

# Estacionalitat dels paràmetres atmosfèrics de la Cova de sa Font (sa Dragonera): un registre detallat del cicle anual dels valors de temperatura, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>

Joaquín GINÉS <sup>1,2</sup>, Ángel FERNÁNDEZ-CORTÉS <sup>3</sup>, Joan J. FORNÓS <sup>1,2</sup>, José M. CALAFORRA <sup>3</sup>  
i Àngel GINÉS <sup>1,2</sup>(†)

<sup>1</sup> Societat Espeleològica Balear. Palma, Mallorca. Email: jginesgracia@yahoo.es

<sup>2</sup> Grup de Recerca Ciències de la Terra. Universitat de les Illes Balears. Palma, Mallorca.

<sup>3</sup> Recursos Hídricos y Geología Ambiental. Universidad de Almería. La Cañada, Almería.

## Abstract

High CO<sub>2</sub> concentrations are common in caves from the Balearic Islands and have been the subject of research for years in a site that can be considered paradigmatic: Cova de sa Font, located on the small island of sa Dragonera. As a complement to previous research carried out since 2014, continuous recording devices of temperature, CO<sub>2</sub>, and O<sub>2</sub> were installed in the cave to gain a detailed understanding of its atmospheric dynamics. Data recorded between April and December 2023 reveal a remarkable but gradual rise in CO<sub>2</sub> levels during late spring and early summer, reaching concentrations above 60,000 ppm throughout the summer period and even reaching estimated values above 70,000 ppm of CO<sub>2</sub> lasting to the beginning of November. The O<sub>2</sub> data record shows a very strong inverse correlation with CO<sub>2</sub> content, with minimum values during the summer when the lowest O<sub>2</sub> concentrations are reached, below 14.5 %. With the influxes of cold air during autumn, the cave ceases to be a confined atmospheric environment, so that CO<sub>2</sub> levels dropped from 60,000 to 2,000 ppm in less than three days by the end of November 2023, resulting in a complete renewal of the cave's air in winter. The available cave temperature records and meteorological data allow us to interpret in detail the particularities of the atmospheric dynamics of Cova de sa Font, suggesting a model of the cave's atmosphere behavior that acts as a summer cold air trap, which is responsible for the confinement and high summer concentrations of CO<sub>2</sub>.

## Resumen

Las concentraciones elevadas de CO<sub>2</sub> son frecuentes en las cuevas de las Baleares, y han sido objeto de investigación desde hace años en una localidad que puede ser considerada paradigmática: la Cova de sa Font, situada en la pequeña isla de sa Dragonera. Como complemento de investigaciones previas, desarrolladas desde el año 2014, se instalaron en la cavidad dispositivos de registro continuo de temperatura, CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub>, con la finalidad de conocer en detalle su dinámica atmosférica. Los datos registrados, entre los meses de abril y diciembre de 2023, permiten observar una subida muy notable pero paulatina de los valores de CO<sub>2</sub> durante el final de la primavera y comienzo del verano, alcanzándose concentraciones superiores a 60.000 ppm durante todo el período estival, llegando incluso a valores estimados por encima de 70.000 ppm de CO<sub>2</sub> a comienzos del mes de noviembre. El registro de los datos de O<sub>2</sub> muestra una muy fuerte correlación inversa con respecto al contenido en CO<sub>2</sub>, con valores mínimos durante el verano cuando se llegan a alcanzar las concentraciones más bajas de O<sub>2</sub>, inferiores al 14,5 %. Con las entradas de aire frío otoñales la cavidad deja de ser un ambiente atmosférico confinado, de tal modo que a finales de noviembre de 2023 los valores de CO<sub>2</sub> bajaron de 60.000 a 2.000 ppm en menos de 3 días, teniendo lugar la completa renovación del aire de la cueva durante el invierno. Los registros de temperatura en el interior de la cavidad y los datos meteorológicos disponibles permiten interpretar en detalle las particularidades de la dinámica atmosférica de la Cova de sa Font y sugerir un modelo de funcionamiento como trampa de aire frío estival, que es responsable del confinamiento y de las altas concentraciones estivales del CO<sub>2</sub>.

Ginés, J.; Fernández-Cortés, Á.; Fornós, J.J.; Calaforra, J.M. i Ginés, À. (2025): Estacionalitat dels paràmetres atmosfèrics de la Cova de sa Font (sa Dragonera): un registre detallat del cicle anual dels valors de temperatura, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>. Papers Soc. Espeleo. Balear, 8: 35-52. ISSN-e 2605-3144. © Societat Espeleològica Balear.  
**Rebut:** 30 octubre 2025; **Revisat:** 21 novembre 2025; **Acceptat:** 24 novembre 2025.  
**Publicat online:** 9 desembre 2025.

## Introducció

Les elevades concentracions de CO<sub>2</sub> observades a algunes coves de Mallorca han cridat l'atenció dels espeleòlegs illencs, per mor de la dificultat exploratòria que aquest fet suposa per a la visita o la recerca en determinades cavitats (MESTRE, 1980; GINÉS et al., 1987; ENCINAS & HELBLING, 2011; MULET & RODRÍGUEZ-HOMAR, 2014). Aquesta circumstància ha propiciat que s'hagin

(†) Aquestes investigacions foren promogudes i liderades per Àngel Ginés, qui participà en la recollida de dades i la interpretació dels resultats. El seu sobtat traspàs, ocorregut el gener de 2024, impedià la seva participació activa en la redacció del present treball.

(†) These researches were done under the leadership of Àngel Ginés, who was involved in the field data collection and the interpretation of the results. His unexpected decease, occurred in January 2024, prevented his active participation in the elaboration of this paper.

empres, des de fa temps, investigacions centrades en dos fronts clau com són la ciclicitat estacional dels valors de CO<sub>2</sub> en algunes coves (GINÉS et al., 1987, 2017), o el registre de concentracions molt elevades d'aquest gas i el seu possible origen (GINÉS et al., 2024).

No hi ha cap dubte que si es tracta de cercar una localitat paradigmàtica pel que fa a la presència d'elevats valors de CO<sub>2</sub>, que es donen d'acord a un cicle anual ben evident, cal fer referència a la Cova de sa Font, situada en la petita illa de sa Dragonera. A l'esmentada localitat s'enregistren concentracions molt altes de CO<sub>2</sub> que segueixen un règim estacional molt clar, amb valors estivals que superen les 70.000 ppm (GINÉS et al., 2017, 2022b). Precisament, l'existència d'aquestes investigacions prèvies, que posaven de manifest amb claredat un comportament cíclic anual, feu albirar la possibilitat i la conveniència d'obtenir un registre continu molt més detallat dels principals paràmetres atmosfèrics de la cova.

Amb aquest plantejament, durant l'any 2023 s'instal·laren dispositius d'enregistrament continu de dades atmosfèriques (concentració de CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>, temperatura i humitat relativa), amb el propòsit de recollir informació detallada sobre la dinàmica de l'atmosfera de la Cova de sa Font, que permetés relacionar el cicle anual observat a la cavitat amb les dades meteorològiques disponibles. L'objectiu final de la recollida d'aquestes dades fou el de proposar un model plausible que expliqués les peculiaritats del funcionament climàtic de la cova.

## Enquadrament geogràfic i característiques generals de la cavitat

Sa Dragonera és una illa de petites dimensions —4 km de llargada per 1 km d'amplada màxima— que emergeix com a continuació de l'extrem sud-occidental de l'illa de Mallorca, de la qual està separada per un estret freu que no arriba al quilòmetre d'amplada (Figura 1). Des del punt de vista administratiu pertany al municipi mallorquí d'Andratx, i el 1995 fou declarada Parc Natural, gestionat pel Consell de Mallorca que és el propietari de l'illa des de 1987.

La Cova de sa Font (també coneguda amb el topònim de Cova des Moro) es localitza, a una alçada de 25 m, vora el llit del comellar que desemboca en el petit port d'es Lledó, en la meitat nord-oriental de l'illa (Figura 1B). La seva localització ve definida per les següents coordenades UTM-ETRS89: 31S 442292 4382473.

Pel que fa a la geologia, sa Dragonera representa la continuació cap al sud-oest dels relleus plegats, majoritàriament mesozoics, de la Serra de Tramuntana mallorquina (FORNÓS et al., 1996). La cova està excavada en calcàries dolomítiques del juràssic inferior, que capbussen de forma accentuada cap al sud-est (Figura 1C); sobre els materials esmentats apareixen encavalcats sediments detrítics del miocè inferior, com a conseqüència de l'estructuració de les serralades de Mallorca durant l'orogènia alpina. Aquest esdeveniment tectònic és responsable del perfil característic de l'illa, amb importants penya-segats en el seu costat nord-oest i uns vessants més suaus cap al sud-est tot seguint el capbussament de les capes rocoses involucrades en els encavalcaments (BALAGUER, 2002).

La cova s'obre a l'exterior mitjançant un pou vertical de devers 11 m de fondària, dotat actualment

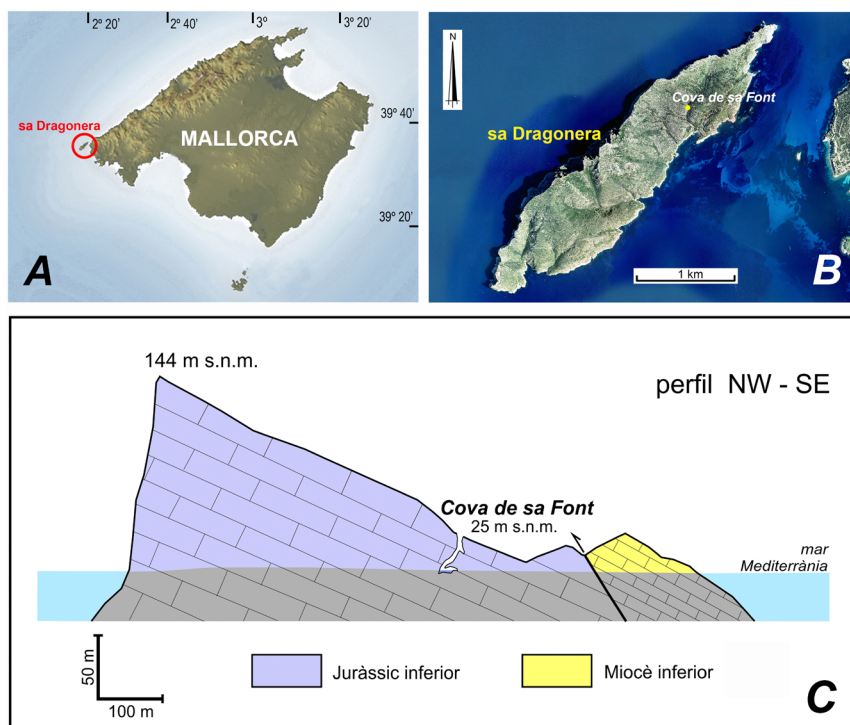


Figura 1: Marc geogràfic i geològic. A: Situació de sa Dragonera en relació amb l'illa de Mallorca. B: Localització de la Cova de sa Font. C: Tall geològic transversal simplificat del sector septentrional de l'illa de sa Dragonera.

Figure 1: Geographic and geological setting. A: Sa Dragonera is an islet located close to the coast of Mallorca Island. B: Location of Cova de sa Font. C: Transverse simplified geological profile of the northern sector of Sa Dragonera.

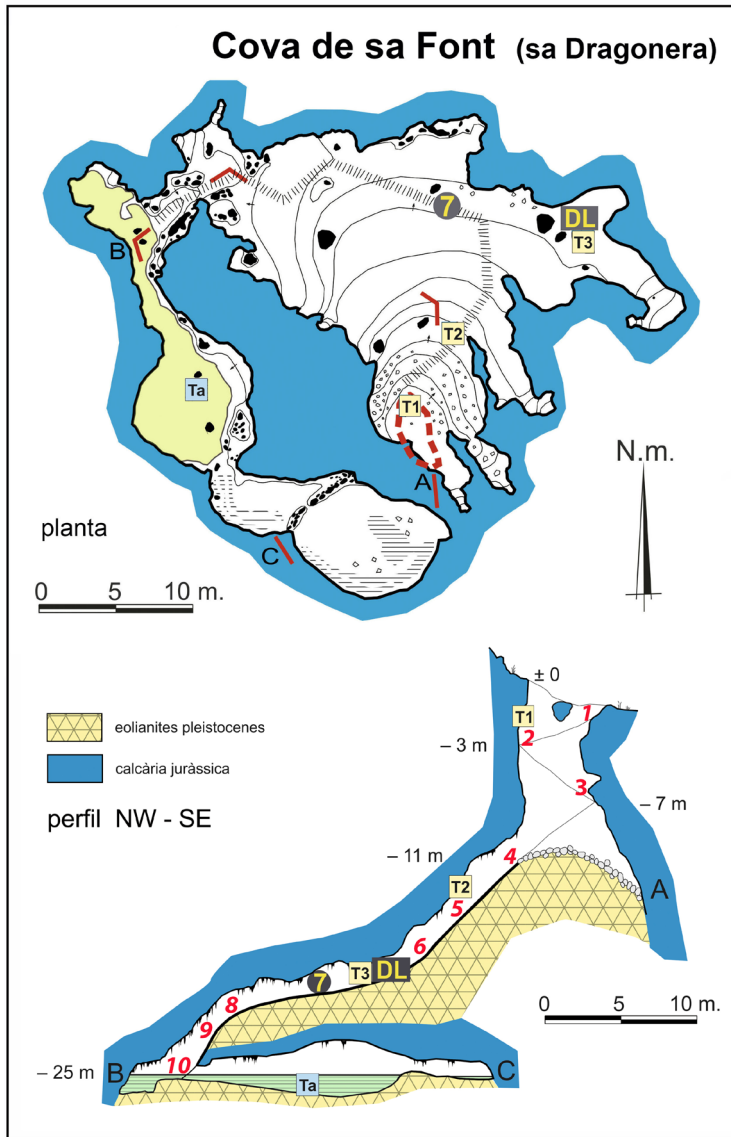


Figura 2: Topografia de la Cova de sa Font –també coneguda com a Cova des Moro– amb la situació de les estacions de mesura. Modificat a partir de GINÉS & GINÉS (2010). DL: data-loggers de CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>. T1, T2, T3, Ta: sensors de temperatura. 7: estació de referència emprada a les campanyes prèvies de mesura. Els números vermells en el perfil de la cova corresponen a estacions de mesura de les campanyes de 2014 i 2018-2019.

