta intensa explotació ha donat lloc a un descens generalitzat dels nivells a les parts més interiors de l'illa i a una intrusió marina en les zones costaneres.

Els aquífers càrstics de les Pitiüses

Les Pitiüses es poden considerar com un sol domini geomorfològic format per l'illa d'Eivissa al Nord, formada bàsicament per materials plegats durant l'orogènia Alpina, i els illots del canal de Formentera i l'illa de Formentera al sud on dominen els materials postorogènics d'origen escullós disposats de manera subhoritzontal.

A l'illa d'Eivissa es poden diferenciar dues zones muntanyoses (Ets Amunts - Serra de Sant Vicent al Nord, i S'Atalaia de Sant Josep - Serra Grossa al Sud) separades per una depressió orientada en direcció SO-NE (depressió de Sant Antoni - Santa Eulària). Les zones muntanyoses estan formades en la seva gran majoria per carbonats massius del Juràssic Inferior i del Cretaci Mitjà i Superior, mentre que a la depressió central hi afloren bàsicament turbidites del Miocè Inferior i materials del Quaternari d'origen al·luvial, col·luvial i eòlic. Per la seva banda l'illa de Formentera està formada en la seva pràctica totalitat per calcàries esculloses del Miocè Superior disposades subhoritzontalment, damunt les quals hi trobem sediments eòlics i al·luvials del Quaternari.

A les dues zones muntanyoses d'Eivissa hi trobem aquífers càrstics amb un desenvolupament important. Així a la zona dets Amunts trobem els pòlies de Santa Agnès de Corona i de Sant Mateu d'Albarca (Fig. 9), o surgències amb comportaments càrstics com es Broll de Buscastell. A les serres meridionals també s'observen processos de carstificació en superfície, però sense donar lloc a formes del relleu importants.

La compartimentació geològica és molt important a l'illa d'Eivissa; per aquesta raó no hi ha cap aquífer de gran importància. En l'actualitat l'illa d'Eivissa es proveeix en gran part amb aigua dessalada, però fins proveeix en gran part amb aigua dessalada, però fins a la posada en marxa de les dessaladores alguns dels aquífers d'Eivissa es van explotar intensament, fet que va provocar intrusió salina en ells. Aquesta circumstància es produïa sobretot a la massa de Serra Grossa, que proveeix a Vila, i en menor mesura a la massa de Santa Agnès que proveeix a Sant Antoni. Aquesta intrusió ha estat més eficient gràcies a la fracturació i carstificació de les masses carbonatades.

Les masses d'aigua de Formentera tenen un comportament equivalent a la resta de masses

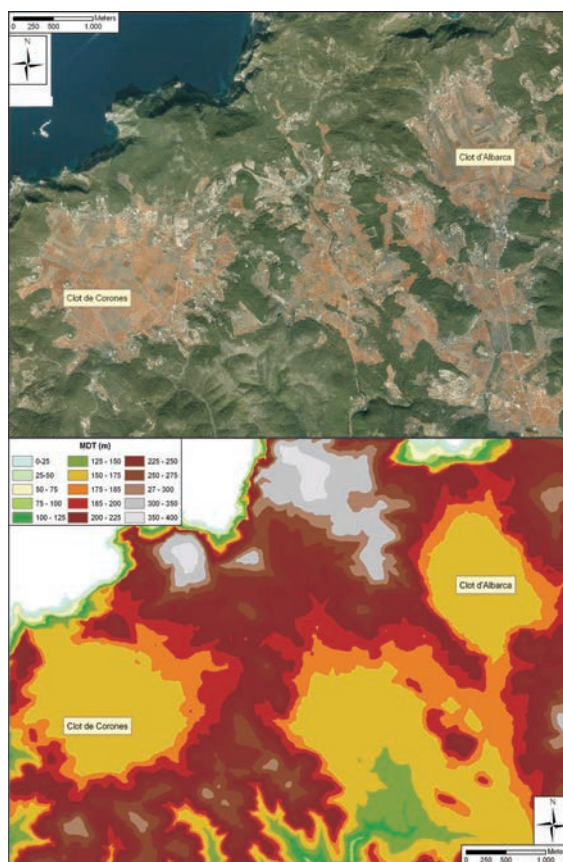


Figura 9: Imatge aèria i Model Digital del Terreny (MDT) de la zona central dets Amunts d'Eivissa on destaquen els pòlies de Corona i Albarca. La forma circular d'aquestes depressions, l'endorreisme i l'existència d'argiles vermelles en elles corrobora l'origen càrstic d'aquestes depressions.

Figure 9: Aerial view and Digital Elevation Model (DEM) of central Amunts zone in Eivissa where Corona and Albarca poljes can be identified. The circular shape, the endorheic functioning and the existence of red clay in them confirms the karstic origin of these depressions.

de les Balears desenvolupades damunt de materials carbonatats d'origen escullós. Per tant els conductes càrstics i altres manifestacions associades a la fracturació i porositat primària d'aquests materials hi són abundants. Les petites dimensions de Formentera comporten que els aquífers d'aquesta illa siguin de dimensions reduïdes, i la naturalesa dels materials i la connexió amb el mar impliquen que l'explotació d'aquestes masses sigui molt delicada. De fet en l'actualitat la pràctica totalitat de l'aigua de consum humà d'aquesta illa és aigua produïda per la dessaladora, tot i això les masses continuen tenint una important intrusió del mar i per tant una baixa qualitat química.

	Codi	Nom	Àrea permeable (km ²)	Infiltració pluja (hm ³ /any)	Suma entrades (hm ³ /any)	Extracció ús urbà (hm ³ /any)	Altres extraccions (hm ³ /any)	Total usos (hm ³ /any)
Calcàries massives i fissurades (Jurassic i Cretaci) Eivissa	20.02-M1	Santa Agnès	35,8	2,5	2,7	0,5	0,3	0,8
	20.03-M1	Cala Llonga	19,8	1,5	2,5	1,3	0,8	2,1
	20.04-M2	Es Canar	30,3	1,6	2,0	0,5	0,8	1,3
	20.05-M1	Cala Tarida	42,2	2,0	2,5	0,4	0,3	0,7
	20.06-M3	Serra Grossa	49,6	2,8	3,0	1,6	0,1	1,7
Calcàries esculloses i calcarenites (Formentera)	21.01-M1	La Mola	15,33	1,10	1,16	0,00	0,03	0,03
	21.01-M2	Cap de Berberia	21,18	1,30	1,55	0,00	0,04	0,04
	21.01-M3	La Savina	39,67	1,88	2,25	0,00	0,08	0,08

Taula 5: Balanç hídric resumit d'algunes de les masses subterrànies amb comportament més o menys càrstic de les Pitiüses. Les extraccions indicades es corresponen a dades de l'any 2006, mentre que les entrades i infiltració s'han obtingut en base a la permeabilitat del terreny, la pluviometria mitjana històrica i la transferència entre masses subterrànies (SEP, 2011).

