

Caracterització físico-química dels llacs de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca)

Joan J. FORNÓS^{1,2}, Alejandro PILARES¹, Francesc GRÀCIA^{1,2} i Ana ENTRENA^{1,2}

¹ Grup de Recerca de Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma. Email: joan.fornos@uib.cat

² Societat Espeleològica Balear. Palma.

Abstract

Five-year (2013-2017) of sampling data of the physical-chemical characteristics of the lake waters existing in the Coves del Drac are presented. Salinity, temperature and pH as well as dissolved oxygen data, along the entire water column are measured, with special emphasis on the most superficial part due to the interest that it represents for the interaction of the environment with respect to the precipitation/dissolution of the carbonates. The data obtained show the presence of one, sometimes two, haloclines, as well as the variation of both the temperature and the pH with a marked seasonal and, variable, character in the different lakes related to the topography (profile) of the cave and the environmental parameters of the air-filled chambers.

Resum

Es presenten les dades de mostreig durant un quinquenni (2013-2017) de les característiques físico-químiques de les aigües dels llacs existents a les Coves del Drac. S'han pres mesures de salinitat, temperatura i pH així com d'oxigen dissolt, al llarg de tota la columna d'aigua, tot posant un especial èmfasi en la part més superficial degut a l'interès que representa per a la interacció del medi respecte a la precipitació/dissolució dels carbonats. Les dades obtingudes mostren la presència d'una, a vegades dues, haloclines, així com la variació tant de la temperatura com del pH amb un marcat caràcter estacional i, variable, en els diferents llacs relacionat amb la topografia (secció) de la cova i dels paràmetres ambientals de les cambres d'aire.

Fornós, J. J. ; Pilares, A. ; Gràcia, F. i Entrena, A. (2018): Caracterització físico-química dels llacs de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca).
Papers Soc. Espeleo. Balear, 1: 181-195. ISSN 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.
Rebut: 7 novembre 2019; **Revisat:** 18 novembre 2019; **Acceptat:** 26 novembre 2019.
Publicat online: 10 desembre 2019.

Introducció

La presència de cavitats càrstiques amb ambients anquihalins és molt important a la franja litoral sud i est de l'illa de Mallorca (JAUME & GRÀCIA, 2006). La proximitat a la línia de costa ha determinat la seva espeleogènesi i posterior evolució per la fluctuació de la zona de mescla d'aigües continentals i marines, que han controlat i determinat els fenòmens que han tingut lloc en aquestes cavitats (GINÉS, 2000; GINÉS et al., 2018). Moltes d'aquestes coves, les quals se situen sobre materials carbonatats del miocè superior (FORNÓS & GELABERT, 2011), es caracteritzen per un important desenvolupament horitzontal on destaca la presència de grans sales originades per processos de col·lapse, així com llacs quan s'assoleix el nivell freàtic juntament amb tota una sèrie de galeries i conductes negats (GINÉS & GINÉS, 2011).

La columna d'aigua d'aquests llacs té un paper molt important en el règim geoquímic d'aquestes cavitats a causa de tot un conjunt de processos i aspectes que en deriven de les seves característiques, entre els quals destaca la desgasificació de CO₂ que es produeix a la interfase aire-aigua i provoca la precipitació i acumulació de calcita a la superfície dels llacs (TAYLOR et al., 2004; FAIRCHILD et al., 2006). Aquest fenomen té una forta implicació en la formació d'espeleotemes freàtics (Figura 1) i en la deposició de sediments carbonatats en el fons dels llacs (FORNÓS et al., 2011, PILARES et al., 2018). Els aspectes que contribueixen a la formació i determinen les característiques d'aquests sobrecreixement freàtics han estat fruit d'anàlisi en diferents ocasions (BOOP et al., 2017; CSOMA et al., 2006; GINÉS et al., 2012) a causa, principalment, de l'important coneixement que aporten en l'estudi de les oscil·lacions glacioeustàtiques que ha experimentat la Mediterrània durant el quaternari (DORALE et al. 2010; TUCCIMEI et al. 2010; POLYAK et al., 2018).

Un altre aspecte molt important és l'elevada agressivitat química de les aigües que es produeix per la mescla d'aigües meteòriques i salines al litoral (BACK et al., 1979, 1984), en aquest àmbit es detecta una important haloclina derivada del notable canvi en profunditat de les concentracions de salinitat de les aigües pel contacte de masses amb diferents graus de salinitat (GRÀCIA, 2015). En aquests nivells, els processos de dissolució de la roca són molt importants i és comú trobar un gran nombre de morfologies de corrosió (GRÀCIA et al., 2011).

En general, la columna d'aigua d'aquests àmbits càrstics apareix estratificada i estable, amb capes ben definides i amb carència de corrents horitzontals importants, a excepció de les sales o conductes

negats més pròxims al mar, on a vegades, el contacte directe amb la mar ocasiona que les aigües transportin materials d'origen marí dins la cavitat (FORNÓS et al., 2011).

Les Coves del Drac, situades a la marina de Manacor, són un clar exemple de cavitat de la zona de mescla d'aigües en un entorn anquihalí, on les seves característiques, així com els processos que tenen lloc al seu interior, estan controlats pels factors que afecten les aigües freàtiques (recàrrega, intrusió marina, desgasificació, etc.). En aquesta línia, l'objectiu del present estudi és el de caracteritzar la columna d'aigua de la cova (posant un especial èmfasi en els nivells més superficials), analitzar la seva variació temporal a diferents punts de la cavitat, i determinar les implicacions que té en els processos que es produeixen a la cavitat.



Figura 1: Sobrecreixements freàtics (POS) subactuals creixent sobre estalagmites a la galeria de les Delícies (Foto: A. Cirer).

Figure 1: Present-day phreatic overgrowths on speleothems (POS) growing over stalagmites in Galeria de les Delícies (Photo: A. Cirer).

Mètodes

Donat l'interès que té la geoquímica de les aigües per a la precipitació dels espeleotemes freàtics es va posar especial interès en el mostreig de la làmina més superficial dels llacs. En aquest sentit i aprofitant el fàcil accés des de la vorera dels llacs es van fer mesures periòdicament al *llac Negre* i al *llac de les Delícies*.

Per analitzar la composició geoquímica de la capa superior de la columna d'aigua de la cavitat, s'han realitzat mesures de temperatura i de potencial d'oxidació-reducció (ORP), així com dels nivells de pH, TDS, conductivitat i salinitat durant el període 2012 – 2017. S'efectuaren mostres trimestrals a punts concrets de la cova (Figura 2) per poder caracteritzar la seva dinàmica anual i estacional, fent ús d'una sonda multiparàmetre Hanna (HI9828) amb registres cada 20 cm des de la superfície de l'aigua fins a una profunditat màxima general de 2,60 m, amb oscil·lacions de +/- 25 cm per canvis en el nivell freàtic derivats de la situació meteorològica i de variacions de la pressió atmosfèrica (GÓMEZ-PUJOL et al., 2007).

Per altra banda, i donada la importància del reconeixement de la presència d'haloclines, les capes inferiors de la columna d'aigua es caracteritzaren a partir de les dades obtingudes pels espeleobussejadors, fent ús d'una sonda multiparàmetre EXO-1 (YSI) amb interfície KOR. Es realitzaren 3 mostres entre el 2015 i 2016 a 4 punts diferenciats de la cavitat (Figura 2). D'aquesta manera, s'ha pogut caracteritzar per complet el perfil vertical de l'aigua i documentar la zona d'haloclina. Per a l'anàlisi de la informació s'han representat gràficament totes les dades i s'han calculat diferents paràmetres estadístics, per conèixer el comportament temporal que experimenta la làmina d'aigua i poder analitzar els diferents canvis a cada punt de la cova.

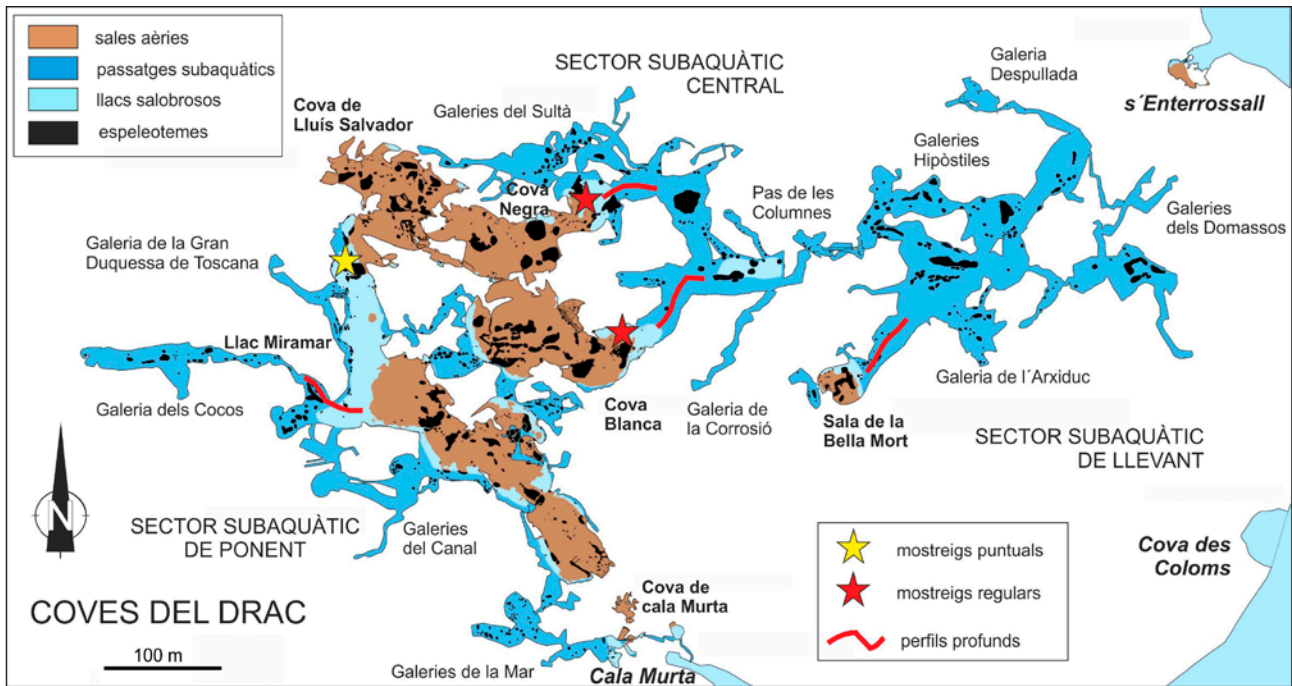


Figura 2: Plànol topogràfic general de les coves del Drac, amb la localització dels punts de mostrejos geoquímics de les aigües (Base topogràfica SEB – Societat Espeleològica Balear).
 Figure 2: General topographic map of Coves del Drac showing the points of water sampling for their geochemical description (Topographic base SEB – Societat Espeleològica Balear).