Figure 2: Topographical survey of Cova de sa Font –also known as Cova des Moro– including the location of the measuring stations. Modified from GINÉS & GINÉS (2010). DL: CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> data-loggers. T1, T2, T3, Ta: temperature sensors. 7: reference measuring station used in the previous campaigns. The red numbers in the cave profile correspond to measuring stations used in the 2014 and 2018-2019 campaigns.

d'una escala de pedra que, en tres trams, permet assolir la cúspide d'una sala amb fort declivi cap al nord (Figura 2). Aquesta sala té uns 30 m de dimensió màxima i presenta abundants formacions estalagmítiques i columnes que limiten el seu extrem nord-occidental, lloc on una nova davallada porta a la vora d'un petit llac, proveït d'instal·lació de bombeig per a l'abastiment d'aigua a les instal·lacions del Parc Natural. El llac se situa a la cota -25 m des de l'entrada de la cova i es correspon amb el nivell freàtic litoral, afectat per les fluctuacions mareals. En direcció sud, el llac es perllonga i guanya dimensions, permetent accedir a dues petites sales de sòtil baix. En línies generals es tracta doncs d'una cavitat fortament descendent en la qual el sector inicial, gairebé vertical, es presenta notablement modificat per les adaptacions antròpiques que possibiliten el recorregut còmode de la cova. Cal remarcar que la pràctica totalitat del trespol de la sala principal està format per un substrat calcarenític corresponent a eolianites pleistocenes fortament cimentades que estan recobertes per una colada, el que resulta en un pendent cònic molt regular i cridaner (Figura 2) on s'han excavat els esglaons que faciliten la visita de la cova. Els dipòsits d'eolianites pleistocenes també es poden apreciar a les parets i al paviment dels llacs terminals.

Ja s'ha esmentat abans que la Cova de sa Font és el principal punt d'abastiment hídric de les instal·lacions del Parc Natural. En aquest sentit, la cova ha estat des de l'antiguitat clàssica lloc de proveïment d'aigua de les rutes de navegació i, probablement, aquesta disponibilitat d'un recurs molt apreciat pels navegants és la responsable del nom de l'illa, tal com assenyalen GINÉS & GINÉS (2010). Aquests autors relacionen el topònim sa Dragonera amb l'hidrònim *Dragunara* –amb totes les seves variants– el qual està molt estès a tota l'àrea mediterrània.

## Antecedents. Les investigacions prèvies sobre el CO<sub>2</sub> en la Cova de sa Font

Les successives visites a aquesta localitat de sa Dragonera, moltes d'elles centrades en la recerca faunística a les seves aigües subterrànies (GINÉS & GINÉS, 1977; GINÉS, 1982; GINÉS et al., 2022a), permeteren constatar el caràcter estacional dels problemes exploratoris observats, que presumptament es relacionaven amb concentracions elevades de CO<sub>2</sub> a l'atmosfera de la cova. Per tal d'aprofundir en aquest tema, en el darrer decenni es desenvoluparen dues campanyes de mesures i mostreig de l'aire de la Cova de sa Font que posaren en evidència un cicle anual molt patent, caracteritzat per concentracions molt elevades de CO<sub>2</sub> durant l'estiu i bona part de la tardor, enfront dels mínims valors hivernals.

**Primera campanya de mesures. Any 2014**

En aquesta campanya es prengueren mesures de les concentracions de CO<sub>2</sub>, utilitzant un dispositiu portàtil de la firma sueca *SenseAir*. Les mesures s'efectuaren en 10 estacions de mostreig distribuïdes des de l'exterior (estació 1) fins a les vores del llac situat al fons de la cavitat (estació 10). En total es portaren a terme 13 jornades de presa de dades, amb una periodicitat aproximadament mensual (GINÉS et al., 2017).

Els resultats obtinguts mostren un patró ben definit (Figura 3). Partint d'uns valors de CO<sub>2</sub> similars als de l'atmosfera exterior en totes les estacions de mesura (< 1.000 ppm), les concentracions s'incrementen de manera dràstica fins a superar les 50.000 ppm al començament de l'estiu de 2014. Aquests valors tan elevats afecten de manera molt homogènia a gairebé tota la cavitat (Figura 3A), amb l'excepció de les estacions 1 a 3 que es disposen al llarg de l'escala de pedra que davalla pel pou d'accés. Durant tot l'estiu, les concentracions de CO<sub>2</sub> assolixen valors màxims propers a 70.000 ppm, que es perllongaran bona part de la tardor. Val a dir que a la publicació original dels resultats d'aquesta campanya (GINÉS et al., 2017) es consignaren valors màxims per sobre de 90.000 ppm, els quals cal considerar críticament per apropar-se al rang màxim de mesura de 100.000 ppm de l'instrument emprat (model *SenseAir CO<sub>2</sub> Alarm*), dispositiu que donava una baixa precisió per damunt de 50.000 ppm. Per aquest motiu, aquests valors màxims han estat revisats i corregits a les gràfiques de la Figura 3.

Les concentracions elevades de CO<sub>2</sub> es mantenen fins ben entrada la tardor (1 de novembre), data a partir de la qual es produirà la ventilació de la cavitat. D'aquesta manera, el 22 de novembre ja ha tingut lloc la renovació completa de l'aire a la majoria d'estacions de mesura (Figura 3B), arribant així al mes de desembre que és quan es generalitzen els valors baixos hivernals (< 1.000 ppm) en tota la cavitat.

El cicle anual de les concentracions de CO<sub>2</sub> resulta ben evident en les estacions de mesura més internes de la Cova de sa Font, ja que les estacions més properes a la superfície –estacions 1 a 3, situades al llarg del pou d'ingrés– es veuen afectades tot l'any per intercanvis amb l'atmosfera exterior. Concretament, el cicle estacional dels valors mesurats a l'estació 7 (Figura 3C) és prou il·lustratiu del que succeeix als sectors interns de la cova: una forta pujada del contingut de CO<sub>2</sub> durant la primavera i començament de l'estiu, amb unes concentracions molt elevades que es mantenen fins la tardor, moment quan té lloc una davallada gairebé sobtada fins als mínims hivernals. Malgrat que l'estació 7 està situada

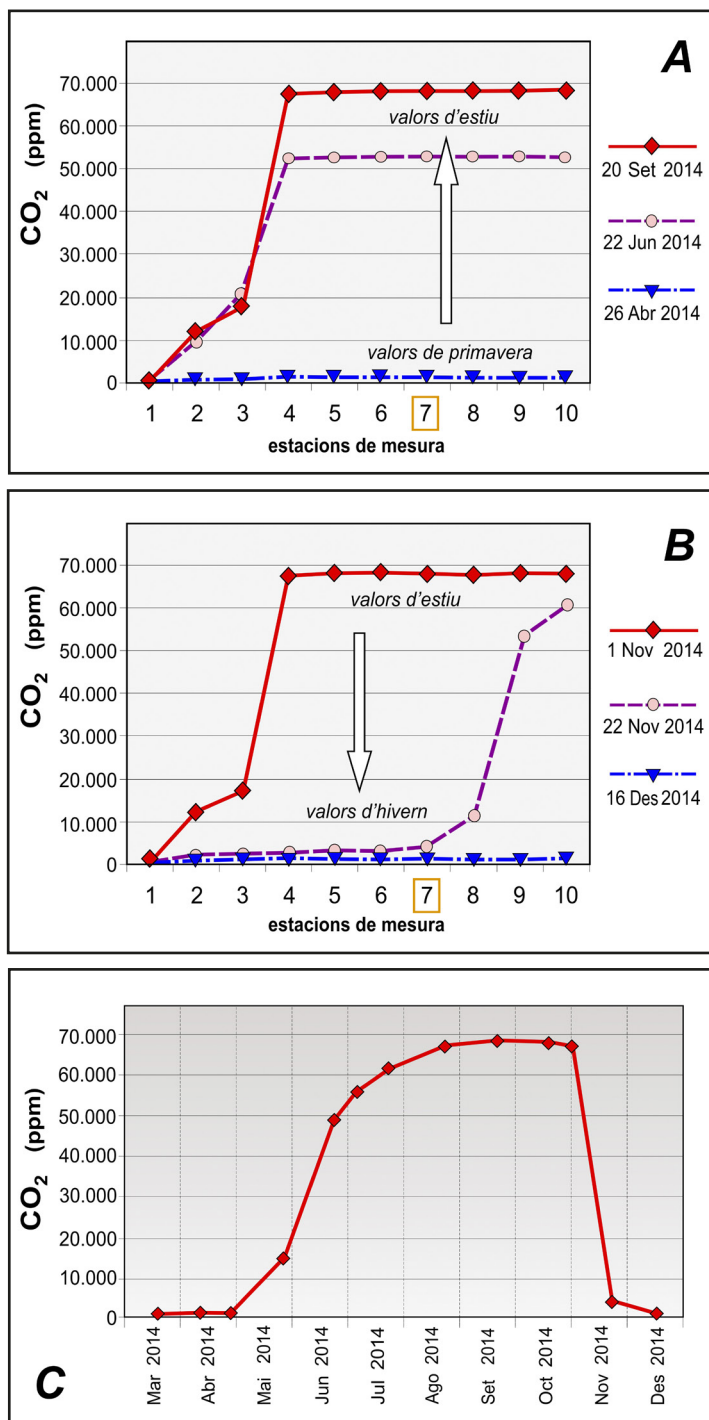


Figura 3: El cicle anual de la concentració de CO<sub>2</sub> a la Cova de sa Font, al llarg de l'any 2014; a les dues gràfiques superiors l'estació de mesura nº 1 correspon a l'entrada de la cavitat, i la nº 10 al punt més fondo situat a la vorera del llac (segons GINÉS et al., 2017, modificat). A: Increment progressiu dels valors de CO<sub>2</sub> fins arribar als màxims estivals, degut a la nul·la ventilació de la cova durant l'estiu. B: Fase de ventilació eficient de la cavitat a partir de la tardor, fins a restablir-se unes concentracions properes a les de l'atmosfera exterior. C: Evolució dels valors de CO<sub>2</sub> durant el cicle anual, a l'estació de mesura nº 7. Vegeu la localització de les estacions a la Figura 2.

Figure 3: The annual cycle of CO<sub>2</sub> values in Cova de sa Font, throughout 2014; in the two upper graphs, measuring station no. 1 corresponds to the entrance of the cave, and no. 10 to the deepest point located on the shore of the lake (according to GINÉS et al., 2017, modified). A: Progressive increase until reaching maximum CO<sub>2</sub> values, due to the absence of ventilation in the cave during the summer. B: Phase of efficient ventilation of the cave from autumn, until concentrations close to those of the outside atmosphere are reestablished. C: Evolution of CO<sub>2</sub> values during the annual cycle, at measuring station nº 7. See the location of measuring stations in Figure 2.

bastant a l'interior de la cova –a la cota -17 m i en la base del fort rost cònic que formen les eolianites pleistocenes– es tracta d'un context topogràfic relativament favorable per als possibles intercanvis amb l'atmosfera exterior. Tenint en compte aquestes circumstàncies es va elegir aquesta zona, propera a l'estació de mesura 7 (Figura 2), per a la instal·lació l'any 2023 dels aparells d'enregistrament continu, tal com es veurà més endavant.

Data mostreig	Anàlisis bosses			Dades de camp		
	CO <sub>2</sub> (ppm)	δ <sup>13</sup> C-CO <sub>2</sub> (‰)	CH <sub>4</sub> (ppm)	CO <sub>2</sub> (ppm)	Temperatura (°C)	HR (%)
23/02/2018	570	-13,15	1,65	-	15,8	88,7
17/04/2018	983	-17,03	1,37	637	18,6	-
08/05/2018	1.625	-19,19	1,03	1.480	17,7	-
26/05/2018	8.475	-21,20	0,39	9.530	18,9	88,0
12/06/2018	30.359	-21,24	0,40	34.000	18,5	92,0
07/07/2018	-	-	-	54.550	19,0	90,0
19/07/2018	56.891	-21,30	0,09	59.400	19,4	87,3
22/09/2018	66.832	-22,18	0,46	68.731	20,0	86,0
02/11/2018	940	-17,42	1,55	930	-	-
10/12/2018	942	-17,55	1,49	890	18,3	90,0
21/02/2019	644	-14,33	1,53	760	16,8	90,0
29/05/2019	2.119	-20,56	0,83	2.220	18,6	94,4
06/06/2019	9.745	-22,40	0,24	9.880	19,2	87,0
21/06/2019	28.809	-18,91	0,30	32.000	18,9	90,3
26/06/2019	34.098	-18,82	0,28	37.000	18,6	92,0
28/09/2019	-	-	-	61.800	20,0	87,0
05/10/2019	61.674	-22,21	0,08	62.100	20,6	83,0
Exterior (mitjana)	467	-10,40	1,95	-	-	-
Sòl (mitjana)	7.512	-20,64	0,44	-	-	-

Taula 1: Resultats analítics i dades de camp de les mostres d'aire recollides a l'estació 7 de la Cova de sa Font i al seu entorn exterior, durant els anys 2018 i 2019. Les files marcades en groc corresponen a visites efectuades sense recollida de mostres d'aire i, per tant, tan sols inclouen dades de camp.