Table 5: Summarised water balance of some of the groundwater bodies with a more or less karst behavior in Pitiüses islands. The indicated urban extraction corresponds to 2006 year data. Inputs and infiltration were obtained based on terrain permeability, average historical rainfall and mass transfer between bodies (SEP, 2011).

Protecció i gestió dels aqüífers càrstics

Tal i com s'ha indicat abans els aqüífers càrstics, per les seves especials característiques, tenen una gestió més complexa que no els aqüífers amb un flux de tipus difús. A part de l'escassa capacitat de regulació natural i d'emmagatzematge d'aquests tipus d'aqüífers, un dels seus aspectes més problemàtics és la seva alta vulnerabilitat a la contaminació. La vulnerabilitat d'un aqüífer es pot definir com la facilitat amb la qual un contaminant aplicat a la superfície del terreny arriba o afecta a l'aqüífer subjacent. Per tant aquells aqüífers molt vulnerables són els que poden ser més fàcilment "atacats" per un contaminant. La metodologia clàssica per a la determinació de la vulnerabilitat a la contaminació d'un aqüífer ha estat ideada per a aqüífers de flux difús, per aquesta raó ha estat necessari proposar mètodes específics per a zones càrstiques (IGME, 2003).

Un mètode àmpliament utilitzat per al càlcul de la vulnerabilitat d'un aqüífer és el DRASTIC (ALLER et al., 1987). Aquest mètode té en consideració 7 variables que permeten establir un nivell de vulnerabilitat: D (Profunditat de l'aigua), R (Recàrrega neta), A (Litologia de l'aqüífer), S (Tipus de sòl), T (Pendent del terreny), I (Naturalesa de la zona no saturada), i C (Conductivitat hidràulica). A cadascun d'aquests paràmetres se li assigna un índex de ponderació

que estableix la importància o influència d'aquest factor damunt la vulnerabilitat. Així, l'índex DRASTIC d'una zona concreta es determina mitjançant la següent expressió:

$$\text{DRASTIC} = 5D + 4R + 3A + 2S + T + 5I + 3C$$

Per tant aquest mètode considera que els factors més determinants per al càlcul de la vulnerabilitat són la profunditat i la naturalesa de la zona no saturada. Així, quan la profunditat de l'aigua és inferior a 1,5 metres D té un valor de 10, mentre que quan la profunditat és superior a 30 m el valor és 1. Així mateix, quan la zona no saturada es correspon amb argiles o llims al paràmetre I se li assigna un valor de 2, mentre que quan es tracta de carbonats carstificats se li assigna un valor de 10. D'altra banda, el pendent natural del terreny i el tipus de sòl són els paràmetres menys determinants. Si es determina l'índex DRASTIC a un territori s'obindrà un valor característic per a cada àrea que ens permetrà determinar quines zones són les més vulnerables (índex DRASTIC més alt) i quines són les menys vulnerables (índex DRASTIC baix).

Una altra metodologia àmpliament utilitzada és el mètode GOD (FOSTER, 1987). Aquest mètode sols considera 3 paràmetres i sol ser utilitzat en indrets en els quals no es té un bon coneixement del medi. Aquesta metodologia permet, doncs, fer una primera determinació o aproximació a la vulnerabilitat de cada àrea d'un territori. Els paràmetres considerats són: G: Tipus d'aqüífer. Es poden considerar 5

tipus diferents: inexistent, sorgent, confinat, semiconfinat o lliure. Aquest paràmetre pot tenir valors entre 0 (no existeix cap aqüífer) i 1 (aqüífer lliure). O: Litologia de la zona no saturada. Es correspon amb la naturalesa i el grau de consolidació de la zona no saturada, i per tant té en compte la porositat i permeabilitat d'aquesta. A aquest paràmetre se li assignen valors entre 0,4 (argiles sense consolidar) y 1 (calitxos i calcàries fissurades). D: Profunditat de l'aigua subterrània. A aquest paràmetre se li assignen valors entre 0,4 (profunditats superiors a 100 m) i 1 (profunditats inferiors a 2 metres). Multiplicant aquests tres paràmetres s'obté una valoració de la vulnerabilitat de l'aqüífer. Quan el valor és 0 indica que no hi ha aqüífer, de tal manera que els valors propers a 0 tindran una vulnerabilitat molt baixa i els propers a 1 una vulnerabilitat molt alta.

Aquestes dues metodologies estan ideades per a aqüífers amb flux difús, per tant la seva aplicació a zones càrstiques pot induir a l'obtenció de vulnerabilitats poc reals. Degut a que els aqüífers càrstics són força abundants s'han desenvolupat mètodes específics per a aquests aqüífers, entre els que es poden destacar el mètode COP i el mètode EPIK.

L'índex COP (VIAS et al., 2004) s'obté al multiplicar tres factors: C, Concentració de flux; O, Estrats suprajacents, i P, Precipitació. El factor C es relaciona amb com i amb quina rapidesa les aigües superficials s'infiltra fins a l'aqüífer. Per a calcular aquest factor es diferencien aquelles àrees en que hi ha recàrrega mitjançant engolidors de la resta d'àrees. En aquelles àrees on hi ha engolidors, C dependrà de la distància als engolidors. A la resta de zones, C dependrà bàsicament del grau de desenvolupament del carst. Valors baixos d'aquest factor ens indicaran vulnerabilitats altes.