Paral·lelament es mesuraren també els paràmetres ambientals (temperatura i CO_2) de la cavitat a la zona dels llacs amb un sensor Vaisala (GM70) i es feren observacions de la presència de calcita flotant a la superfície de les aigües.

Antecedents

Poca és la informació des del punt de vista geoquímic que es té de les característiques dels llacs salobrosos presents a les Coves del Drac. Les primeres dades modernes amb un cert rigor científic corresponen a les que es realitzaren a la cavitat tot aprofitant les primeres exploracions subaquàtiques que s'hi realitzaren per un grup de gal·lesos (GRÀCIA et al, 2018). D'aquestes exploracions en surt el treball de GASCOINE (1992), el qual dona dades sobre la presència d'haloclines i les relaciona amb processos de dissolució. Aporta també dades de conductivitat, temperatura i pH així com d'alguns cations (Na, Ca i Mg) del *llac Negre* (fins a una profunditat de 4 m), *llac Miramar* o *Martel* (fins a una profunditat de 8 m) i *llac de les Delícies* (fins a una profunditat de 4 m) a part d'altres llacs més petits. Els valors que dona de temperatura per al *llac Negre* (14,4°C en superfície i 17,2°C a 4 m) són més baixos que els dels altres llacs (18,0°C a 18,8°C pel *llac de les Delícies*, 18,9°C a 19,3°C pel *llac Miramar*) fet que es relaciona clarament amb la temperatura de l'aire (14,9°C pel *llac Negre*, i poc més de 18°C per als altres dos). En quant a la conductivitat, en tots els casos s'incrementa en profunditat; en superfície va des dels 2,2 mS del *llac Negre* a 8,0 mS del *llac Miramar* i als 4 m de profunditat dona 8,3 mS al *llac Negre* mentre que als 8 m de profunditat el *llac Miramar* arriba a valors de 13,3 mS (9,2 mS als -4 m). El pH en tots els casos és lleugerament inferior a 7 excepte a la superfície del *llac de les Delícies* amb valors de 7,35.

Les dades més recents van associades als treballs relacionats amb la tesi doctoral de L.M. Boop realitzada a la University of South Florida (BOOP, 2014). En aquesta memòria, juntament amb treballs relacionats amb l'esmentada tesi (BOOP et al., 2013, 2014, 2017), es donen les dades corresponents als perfils de 2,6 m de profunditat realitzats al *llac de les Delícies* de pH, temperatura i conductivitat així com de la composició isotòpica d'oxigen i carboni i del contingut en oxigen dissolt; tot això amb l'objectiu d'avaluar la capacitat del medi en la precipitació/dissolució de carbonats, sia en forma d'aragonita o de calcita. Part dels resultats, concretament els corresponents a l'any 2013 estan incorporats en la descripció dels paràgrafs següents.

Resultats dels primers 2,6 m de la columna d'aigua (llac Negre – llac de les Delícies)

Els resultats obtinguts mostren lleugeres variacions espacials i temporals entre els diferents perfils analitzats, no obstant això, són importants els canvis que es produeixen al llarg dels perfils de la columna d'aigua pel que fa a cada una de les variables analitzades. A continuació, es descriuen les principals característiques de la capa superficial (fins a 2,60 m de profunditat) a partir dels mostrejos regulars efectuats. Aquesta informació s'ha complementat amb les dades dels mostrejos puntuals realitzats pels espeleobussejadors a diferents punts de la cova, per intentar caracteritzar tot el perfil vertical accessible (la profunditat màxima dels conductes és de 24,0 m a la *galeria de les Delícies*; ENSEÑAT et al., 2018) dades que es descriuen més endavant en un altre apartat.

Temperatura

En general, la temperatura disminueix en els primers 40 cm però amb la profunditat augmenta de forma lineal i progressiva a tots els perfils. Al *llac Negre* (Figura 3a) la temperatura de l'aigua és

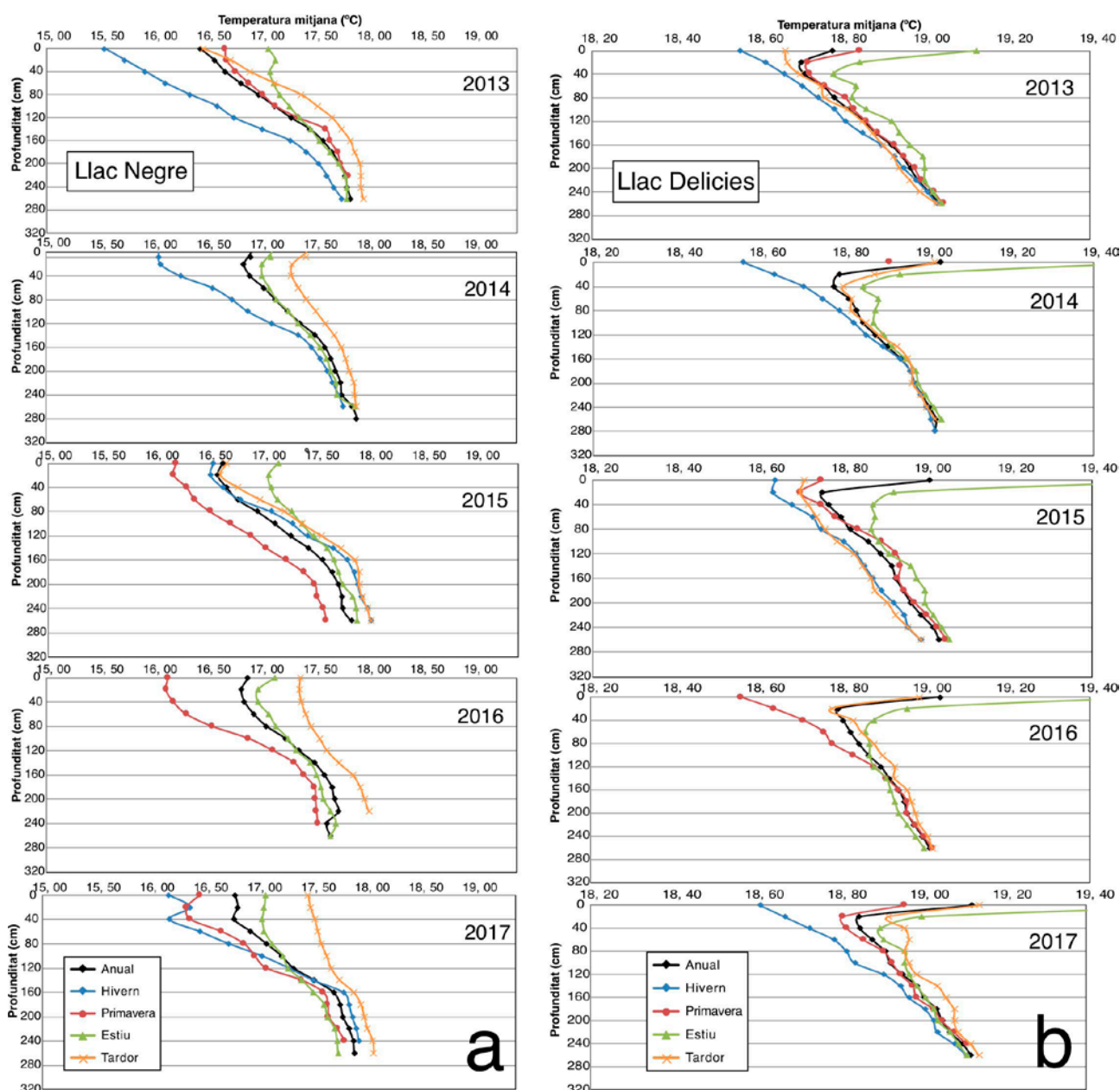


Figura 3: Perfils estacionals superficials de les temperatures mitjanes realitzats al *Llac Negre* (a) i *Llac de les Delícies* (b).
 Figure 3: Shallow seasonal profiles of average temperatures measured at *Llac Negre* (a) and *Llac de les Delícies* (b).

lleugerament inferior amb un valor mínim enregistrat de 15,94°C, un valor màxim de 18,08°C i una mitjana de 17,33°C, per part seva, el *llac de les Delícies* (Figura 3b) és un poc més càlid amb un mínim de 18,29°C, un màxim de 19,78°C i una mitjana de 18,91°C.