Table 1: Analytical results and field data of the air samples collected at the station no. 7 of Cova de sa Font and at the external environment of the cave, during 2018 and 2019. The rows marked in yellow correspond to visits carried out without collecting air samples and, therefore, only include field data.

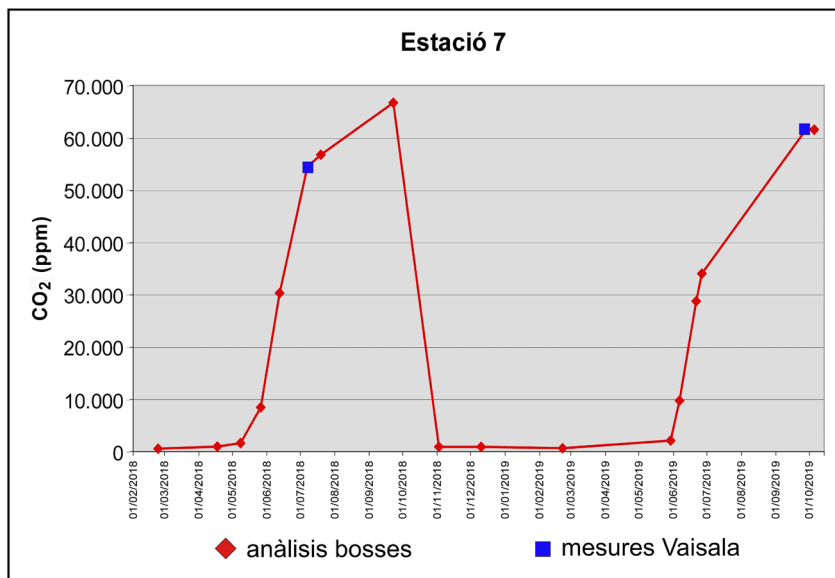


Figura 4: Evolució de les concentracions de CO<sub>2</sub> a l'estació de mesura nº 7 (veure localització a la Figura 2), entre el mes de febrer de 2018 i octubre de 2019. Quadrats vermells: resultats de l'anàlisi en el laboratori de les mostres d'aire. Quadrats blaus: mesuraments *in situ* amb el dispositiu portàtil Vaisala.

Figure 4: Evolution of CO<sub>2</sub> values at measuring station no. 7 (see location on Figure 2), between February-2018 and October-2019. Red squares: analytical results of air samples in the laboratory. Blue squares: *in situ* measurements with Vaisala portable device.

### Segona campanya de recollida de mostres. Anys 2018 i 2019

Entre els mesos de febrer de 2018 i octubre de 2019 es desenvolupà una segona campanya en la Cova de sa Font, centrada en aquesta ocasió en la recollida de mostres d'aire –en bosses tipus Ritter d'1 L de capacitat– per la seva ulterior anàlisi al *Laboratorio de Isótopos Estables* de la *Universidad de Almería*. Les anàlisis efectuades inclouen les concentracions de CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub>, així com les seves respectives signatures isotòpiques. En total es feren 15 jornades de recollida de mostres d'aire, amb periodicitat variable (en intervals aproximats d'entre dues setmanes i tres mesos), així com dues incursions addicionals per prendre mesures *in situ* de comprovació amb un dispositiu de la firma *Vaisala*, el rang de mesura del qual arribava fins a 100.000 ppm de CO<sub>2</sub>.

Les estacions de mostreig foren les mateixes que es feren servir en la campanya del 2014; els resultats analítics i els mesuraments de camp corresponents a l'estació 7, es troben recopilats a la Taula 1 i la Figura 4.

De forma paral·lela a la recollida de mostres d'aire, es realitzaren prospeccions faunístiques per tal d'avaluar els efectes de les elevades concentracions de CO<sub>2</sub> en la distribució de la fauna cavernícola terrestre de la cavitat. Els resultats d'aquestes campanyes, dutes a terme durant l'interval 2018-2019, foren publicats parcialment, focalitzant l'atenció en els aspectes bioespeleològics i en la caracterització isotòpica del CO<sub>2</sub> de l'atmosfera de la cova (GINÉS et al., 2022a i 2022b). Cal deixar constància que les estacions de mostreig faunístic que s'utilitzaren en aquestes publicacions no coincideixen amb les estacions de

mostreig d'aire emprades des del 2014, atès que obeïen a criteris ecològics relacionats amb la possible presència de fauna cavernícola.

El comportament de les concentracions de CO<sub>2</sub> a l'estació 7 (Figura 4) és pràcticament idèntic al que mostraven les dades de la primera campanya. Començant per uns valors mínims hivernals de devers 600 ppm, s'incrementen de manera dràstica però gradual fins a unes concentracions màximes superiors a 60.000 ppm, que s'assoleixen a finals de l'estiu i inicis de la tardor. Els valors màxims registrats corresponen al 22 de setembre de 2018 quan l'anàlisi de les mostres d'aire dona 66.832 ppm, xifra que coincideix amb els mesuraments *in situ* que superen les 68.000 ppm (Taula 1). La ventilació total de la cova succeeix l'any 2018 durant el mes d'octubre, de tal manera que el 2 de novembre s'han restablert ja unes concentracions de CO<sub>2</sub> hivernals de 940 ppm (Figura 4).

La signatura isotòpica del CO<sub>2</sub> (Taula 1) permet relacionar les elevades concentracions observades a la Cova de sa Font amb el concepte de *ground air*, tal com el plantejava primerencament ATKINSON (1977) i, amb posterioritat, MATTEY et al. (2016). Es tractaria del que es podria traduir com *aire de la zona vadosa*, relativament desvinculat dels processos que es donen a l'horitzó edàfic i caracteritzat per una signatura isotòpica específica, menys negativa que la del sòl pobre desenvolupat a l'epicarst de sa Dragonera (GINÉS et al., 2022b).

La Figura 5 resumeix l'evolució estacional dels gràfics *Keeling* obtinguts a partir dels parells de valors de 1/CO<sub>2</sub> — δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> per al sistema atmosfera exterior – sòl – atmosfera de la cavitat. De l'anàlisi dels *Keeling-plots* es poden extreure les següents informacions rellevants: 1) la signatura isotòpica teòrica de la font de CO<sub>2</sub> procedent de l'horitzó edàfic (sòl) i/o la zona vadosa, que es pot inferir del valor d'intersecció de la funció lineal *Keeling* amb l'eix δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub>; i 2) el percentatge de CO<sub>2</sub> de l'atmosfera exterior que està present en l'aire de la cavitat. Les línies rectes contínues de la gràfica representen la mescla de l'atmosfera local amb un component ric en CO<sub>2</sub> isotòpicament més lleuger, derivat ja sigui directament de la cobertura edàfica o bé procedent de la degradació de matèria orgànica als buits i esclerxes de la zona vadosa (*ground air*) i sense una vinculació estreta amb una procedència edàfica, tal com ja s'assenyalava a altres publicacions sobre aquesta i altres coves de les Balears (GINÉS et al., 2022b, 2024). Les línies de punts, perpendiculars a les línies contínues, indiquen proporcions de mescla etiquetades com a percentatges (%) de CO<sub>2</sub> atmosfèric de l'exterior que forma part de l'aire de la cavitat.

Durant l'hivern, la cavitat està ben ventilada degut a la circulació convectiva de l'aire entre l'exterior i l'interior, de tal manera que l'atmosfera de la cavitat presenta un percentatge de CO<sub>2</sub> procedent de l'exterior superior al 90 % (Figura 5A). Al llarg de la primavera, la contribució de CO<sub>2</sub> de l'exterior oscil·la

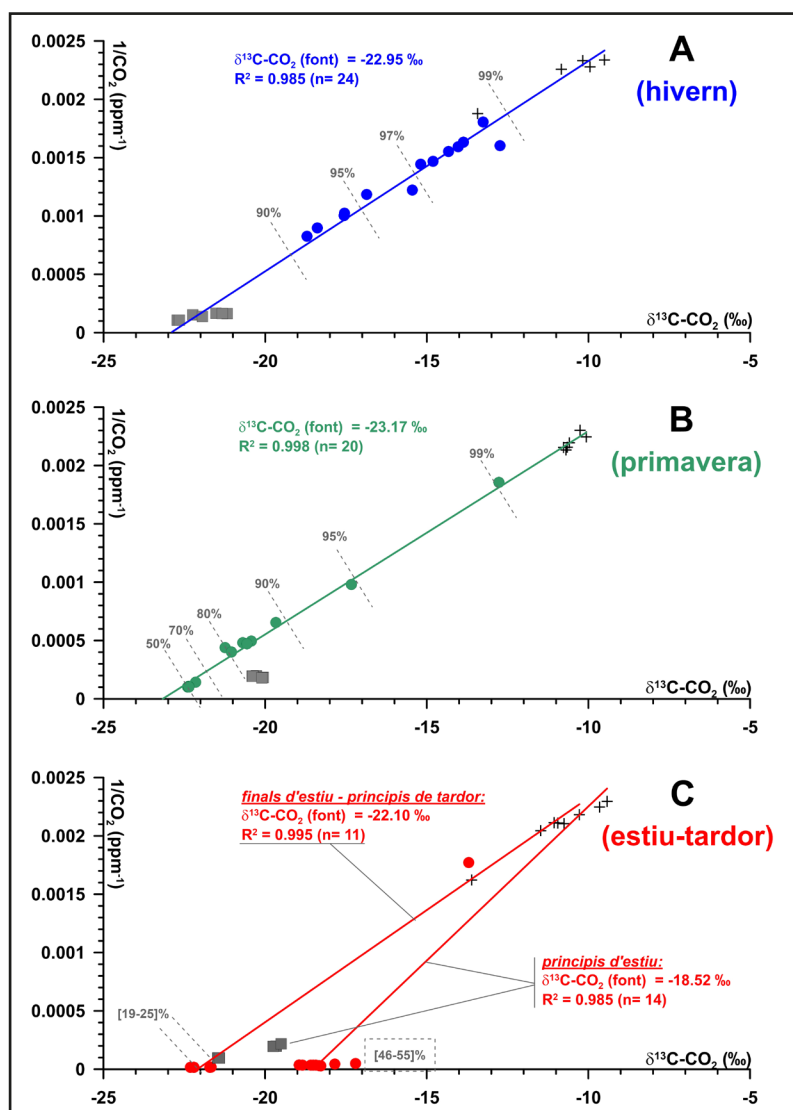


Figura 5: *Keeling-plots* obtinguts per a la Cova de sa Font a partir dels valors de CO<sub>2</sub> i δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> de les mostres d'aire recollides a l'exterior, al sòl i a l'interior de la cavitat. A: hivern (desembre 2018 i febrer 2019). B: primavera (maig i inicis de juny de 2019). C: estiu - tardor (finals de juny i octubre de 2019).

Creus: aire exterior; cercles de color: aire de la cavitat; quadrats grisos: aire de l'horitzó edàfic. Vegeu explicacions addicionals al text.

Figure 5: *Keeling-plots* for Cova de sa Font obtained from CO<sub>2</sub> and δ<sup>13</sup>C-CO<sub>2</sub> values of the air samples collected outside, in the soil horizon, and inside the cave. A: winter (December 2018 and February 2019). B: spring (May and early June 2019). C: summer - autumn (late June and October of 2019).

Crosses: exterior air; color circles: cave air samples; grey squares: air from the edaphic horizon. See additional explanations in the text.

entre el 80 % i el 90 % en maig del 2019, i entre el 50 % i el 70 % a començaments de juny, amb l'excepció de la zona menys fonda i propera a l'entrada de la cavitat (per damunt dels 2 m de fondària), on el CO<sub>2</sub> de l'exterior segueix representant més del 90 % (Figura 5B).

El valor de  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  estimat per a la font de CO<sub>2</sub> no atmosfèric (component enriquida en CO<sub>2</sub> isotòpicament més lleuger) fou gairebé el mateix per a l'hivern i la primavera (aproximadament 23 ‰). Aquest valor és similar als estimats en altres cavitats on s'acumula CO<sub>2</sub> generat per la respiració microbiana en sòls que contenen matèria orgànica procedent de vegetació C3 (entre -25 i -28 ‰, GARCÍA-ANTÓN et al., 2014). No obstant això, en primavera s'aprecia una lleugera tendència cap a un CO<sub>2</sub> edàfic isotòpicament més pesat (Figura 5B), el que indicaria una probable difusió del gas des del sòl cap a l'atmosfera exterior (major respiració del sòl amb l'augment de la temperatura).

Al llarg de l'estiu i fins als inicis de la tardor, els nostres mesuraments mostren que la concentració de CO<sub>2</sub> en l'atmosfera de la cavitat augmentà de forma progressiva des de 30.000 ppm (a finals de juny) fins aproximadament 60.000 ppm, als inicis d'octubre. Durant una primera etapa (principis de l'estiu), el  $\delta^{13}\text{C-CO}_2$  estimat per a la font rica en CO<sub>2</sub> (no atmosfèric) augmenta fins a -18,52 ‰ (Figura 5C). Aquest CO<sub>2</sub> més pesat (enriquit en <sup>13</sup>C) es difon cap a l'atmosfera de la cavitat des de la zona vadosa circumdant (*ground air*), i no directament des del sòl. Els moments de ventilació de la cavitat, encara freqüents i controlats pels descensos de la temperatura exterior, determinaren que la contribució del CO<sub>2</sub> procedent de l'exterior encara oscil·lés entre el 45 % i el 55 % a principis de l'estiu. Finalment, durant una segona etapa (finals de l'estiu i inicis de la tardor), el contingut de CO<sub>2</sub> de l'aire de la cova augmentà per damunt de 60.000 ppm i, per tant, el CO<sub>2</sub> residual de l'atmosfera exterior disminuí fins a assolir valors entre el 19 % i el 25 %. Malgrat això, les pluges de la tardor probablement activaren la producció edàfica de CO<sub>2</sub> i, com a conseqüència, la signatura isotòpica estimada per a la font rica en CO<sub>2</sub> (no atmosfèric) baixà fins al -22,10 ‰ (Figura 5C), el que indica un cert increment de la contribució de CO<sub>2</sub> procedent de la cobertura edàfica.

