

## **OBSERVACIONES SOBRE LA CONCENTRACIÓN DE DIÓXIDO DE CARBONO EN LA ATMÓSFERA DE LA COVA DE LES RODES (Pollença, Mallorca)**

por Àngel GINÉS, Justo HERNÁNDEZ, Joaquín GINÉS y Andreu POL  
del Grup Espeleològic EST. Palma de Mallorca.

### **Resum**

Les dades obtingudes en l'atmosfera de la Cova de les Rodes (Pollença) mitjançant 14 sèries d'observacions, que foren realitzades entre Abril de 1982 i Març de 1983, han permès comprovar l'existència d'una important oscil·lació cíclica anual del contingut en diòxid de carboni.

La informació que s'ha aconseguit reunir correspon a un total de 40 mesures fetes amb la tècnica Draeger, havent-se triat com a estacions de medició 6 llocs suficientment representatius de la topografia de la cavitat, que endemés tenen l'avantatge d'estar distribuïts al llarg d'un recorregut de quasi 400 metres: és a dir, des de prop de l'entrada fins al punt més allunyat d'ella.

Es constata que els valors de la concentració de diòxid de carboni registrats en l'atmosfera de la Cova de les Rodes fluctuen entre 4,9 % i menys de 0,1 % en volum, i presenten un màxim a l'estiu i un mínim durant els mesos de Març-Abril. Són especialment significatives les 5 sèries d'observacions que van des del 23 de Maig fins l'11 de Juliol de 1982, ja que posen de manifest la rapidesa amb què es produeix l'ocupació de l'atmosfera de la cavitat per l'aire enriquit en diòxid de carboni, provinent de les esclatxes que enrevolten la cova. Malgrat que els coneixements disponibles sobre la dinàmica de l'aire i sobre les característiques microclimàtiques de la Cova de les Rodes són encara escassos, s'han pogut elaborar algunes conclusions sobre el comportament del diòxid de carboni en les esclatxes i coves dels sistemes càrstics de Mallorca.

### **Abstract**

Data obtained from the atmosphere of the Cova de les Rodes (Pollença) through 14 series of observations, accomplished between April 1982 and March 1983, give evidence that there is an important annual cyclic oscillation in carbon dioxide contents.

All information assembled is a result of 40 measurements using the Draeger technique. Measurement stations chosen were 6 places sufficiently representative of the topography of the cavity. Moreover, there is the advantage that they are allocated over a distance of nearly 400 metres, that is, from the immediate area of the entrance to the far end of the cave.

It is proved that carbon dioxide concentration values recorded from the atmosphere of the Cova de les Rodes oscillate between 4.9 % and less than 0.1 % in volume, peaking a maximum in summer and a minimum in March-April. The 5 series of observations from 23th May 1982 to 11th July 1982 are specially significant as they show how quickly the atmosphere of the cave is occupied by carbon dioxide enriched air, originated in the fissures surrounding the cavity. Despite of the lack of knowledge available by now on the air dynamics and microclimatic characteristics of the Cova de les Rodes, some conclusions on the carbon dioxide behaviour in the fissures and caves of the karstic systems in Mallorca have been reached.

## Introducción

El dióxido de carbono desempeña un papel fundamental en los procesos de karstificación debido a su capacidad para disolverse en el agua y producir ácido carbónico. De hecho, la cantidad total de caliza que puede ser disuelta en forma de bicarbonato cálcico por unidad de volumen de agua es función de la presión parcial de CO<sub>2</sub> (pCO<sub>2</sub>) disponible en el aire que se halla en contacto con ella o, lo que es lo mismo, de la concentración de dicho gas en el medio. Las principales fuentes de aprovisionamiento de CO<sub>2</sub> están constituidas por la atmósfera y sobre todo por la actividad metabólica de la vegetación y de los seres vivos que habitan en el suelo. Mientras las concentraciones de CO<sub>2</sub> atmosférico son bastante uniformes, pudiéndose evaluar en torno al 0,03 % en volumen, los niveles de dióxido de carbono existentes en el aire del suelo son variables y casi siempre mucho más altos, como consecuencia de la respiración de las raíces de las plantas y de la degradación de materia orgánica llevada a cabo por los microorganismos edáficos.