Estacionalment, cal destacar la variabilitat de la capa més superficial dels llacs (entre els 0 i els 40 cm de profunditat) amb importants oscil·lacions en la temperatura. Es produeixen augments significatius durant els mesos càlids i disminucions durant els períodes freds de l'any. A la resta del perfil, les temperatures mitjanes són més baixes durant els mesos d'hivern i primavera i les més elevades als mesos d'estiu i tardor. El perfil és molt estable durant tot l'any al *llac de les Delícies*, mentre que al *llac Negre* la variabilitat és major.

Al *llac Miramar*, on s'han fet mostrejos de forma esporàdica la temperatura del perfil és molt estable i varia molt poc en profunditat.

Anualment, el comportament de la làmina d'aigua és molt similar a tots els llacs, encara que cal destacar un augment de la temperatura enregistrada a la capa més superficial del *llac de les Delícies* durant els últims anys (2014-2017) en comparació amb anys anteriors.

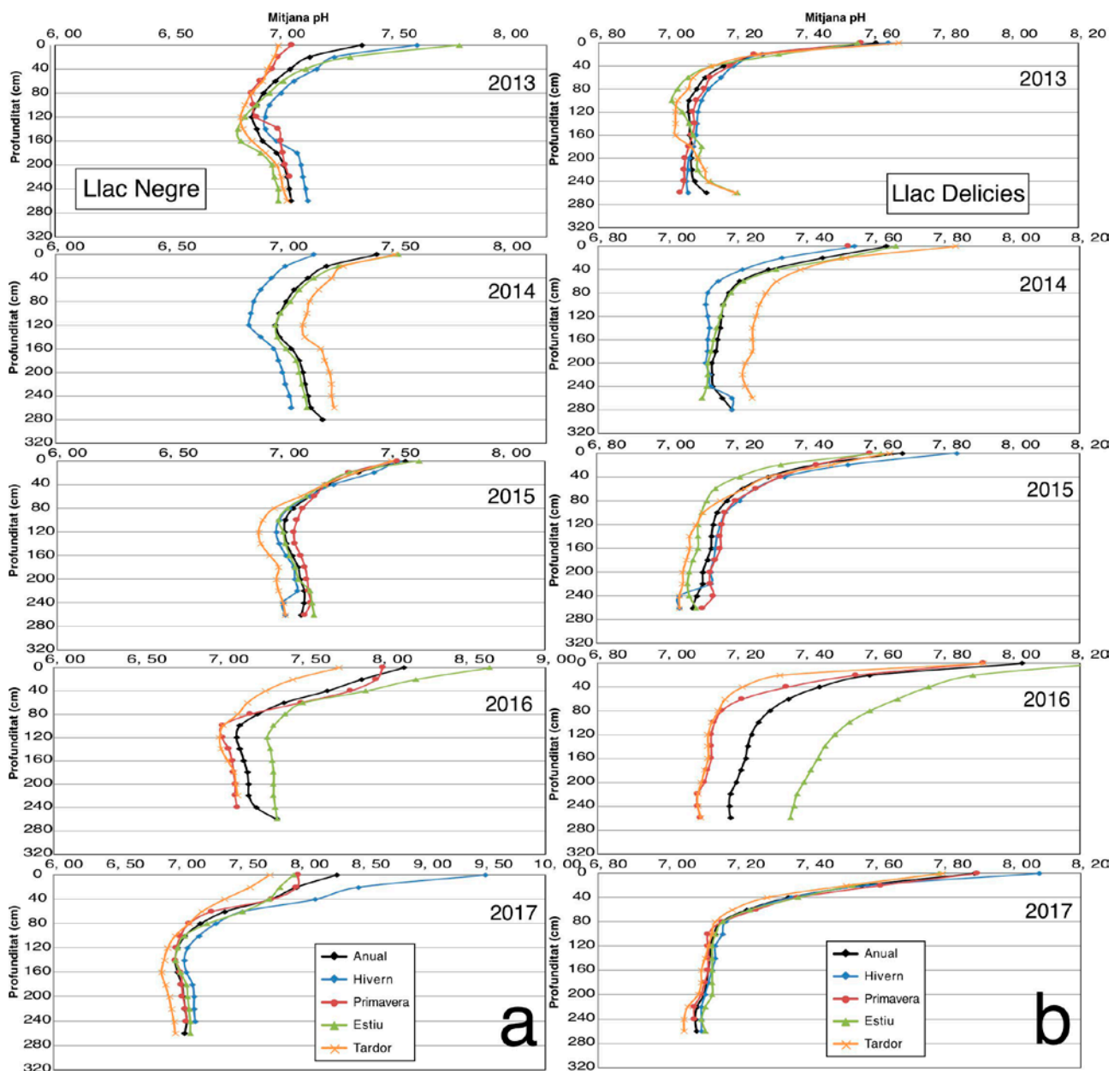


Figura 4: Perfils estacionals superficials del pH mitjà realitzats al *Llac Negre* (a) i *Llac de les Delícies* (b).
 Figure 4: Shallow seasonal profiles of average pH measured at *Llac Negre* (a) and *Llac de les Delícies* (b).

pH

Els valors de pH al *llac Negre* i al *llac de les Delícies* són molt similars amb uns valors mitjans per al període de 7,18 i 7,21 respectivament. Amb més detall, el primer presenta un valor mínim de 6,87 i màxim de 9,51, el segon, 6,86 de mínim i 8,26 de màxim (Figura 4).

El pH té un comportament similar al llarg de tot l'any a tot el perfil, malgrat això, són importants les variacions que es produeixen a prop de la superfície on les aigües són més bàsiques amb pH més alts. Les capes inferiors són molt estables i van disminuint en profunditat fins als 1,20 m, per després augmentar lleugerament. Tal i com es veurà més endavant, les lectures amb el sensor EXO-KOR indiquen que en general, a partir dels 8 metres de fondària té lloc un important augment del pH, que en la zona de la *sala de la Bella Mort* és als -10 m. A nivells més baixos torna a disminuir molt lleugerament el pH.

Salinitat

La salinitat augmenta amb la profunditat a totes les zones de la cova. Les dades obtingudes de les capes d'aigua inferiors (vegeu més endavant) mostren un augment important de la salinitat en general entre els 6 i 8 m de fondària, punt on se situa la zona d'haloclina i que ja dona pas a les aigües plenament marines.

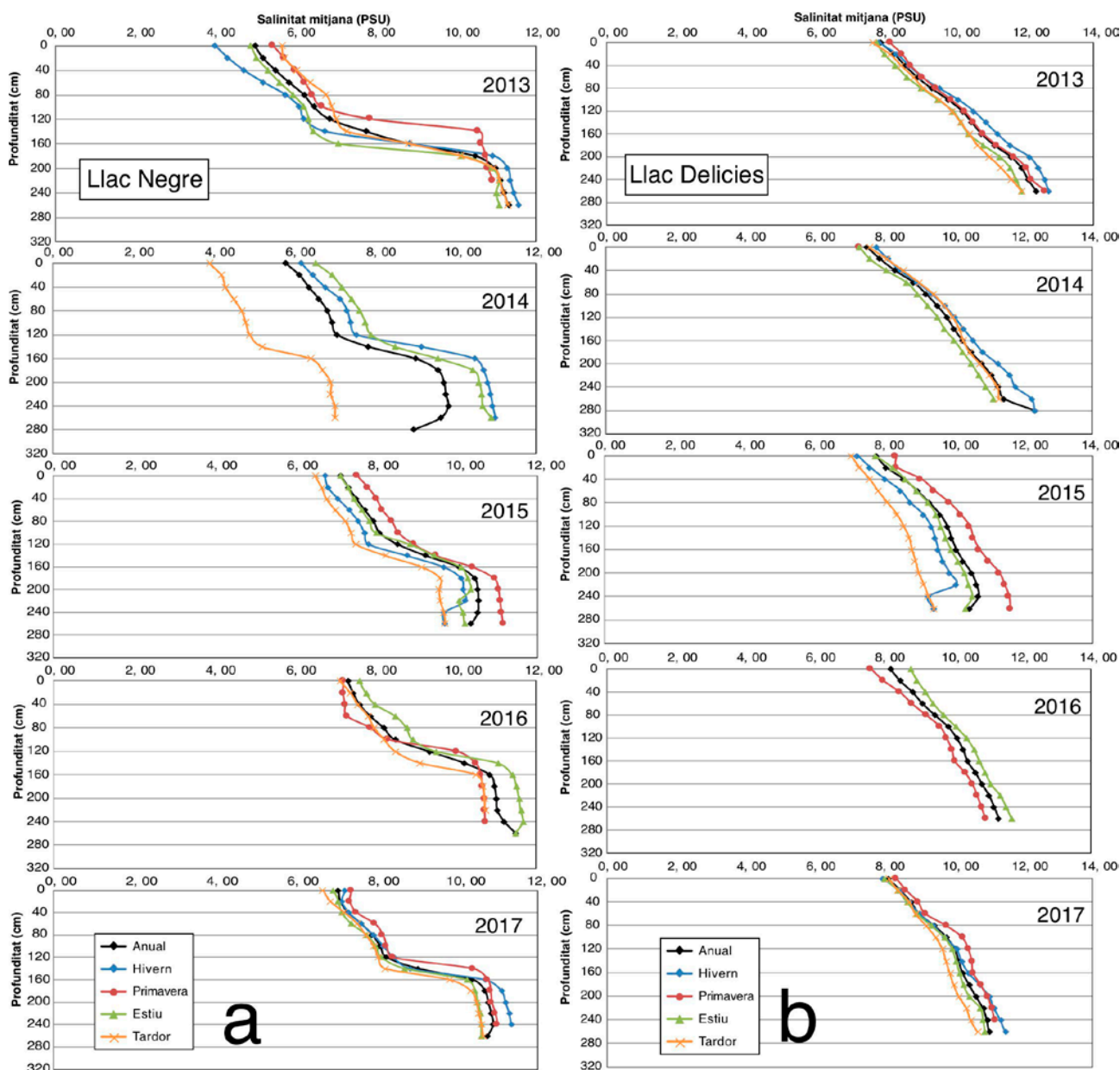


Figura 5: Perfils estacionals superficials de la salinitat mitjana realitzats al *Llac Negre* (a) i *Llac de les Delícies* (b).
Figure 5: Shallow seasonal profiles of average salinity measured at *Llac Negre* (a) and *Llac de les Delícies* (b).