Les concentracions de CH<sub>4</sub> mesurades (Taula 1) es poden considerar un bon indicador del grau de confinament de la cavitat i presenten una relació inversa amb aquest factor, de tal manera que els continguts són molt més baixos en els ambients subterranis escassament ventilats, on la renovació amb CH<sub>4</sub> atmosfèric està limitada (FERNÁNDEZ-CORTÉS et al., 2015) i, en canvi, predomina el consum del gas per l'acció de microorganismes metanòtrofs (MARTÍN-POZAS et al., 2022). D'aquesta manera, a les dates hivernals, amb una ventilació eficient de la cova, s'han mesurat concentracions de CH<sub>4</sub> que van d'1,49 a 1,65 ppm, influenciades evidentment per les aportacions d'aire exterior amb continguts que oscil·len al voltant d'1,95 ppm. Durant el període estival, quan l'atmosfera de la cova es troba gairebé totalment confinada, el CH<sub>4</sub> de l'aire disminueix de forma dràstica situant-se entre 0,08 i 0,46 ppm fins ben avançada la tardor.

## Enregistrament continu dels valors de temperatura, CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub>. Any 2023

Partint de la base de les investigacions prèvies portades a terme a la Cova de sa Font, es considerarà pertinent emprendre l'enregistrament continu d'alguns paràmetres de la seva atmosfera. Així, de l'11 d'abril fins a l'11 de desembre del 2023 es desenvolupà una tercera campanya de presa de dades, amb la finalitat d'arribar a conèixer en detall les particularitats de la dinàmica atmosfèrica de la cova.

### *Materials i mètodes*

Aquesta campanya combinà l'enregistrament continu d'alguns paràmetres de l'atmosfera de la cavitat amb la realització d'uns pocs mesuraments puntuals de CO<sub>2</sub> i anàlisis de mostres d'aire, efectuats per tal de complementar les dades recol·lectades pels *data-loggers* i comprovar la coherència del registre obtingut.

S'utilitzaren dos *data-loggers*—un d'ells de CO<sub>2</sub> i un altre d'O<sub>2</sub>—que es varen disposar en el replà lateral existent després del fort rost que forma la part superior de l'espectacular dipòsit d'eolianites pleistocenes; el lloc escollit es troba en les rodalies de l'estació 7 usada en anteriors campanyes (Figura 2), a una cota de -17 m i un poc apartat del camí d'accés que recorre la cova. Els dispositius emprats estaven fabricats per la firma britànica *Goodsell Systems Ltd. (GSL)*. El dispositiu model CO2LOG\_10 (10 % CO<sub>2</sub> Data Logger) està equipat amb un sensor NDIR (Sensirion K33 ICB-F 10 %) que permet el mesurament de la concentració del gas en un rang entre 400 ppm i 100.000 ppm, amb una exactitud de  $\pm 3$  % del valor mesurat i una resolució digital del 0,001 % vol. Per altra banda, el dispositiu d'enregistrament de la concentració d'O<sub>2</sub> en l'aire (model O2LOG) es troba equipat amb un sensor electroquímic d'O<sub>2</sub>

(SEN0322), amb un rang de mesura del 0 al 25 % vol, una precisió inferior al 2 % i una resolució de 0,15 % vol. Aquest sensor té una estabilitat inferior al 2 %/mes, motiu pel qual es recomana la seva substitució cada 2 anys.

Els *data-loggers* utilitzats enregistren els valors de CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> amb una cadència de 3 hores, que es considera adequada per tal d'intentar esbrinar els detalls del funcionament de l'atmosfera de la cova. Degut a la manca de subministrament elèctric, els dispositius enregistradors eren accionats cada un d'ells per 4 bateries d'1,5 V (D/LR20), que permetien una autonomia de com a mínim 2 mesos. Per aquest motiu es programaren visites amb una periodicitat bi-mensual per procedir a la substitució de les bateries, visites que s'aprofitaven per anar descarregant les dades emmagatzemades així com per efectuar mostres i mesuraments sobre el terreny de les concentracions de CO<sub>2</sub> (Figura 6).

El funcionament dels *data-loggers* fou del tot correcte durant els 4 primers mesos (entre abril i agost), obtenint-se un excel·lent registre paral·lel de CO<sub>2</sub> i d'O<sub>2</sub>. A partir de l'agost començaren els problemes operatius dels dispositius enregistradors, aparentment deguts als problemes de condensació en els components electrònics. Així, durant els mesos d'agost i setembre fallaren ambdós dispositius, i al bimestre següent (octubre i novembre) afortunadament el *data-logger* d'O<sub>2</sub> funcionà sense problemes, fet que serà clau per intentar reconstruir el cicle anual de l'atmosfera de la cavitat.

Les visites programades per substituir les bateries requeriren, al llarg dels mesos d'estiu, l'ús d'equips autònoms de respiració per mor de les elevades concentracions de CO<sub>2</sub>. Aquestes visites, efectuades cada dos mesos com ja s'ha comentat abans, permeteren obtenir dades puntuals del contingut de CO<sub>2</sub> en quatre dates concretes: 12 de juny, 8 d'agost, 3 d'octubre i 12 de desembre, dades que ajudaran a comprovar i reconstruir correctament el cicle anual observat. Aquests mesuraments foren realitzats amb un sensor portàtil de la firma *Vaisala* (MI70), dotat d'una sonda (GMP251) amb un rang de mesura fins a 200.000 ppm de CO<sub>2</sub>, amb una precisió del 0,2 % entre 0 i 80.000 ppm de CO<sub>2</sub> i del 0,4 % entre 80.000 i 200.000 ppm de CO<sub>2</sub>.

La visita del 3 d'octubre s'aprofità per recollir mostres d'aire en la ubicació dels *data-loggers*, mitjançant bosses tipus *Ritter* d'1 L omplertes a pressió atmosfèrica amb una petita bomba-compressor d'aire d'1,8 L/min accionada amb bateries. Aquestes mostres d'aire foren analitzades en el termini de 48 hores per tal de determinar les fraccions molars de CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> així com el δ<sup>13</sup>C d'ambdós gasos, utilitzant espectròmetres CRDS (analitzador G2201-i, Picarro Inc., EE.UU.) al *Laboratorio de Isótopos Estables* de la *Universidad de Almería*. Es processaren tres patrons interns amb concentracions certificades de CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> i valors coneguts de δ<sup>13</sup>C per a cada gas, amb la finalitat de verificar el



Figura 6: Equipament utilitzat en la campanya de l'any 2023. A: Ubicació dels *data-loggers* en un lateral del replà on estava situada l'estació 7 (vegeu Figura 2). B: Comprovant el funcionament durant la instal·lació dels dispositius. C: Descàrrega de les dades i canvi de les bateries a la zona d'entrada de la cavitat. D: Dispositiu mesurador de la firma *Vaisala*, amb un rang de mesura fins a 200.000 ppm de CO<sub>2</sub>. E: S'han utilitzat bosses tipus *Ritter* per als mostres d'aire de la cova, essent necessari l'ús d'equips autònoms de respiració per a les incursions realitzades durant la temporada estival.

Figure 6: Equipment used in the 2023 campaign. A: The *data-loggers* were placed on a flat area close to the location of measurement station 7 (see Figure 2). B: Installation of the *data-loggers* and check of their operation. C: Download of the data and batteries' replacement at the entrance area of the cave. D: Measuring device from the *Vaisala* company, with a measurement range of CO<sub>2</sub> up to 200,000 ppm. E: *Ritter*-type bags were used for the air sampling in the cave, with breathing equipment necessary in the summer season trips.

correcte funcionament de l'analitzador CRDS. Aquest mostreig addicional, efectuat als inicis de la tardor, permetrà validar la qualitat de les dades obtingudes amb els diversos dispositius utilitzats durant la campanya.

Per a l'enregistrament de les temperatures s'utilitzaren sensors de la firma *Gemini Data Loggers*, *Tinytag model Plus2* (TGP-4500), amb un rang de mesura entre -40°C i 85°C i una resolució de 0,01°C, que s'instal·laren en tres punts al llarg de la cavitat així com en el llac final (Figura 2). Aquests sensors enregistraven les dades amb una cadència d'una hora. Encara que aquests dispositius enregistradors mesuren també la humitat relativa, tan sols s'ha obtingut un registre coherent en el sensor situat a l'entrada de la cavitat (T1); en la resta de sensors, amb molt elevades humitats relatives, els registres han estat defectuosos.

Quant a les informacions meteorològiques, es disposà de les dades d'algunes estacions de l'AEMET relativament properes, ja que no hi havia registres de sa Dragonera pròpiament dita. Concretament, es consultaren les informacions de l'estació del Port de Palma (B228), situada en un context geogràfic i climàtic assimilable al de sa Dragonera; així mateix es tingué també accés a dades de l'estació d'Andratx-Sant Elm (B103B), però presentaven importants llacunes sobretot en alguns moments clau de la tardor del 2023.

### L'enregistrament paral·lel de CO<sub>2</sub> i O<sub>2</sub> (12 d'abril a 8 d'agost de 2023)

El registre corresponent als quatre primers mesos de la campanya ha estat complet i sense problemes en cap dels dos *data-loggers*. Els resultats obtinguts mostren una evolució dels valors de CO<sub>2</sub> que arranxa en abril des de xifres de l'ordre de les 2.000 ppm, les quals experimenten diverses dents de serra, però amb tendència ascendent, que marquen un màxim puntual de 13.160 ppm el dia 11 de maig. Després d'una davallada accentuada, a partir del 21 de maig s'instaura una tendència fortament ascendent que, amb petits dents de serra a escala diària, arriba fins a les 57.200 ppm corresponents al 8 d'agost (Figura 7); les taxes d'increment del CO<sub>2</sub> foren elevadíssimes durant aquest període, arribant fins i tot a 2.410 ppm d'increment al dia. Convé consignar que es disposa també de mesures puntuals de CO<sub>2</sub>, preses els dies 12 de juny (35.730 ppm) i 8 d'agost (58.800 ppm) en ocasió del procés de canvi de bateries i descàrrega de dades. Aquestes mesures resulten totalment coherents amb el registre emmagatzemat pel *data-logger* de CO<sub>2</sub> i venen a ratificar la robustesa de les dades enregistrades.

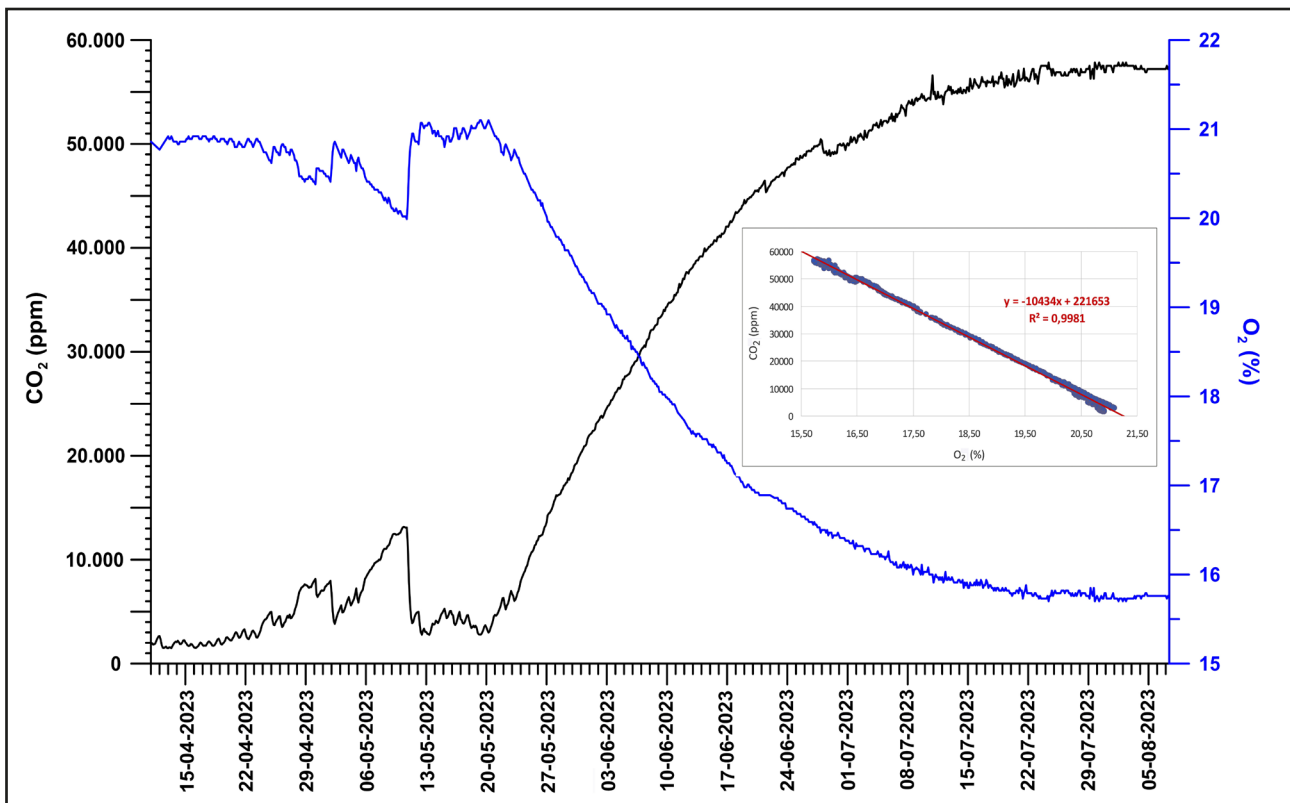


Figura 7: Els registres de CO<sub>2</sub> i d'O<sub>2</sub> a la Cova de sa Font, corresponents als quatre primers mesos de la campanya des 2023.