El factor O dona idea de la capacitat de la zona no saturada per a filtrar els contaminants. Per a l'obtenció d'aquest factor es considera l'existència o no de sòl, i la naturalesa i potència d'aquest. Si existeix un sol argilós i potent tindrà un factor elevat, mentre que si és un sòl poc potent i arenós se li assignarà un factor baix. Aquest factor també avalua la litologia de les roques de la zona no saturada i el fet que l'aqüífer sigui lliure, confinat o semiconfinat. Les roques argiloses i llimoses tenen valors elevats, mentre que les roques carstificades els tenen baixos. La suma d'aquests dos factors (sòl i

litologia) ens dona el factor O. Els valors elevats d'O indicaran una protecció de l'aqüífer alta, i per tant una vulnerabilitat baixa.

El factor P es relaciona amb la influència de la precipitació i la intensitat d'aquesta. Aquest mètode considera que la intensitat de la pluja, obtinguda mitjançant la relació entre la precipitació anual i el número de dies en els que es concentra aquesta pluja, incrementa la vulnerabilitat de l'aqüífer.

Un altre mètode per al càlcul de la vulnerabilitat desenvolupat per aqüífers càrstics és el mètode EPIK (OFEFP, 1998), desenvolupat per DOERFLINGER & ZWAHLEN (1998). Aquest mètode es basa en quatre paràmetres: E, característiques de la zona superficial (epikarst); P, cobertura de protecció; I condicions d'infiltració; K, desenvolupament de la xarxa càrstica.

Aquest mètode defineix el factor de protecció de l'aqüífer, així valors baixos indicaran una protecció baixa i per tant una vulnerabilitat elevada. Aquest índex (V) s'obté al sumar els quatre factors considerats amb una ponderació establerta de la següent manera: $V = (3E) + (P) + (3I) + (2K)$

La variable E permet assignar un valor a la part superficial de l'aqüífer i la zona propera a la superfície. Aquesta variable tindrà el valor 1 quan existeixi una xarxa càrstica típica ben desenvolupada amb dolines, coves i resta d'elements. El valor serà 3 quan hi hagi una absència de morfologia epicàrstica, i E serà 2 quan existeixin evidències de carst a la superfície però no estigui ben desenvolupat. La variable P permet definir quin tipus de

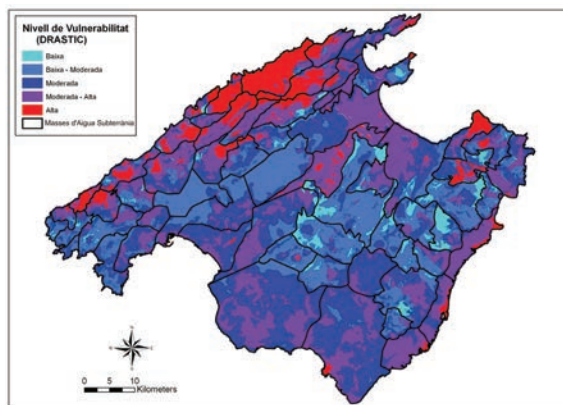


Figura 10: Mapa de la vulnerabilitat a la contaminació a Mallorca realitzat amb el mètode DRASTIC.

Figure 10: Vulnerability map of Mallorca obtained with DRASTIC method.

cobertora o sòl està present. Es diferencien quatre possibilitats. Quan hi ha absència de capa protectora ($P=1$). Si existeix una cobertora de poc gruix ($P=2$). Quan la cobertora és de gruix mitjà ($P=3$). En el cas que la cobertora estigui formada per argiles, el valor de P serà 4. La variable I permet estimar la facilitat per a la infiltració o recàrrega. El valor d' I serà 1 quan es tracti de zones amb vies accessibles per a la infiltració, serà 2 quan el terreny tingui pendents moderats, i serà màxim (3) quan la zona presenti pendents del terreny elevats. La variable K es refereix al desenvolupament de la xarxa càrstica. Quan existeix una xarxa càrstica ben desenvolupada el valor serà 1. Quan la carstificació és relativament pobre el valor serà 2, i quan l'aquífer té un comportament proper a un aquífer detrític o isòtrop el valor serà 3.

Un cop s'han estimat cadascun dels paràmetres, s'obté el factor de protecció de l'aquífer que podrà oscil·lar entre 9 (màxima vulnerabilitat) i 34 (mínima vulnerabilitat). Els aquífers amb valors entre 9 i 19 es consideren de vulnerabilitat alta, els que es situen entre 20 i 25 tenen una vulnerabilitat moderada, i als que assoleixen valors entre 26 i 34 se'ls assigna un grau de vulnerabilitat baix. Els autors d'aquest mètode afegeixen la categoria de vulnerabilitat molt baixa quan existeix un sòl o cobertora formada per materials de baixa conductivitat hidràulica (argiles) de com a mínim 8 metres de gruix.

En resum els mètodes "clàssics" per a l'obtenció de la vulnerabilitat a la contaminació d'un aquífer consideren que la profunditat del nivell piezomètric i el tipus de roca present a la zona no saturada són els dos paràmetres més determinants. A les zones càrstiques ben desenvolupades però, algun d'aquests paràmetres poden ser relativament poc importants. Així, en les àrees on existeix un sistema d'avencs o engolidors ben desenvolupat la profunditat del nivell freàtic pot ser poc determinant, ja que l'aigua d'infiltració discorre molt ràpidament fins a profunditats que poden superar el centenar de metres. Per aquesta raó els mètodes ideats per a aquífers càrstics consideren com a factors determinants de la vulnerabilitat l'existència d'un sistema càrstic i fins a quin punt està desenvolupat, considerant-se tant l'existència d'una morfologia càrstica en superfície com l'existència d'un carst desenvolupat en profunditat. S'ha d'indicar, però, que si es vol fer una estimació de la vulnerabilitat d'un territori on hi ha aquífers

càrstics i no càrstics és més convenient utilitzar un mètode genèric o clàssic, tot i que subestimi la vulnerabilitat a les zones amb carstificació desenvolupada. S'ha de considerar també que per a poder aplicar els mètodes específics per a aquífers càrstics és necessari disposar d'un bon coneixement del desenvolupament del carst en cada zona. A la Figura 10 es presenta la vulnerabilitat a la contaminació a l'illa de Mallorca, en la qual s'observa que els valors de més alta vulnerabilitat es localitzen a les àrees dominades per roques carbonatades i a les zones on la profunditat del nivell freàtic és baixa.