Les diferents zones de la cova presenten petites variacions en les concentracions de salinitat: al *llac de les Delícies* (Figura 5b) es produeix un augment de la salinitat en profunditat molt lineal però té unes concentracions més elevades amb un valor mitjà de 9,86 psu, un valor mínim de 6,15 psu i màxim de 12,96 psu; al *llac Negre* (Figura 5a) l'augment de salinitat en profunditat a la capa superficial és més accentuat encara que en general registra uns valors de salinitat inferiors amb un valor mitjà de 8,88 psu, un valor mínim de 3,90 psu i un valor màxim d'11,68 psu.

La salinitat a la capa superior del *llac Miramar*, com ja ocorre amb altres paràmetres es presenta molt estable, sense pràcticament variabilitat fins a arribar a les aigües més profundes i a la zona d'haloclina.

Estacionalment hi ha petites variacions en les concentracions de salinitat de tots els perfils, encara que no segueixen un patró del tot definit.

Anualment, tots els llacs presenten una dinàmica similar, no obstant això, cal destacar els valors del *llac Negre* durant els anys 2013 i 2014 amb uns nivells de salinitat més baixos, amb una psu mitjana de 8,05 i 8 respectivament.

Oxigen dissolt

Aquest paràmetre presenta valors anuals i estacionals molt irregulars (potser degut al mal funcionament dels sensors), motiu pel qual ha estat difícil establir el seu comportament general i caracteritzar la seva dinàmica estacional i anual (Figura 6). En línies generals la concentració percentual d'oxigen dissolt és un poc superior a la capa més superficial, disminuint lleugerament o mantenint-se al llarg dels dos primers metres per tornar a pujar lleugerament a partir d'aquí. Tan sols un fet cal remarcar i és la clara diferència entre el *llac Negre* i el *llac de les Delícies*. En el *llac Negre* s'hi observa clarament un nivell d'anòxia entre els 0,50 i 1,60 m de profunditat que s'ha pogut constatar en tots els mostrejos (Figura 6a).

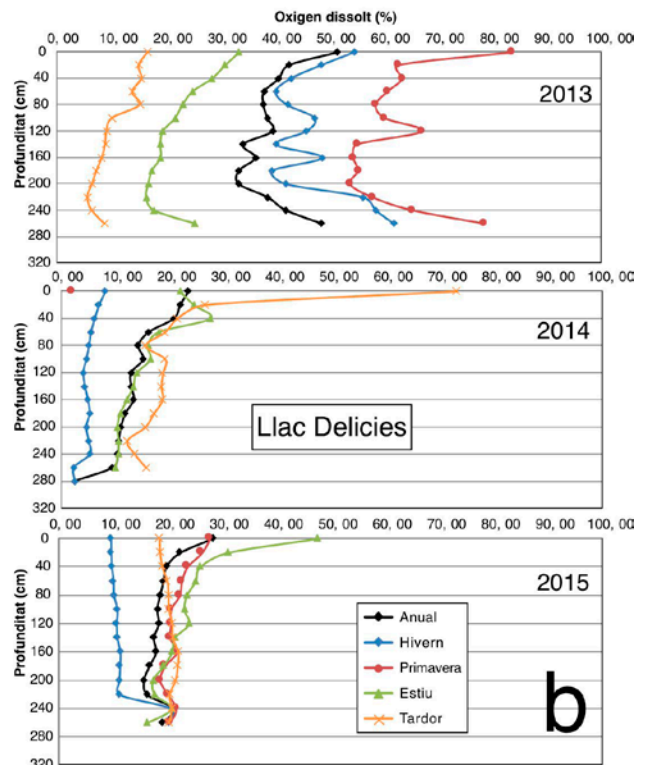
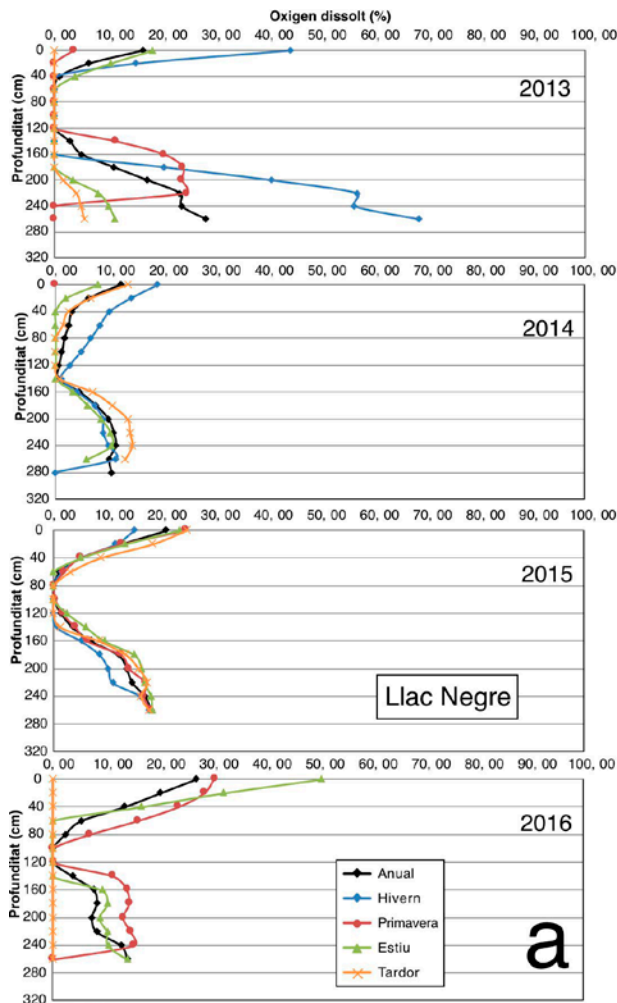


Figura 6: Perfils estacionals superficials de l'oxigen dissolt mitjà realitzats al *llac Negre* (a) i *llac de les Delícies* (b).
 Figure 6: Shallow seasonal profiles of dissolved oxygen average measured at *Llac Negre* (a) and *Llac de les Delícies* (b).

Concentració de CO₂ i presència de calcita flotant

Els valors de la concentració del CO₂ a les cambres d'aire situades sobre els llacs Negre i de les Delícies mostren una gran estacionalitat així com diferències significatives entre els dos llacs (Taula 1). Durant l'estació estival i coincidint amb el moment de menor aireació de la cavitat les dues zones arriben a valors superiors als 1400 ppm de CO₂, mentre que en l'època hivernal presenten valors entre els 400 i 450 ppm. A primavera i tardor els valors oscil·len entre els 500 i 700 ppm. Els valors alts en el contingut de CO₂ es mantenen durant més temps a la zona del llac de les Delícies, mentre que la variació deguda a l'estacionalitat és molt més ràpida a la zona del llac Negre degut bàsicament al perfil més directe d'accés i la facilitat d'entrada d'aire exterior fins aquesta zona. Un comportament similar té la temperatura de l'aire on s'observa una major fluctuació i uns valors més extrems en el cas del llac Negre mentre que al llac de les Delícies la variació és més moderada.

L'observació dels cristalls de calcita flotant a la superfície dels llacs també mostra diferències significatives (Taula 1). En línies generals podem dir que al llac Negre la calcita flotant hi és present durant tot l'any i en quantitats significatives mentre que al llac de les Delícies aquesta no sempre hi és present, i si hi és ho fa en proporció inferior a la del llac Negre. En ambdós casos la presència de calcita flotant sembla ser més important durant l'hivern.

		CO ₂ (ppm)	Temperatura (°C)	Calcita flotant
Llac Negre	Hivern	398	16,01	xxx
	Estiu	1480	21,6	xxx
Llac de les Delícies	Hivern	458	16,5	xx
	Estiu	1442	19,8	x

Taula 1: Dades de CO₂ i temperatura de l'aire de la cova a les zones del llac Negre i del llac les Delícies, així com de la presència de calcita flotant a la seva superfície (x: poc abundant; xx: abundant; xxx: molt abundant).

Table 1: CO₂ and temperature air data at the Llac Negre and Llac de les Delícies as well as presence of calcite rafts in their surface. (x: not abundant; xx: abundant; xxx: very abundant).

Perfils profunds de temperatura, salinitat i pH

Donades les característiques topogràfiques de la cova i el seu desenvolupament tant en planta com en vertical, s'ha optat per realitzar una sèrie de perfils mitjançant l'espeleobusseig allà on per qüestions operatives resultés més senzill accedir al màxim de la columna d'aigua. En total s'han fet quatre perfils (Figura 2) iniciant-se en tots els casos en els principals llacs i seguint per les seves continuacions subaquàtiques, prenent mesures en cada un d'ells de temperatura, salinitat i pH. Aquests perfils no s'han realitzat en una mateixa vertical sinó que s'han fet a través d'un transecte adaptant-se a les característiques de la cova i procurant agafar el màxim desnivell dins la columna d'aigua.