En el quadre es mostra la molt forta correlació negativa existent entre ambdues variables.

Figure 7: CO<sub>2</sub> and O<sub>2</sub> records from Cova de sa Font, corresponding to the first four months of the 2023 campaign.

The inset shows the very strong negative correlation existing between both variables.

Pel que fa als valors d'O<sub>2</sub>, el registre obtingut és idèntic al de CO<sub>2</sub> però amb un comportament totalment invers (Figura 7), des del moment que les concentracions d'O<sub>2</sub> són mínimes en correspondència amb els valors màxims de CO<sub>2</sub>, per reemplaçament de gasos. Les concentracions d'O<sub>2</sub> mesurades van des de gairebé el 21 % a l'inici del registre, fins a valors mínims del 15,73 % el 8 d'agost, en relació amb les concentracions màximes de CO<sub>2</sub> enregistrades en aquelles dates.

Les corbes obtingudes per a ambdós gasos són idèntiques –amb les mateixes fluctuacions– però amb una correlació negativa gairebé perfecta (Figura 7). Aquesta correlació negativa tan forta resultarà extremadament útil, ja que el registre d'O<sub>2</sub> ens servirà com a *proxy* per a avaluar les concentracions de CO<sub>2</sub> durant els mesos d'octubre i novembre, quan el *data-logger* d'aquest gas va fallar totalment.

Criden un poc l'atenció els pics positius del contingut de CO<sub>2</sub> observables els darrers dies d'abril i a mitjans de maig (Figura 7). Es tracta d'episodis en els quals comença la tendència ascendent de les concentracions de CO<sub>2</sub>, però que aparentment es veuen interromputs per moments de ventilació eficient de la cova, lligats a baixades puntuals de les temperatures exteriors. Més endavant s'anitzaran en detall aquestes qüestions.

### Reconstrucció del cicle anual dels valors de CO<sub>2</sub>. Any 2023

Tal com ja s'ha comentat anteriorment, el cicle anual de les concentracions de CO<sub>2</sub> està marcat, durant la primavera i l'inici de l'estiu, per un gradual i molt important increment dels seus valors fins a arribar a uns màxims estivals, sempre superiors a 50.000 ppm. Aquests continguts força elevats es perllonguen amb claredat fins a les darreries del mes d'octubre; lamentablement, el *data-logger* del CO<sub>2</sub> deixà de funcionar en agost, però es disposa de mesures puntuals i anàlisis de mostres d'aire que quantifiquen per damunt de 61.000 ppm les concentracions existents en la data del 3 d'octubre (Figura 8).

La part final del cicle anual no ha pogut ser mesurada directament per mor de la fallada ja definitiva del dispositiu registrador del CO<sub>2</sub>. Per fortuna, el *data-logger* de l'O<sub>2</sub> continuà operatiu del 4 d'octubre fins al final de la campanya, permetent la reconstrucció de la part final del cicle en base a la molt forta correlació inversa observada entre ambdues variables (Figura 8). En aquesta part final del cicle destaquen els valors màxims de CO<sub>2</sub>, estimats per sobre de 70.000 ppm en base al registre d'O<sub>2</sub>, que assoleix valors mínims del 14,29 % a començaments de novembre. Precisament, és el 8 de novembre quan comença la ventilació de la cavitat en dues fases: una primera davallada de la concentració de CO<sub>2</sub> fins a 47.000 ppm, que es veu interrompuda per una breu remuntada, seguida per una sobtada davallada final des de 60.000 fins a 2.000 ppm, ocorreguda entre el 21 i 24 de novembre. La part terminal del registre d'aquesta campanya mostra una pujada efímera fins a 15.000 ppm (1 de desembre), per finalment recuperar uns valors hivernals propers a 1.000 ppm, corroborats amb una medicació *in situ* de 1.203 ppm el dia 12 de desembre.

De cara a la interpretació dels resultats d'aquesta campanya, és interessant relacionar el cicle estacional observat amb el registre de temperatures dins la cavitat i, sobretot, amb les dades meteorològiques disponibles (Figura 9). En aquest conjunt de gràfiques, s'han assenyalat amb línies discontinües negres els esdeveniments principals que resulta possible relacionar en els diferents registres. Per exemple, són ben evidents tant l'inici de l'increment dràstic de les concentracions de CO<sub>2</sub> –ocorregut devers el dia

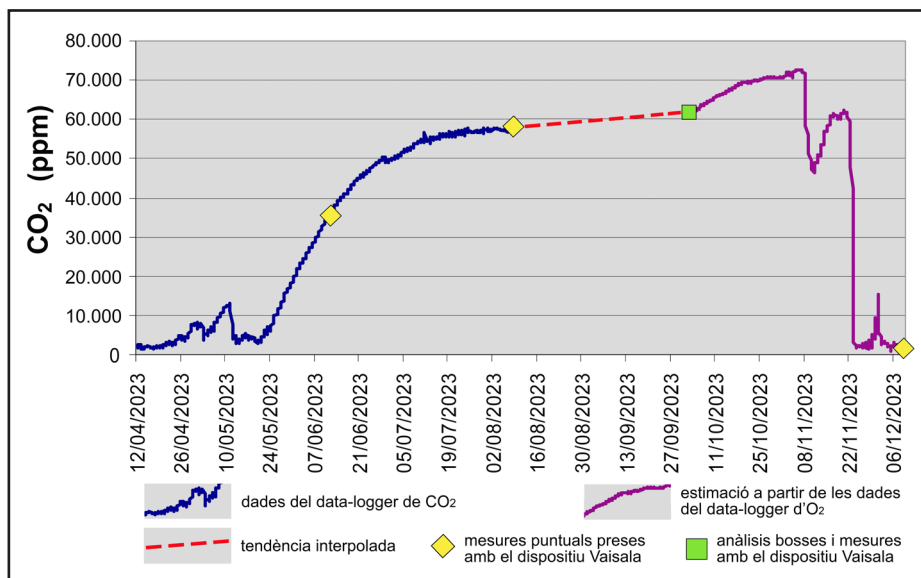


Figura 8: Reconstrucció del cicle anual de les concentracions de CO<sub>2</sub> mesurades a la Cova de sa Font, corresponent a l'any 2023. Línia blava: registre del *data-logger* de CO<sub>2</sub>. Línia vermella: tendència interpolada (error del registrador de dades). Línia magenta: registre estimat a partir dels valors del *data-logger* d'O<sub>2</sub>. Quadrats grocs: mesures *in situ* amb un dispositiu portàtil *Vaisala*. Quadrat verd: dades de l'anàlisi de laboratori de mostres d'aire, juntament amb mesures *in situ*.  
 Figure 8: Reconstruction of the annual cycle of CO<sub>2</sub> concentrations measured in Cova de sa Font, corresponding to the year 2023. Blue line: record from the CO<sub>2</sub> data-logger. Red line: interpolated tendency (data-logger failure). Magenta line: record estimated from the O<sub>2</sub> data-logger values. Yellow squares: *in situ* measures with a *Vaisala* portable device. Green square: data from laboratory analysis of air samples, together with *in situ* measurements.

21 de maig de 2023– com la davallada sobtada que té lloc al voltant del 23 de novembre; en ambdós casos, la relació causal amb el comportament de les temperatures exteriors a l'estació meteorològica del Port de Palma és molt clara, com es discutirà més endavant.

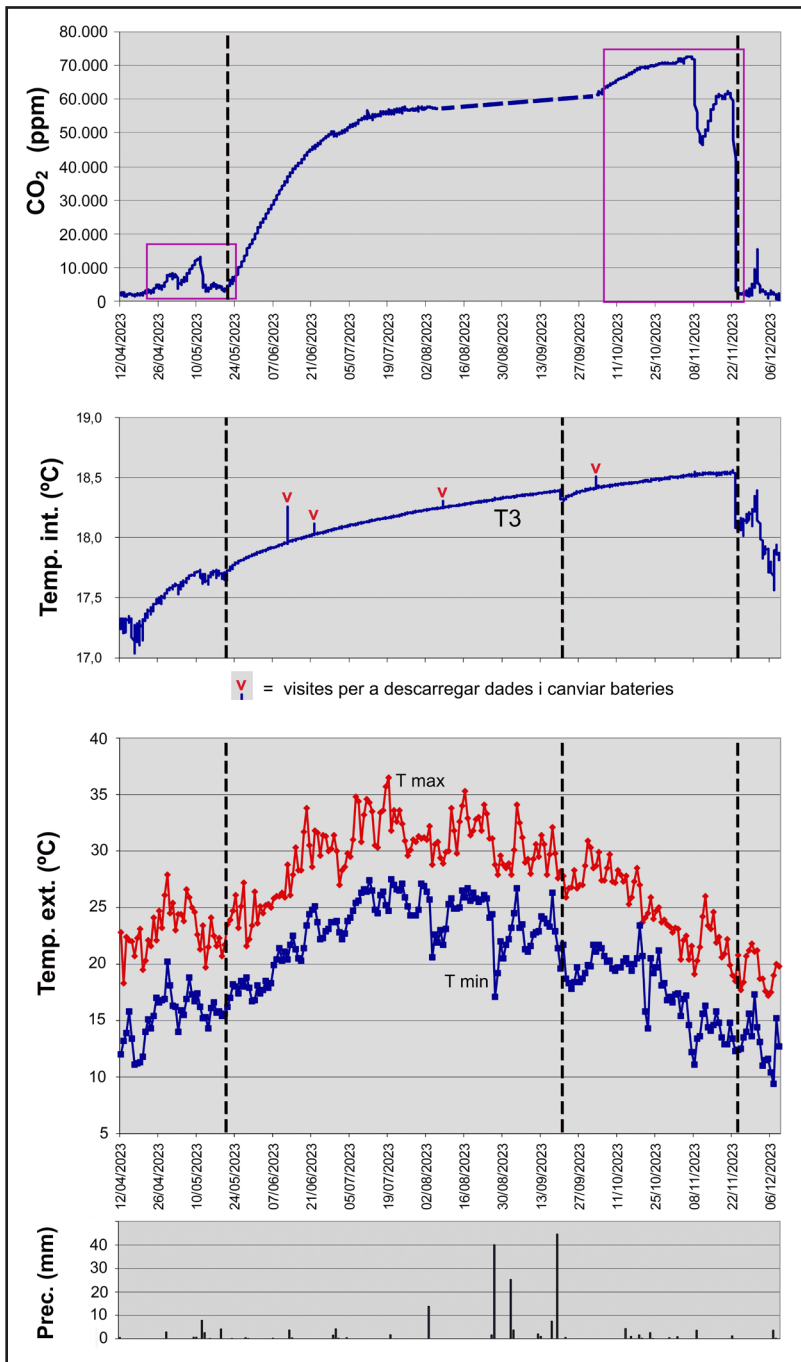


Figura 9: El cicle anual de les concentracions de CO<sub>2</sub> mesurades a la Cova de sa Font l'any 2023, representat conjuntament amb les temperatures de l'interior de la cavitat (estació T3), i les dades meteorològiques disponibles en l'AEMET OpenData (temperatures màximes i mínimes en l'estació del Port de Palma, i precipitacions en l'estació Andratx-Sant Elm). Els requadres magenta de la figura superior assenyalen els sectors del registre que es discutiran en detall més endavant. Les línies discontinües negres indiquen la possible correlació entre alguns dels principals esdeveniments dels diferents registres. Explicacions addicionals en el text.

Figure 9: The annual cycle of CO<sub>2</sub> measured at Cova de sa Font in 2023, represented together with the temperatures inside the cave (station T3), and the meteorological data available in AEMET OpenData (maximum and minimum temperatures at the Port de Palma station, and precipitation at the Andratx-Sant Elm station). The magenta boxes in the upper figure indicate the sectors of the record that will be discussed in detail later. Letter V, in the cave temperatures graph, correspond to short visits for the replacement of the data-loggers' batteries. The black dashed lines represent the possible correlation between some of the main events observed in the different records. Additional explanations in the text.

Així mateix, el registre de les temperatures a l'interior de la cova (estació T3, de la Figura 2) mostra dos aspectes interessants. Per una banda, són perceptibles unes petites pujades puntuals (marcades amb la lletra V) corresponents a les jornades en les quals s'accedí a la cavitat per a la substitució de les bateries dels *data-loggers* o per altres comprovacions de la seva operativa (Figura 9). D'altra banda, també s'observa una ruptura molt clara de la tendència ascendent de la temperatura a l'interior de la cova, ocorreguda sobre el 20 de setembre en relació amb una davallada important de les temperatures externes. Aquesta ruptura no té cap reflex en la corba de les concentracions de CO<sub>2</sub>, bàsicament degut a que els *data-loggers* no estigueren operatius entre el 8 d'agost i el 3 d'octubre; tal vegada sigui convenient assenyalar que aquesta ruptura coincideix amb l'episodi més important de precipitacions (44,7 mm), registrat a l'estació meteorològica d'Andratx-Sant Elm el 19 de setembre.

### Observació detallada d'alguns sectors del registre obtingut

En la part superior de la Figura 9 es troben remarcats en magenta dos lapses temporals, que seran objecte d'una especial atenció tot seguit. Es tracta d'analitzar en detall els sectors inicial i final del registre de CO<sub>2</sub> obtingut: uns accentuats pics d'ascens-descens (en abril i maig) previs a la gran pujada definitiva estival i, per altra banda, les vicissituds de la part final del registre que porten a la ventilació total de la cavitat.