A mode d'exemple, a la Figura 11 es presenten dues imatges aèries de terrenys amb un bon desenvolupament càrstic a Mallorca. En aquestes s'observen àrees amb una intensa fraturació i presència de camps de dolines com poden ser l'àrea propera al Torrent de Pareis (a) o la zona del massís de

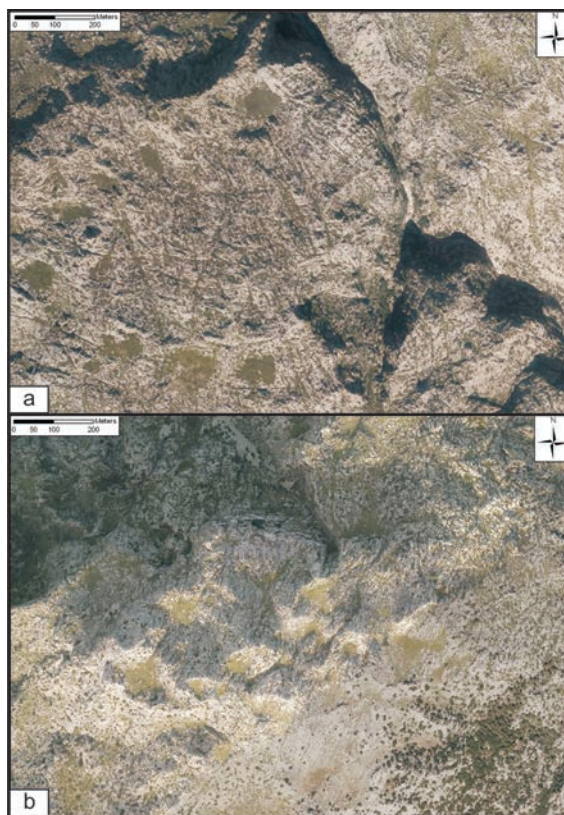


Figura 11: Imatges aèries de zones amb un bon desenvolupament càrstic a Mallorca (Torrent de Pareis (a) i Massís de Sa Costera (b)). En base al mètode EPIK en aquestes zones la vulnerabilitat ha de ser màxima.

Figure 11: Aerial images of areas with a good karst development in Mallorca (Torrent de Pareis (a) and Sa Costera zone (b)). If we apply the EPIK method the vulnerability of these areas should be maximum.

Sa Costera (b). Si apliquessim el mètode EPIK en aquests sectors obtindríem valors propers a 9 (màxima vulnerabilitat). Així, en aquestes dues zones E serà 1 (existeix xarxa càrstica típica ben desenvolupada amb dolines, cavitats subterrànies i resta d'elements); P serà 1 ja que pràcticament no hi ha capa protectora; I serà també 1, ja que és una zona amb vies accessibles per a la infiltració; i K serà 1 ja que existeix una xarxa càrstica ben desenvolupada.

Un altre aspecte relacionat amb la gestió dels aqüífers és el referent a la protecció de les captacions de proveïment urbà. Els pous de proveïment disposen d'uns perímetres de protecció que tenen l'objectiu d'evitar l'arribada de contaminants al pou en qüestió. La contaminació considerada pot ser bacteriològica o química. En el cas de la contaminació bacteriològica s'ha d'establir una zona de trànsit al voltant del pou que permeti assegurar que un microorganisme no sobreviurà, per la qual cosa el temps de trànsit sol estar entre 10 i 100 dies. En el cas de la contaminació química el temps de trànsit que sol considerar-se és d'entre 5 i 10 anys, que és el temps que es considera necessari per a diluir un possible contaminant que ha entrat a l'aqüífer. Les envoltants que defineixen aquests temps de trànsit entre un punt del territori i el pou de proveïment són els anomenats perímetres de protecció.

Per a la determinació de la distància cartogràfica al voltant del pou que es correspon amb el temps de trànsit, es poden utilitzar diverses metodologies (IGME, 2003). De la mateixa manera que per a l'obtenció de la vulnerabilitat d'un aqüífer, els mètodes clàssics per a determinar aquests temps de trànsit així com els radis d'influència o zona de captació d'un pou estan ideats per a aqüífers amb flux difús. Aquests mètodes es basen en les equacions de flux de l'aigua subterrània i en els paràmetres hidrodinàmics, variables que són vàlides per a aqüífers isòtrops. En aqüífers no isòtrops com els càrstics l'ús d'aquestes variables pot induir a errors.

Les variables que es consideren per establir els temps de trànsit i en conseqüència els perímetres de protecció són la transmissivitat, el cabal de bombament, el gruix saturat de l'aqüífer, el gradient hidràulic i la porositat. A partir d'aquests paràmetres s'obté l'envolvent o perímetre al voltant del pou, que tindrà una forma més o menys el·líptica en funció del gradient hidràulic de la zona. Degut a que en els aqüífers càrstics l'aigua circula preferentment

per conductes, l'establiment d'un perímetre de protecció amb aquest tipus de metodologia pot aportar resultats irreals. En aquest sentit hi ha altres metodologies que ens permeten fer una millor estimació dels perímetres de protecció.

Un mètode utilitzat és fer ús de traçadors. Aquest mètode consisteix en abocar una substància innòcua per a l'aqüífer a una zona i determinar el temps que triga en aparèixer a la captació en qüestió. D'aquesta manera s'obtenen amb bona precisió les velocitats i direccions del flux subterrani. Una altra opció que permetrà determinar el perímetre de restriccions és fer un bon estudi hidrogeològic que permeti determinar les direccions de flux en cada zona. En les àrees càrstiques a més serà necessari conèixer la fracturació que afecta a les roques carbonatades, ja que les cavitats i per tant els conductes per on circularà l'aigua subterrània seguiran aquestes línies preferents. En resum, degut a l'anisotropia dels aqüífers càrstics, per a determinar els perímetres de protecció dels pous en aquestes zones és necessari disposar d'una major informació del subsòl, en especial per a la determinació de velocitats i direccions de flux preferents.