Llac Miramar i galeria dels Cocos

Al llac Miramar i galeria dels Cocos (Figura 7), la temperatura del perfil és molt estable (de 19,3 a 20°C) i varia molt poc en profunditat, malgrat això, les lectures obtingudes pels espeleobussejadors mostren una lleugera disminució en la temperatura als 8 m de profunditat, que torna a augmentar a partir d'aquesta cota. A més, en aquelles zones més profundes, es pot observar una lleugera disminució de la temperatura a partir dels 11-12 m. En



Figura 7: Localització d'un dels perfils CTD anant del llac Miramar a la galeria dels Cocos. L'aspecte borros del submarinista de l'esquerra mostra la presència de l'haloclina (Foto: A. Cirer).
Figure 7: Location of a CTD profile from Llac Miramar to Galeria dels Cocos. The blurred aspect of the diver on the left side shows the presence of one halocline (Photo: A. Cirer).

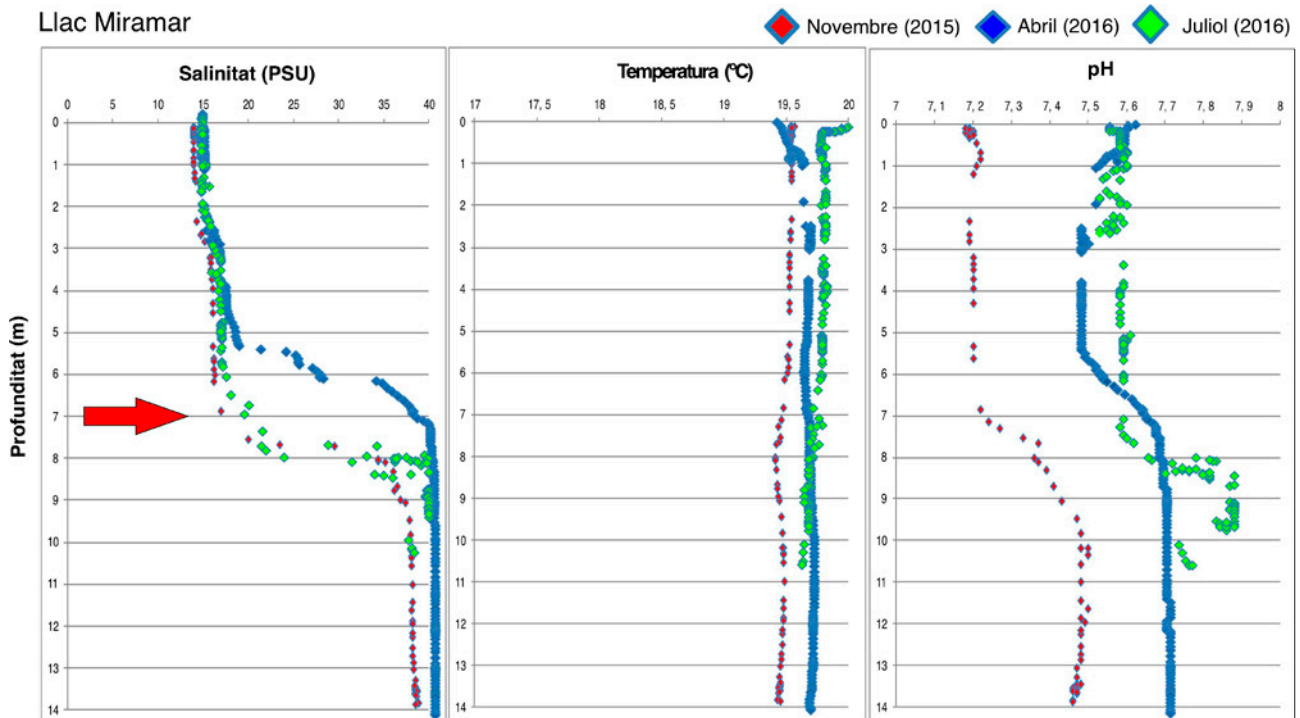


Figura 8: Perfils profunds de salinitat, temperatura i pH del *llac Miramar* a la *galeria dels Cocos* (la fletxa indica la situació de l'haloclina).
 Figure 8: Deep-water profiles of salinity, temperature and pH at *Llac Miramar – Galeria dels Cocos* (red arrow indicates the location of the halocline).

qualsevol cas la temperatura és força uniforme al llarg de tot el perfil variant només algunes dècimes de grau (excepte al nivell més superficial coincidint amb l'època estival). La variació estacional no supera els 0,5°C donant els valors més baixos a finals de la tardor en els mostresos realitzats (Figura 8).

La salinitat dins del mateix perfil oscil·la entre 14 i quasi 40 psu. Des de la superfície als 6-7 m es va incrementant lleugerament dins tots els perfils estacionals fins a les 16-17 psu ja als 8 m en els quals trobem una marcada haloclina que ja dona pas a aigües plenament de salinitat marina. Aquesta haloclina presenta una variació de profunditat en el perfil realitzat a la primavera, estació en la qual es troba uns 1,5 m per damunt (Figura 8).

El pH mostra un major grau de variabilitat en els diferents mostresos estacionals, amb un valor mínim de quasi 7,2 i amb uns valors que arriben a 7,9. Així mateix, presenta un comportament similar a la salinitat incrementant-se clarament tot coincidint amb l'haloclina. El pH a finals de tardor és molt més baix que als altres mostresos (abril i juliol) que mostren un comportament similar, disminuint en el primer metre per mantenir-se estable fins a arribar a l'haloclina i llavors ja incrementant-se fins els valors més elevats (Figura 8).

Llac Negre i galeria Negra

Els perfils realitzats al *llac Negre* i la *galeria Negra* (Figura 2) són els que presenten una major variabilitat respecte als perfils realitzats a altres indrets de la cavitat. Així, pel que fa a la temperatura podem observar els valors més baixos mesurats en tots els perfils amb valors inferiors als 17°C en superfície. Aquests valors es van incrementant de forma més o menys lineal en profunditat fins arribar als 19,7°C a uns 9 m de fondària, moment en el qual tendeix a estabilitzar-se. No s'observen grans variacions estacionals éssent lleugerament inferiors (alguna dècima de grau) en els mostresos realitzats el mes d'abril (Figura 9).

La salinitat també s'incrementa gradualment amb la profunditat. Amb uns valors de 8 psu en superfície arriba als 20 psu a uns 6-7 m de profunditat, punt a partir del qual s'incrementa més ràpidament fins als 8 m coincidint amb l'haloclina, encara que aquí no està tant marcada com en altres perfils, passat a aigües plenament marines a partir dels 9 m de profunditat.

El pH mesurat en els tres perfils estacionals mostra diferències encara que amb un comportament similar. Així els valors de pH varien entre poc més de 7 a 1 m de fondària a quasi 8 a partir dels 8 m coincidint amb l'aigua plenament marina. En tots ells el pH disminueix clarament en el primer metre de profunditat per anar pujant gradualment (amb un interval decreixent entre els 5 i 7 m) fins als 8 m on s'incrementa bruscament (Figura 9). El perfil de final de tardor (novembre) presenta clarament els

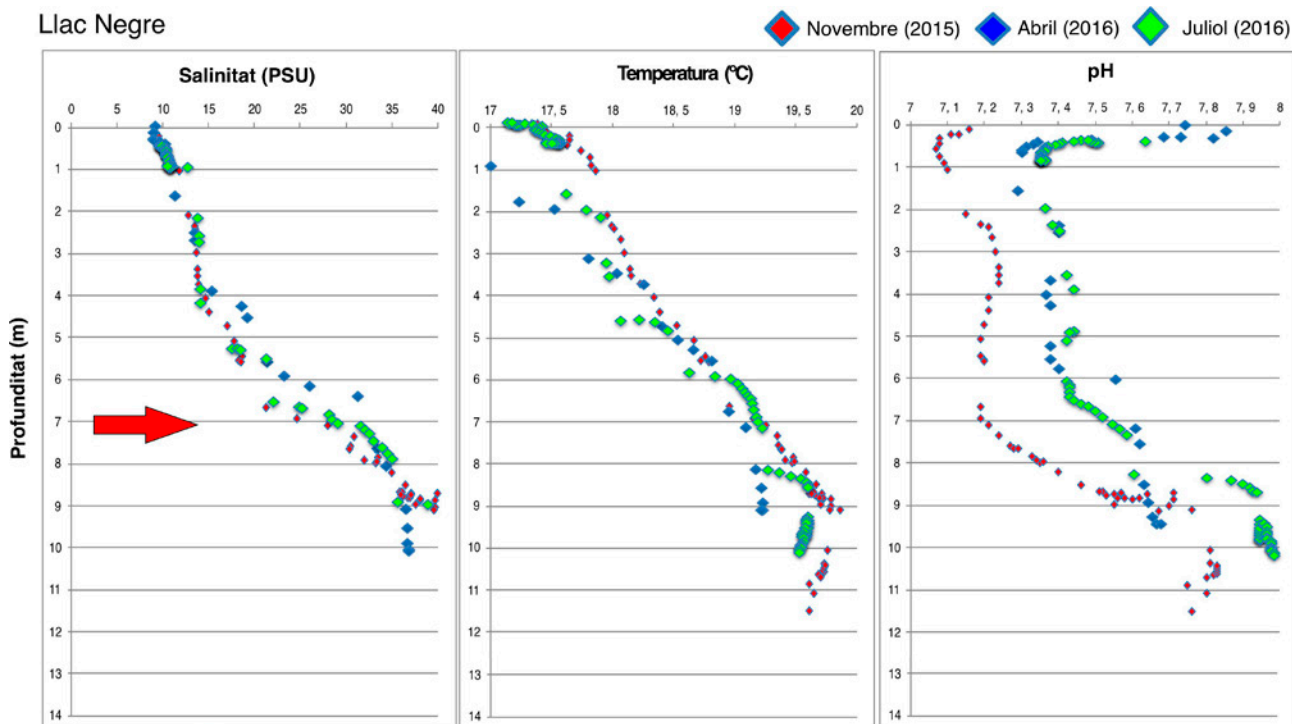


Figura 9: Perfils profunds de salinitat, temperatura i pH del *Llac Negre* i *galeria Negra* (la fletxa indica la situació de l'haloclina).
 Figure 9: Deep-water profiles of salinity, temperature and pH at *Llac Negre* and *Galeria Negra* (red arrow indicates the location of the halocline).

valors més baixos amb una diferència en tots els perfils de 0,5 punts inferior respecte als de les altres dues estacions.