El sector del registre de CO<sub>2</sub> que es mostra a la Figura 10 comença amb unes concentracions entre 2.000 i 3.000 ppm que fluctuen amb una periodicitat diària fins al 24 d'abril, que és quan s'inicia una forta tendència ascendent fins a 13.000 ppm –amb importants dents de serra– que es veu truncada per dues davallades molt evidents els dies 3 i 11-12 de maig, les quals es relacionen molt clarament amb descensos termomètrics notoris (entrades d'aire fred) registrats a l'estació meteorològica del Port de

Palma. A partir del 13 de maig es manté una tendència fluctuant diària, fins que el 24 de maig s'instaura un règim d'increment dràstic dels valors de CO<sub>2</sub>, que conduirà a la llarga a màxims estivals superiors a 60.000 ppm. Crida especialment l'atenció la variació diària de les concentracions de CO<sub>2</sub> durant aquest sector del registre (Figura 10), les quals presenten valors màxims en arribar la nit (21 hores) en front de mínims de matinada o a primera hora del matí (6 o 9 hores); la mateixa dinàmica s'observa a les temperatures interiors (estació T3), on també es reconeixen amb claredat variacions amb periodicitat diària. Aquest comportament posa de manifest l'existència d'entrades d'aire relativament fred durant les nits, que produeixen una lleugera ventilació de la cavitat; aquestes irrupcions nocturnes d'aire fred cessen durant l'estiu, quan les temperatures mínimes nocturnes s'eleven per damunt d'un cert llindar, que es podria situar al voltant dels 17°C.

La part final del registre obtingut també presenta aspectes força interessants. Les concentracions estivals de CO<sub>2</sub>, que l'any 2023 es perllongaren fins a començaments de novembre amb valors superiors a 70.000 ppm, es venen lleugerament interrompudes per una primera davallada el dia 8 de novembre, relacionada amb una entrada episòdica d'aire fred que queda reflectida en les dades meteorològiques disponibles (Figura 11); aquesta davallada no afectà, en canvi, el registre de temperatures de l'interior de la cavitat (estació T3), que continuà ascendent per damunt dels 18,5°C. Després d'aquest primer episodi, la davallada definitiva dels continguts de CO<sub>2</sub> comença el 21 de novembre i es completa la ventilació gairebé total de la cova en tan sols uns pocs dies, quan es consoliden les temperatures exteriors pròpies del final de la tardor. És oportú fer menció de l'existència d'una irrupció d'aire fred, entre els dies 20 i 23 d'octubre, que no té repercussió en els valors de CO<sub>2</sub> enregistrats (Figura 11); es tracta d'un descens termomètric molt manco marcat que el del dia 8 de novembre, que serà quan de fet s'inicia tímidament la fase de ventilació de la cova.

#### *Els registres de temperatura obtinguts a la cavitat*

Es disposaren tres sensors que enregistraven les temperatures en diferents punts de la Cova de sa Font, des de la seva entrada fins al punt on se situen els *data-loggers* de CO<sub>2</sub> i d'O<sub>2</sub> (Figura 2);

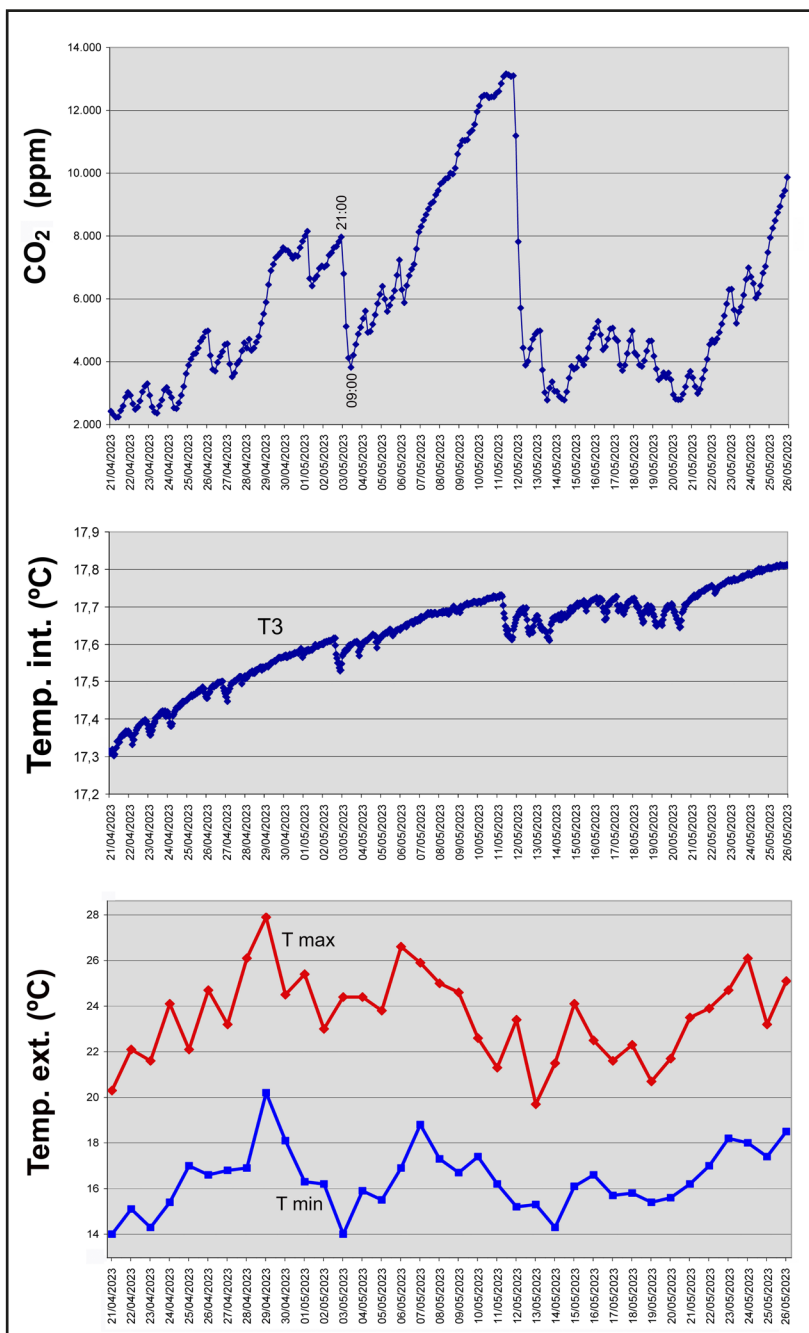


Figura 10: Sector inicial del registre de CO<sub>2</sub> mesurat a la Cova de sa Font entre els dies 21 d'abril i 26 de maig, representat conjuntament amb les temperatures interiors (estació T3), així com amb les temperatures màximes i mínimes diàries de l'estació meteorològica del Port de Palma (AEMET OpenData). L'interval de mesura de les concentracions de CO<sub>2</sub> és de 3 hores, i el de les temperatures interiors és d'1 hora.

Figure 10: Detail of the CO<sub>2</sub> record measured in Cova de sa Font between April 21 and May 26, represented together with the cave temperatures (station T3), and the maximum and minimum daily temperatures of the Port de Palma meteorological station (AEMET OpenData). The measurement interval for the CO<sub>2</sub> concentrations is 3 hours, and 1 hour for the interior temperatures.

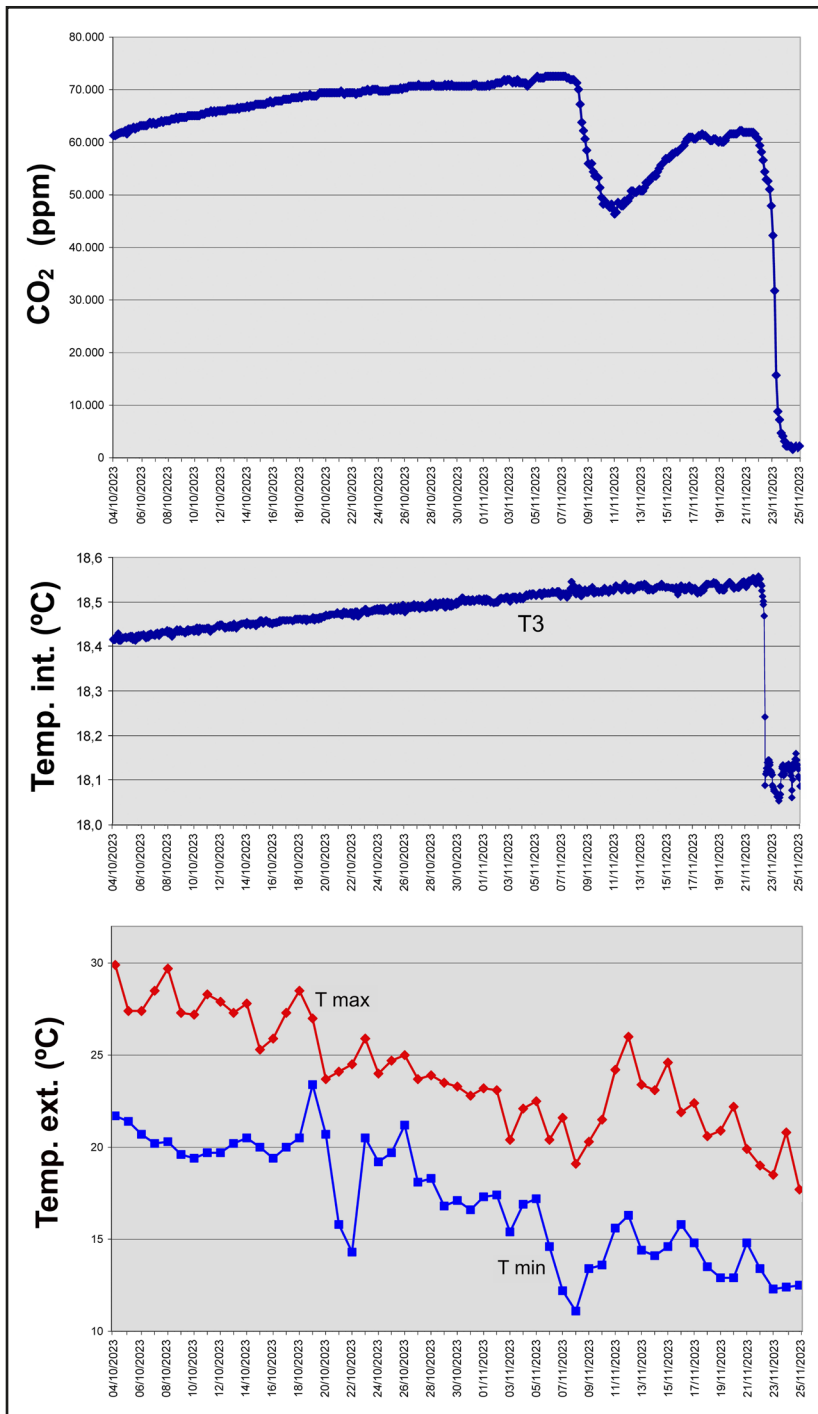


Figura 11: Sector final del registre de CO<sub>2</sub> mesurat a la Cova de sa Font entre els dies 4 d'octubre i 25 de novembre, representat conjuntament amb les temperatures interiors (estació T3), així com amb les temperatures màximes i mínimes diàries de l'estació meteorològica del Port de Palma (AEMET OpenData). La ventilació gairebé total de la cavitat té lloc en menys de tres dies.  
 Figure 11: Detail of the CO<sub>2</sub> record measured in Cova de sa Font between October 4 and November 25, represented together with the cave temperatures (station T3), and the maximum and minimum daily temperatures of the Port de Palma meteorological station (AEMET OpenData). Almost total ventilation of the cave takes place in less than three days.

també es col·locà un sensor de temperatura submergit a les aigües del llac. Es pretenia obtenir dades que documentessin la dinàmica de l'atmosfera de la cova i poguessin explicar com es produeix la ventilació dels sectors interns de la cavitat. Amb aquesta intenció, de fet s'instal·là un quart sensor en el punt més fondo de la cova, a la vorera del llac final, però aquest dispositiu no funcionà en cap moment.

Una primera aproximació a la dinàmica tèrmica de la cova ens la proporciona l'observació de les temperatures mitjanes de les estacions meteorològiques de l'AEMET (Port de Palma i Andratx-Sant Elm) juntament amb les temperatures enregistrades als 3 sensors de l'interior de la cavitat (Figura 12). Resulta ben evident la relació directa entre les temperatures exteriors i els registres obtinguts dins la cova, relació que és molt patent en el cas del sensor T1 i es va mitigant en els sensors situats més a l'interior (T2 i T3).

Les dades de temperatura més detallades de les diferents estacions apareixen recollides a la Figura 13, on estan representades en el mateix ordre que se situen les estacions a mesura que ens endinsem en la cavitat. El sensor T1, instal·lat just a l'entrada de la cova, a 2 m de fondària, ens mostra uns valors de temperatura totalment controlats per les condicions meteorològiques exteriors, fet que és extensiu al registre d'humitat relativa obtingut.

A una cota aproximada de -12 m estava ubicat el sensor T2, penjat del sòtil a la zona amb fort pendent del dipòsit d'eolianites, en una situació encara molt condicionada per la proximitat al sector vertical que dona accés a la cavitat. Els valors de temperatura del sensor T2 recullen una clara tendència general ascendent (des de 17,2°C fins a un màxim de 19,5°C), en la que s'intercalen alguns petits pics positius estiuencs així com nombrosos pics negatius corresponents a successives entrades d'aire fred des de

l'exterior, sobretot en la part inicial i final del registre obtingut (Figura 13).