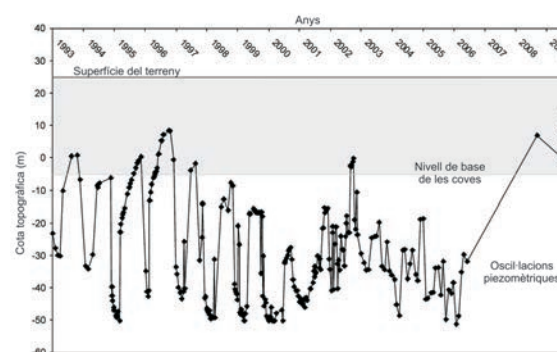


Figura 12: Evolució piezomètrica del pou de proveïment urbà número 2 de Crestatx (xarxa de l'IGME) situat a pocs metres de la zona afectada per col·lapses. La figura representa també la cota topogràfica del terreny del pou (25 metres sobre el nivell del mar) i el nivell de base de les cavitats (5 metres sota el nivell del mar) (figura adaptada a partir de GARCIA-MORENO, I. & MATEOS, R.M., 2011).

Figure 12: Evolution of the water table at the urban supply well of Crestatx number 2 (IGME control network) located a few meters from the affected area by collapsing. The figure also represents the topographic elevation of the land of the well (25 meters above sea level) and the base level of the cavities (5 meters below sea level) (figure adapted from GARCIA-MORENO, I. & MATEOS, RM, 2011).

Problemàtica dels aqüífers càrstics

A part de la problemàtica que comporta l'existència d'un exocarst ben desenvolupat, ja que implica que l'aigua d'infiltració assoleixi l'aqüífer amb rapidesa, una de les problemàtiques més acusades en els aqüífers càrstics és el desenvolupament de formes subterrànies o endocarst. La formació i desenvolupament d'aquestes formes està condicionada en gran mesura per la circulació de les aigües subterrànies, per la qual cosa la modificació d'aquesta circulació pot induir i potenciar processos de dissolució o precipitació. En aquest sentit la gestió dels aqüífers càrstics ha de tenir en consideració que l'exploració de l'aqüífer pot provocar o accelerar processos càrstics.

Un exemple d'aquest problema ha ocorregut a la massa de Crestatx (GARCIA-MORENO & MATEOS, 2011). Aquesta massa d'aigua que proveeix la badia d'Alcúdia ha estat intensament explotada, de fet s'estima que 2,3 dels 2,6 hm³

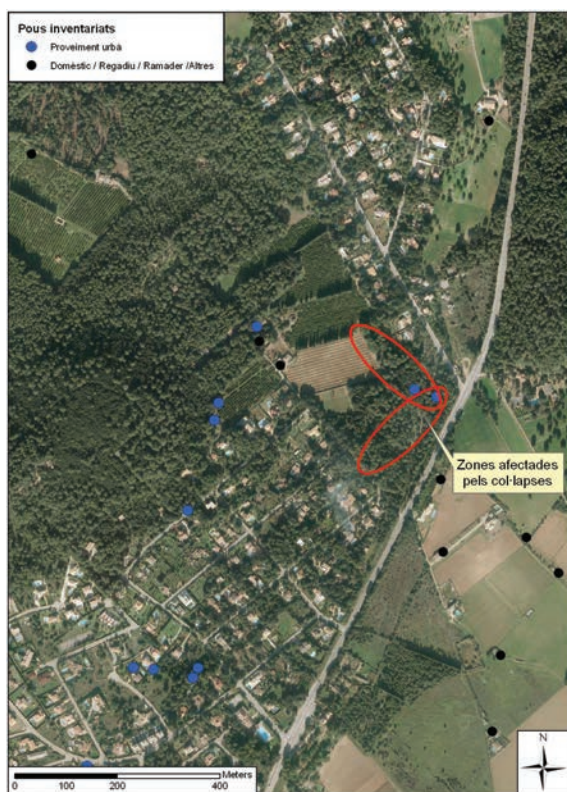


Figura 13: Imatge aèria de la zona de Crestatx on es mostra la localització dels grups de col·lapses i els principals pous de la zona.

Figure 13: Aerial image of the Crestatx area showing the collapse location and the main wells in the area.



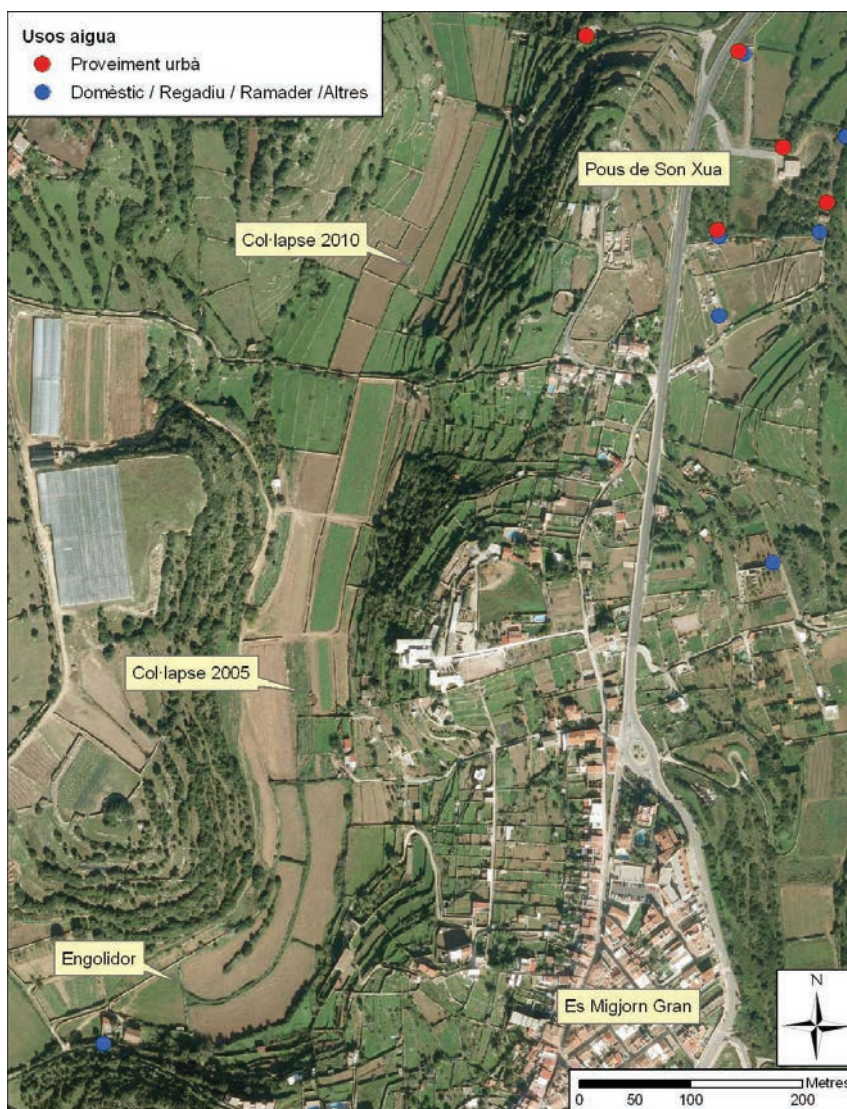
Figura 14: Dos dels col·lapses que s'han obert a la urbanització de Crestatx. A la imatge superior s'observa un gran col·lapse que afecta a una zona de conreu. A la imatge inferior es mostra un col·lapse de més petites dimensions però que afecta a una infraestructura de la urbanització (carretera) i que es localitza a poca distància dels habitatges.