Llac i galeria de les Delícies

Al transecte on s'ha realitzat el perfil al llarg de la *galeria de les Delícies*, partint del llac homònim (Figura 2), la temperatura oscil·la entre els 18,5°C a la superfície en el mostreig de final de tardor i els 19,8°C a 10 m de profunditat en tots els mostrejors (Figura 10). En tots els perfils la temperatura augmenta gradualment fins als 3 m on hi ha un petit salt positiu de quasi 0,5°C incrementant-se després de nou gradualment fins arribar als 19,7°C a partir dels 9 m de profunditat. Només s'ha observat un petit salt positiu d'algunes dècimes tot coincidint amb l'haloclina. La variació estacional només està reflectida en els primers tres metres en el perfil de novembre amb temperatures un poc més baixes, però a partir d'aquesta profunditat tots els perfils estacionals s'uniformitzen.

La salinitat en els tres perfils estacionals és pràcticament idèntica. S'incrementa gradualment de forma constant des de valors de 10 psu en superfície fins als 6-7 m de profunditat on arriba a les 20 psu per als 8 m ja superar les 35 psu marcant-se clarament la presència de l'haloclina que ja dona pas a les aigües plenament marines (Figura 10). La localització de l'haloclina mostra una certa variació respecte a la profunditat en els diferents mostrejors estacionals, trobant-se a més profunditat en el mostreig de tardor (novembre) i més superficial (menys de 70 cm) en el de primavera (abril).

El pH en els perfils realitzats en aquest transecte varia des dels 7,9 punts en superfície disminuint fins a 7,3 entre 4 i 5 m de profunditat per tornar a pujar fins als 7,9 a partir dels 9 m. Tots els perfils estacionals del pH mostren el mateix comportament en profunditat. Es produeix una disminució gradual fins als 5 m de profunditat moment a partir del qual s'incrementen els valors del pH tot coincidint amb la presència de l'haloclina i amb valors de 7,9. Els valors inferiors corresponen al mostreig de tardor (novembre) mentre que els superiors al d'estiu (juliol), en qualsevol cas el seu comportament és clarament paral·lel en profunditat (Figura 10).

Sala de la Bella Mort

El perfil realitzat a la *sala de la Bella Mort* (Figura 2) mostra una temperatura molt uniforme en tot el seu recorregut i en tots els mostrejors estacionals. La temperatura és força constant des de la superfície (19,3°C) fins als 7 m de profunditat coincidint amb una haloclina i incrementant-se 0,5°C fins a arribar als 19,7°C ja en presència de l'aigua marina (Figura 11).

Els perfils de salinitat mostren un dibuix molt diferent al dels altres llacs. La característica diferencial consisteix en la presència de dues haloclines marcades per forts increments de salinitat, una d'elles

Llac Delícies

◆ Novembre (2015) ◆ Abril (2016) ◆ Juliol (2016)

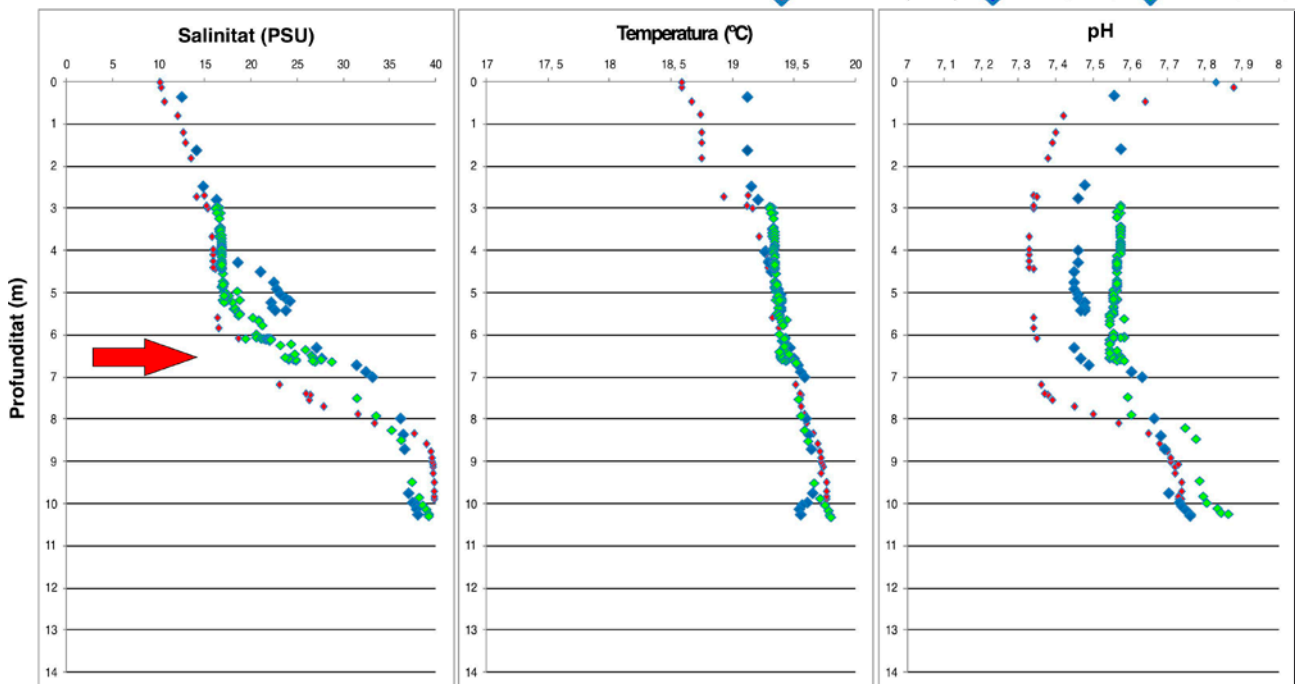


Figura 10: Perfils profunds de salinitat, temperatura i pH del *llac de les Delícies* i la *galeria de les Delícies* (la fletxa indica la situació de l'haloclina).
 Figure 10: Deep-water profiles of salinity, temperature and pH at *Llac de les Delícies* and *Galeria de les Delícies* (red arrow indicates the location of the halocline).

als 2,5 m de profunditat i la principal a uns 7 m. Els valors de salinitat van d'aigua dolça (2 psu) en els primers 2 m incrementant-se de cop fins a un poc més de 15 psu entre els 2 i 3 m de fondària on marquen una primera haloclina. Des dels 3 als 7 m de profunditat la salinitat es manté constant en els 15-17 psu i a partir dels 7 m s'incrementa bruscament fins a superar els 35 psu, indicatiu ja d'aigua plenament marina i que marca com en els altres llacs l'haloclina principal. A partir d'aquí la salinitat es

Bella Mort

◆ Novembre (2015) ◆ Abril (2016) ◆ Juliol (2016)

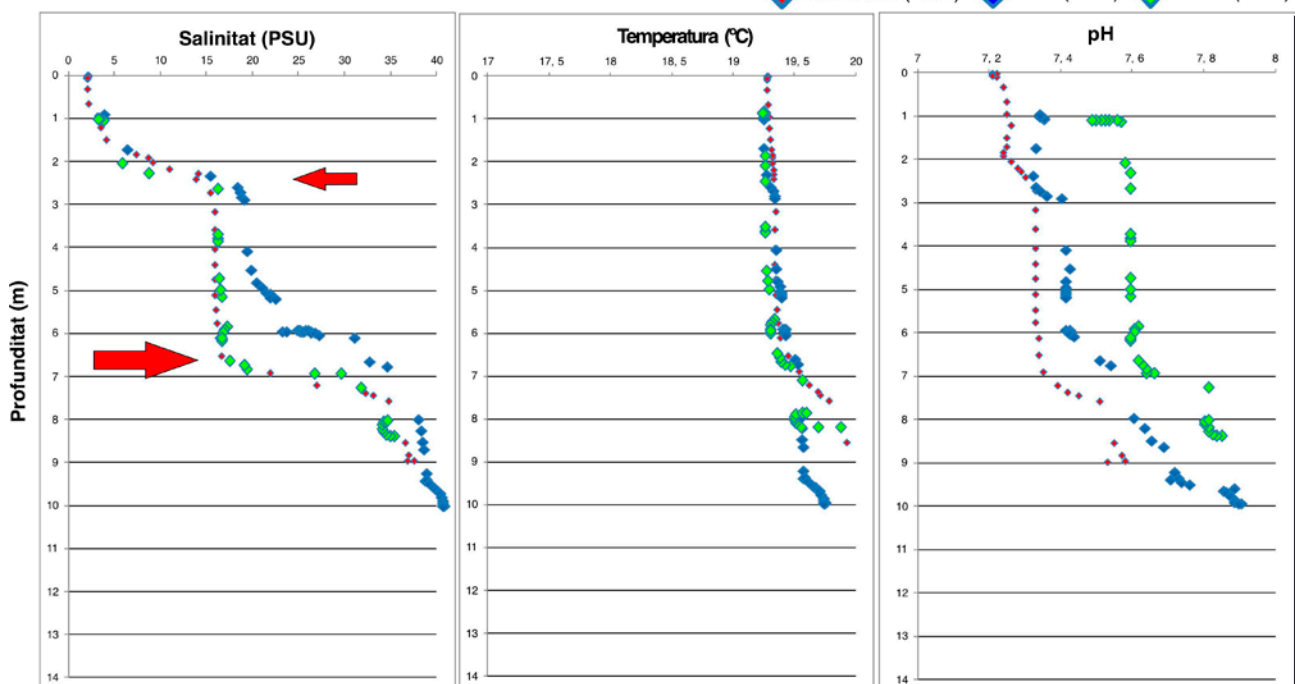


Figura 11: Perfils profunds de salinitat, temperatura i pH de la *sala de la Bella Mort* (les fletxes indiquen la situació de les haloclines).
 Figure 11: Deep-water profiles of salinity, temperature and pH at *Sala de la Bella Mort* (red arrow indicates the location of the haloclines).

manté entre els 35 i 40 psu. Com en tots els altres casos en el perfil realitzat durant la primavera (abril) s'observa la segona haloclina 0,5 m per sobre la dels altres mostrejos (Figura 11).