Finalment, es disposa de les dades del sensor T3 que estava situat a la cota -17 m, en les immediacions dels *data-loggers*. Els valors registrats en aquest sensor són molt semblants als del T2, però més suavitzats, en trobar-se més allunyat de les influències exteriors. Es parteix en el sensor T3 d'una temperatura

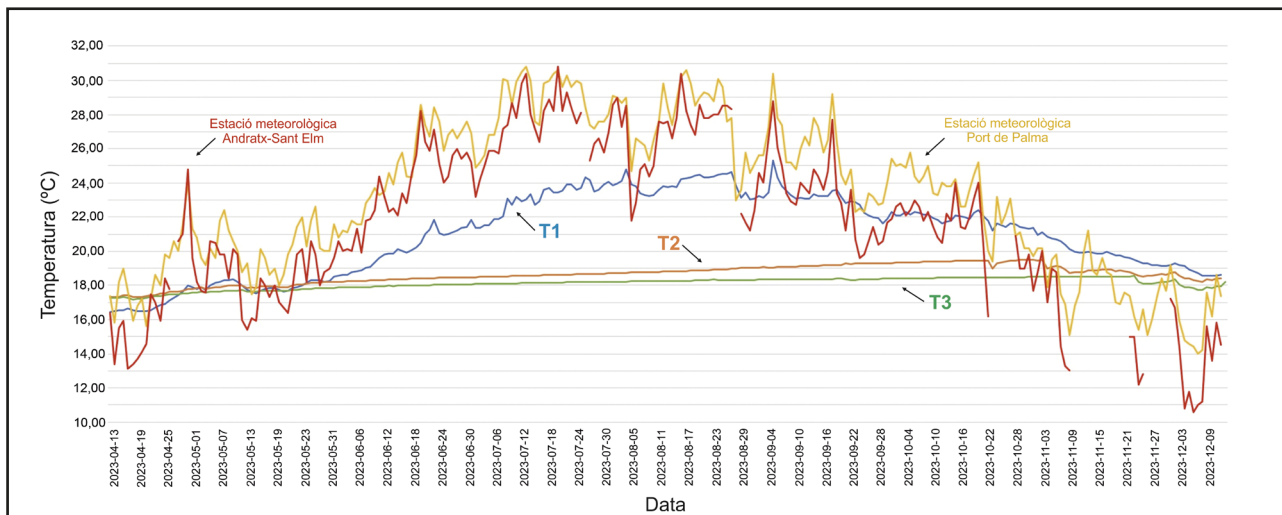


Figura 12: Temperatures mitjanes a les estacions meteorològiques de l'AEMET (Port de Palma i Andratx-Sant Elm) i temperatures enregistrades a l'interior de la Cova de sa Font, entre abril i desembre de l'any 2023.  
 Figure 12: Mean temperatures at AEMET meteorological stations (Port de Palma and Andratx-Sant Elm) and temperatures recorded inside Cova de sa Font, between April and December 2023.

primaveral de devers 17,2°C i s'arriba a un màxim de 18,6°C al final de la tardor; a més a més, es minimitzen els pics negatius de temperatura enregistrats en el T2. La comparació de les corbes de temperatura dels sensors T3 i T2 és força il·lustrativa en aquest sentit: en el registre del sensor T3 desapareixen els pics negatius relacionats amb les entrades d'aire fred ocorregudes devers el 20 d'octubre i la primera quinzena de novembre (Figura 13), irrupcions que apareixen enregistrades clarament tant en el sensor T2 com en les dades meteorològiques de l'estació del Port de Palma (Figures 9 i 11). Ambdós sensors (T2 i T3) no capturaren un registre vàlid dels valors d'humitat relativa.

Centrant-nos en el sensor T3, que correspon a la situació dels *data-loggers* de CO<sub>2</sub> i d'O<sub>2</sub>, a més de la lleugera tendència ascendent de les temperatures –abans esmentada–

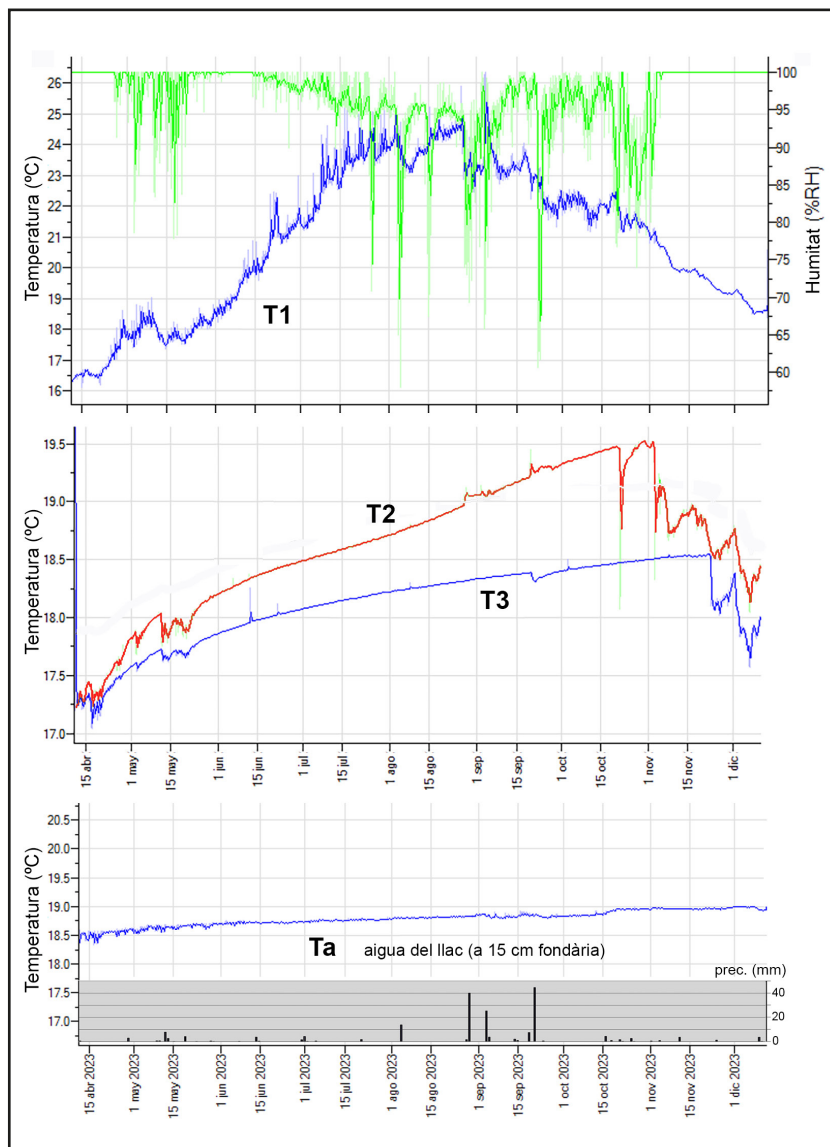


Figura 13: Els registres de temperatura i humitat relativa obtinguts a l'interior de la Cova de sa Font (vegeu la situació dels sensors en la Figura 2). Juntament amb les temperatures del llac freàtic de la cavitat, s'indiquen les precipitacions enregistrades a l'estació meteorològica d'Andratx-Sant Elm.  
 Figure 13: Temperature and relative humidity records obtained in Cova de sa Font (location of the sensors in Figure 2). Along with the temperatures of the phreatic pool of the cave, the rainfall events recorded at the Andratx-Sant Elm meteorological station are indicated.

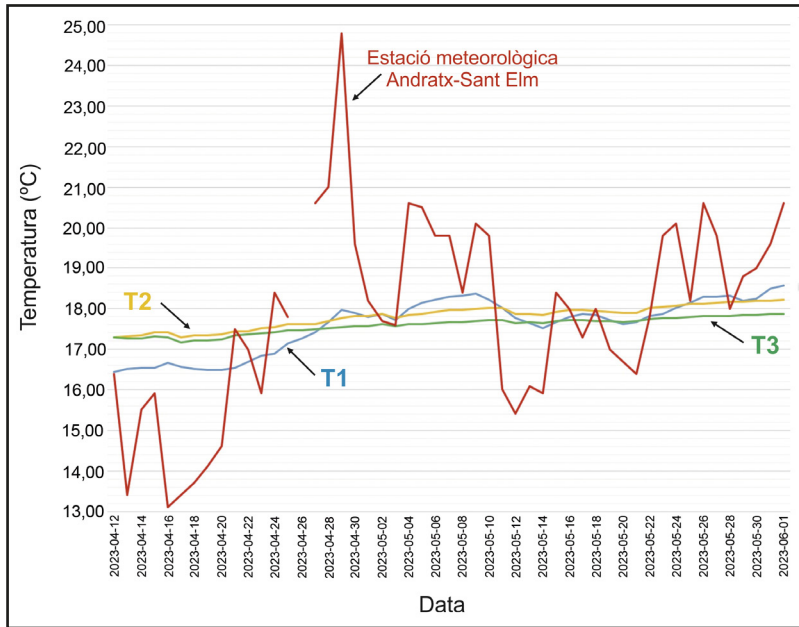


Figura 14: Temperatura mitjana a l'estació meteorològica de l'AEMET d'Andratx-Sant Elm, representada juntament amb les temperatures enregistrades a l'interior de la Cova de sa Font, entre el 12 d'abril i l'1 de juny de 2023.

Figure 14: Mean temperature at the AEMET meteorological station in Andratx-Sant Elm, represented together with the temperatures recorded inside Cova de sa Font, between April 12 and June 1, 2023.

destaquen algunes altres particularitats (Figura 13). Fins al 20 de maig, aproximadament, predominen les dents de serra relacionades amb entrades d'aire fred, moltes d'elles amb cadència diària en tractar-se d'irrupcions lligades a la baixada nocturna de les temperatures exteriors. A partir de la tercera setmana de maig s'instaura el règim de confinament atmosfèric de la cova, que produeix un progressiu increment de la temperatura (des de 17,7°C fins a arribar a 18,6°C) però amb una variabilitat diària molt feble. Tan sols s'observen uns pocs pics positius corresponents a les incursions realitzades en la cavitat per a la substitució de les bateries, així com una clara ruptura de la tendència ascendent, deguda a una lleugera davallada de temperatura (de menys de 0,1°C) ocorreguda el 20 de setembre. La tendència ascendent es perllonga fins al 21 de novembre, quan es produeixen successives davallades de la temperatura conseqüència de la ventilació efectiva de la cavitat a partir d'aquella data (Figura 13).

Per tal d'acabar de comprendre el comportament tèrmic de la cova, pot resultar interessant l'observació de les vicissituds de les temperatures a l'interior de la cavitat durant els moments previs a la instauració del confinament de l'atmosfera subterrània que té lloc durant l'estiu. En aquest sentit, la Figura 14 ens mostra que, amb temperatures mitjanes exteriors per sota dels 17,5°C, els valors de temperatura mesurats a les estacions T2 i T3 mostren descensos evidents que posen de manifest la ventilació activa de la cova, tal com succeeix dues vegades entre els dies 10 i 22 de maig. Així mateix, entre els dies 1 i 3 de maig, també es constata una tímida davallada de la temperatura a l'interior de la cavitat, previsiblement associada al refredament de l'atmosfera exterior durant les nits.

Finalment, el registre de la temperatura del llac freàtic de la cova és relativament simple. Presenta també una lleugera tendència ascendent durant tot l'any, amb temperatures que van des dels 18,4°C en abril fins als 19°C a finals de novembre. La primera part del registre, fins arribar al mes de juny, mostra una variabilitat més acusada però molt baixa (Figura 13); per altra banda, s'observen als mesos de setembre i octubre uns febles descensos de la temperatura (d'unes poques centèsimes de °C), tal vegada relacionats amb diversos episodis de precipitacions intenses que tingueren lloc al final de l'estiu.

## La dinàmica de l'atmosfera de la Cova de sa Font

Malgrat que el cicle observat en els paràmetres atmosfèrics de la cavitat presenta uns trets extraordinaris –per mor de les molt elevades concentracions de CO<sub>2</sub> que s'assoleixen– la dinàmica de la seva atmosfera és ben senzilla, tal i com es desprèn de les observacions realitzades des de fa anys (GINÉS et al., 2017, 2022a, 2022b), i complementades amb les dades recents exposades en el present treball.

El funcionament és molt simple i està condicionat pel caràcter marcadament descendent de la Cova de sa Font, que fa que aquesta funcioni com a trampa d'aire fred durant l'estiu (CIGNA, 2003). Així, el cicle anual de la seva dinàmica atmosfèrica s'inicia a l'hivern, quan la cavitat està sotmesa a una eficient renovació de la seva atmosfera, que manté uns nivells de CO<sub>2</sub> baixos, al voltant de 1.000 ppm (Figura 15). En contraposició, al llarg de l'estiu i bona part de la tardor el confinament de l'atmosfera es generalitza i afecta a gairebé tota la cova, arribant-se a assolir màxims que superen les 65.000 ppm de CO<sub>2</sub>; tan sols s'escapen d'aquest confinament els sectors del pou d'accés més propers a la superfície,

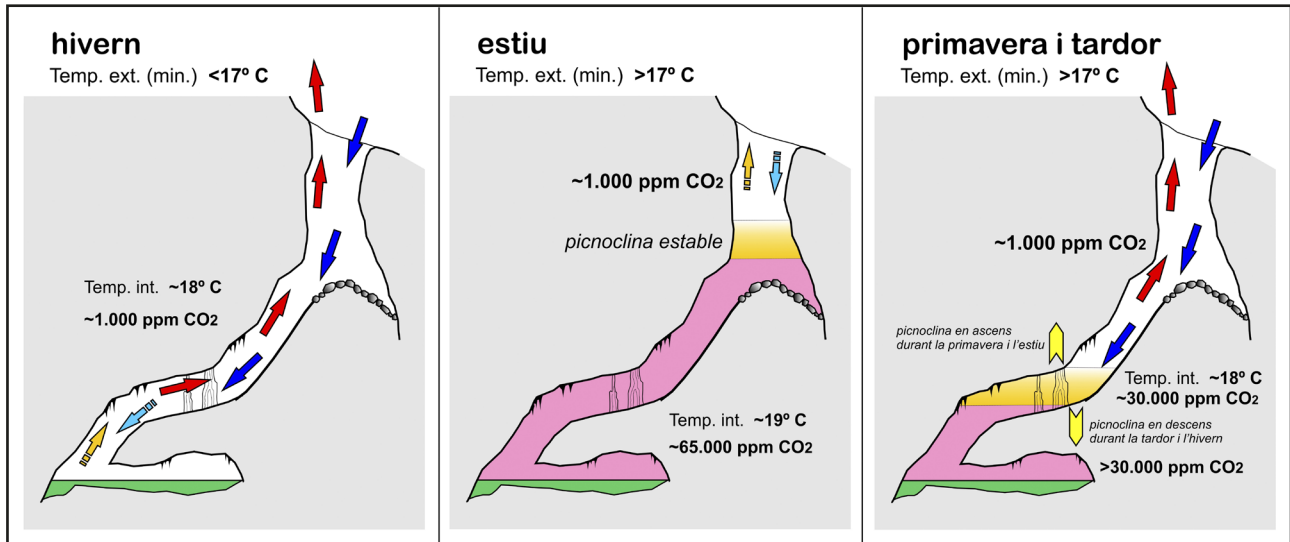


Figura 15: Esquemes que recullen la dinàmica de l'atmosfera de la Cova de sa Font en les diferents estacions de l'any. A l'hivern la cova està completament ventilada, mentre que a l'estiu hi ha un confinament total de l'aire als sectors profunds de la cavitat, amb una picnoclina de l'aire, o zona de transició, molt estable. Durant les altres estacions té lloc una ventilació parcial de la cova, amb la picnoclina de l'aire pujant progressivament durant la primavera, i baixant a la tardor fins a la ventilació total de la cova.