Figure 14: Two of the collapses that have occurred in the urbanization of Crestatx. The upper image shows a large collapse affecting a cultivated area. The lower image shows a smaller collapse affecting an infrastructure of the urbanization (road) and located at a short distance from inhabited houses.

anuals que hi entren s'extreuen mitjançant pous (Taula 3). Aquesta intensa explotació es produeix bàsicament a l'època estival, període en el qual el nivell piezomètric pot descendir fins a quasi 90 m per sota del nivell del mar. D'altra banda a l'època hivernal els nivells es recuperen a cotes positives. A la Figura 12 es presenta l'evolució piezomètrica d'un dels pous de Crestatx entre 1993 i 2009. En aquesta figura s'ha representat també la superfície del terreny (cota del pou) i el nivell de base de les cavitats presumptament produïdes pels processos de dissolució de la zona (profunditat mitjana d'aquestes). De la figura podem destacar les següents qüestions: el nivell de base de les cavitats coincideix amb

Figura 15: Imatge aèria del nucli urbà d'Es Migjorn Gran (Menorca) i del barranc que discorre per l'oest d'aquest nucli. A la imatge s'indica la localització de l'engolidor i dels col·lapses apareguts al llarg del segle XXI.

Figure 15: Aerial view of Es Migjorn Gran village (Menorca) and the karstic ravine that runs through the west of townlet. The image shows the location of the collapses appeared throughout the XXI century.



la cota topogràfica del nivell piezomètric durant les èpoques plujoses i sense extracció (hiverns), és a dir amb els nivells piezomètrics màxims; els descensos entre hivern i estiu arriben a ser de 60 metres (de cota +10 m s.n.m. a cota -50 m s.n.m.) en els anys 90, mentre que en el primer decenni del segle XXI es redueixen a uns 30 metres degut a la menor recàrrega de l'aquífer; les importants pluges de 2008 i 2009 permeten una recuperació espectacular de l'aquífer arribant a superar els registres històrics.

A finals dels anys 90 es va detectar l'aparició d'enfonsaments associats a col·lapses càrstics, que entre els anys 2008 i 2010 varen accelerar-se amb les intenses pluges d'aquells anys. A la Figura 13 es mostra una imatge aèria de la urbanització de Crestatx amb la localització dels pous inventariats i la indicació de les zones afectades pels col·lapses. La distribució espacial

dels col·lapses es pot relacionar amb dues direccions preferents: direcció NO-SE i direcció NE-SO. Aquestes dues direccions concorden amb les direccions preferents de les estructures tectòniques a la Serra de Tramuntana i gran part de Mallorca. Al mateix temps la direcció NO-SE concorda amb la traça d'una sèrie de mines d'aigua que en l'actualitat estan abandonades i que servien per a conduir l'aigua de les zones altes de Crestatx cap a les zones baixes, és a dir en direcció sud-est. En les èpoques en que aquestes mines estaven en funcionament l'aigua de Crestatx s'utilitzava per al reg dels camps de cultiu i no per a l'abastament de la població. Aquestes direccions preferents o alineacions dels col·lapses detectats indiquen que la distribució d'aquests no és aleatòria sino que està relacionada amb elements preexistents que poden tenir un origen antròpic (mines



Figura 16: Imatge del col·lapse que va aparèixer al mig del barranc occidental d'Es Migjorn Gran l'any 2005. A la imatge s'observa com el forat va ser reblert pel pagès per pedres provinents d'una paret seca propera, abocant-hi un total de 40 metres lineals de paret.

Figure 16: Picture of the collapse that appeared in the middle of the western gorge of Es Migjorn Gran in 2005. The picture shows how the hole was filled by the farmer with rocks from a nearby stone-wall, throwing in them a total of 40 linear meters of wall.

d'aigua) o estructural (fracturació i estructures geològiques). En qualsevol cas l'aparició d'aquests col·lapses sembla poder-se relacionar directament amb l'explotació de l'aquífer. Així, les importants oscil·lacions piezomètriques que han tingut lloc a la zona degut a les intenses extraccions de les èpoques estivals i a la recàrrega natural que té lloc a les èpoques hivernals, poden haver ajudat a incrementar la grandària dels conductes càrstics de la zona i han permès l'arrossegament dels materials fins que omplien les cavitats més superficials cap a zones més profundes o interiors. El fet que aquestes oscil·lacions hagin arribat al nivell de base de les cavitats o carst, ha provocat l'acceleració d'un procés que de per si es produeix de manera natural a les zones càrstiques. Les intenses plujes dels anys 2008 i 2009 han estat les que han acabat d'accelerar el procés d'obertura dels col·lapses ja que han provocat un ràpid rentat dels sediments fins dipositats a les cavitats i per tant la pèrdua de sustentament de les parets i sostres de les coves. En l'actualitat alguns d'aquests col·lapses, que tenen diàmetres de