El pH dels tres perfils estacionals també mostra el mateix dibuix. El comportament del pH en les tres estacions és similar encara que amb valors diferents. Els valors mínims es donen a la superfície i durant la tardor amb valors de 7,2. A partir d'aquí el pH va pujant lleugerament fins un primer salt coincidint amb l'haloclina més superficial per mantenir-se més o menys constant fins als 7-8 m de profunditat on coincidint amb l'haloclina més profunda es produeix un nou salt arribant a valors del pH propers al 7,9. Els valors més baixos es donen en el mostreig de novembre (tardor) mentre que els més alts en el perfil d'estiu (juliol) com queda reflectit a la Figura 11.

Discussió

Els resultats mostren la presència d'una capa d'aigua dolça o salabrosa a la zona superior dels perfils que augmenta en salinitat amb la profunditat, fins que s'arriba a una capa d'aigua salada i densa que ocupa el fons dels llacs. Tot i que els valors de salinitat augmenten de forma progressiva, els perfils presenten una important haloclina per la mescla de les aigües continentals i marines (GRÀCIA, 2015). De forma puntual al llac de la *sala de la Bella Mort* se n'han observat dues (Figura 12). En aquest àmbit, gràcies a les exploracions subaquàtiques a la cavitat, s'han identificat una gran varietat de morfologies de corrosió a conseqüència dels importants processos de dissolució de la zona de mescla d'aigües litorals (BACK, 1984), fenomen que també es manifesta a altres cavitats litorals amb ambients anquihalins de l'est i sud de Mallorca (GRÀCIA et al., 2011, 2015). Aquest procés de dissolució també té implicacions en el règim sedimentari de les cavitats, per la generació de materials derivats de la desintegració de la roca encaixant que s'acumulen en el fons dels llacs (PILARES et al., 2018; FORNÓS et al., 2011; GRÀCIA et al., 2006), a més de ser molt important en l'origen i en l'evolució d'aquestes cavitats (GINÉS, 2000; GINÉS et al., 2018).

En general, els mostrejos trimestrals efectuats mostren una estabilitat de la columna d'aigua i una forta estratificació. Malgrat això, destaquen petites variacions estacionals en els nivells de salinitat dels llacs, canvis que estan directament relacionats amb les aportacions d'aigües meteorològiques dins l'aqüífer (BOOP et al., 2014). A partir de les dades meteorològiques registrades pel període d'estudi, s'ha pogut constatar que, en general, un augment en les precipitacions provoca una disminució de la salinitat a les capes superiors dels llacs.

Així doncs, les característiques de la salinitat en profunditat de la columna d'aigua més superficial a cada cova, dependran, entre altres factors, de la recàrrega hídrica de la zona. No obstant això, dins una mateixa cova, com passa a les Coves del Drac, es poden produir diferències en la salinitat entre diferents llacs, que deriven de la pròpia configuració de la cavitat, del tipus de substrat litològic al sostre que pot afavorir la percolació de l'aigua i de la presència de fractures o obertures que afavoreixin la infiltració de les aigües d'escorrentia dins la cavitat. Per tant, aquests factors determinaran el grau de recàrrega hídrica i el temps de resposta, entès com el temps que tarden les aigües meteorològiques en incorporar-se a l'aqüífer. Un altre factor important és la proximitat de les aigües a la línia de costa, que ocasiona, de forma general, un desplaçament de l'haloclina cap a nivells superiors per mor d'una major intrusió marina. Finalment, cal indicar, que a causa de la carència de corrents importants d'aigües subterrànies a la zona d'estudi, es descarta que aquest factor tingui una incidència sobre els canvis que experimenta la salinitat a les aigües freàtiques de la cova.

Les dades de pH estan relacionades amb els nivells de salinitat de l'aigua, per això, la seva dinàmica anual i estacional és molt similar al comportament que experimenta la salinitat (FERNÁNDEZ-TORQUEMADA & SÁNCHEZ-LISAZO, 2003). També hi ha clares diferències en els nivells més superficials a causa de les variacions estacionals de concentració de CO_2 i la temperatura a la cambra d'aire dels llacs la qual cosa implica variacions importants en la seva difusió per arribar a l'equilibri.

La temperatura de l'aigua disminueix en profunditat, però a la capa més superficial s'experimenten importants variacions estacionals, molt relacionades amb canvis en les condicions de l'atmosfera de la cova. Aquest fenomen es produeix principalment durant l'hivern, quan l'aire en superfície és més fred i dens (MARTÍN, 1991) i entra i renova l'atmosfera de la cova, el que provoca una disminució de la temperatura i dels nivells de CO_2 de l'aire. En aquesta línia, els resultats indiquen una temperatura més baixa de l'aigua durant aquests períodes freds i una major presència de precipitats de calcita flotant a la superfície dels llacs per la desgasificació del CO_2 (TAYLOR et al., 2004; FAIRCHILD et al., 2006). Aquest procés és molt important per la seva relació amb la formació dels espeleotemes freàtics (BOOP et al., 2017) i amb l'acumulació de sediments al fons dels llacs (FORNÓS et al., 2011).



Figura 12: A la galeria *Despullada* situada al NE de la sala de la *Bella Mort* hi són visibles dues haloclines (Foto: A. Cirer).
 Figure 12: At *Galeria Despullada* located in the NE part of *Sala de la Bella Mort* two different haloclines are clearly visibles (Photo: A. Cirer).

No obstant això, les taxes de renovació a cada punt de la cova depenen de la morfologia de la cavitat i la proximitat a obertures. A les Coves del Drac s'observa una ventilació més efectiva al *llac Negre*, amb una temperatura de les aigües més baixa que als altres llacs, dades que coincideixen amb els resultats de BOOP (2014) que indicaven una forta renovació de l'aire a aquest llac i temperatures més baixes inclús en comparació amb altres coves. De fet a la superfície del *llac Negre*, la presència de làmines de calcita flotant sempre és més important que en qualsevol dels altres llacs mostrejats.

Per altra banda, les dades obtingudes al *llac Miramar*, a diferència de les altres zones de la cova, mostren un comportament molt uniforme de la capa superficial, sense pràcticament variacions en profunditat. Aquest fet pot derivar de la important aflluència turística en aquesta zona de la cova (ROBLEDO & DURÁN, 2010; GINÉS & GINÉS, 2011), on transiten barques pel llac que mesclen la capa superficial de les aigües. A cotes inferiors el comportament en els paràmetres és similar a les d'altres zones de la cova, no obstant això, cal destacar uns valors en la temperatura més elevats que als altres llacs de la cova, fenomen que pot ser provocat per l'escalfament de l'aigua a conseqüència de la il·luminació instal·lada als llacs d'aquesta zona.

Finalment, cal ressaltar l'estudi de GASCOINE (1992) que ja evidencia aquesta forta mescla de l'aigua que es produeix a les capes superficials del *llac Miramar* derivada de l'activitat turística dins la cavitat. La comparativa amb les dades dels nous mostrejos indica que el pH i la temperatura són molt similars. No obstant això, a partir de la important relació entre conductivitat i salinitat, de forma indirecta s'han pogut comparar les dades i determinar que en l'actualitat els nivells de salinitat del llac són més elevats a tot el perfil, que augmenta més ràpidament en profunditat i que l'haloclina és molt important i se situa a un nivell superior.

Conclusions

Els fenòmens que tenen lloc a aquests àmbits d'aigües salobroses estan determinats per les característiques geoquímiques de l'aigua que controla i determina alguns dels processos més importants com són la generació de calcita flotant a la superfície dels llacs, els sobrecreixements dels

espeleotemes freàtics o la dissolució de la roca encaixant. Per això, conèixer les característiques de les aigües freàtiques és fonamental per entendre aquests sistemes càrstics tan peculiars.

La forta relació entre les característiques de la capa superficial dels llacs amb l'atmosfera de la cova fa que del seu estudi es puguin inferir indirectament aspectes relacionats amb les característiques i la dinàmica de l'atmosfera hipogea.

Per altra banda, i encara que no ha estat objecte d'aquest estudi, conèixer les concentracions de salinitat en profunditat d'aquests àmbits litorals és molt interessant, ja que pot donar tota una sèrie d'informació de l'estat de l'aqüífer i pot servir com indicatiu del grau d'intrusió marina per tal d'evitar una sobreexplotació i salinització. Aquest aspecte és molt important des d'un punt de vista de la gestió de l'aigua, ja que una part molt important de l'aigua que es consumeix a les illes procedeix del subsòl. En aquest sentit, cal destacar l'elevada demanda hídrica que es produeix en aquestes àrees litorals, que s'incrementa molt durant els mesos estivals per una elevada pressió turística en aquestes zones, coincidint amb l'època de menor recàrrega hídrica superficial pròpia del nostre clima mediterrani.