Figure 15: Diagrams showing the dynamics of the atmosphere of Cova de sa Font in the different seasons of the year. In winter the cave is fully ventilated, whereas in summer there is a total confinement of the air in the deep sectors of the cavity, with a very stable air-pycnocline or transition zone. During the other seasons a partial ventilation of the cave is operating, with the air-pycnocline moving up progressively in spring, and going down in autumn until the total ventilation of the cave.

que romanen separats de l'aire confinat de l'interior per una picnoclina –o zona de transició– de poc més d'un metre d'espessor (Figura 15).

Les estacions de la primavera i la tardor són molt més dinàmiques, i és quan es produeixen els canvis substancials en l'atmosfera de la cova (Figures 9 i 13). Per una banda, l'augment de temperatures exteriors que es produeix a la primavera porta implícita una aturada de la renovació de l'aire, instaurant-se de forma progressiva el funcionament de la cova com a trampa d'aire fred. D'aquesta manera, l'enriquiment en  $\text{CO}_2$  de l'atmosfera subterrània comença des del fons de la cavitat durant la primavera i es va propagant cap a dalt, empenyent la picnoclina (o zona de transició) fins a la seva posició més elevada a finals de l'estiu i començament de la tardor. Per altra banda, a les acaballes de la tardor es dona el procés invers: partint de la situació de confinament pròpia de l'estiu, les successives arribades d'aire fred comencen a ventilar la cova, de tal manera que la picnoclina es va desplaçant cap a les zones més fondes, fins que s'assoleix la ventilació hivernal gairebé total de la cavitat (Figura 15).

Aquesta dinàmica quedava suficientment recolzada per les dades de les anteriors campanyes, encara que els registres en continu de l'any 2023 han permès conèixer amb molt més detall el funcionament dels intercanvis atmosfèrics d'aquesta interessant cavitat. En aquest sentit, sembla existir un llindar en les temperatures exteriors –situat devers els  $17^{\circ}\text{C}$ – per davall del qual s'activa la renovació de l'atmosfera de la cova, ja sigui per l'arribada puntual i la persistència de masses d'aire fred, o degut als refredaments nocturns que davallen per sota de l'esmentat llindar.

## Conclusions

La Cova de sa Font, situada a la petita illa de sa Dragonera, és una localitat excepcional per a la investigació de la dinàmica del  $\text{CO}_2$  en la zona vadosa dels carsts de les Balears. La seva atmosfera assolix concentracions molt elevades d'aquest gas que arriben a superar les  $70.000\text{ ppm}$  a finals de la tardor, tot això dins el marc d'un cicle climàtic anual molt evident.

Com a complement de les investigacions prèvies que es venen desenvolupant des de fa més de deu anys, s'instal·laren a la cavitat dispositius d'enregistrament continu de temperatures,  $\text{CO}_2$  i  $\text{O}_2$ , amb la intenció de poder conèixer més en detall la dinàmica de l'atmosfera de la cova. Malgrat els problemes operatius que han sofert els *data-loggers* utilitzats, entre els mesos d'abril i desembre del 2023 s'ha pogut reconstruir amb molt detall el cicle anual del  $\text{CO}_2$ , que es caracteritza per una pujada dràstica de les concentracions durant el final de la primavera i l'inici de l'estiu, quan s'assoleixen valors superiors

a 60.000 ppm, que s'aniran inclús incrementant fins ben entrada la tardor. El registre dels valors d'O<sub>2</sub> mostra una molt forta correlació inversa respecte del contingut en CO<sub>2</sub>, amb valors mínims durant el final de l'estiu que assoleixen concentracions molt baixes d'O<sub>2</sub>, de l'ordre del 14,29 %.

Amb l'arribada de la tardor, i l'entrada de successives masses d'aire fred, la cavitat deixa de ser un ambient atmosfèric confinat, de tal manera que a finals del mes de novembre del 2023 les concentracions de CO<sub>2</sub> davallaren de 60.000 a 2.000 ppm en sols 3 dies, degut a la gairebé completa renovació de l'aire de la cova.

L'anàlisi detallat dels registres obtinguts a la Cova de sa Font l'any 2023, incloent-hi els registres de temperatures de l'interior de la cavitat i les dades meteorològiques disponibles, permeten interpretar les particularitats de la seva dinàmica atmosfèrica. La cova funciona com una trampa d'aire fred durant l'estiu, que és responsable del confinament de l'atmosfera de la cova i les seves altes concentracions estivals de CO<sub>2</sub>. Quan amb l'arribada de la tardor les temperatures exteriors davallen per sota d'un llindar –estimat en 17°C– comença la renovació de l'aire enrari de la cova mitjançant successives arribades de masses d'aire fred sobre la Mediterrània occidental, que causen un refredament substancial de l'atmosfera exterior al manco durant les nits.

## Agraïments

Agraïm a la Direcció del Parc Natural de sa Dragonera els permisos que ens van concedir per a realitzar reiterades visites a la Cova de sa Font, i l'autorització dels diferents mostrejos efectuats al llarg de tots aquests anys; l'agraïment és extensiu a tot el personal del Parc Natural. Concretament, les activitats de l'any 2023 s'han vist molt afavorides per l'interès demostrat per Pilar Gómez, aleshores directora del Parc, que ha posat totes les facilitats i mitjans per a la realització d'aquestes tasques.

Cal expressar la nostra gratitud a Xisco Gràcia qui ha portat a terme les incursions estivals del 2023, que necessitaven d'equips autònoms de respiració. Aquest agraïment és extensiu als espeleobussejadors de la *Societat Espeleològica Balear*, que han col·laborat assíduament en la presa de mostres de les diferents campanyes realitzades.

El nostre agraïment al *Laboratorio de Isótopos Estables de la Universidad de Almería* pels anàlisis de les mostres d'aire de la Cova de sa Font (*Grupo de Investigación Recursos Hídricos y Geología Ambiental i Centro Andaluz del Seguimiento del Cambio Global*).

Les revisions del manuscrit inicial efectuades per Juan José Enseñat i Lluís Gómez-Pujol han contribuït eficaçment a les tasques d'edició del present treball.

La present contribució s'emmarca dins dels projectes PID2020-112720GB-I00 (PLIOKAR-III) i PID2023-146299OB-C21 (GASBIOSUB), finançats per l'*Agencia Estatal de Investigación* (AEI).

## Bibliografia

- ATKINSON, T.C. (1977): CO<sub>2</sub> in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestones. *Journal of Hydrology*, 35: 111-123.
- BALAGUER, P. (2002): Aportacions al coneixement geomòrfic de l'illa de sa Dragonera (Illes Balears, Mediterrània Occidental). *Boll. Soc. Hist. Nat. Balears*, 45:125-136. Palma.
- CIGNA, A. (2003): Climate of caves. In: GUNN, J. (ed.) *Encyclopedia of Caves and Karst Science*, 228-230. Fitzroy Dearborn.
- ENCINAS, J.A. & HELBLING, J. (2011): El aumento estival de CO<sub>2</sub> en un centenar de cavidades mallorquinas. *Subterránea*, 33: 26-28. Madrid.
- FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CUEZVA, S.; ÁLVAREZ-GALLEGO, M.; GARCIA-ANTÓN, E.; PLA, C.; BENAVENTE, D.; JURADO, V.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C. & SÀNCHEZ-MORAL, S. (2015): Subterranean atmospheres may act as daily methane sinks. *Nature Communications* 6: article 7003.
- FORNÓS, J.J.; GELABERT, B. & RODRÍGUEZ-PÉREA, A. (1996): El medi físic: la Geologia. In: ORDINAS, G. & REYNÉS, A. (eds.) *Sa Dragonera, Parc Natural*. Consell Insular de Mallorca, FODESMA. 17-21. Palma.
- GARCÍA-ANTÓN, E.; CUEZVA, S.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; BENAVENTE, D. & SÀNCHEZ-MORAL, S. (2014): Main drivers of diffusive and advective processes of CO<sub>2</sub>-gas exchange between a shallow vadose zone and the atmosphere. *International Journal of Greenhouse Gas Control*, 21: 113-129.
- GINÉS, A. (1982): Inventario de especies cavernícolas de las Islas Baleares. *Endins*, 9: 57-75. Palma.

- GINÉS, A. & GINÉS, J. (1977): Datos bioespeleológicos obtenidos en las aguas cársticas de la isla de Mallorca. *6è Simposium d'Espeleologia*. Escola Catalana d'Espeleologia - S.I.S. del C.E. de Terrassa. 81-95. Terrassa, Barcelona.
- GINÉS, A. & GINÉS, J. (2010): La Cova de sa Font (o Cova des Moro) i l'origen del topònim de l'illa de sa Dragonera: una hipòtesi espeleològica. *Endins*, 34: 9-18. Palma.
- GINÉS, A.; HERNÁNDEZ, J.; GINÉS, J. & POL, A. (1987): Observaciones sobre la concentración de dióxido de carbono en la atmósfera de la Cova de les Rodes (Pollença, Mallorca). *Endins*, 13: 27-38. Palma.
- GINÉS, A.; MULET, A.; RODRÍGUEZ-HOMAR, M.; VADELL, M.; SÁNCHEZ-CANETE, E.P. & GINÉS, J. (2017): Extreme seasonal fluctuations of carbon dioxide in the cave atmosphere of Cova de sa Font (Sa Dragonera islet, Balearic Islands, Spain). In: MOORE, K. & WHITE, S. (eds.) *Proceedings 17th International Congress of Speleology (Edition 2)*, 1: 230-233. Sydney, Austràlia.
- GINÉS, A.; SENDRA, A.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M.; GINÉS, J.; DUMITRU, O.A. & FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022a): Terrestrial cave-fauna enduring extreme CO<sub>2</sub> seasonal changes in the vadose environment: lessons from Dragonera Islet, Balearic Islands. *Proceedings 18th International Congress of Speleology. Vol. I - Karstologia Mémoires*, 21: 281-284. Savoie Mont Blanc, França.
- GINÉS, A.; SENDRA, A.; GINÉS, J.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M.; DUMITRU, O.A. & FERNÁNDEZ-CORTÉS, A. (2022b): Tolerància de la fauna cavernícola terrestre de la Cova de sa Font (Sa Dragonera, Illes Balears) envers altes concentracions de diòxid de carboni. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 5: 87-99. Palma.
- GINÉS, J.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; GRÀCIA, F.; ENSEÑAT, J.J.; FORNÓS, J.J.; CALAFORRA, J.M. & GINÉS, A. (2024): Algunes dades sobre els gasos de l'atmosfera de la Cova dels Ases (Felanitx, Mallorca). Avaluació de les concentracions de CO<sub>2</sub> i CH<sub>4</sub> i les seves signatures isotòpiques. *Papers Soc. Espeleo. Balear*, 7: 135-150. Palma.
- MARTÍN-POZAS, T.; CUEZVA, S.; FERNÁNDEZ-CORTÉS, A.; CAÑAVERAS, J.C.; BENAVENTE, D.; JURADO, V.; SÁIZ-JIMÉNEZ, C.; JANSSENS, I.; SEIJAS, N. & SÁNCHEZ-MORAL, S. (2022): Role of subterranean microbiota in the carbon cycle and greenhouse gas dynamics. *Science of the Total Environment*, 83: article 154921.
- MATTEY, D.P.; ATKINSON, T.C.; BARKER, J.A.; FISHER, R.; LATIN, J.P.; DURRELL, R. & AINSWORTH, M. (2016): Carbon dioxide, ground air and carbon cycling in Gibraltar karst. *Geochimica et Cosmochimica Acta*, 184: 88-113.
- MESTRE, G. (1980): *La incògnita del mundo subterráneo mallorquín*. Antigua Imprenta Soler. 101 pàgs. Palma.
- MULET, G. & RODRÍGUEZ-HOMAR, M. (2014): *Aplicación de la Directiva Hábitats. Actividades en las Cavidades Subterráneas LIC de la Red Natura 2000 de Baleares*. Informe final. Federació Balear d'Espeleologia. 297 pàgs. Inèdit.



Aquest article es distribueix sota els termes de la llicència CC-BY-NC-ND 4.0

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-nd/4.0>