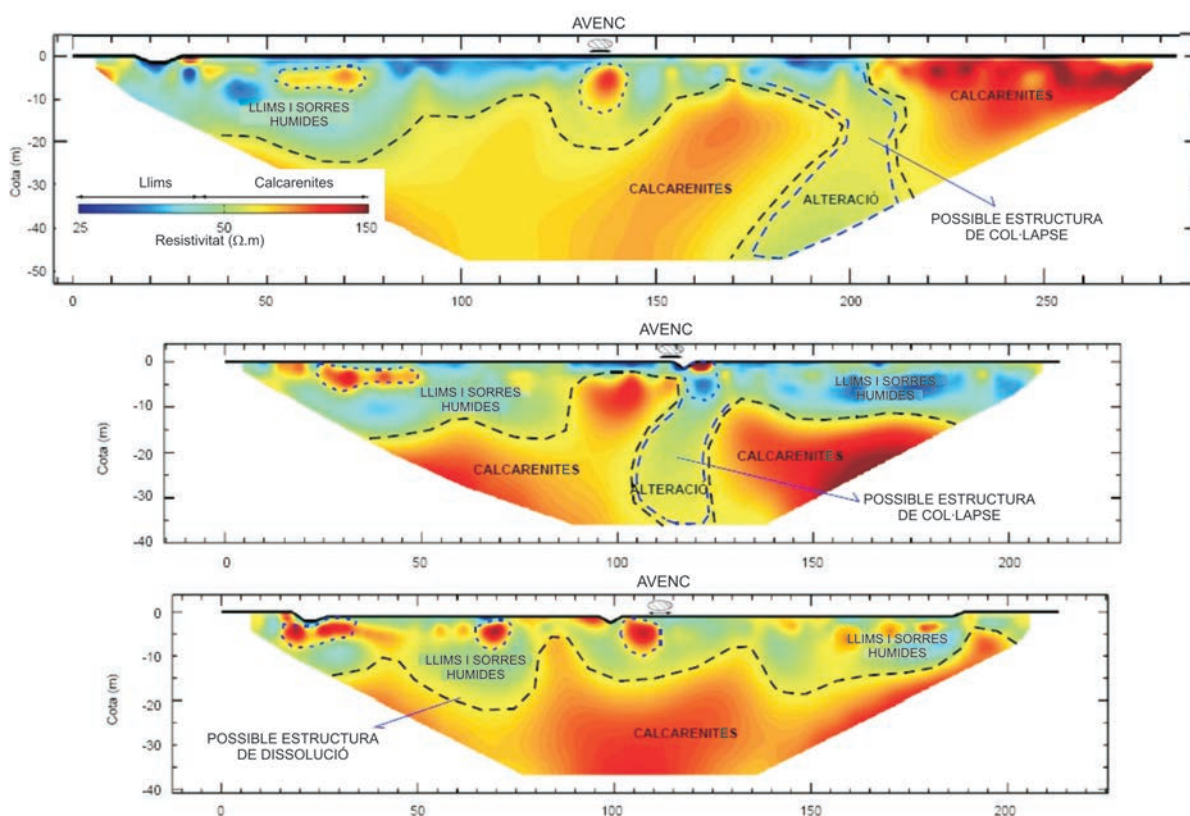


Figura 17: Perfils de tomografia elèctrica realitzats a Es Migjorn Gran per a determinar l'existència de estructures càrstiques en profunditat.

Figure 17: Electric tomography profiles set up near Es Migjorn Gran to determine the possible existence of karstic structures at depth.

fins a 15 metres i profunditats de 7 m, afecten una urbanització i la seva solució no és gens fàcil (Fig. 14).

Un altre exemple d'obertura de col·lapses en zones càrstiques a les Balears el trobem a la massa d'aigua subterrània de Es Migjorn Gran a Menorca. En aquesta massa, en el barranc occidental del nucli d'Es Migjorn Gran, hi ha una zona que rep el topònim de l'Engolidor. Aquesta zona es localitza a la part central del barranc en una àrea deprimida topogràficament respecte de la resta del barranc (Fig. 15). Per la part central d'aquest barranc hi discorre un petit canal de pedra que permet evacuar l'aigua en èpoques de pluja. L'any 2005 a uns 400 m aigües amunt del citat engolidor es va obrir un col·lapse d'uns 7 metres de diàmetre i 5 metres de profunditat que va afectar aquest canal i a les terres circumdants (Figs. 15 i 16). Un estudi de tomografia elèctrica realitzat a la zona (Fig. 17) va posar de manifest que la cobertura de material al·luvial que recobreix el fons del barranc (en colors blaus) té una potència mitjana de l'ordre dels 10 metres i que no reposa sobre un substrat horitzontal. Així en els perfils s'observa com el substrat rocallós, format per calcarenites miocenes (colors grocs i vermells), presenta moltes irregularitats i en ell s'hi observen estructures horitzontals i verticals que estan reblerts per materials més conductors que les calcarenites (colors blavosos). S'observa també l'existència d'anomalies o zones més resistives (colors vermells i grocs) dins la cobertura quaternària que se situen a profunditats d'entre 2 i 5 metres i que presenten formes arrodonides o ovalades que podrien associar-se amb cavitats horitzontals o forats dins la cobertura.

L'obertura d'aquest col·lapse, però, no va provocar més danys que la pèrdua d'una petita zona de conreu a l'amo dels terrenys, a part de la inutilització de la síquia. No va ser fins uns 4 anys més tard (any 2009) que el problema es va accentuar, ja que es va obrir un nou col·lapse uns 400 m aigües amunt de l'anterior (Figs. 15 i 18). En aquest cas aquest col·lapse no va ser de tanta profunditat com el primer, però va coincidir amb una aparició de sediments fins a un dels pous de proveïment del nucli des Migjorn, situat uns 250 metres a l'est del col·lapse. Així doncs, és probable que existeixi una connexió entre el darrer dels col·lapses i els pous de Son Xua que proveeixen al nucli d'Es Migjorn Gran. Aquesta connexió podria ser una galeria subterrània que aprofités una estructura de la roca miocena preexistent. Basant-nos en la direcció entre el



Figure 18: Imatge del col·lapse que va aparèixer l'any 2009 uns 400 metres al nord del col·lapse aparegut l'any 2005. A la imatge s'observa que aquest col·lapse provoca una depressió d'un metre en una àrea de forma circular amb un diàmetre de 5 metres.

Figure 18: Picture of the collapse that occurred in 2009 about 400 meters north from the collapse appeared in 2005. The picture shows that this collapse causes a depression one meter deep in a circular area with a diameter of 5 meters

col·lapse i els pous (OSO-ENE) podria tractar-se d'una estructura sedimentària.