Agraïments

Volem mostrar el nostre agraïment als propietaris, gestors i personal en general de les Coves del Drac per la gran amabilitat i les facilitats dispensades en tot moment durant tots aquests anys de mostrejos a la cavitat. També a tots els companys que en un moment o altre han col·laborat en les tasques de mesura dels paràmetres ambientals dins de la cova, o han fet aportacions que han millorat, sens dubte la qualitat del manuscrit original. El present treball s'emmarca dins del projecte d'investigació del MINECO, CGL2016-79246-P (AEI-FEDER, UE).

Bibliografia

- BACK, W.; HANSHAW, B.B.; PYLE, T.E.; PLUMMER, L.N. & WEIDIE, A.E. (1979): Geochemical significance of groundwater discharge and carbonate solution to the formation of Caleta Xel Ha, Quintana Roo, Mexico. *Water Resources Research*, 15 (6): 1521-1535.
- BACK, W.; HANSHAW, B.B. & VAN DRIEL, J.N. (1984): Role of groundwater in shaping the Eastern coastline of the Yucatan peninsula. In: LaFLEUR, R.G. (ed.) *Groundwater as a geomorphic agent*. Allen & Unwin. 281-293. Boston.
- BOOP, L.M. (2014): *Characterization of the Depositional Environment of Phreatic Overgrowths on Speleothems in the Littoral Caves of Mallorca (Spain): a Physical, Geochemical, and Stable Isotopic Study* [Ph.D. thesis]: Tampa, University of South Florida, 128 p.
- BOOP, L.M.; ONAC, B.P.; WYNN, J.G.; FORNÓS, J.J.; RODRÍGUEZ-HOMAR, M. & MERINO, A. (2014): Groundwater geochemistry observations in littoral caves of Mallorca (western Mediterranean): implications for deposition of phreatic overgrowths on speleothems: *International Journal of Speleology*, 43(2): 193-203.
- BOOP, L.M.; ONAC, B.P.; WYNN, J.G.; FORNÓS, J.J. & RODRÍGUEZ-HOMAR, M. (2013): Water column variability in a coastal tourist cave in Mallorca, Spain. In: Land, L. & Joop, M., *Proceedings of the 20th National Cave and Karst Management Symposium, Carlsbad, New Mexico*. 41-45
- BOOP, L.M.; WYNN, J.G.; THOMPSON, G.; FORNÓS, J.J.; MERINO, A. & ONAC, B.P. (2017): Interactions between surface conditions, the Mediterranean Sea, and cave climate within two littoral caves in Mallorca: Implications for the formation of phreatic overgrowths on speleothems. *Journal of Caves and Karst Studies*, 79(1): 59-72.
- CSOMA, A.E.; GOLDSTEIN, R.H. & POMAR, L. (2006): Pleistocene speleothems of Mallorca: implications for palaeoclimate and carbonate diagenesis in mixing zones. *Sedimentology*, 53: 213-236.
- DORALE, J.A.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; TUCCIMEI, P. & PEATE, D.W. (2010): Sea-level highstand 81,000 years ago in Mallorca. *Science*, 327: 860-863. Washington.
- ENSEÑAT, J.J.; GRÀCIA, F.; GINARD, A.; MASCARÓ, G.; SANTANDREU, G.; FERNÁNDEZ, J.F.; TRIAS, M.; PÉREZ, J.; BOVER, P.; CIRER, A.; PLA, V.; LÁZARO, J.C.; VICENS, D.; ANSALDI, D.; BASCUÑANA, F.X.; CLAMOR, B.; LOZANO, A.; PERELLÓ, M.A.; GUAL, M.A.; VIVES, M.A.; GAVIÑO, B.; GAMUNDÍ, P.; BONNIN, M.; GRANELL, A.; BETTON, N.; FRANGLEN, N. & BORNEMANN, N. (2018): Nou plànol topogràfic de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 65-76.
- FAIRCHILD, I.J.; SMITH, C.L.; BAKER, A.; FULLER, L.; SPÖTL, C.; MATTEY, D.; McDERMOTT, F. & E.I.M.F. (2006): Modification and preservation of environmental signals in speleothems. *Earth-Science Reviews*, 75: 105-153.

- FERNÁNDEZ-TORQUEMADA, Y. & SÁNCHEZ-LISAZO, J.L. (2003): Efecto de una posible interacción entre el pH y la salinidad sobre el crecimiento de *Posidonia oceánica* (L.) Delile, 1813. *Boletín del Instituto Español de Oceanografía*, 19 (1-4): 247-252.
- FORNÓS, J.J. & GELABERT, B. (2011): Condicionants litològics i estructurals del carst a les Illes Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 37-52. Palma.
- FORNÓS, J. J., GINÉS, J., GRÀCIA, F., & MERINO, A. (2011): Els sediments de les cavitats càrstiques de les Balears. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 199-212. Palma.
- GASCOINE, W. (1992): Water chemistry in Cuevas del Drach, Majorca. *Cave Science*, 19 (2): 51-54.
- GINÉS, J. (2000): *El karst litoral en el levante de Mallorca: una aproximación al conocimiento de su morfogénesis y cronología*. Tesis Doctoral. Departament de Ciències de la Terra, Universitat de les Illes Balears. 595 pàgs + 29 llms. Inèdit.
- GINÉS, J. & GINÉS, A. (2011): Les coves turístiques de les Illes Balears: antecedents i estat de la qüestió. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 333-344. Palma.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; TUCCIMEI, P.; ONAC, B.P. & GRÀCIA, F. (2012): Phreatic Overgrowths on Speleothems (POS) from Mallorca, Spain: updating forty years of research. In: GINÉS, A.; GINÉS, J.; GÓMEZ-PUJOL, L.; ONAC, B.P. & FORNÓS, J.J. (eds.) *Mallorca: a Mediterranean benchmark for Quaternary studies*. Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 18: 111-146. Palma.
- GINÉS, J.; GINÉS, A.; GRÀCIA, F. & FORNÓS, J.J. (2018): L'espeleogènesi de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca): evolució dels coneixements i interpretació actual. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 141-163.
- GÓMEZ-PUJOL, L.; ORFILA, A.; CAÑELLAS, B.; ÁLVAREZ-ELLACURÍA, A.; MÉNDEZ, F.J.; MEDINA, R. & TINTORÉ, J. (2007): Morphodynamic classification of sandy beaches in low energetic marine environment. *Marine Geology*, 242: 235-246.
- GRÀCIA, F. (2015): *Les cavitats subaquàtiques de les zones costaneres del llevant i migjorn de Mallorca*. Tesis Doctoral. Programa de Doctorat de Geografia, Universitat de les Illes Balears. 984 pàgs. Inèdit.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; FORNÓS, J. J.; JAUME, D. & FEBRER, M. (2006): El sistema Pirata-Pont-Piqueta (Manacor, Mallorca): geomorfologia, espeleogènesi, hidrologia, sedimentologia i fauna. *Endins*, 29: 25-64.
- GRÀCIA, F.; CLAMOR, B.; GAMUNDÍ, P. & FORNÓS, J.J. (2011): Morfologies de corrosió de la zona de mescla a les coves subaquàtiques de la franja litoral del Llevant i Migjorn de Mallorca. In: GRÀCIA, F.; GINÉS, J.; PONS, G.X.; GINARD, A. & VICENS, D. (eds.) *El carst: patrimoni natural de les Illes Balears*. Endins, 35 / Mon. Soc. Hist. Nat. Balears, 17: 133-146. Palma.
- GRÀCIA, F.; MASCARÓ, G.; PÉREZ, J.; FERNÁNDEZ, J.F.; CIRER, A.; LÁZARO, J.C.; ANSALDI, D.; CLAMOR, B.; PERELLÓ, M.À.; VIVES, M.À.; GAMUNDÍ, P.; GRANELL, À.; BETTON, N.; BORNEMANN, D. & FRANGLÉN, N. (2018): Les exploracions subaquàtiques a les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 105-116.
- JAUME, D. & GRÀCIA, F. (2006): Coves amb hàbitats anquihalins de les Balears i coves amb hàbitats dolçaquícules no litorals: catàleg espeleològic i faunístic. *Endins*, 30: 71-82.
- MARTÍN VIDE, J. (1991): *Fundamentos de climatología analítica*. Síntesis. 1ª edición. Madrid.
- PILARES, A., FORNÓS, J.J., GRÀCIA, F. & GÓMEZ-PUJOL, L. (2018): El registre sedimentari de la part submergida de les Coves del Drac (Manacor, Mallorca). *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 1: 165-180.
- POLYAK, V.J.; ONAC, B.P.; FORNÓS, J.J.; HAY, C.; ASMEROM, Y.; DORALE, J.A.; GINÉS, J.; TUCCIMEI, P. & GINÉS, A. (2018): A highly resolved record of relative sea level in the western Mediterranean Sea during the last interglacial period. *Nature Geoscience*, 11 (11): 860-864.
- ROBLEDO, P.A. & DURÁN, J.J., (2010): Evolución del turismo subterráneo en las Islas Baleares y su papel en el modelo turístico. In: DURÁN, J.J., & CARRASCO, F. (eds.) *Cuevas: Patrimonio, Naturaleza, Cultura y Turismo*. Asociación de Cuevas Turísticas Españolas. 305-322. Madrid.
- TAYLOR, P. M. & CHAFETZ, H.S. (2004): Floating rafts of calcite crystals in cave pools, central Texas, USA: crystal habit vs. saturation state. *Journal of Sedimentary Research*, 74 (3): 328-341
- TUCCIMEI, P.; SOLIGO, M.; GINÉS, J.; GINÉS, A.; FORNÓS, J.J.; KRAMERS, J. & VILLA, I.M. (2010): Constraining Holocene sea levels using U-Th ages of phreatic overgrowths on speleothems from coastal caves in Mallorca (Western Mediterranean). *Earth Surface Processes and Landforms*, 35 (7): 782-790. Londres.