L'aparició dels col·lapses a les proximitats del nucli d'Es Migjorn Gran no sembla tenir el mateix origen que a la zona de Crestatx, és a dir deguda a un ascens i descens dels nivells piezomètrics de manera estacional. En el cas de Menorca, l'origen probablement està condicionat pel descens continuat que han sofert els nivells piezomètrics en aquesta àrea en els darrers 30 anys. De fet des dels anys 80 del segle XX fins a principis del segle XXI la profunditat de l'aigua ha descendit entre 10 i 20 metres en aquesta part del Migjorn, arribant-se a descensos de 30 metres (Fig. 19). Aquest descens pot haver provocat un canvi en les condicions dels materials de la zona vadosa que ha facilitat l'aparició dels col·lapses. Així mateix, si substituïm l'aigua emmagatzemada als porus de la roca en els primers 30 metres per aire provoquem també un canvi en les condicions de la roca. La major compressibilitat de l'aire en front de l'aigua permet que el conjunt de la roca porosa pugui canviar de volum amb més facilitat. D'altra banda, les pluges dels anys 2008 i 2009 poden també haver ajudat a l'aparició del col·lapse més septentrional.

S'ha de recordar, però que els col·lapses càrstics són un dels elements que caracteritzen les zones carstificades, i que l'efecte de l'home és en aquests casos un factor que accelera un procés que tard o d'hora s'acaba produint.

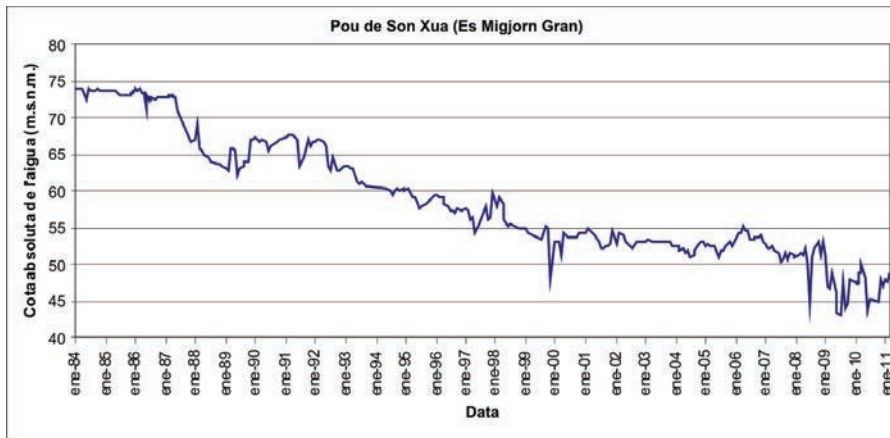


Figura 19: Evolució piezomètrica a un dels pous de proveïment del nucli d'Es Migjorn Gran.

Figura 19: Piezometric evolution in a urban supply well in Es Migjorn Gran.

Conclusions

Les roques que conformen els terrenys aflorants a les Illes Balears són en la seva gran majoria de tipus carbonatats. Aquestes roques carbonatades estan afectades en molts casos per processos càrstics. A les Balears la pràctica totalitat dels recursos hídrics provenen de les aigües subterrànies, per tant és necessari tenir un bon coneixement dels aqüífers càrstics. Degut a que el comportament dels aqüífers càrstics és diferent al dels aqüífers de flux difús la gestió dels recursos hídrics a les Balears ha de tenir en consideració l'existència d'aquest fenomen. En aquest sentit és necessari que es duguin a terme estudis encaminats al millor coneixement del carst a les Balears. Aquest millor coneixement ha de permetre poder establir la vulnerabilitat dels aqüífers, les velocitats i les direccions de circulació dels fluxos subterranis. Així mateix, l'explotació dels aqüífers càrstics de les Balears s'ha de dur a terme considerant els canvis que aquesta explotació pot causar en el funcionament dels sistemes càrstics. Aquests canvis de funcionament poden provocar pèrdues econòmiques de certa importància, ja que poden induir col·lapses o subsidències, raó per la qual és necessari fer una estimació de les conseqüències que poden anar associades a la sobreexplotació d'un aqüífer.

Bibliografia

- ALLER, L., BENNET, T., LEHR, J. H., PETTY, R.J., & HACKETT G., (1987): DRASTIC: A standardized system for evaluating ground water pollution potential using hydrogeologic settings. *NWWA/ EPA Series, EPA-600/2-87-035*.
- DOERFLINGER, N. & ZWAHLEN F. (1998): Practical guide, groundwater vulnerability mapping in karstic regions (EPIK). *Swiss Agency for the Environment, Forests and Landscape (SAEFL)*, 56 pp.
- FOSTER, S.S.D. (1987): Fundamental concepts in aquifer vulnerability, pollution risk and protection strategy. Vulnerability of Soil and Groundwater to pollutants. *TNO Committee on Hydrological Research Information* 38: 69-86.
- GARCIA-MORENO, I. & MATEOS R.M. (2011): Sinkholes related to discontinuous pumping: Susceptibility mapping based on geophysical studies The case of Crestatx (Majorca, Spain). *Environmental Earth Sciences*, 64 (2): 523-537.
- IGME (2003). Perímetros de protección para captaciones de agua subterránea destinada al consumo humano. Metodología y aplicación al territorio. *Serie: Hidrogeología y Aguas Subterráneas*. 273 pp.
- Office Fédéral de l'environnement, des forêts et du paysage (OFEFP) (1998): *Guide pratique. Cartographie de la vulnérabilité en régions karstiques (EPIK)*. 57 pp.
- Servei d'Estudis i Planificació de la DG de Recursos Hídrics (2011): Memòria del Pla Hidrològic de les Illes Balears. 490 pp. (<http://www.caib.es/sacmicrofront/archivopub.do?ctrl=MCRST259ZI95153&id=95153>)
- VIAS, J.M.; ANDREO, B.; PERLES, M.J.; CARRASCO, F.; VADILLO, I. & JIMENEZ, P. (2004): The COP method. In: Vulnerability and risk mapping for the protection of carbonate (karst) aquifers, Final Report of COST Action 620. European Commission, Directorate-General XII Science, Research and Development. 163-172.