En la actualidad, el dióxido de carbono de origen «biogénico» es considerado por muchos investigadores como el principal factor que controla la disolución de la caliza y, por consiguiente, los procesos de karstificación (JAKUCS, 1977; JENNINGS, 1985 y TRUDGILL, 1985; entre otros). Parece bien establecido que la zona edáfica es ciertamente la responsable de la mayor parte de la agresividad química de las aguas que ingresan en el karst, debido al importante aporte de CO<sub>2</sub> biogénico con el que éstas tienden a equilibrarse durante su permanencia temporal en el suelo. Cuando, más tarde, el agua que se ha infiltrado a través de las fisuras de la roca aparece en el techo de una caverna, la concentración de su CO<sub>2</sub> disuelto resulta superior a la del aire circundante y una cierta proporción del CO<sub>2</sub> se desprende por difusión pasando a enriquecer la atmósfera de la cavidad en gas carbónico.

Este mecanismo de transporte de gas carbónico, disuelto en las aguas de infiltración, se verifica no tan sólo a nivel de las cuevas penetrables por el hombre sino que también ocurre, según parece a mayor escala, a nivel de la red de grietas y fisuras que rodea las cuevas, tal como lo sugiere BAKALOWICZ (1979). Es preciso tener en cuenta además los desplazamientos de dióxido de carbono que se realizan en estado gaseoso, pues las circulaciones de aire que afectan a grietas y cavidades de mayor tamaño, especialmente en las zonas de vertiente (RENAULT, 1972), y los fenómenos de difusión o decantación por gravedad que pueden suceder en el interior del karst, son capaces de movilizar masas de aire subterráneas den-

tro de la zona de infiltración de una manera extremadamente compleja.

Las observaciones cuantitativas sobre la composición química del aire de las cuevas comenzaron a ser abordadas probablemente a partir de TROMBE (1952) y han aumentado mucho en los últimos tiempos como resultado de los trabajos de DELECOUR et al. (1968), EK et al. (1968), RENAULT (1971, 1972), JAMES (1975, 1977), EK (1979) y RENAULT (1979). Las investigaciones recientes, aunque localizadas sobre todo en cuevas de Bélgica, Francia y Australia, se han ido progresivamente generalizando a otros terrenos kársticos de diferentes características bioclimáticas, de tal manera que hoy se dispone de abundantes datos cuantitativos que han permitido elaborar interpretaciones de más amplio alcance.

En algunas publicaciones como las de JAMES y DYSON (1981) o CHOPPY (1983) se encuentra resumida con mucho acierto la problemática del comportamiento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera de las cuevas, desde un punto de vista exclusivamente espeleológico. Por otra parte, varios autores han intentado considerar la distribución del dióxido de carbono en el karst como si toda la zona de infiltración (zona vadosa) constituyera un vasto reservorio de CO<sub>2</sub>, el cual intervendría activamente en los equilibrios químicos que afectan al agua durante su trayecto subterráneo. Estas modernas perspectivas de la karstogénesis parten del concepto de pCO<sub>2</sub> equilibrante desarrollado por ROQUES (1963) y se encuentran formuladas, junto con nuevos enfoques, en ATKINSON (1977) y BAKALOWICZ (1979).

## El dióxido de carbono en las cuevas de Mallorca

Por lo que concierne a Mallorca (Figura 1) la primera referencia a elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub> en cuevas de la Isla aparece en BOVER (1839), con relación a la Cova Nova de Son Lluís (Porres). Sin embargo publicaciones posteriores llegaron a crear cierta confusión, pues mientras MARTEL (1903) señala, aunque sin visitar la cueva, que su propietario le había confirmado la existencia de aire irrespirable en algunos sectores, JOLY (1929), habiéndola explorado personalmente, niega que ello fuera cierto. Las mediciones efectuadas el 28 de Febrero de 1982 han permitido demostrar de modo concluyente que el contenido en CO<sub>2</sub> de la Cova Nova de Son Lluís es ciertamente considerable, incluso durante la época invernal, alcanzando magnitudes de hasta 3,5 % en volumen (GINÉS, 1983).

Las informaciones disponibles a partir de la década de los sesenta, a medida que la espeleolo-

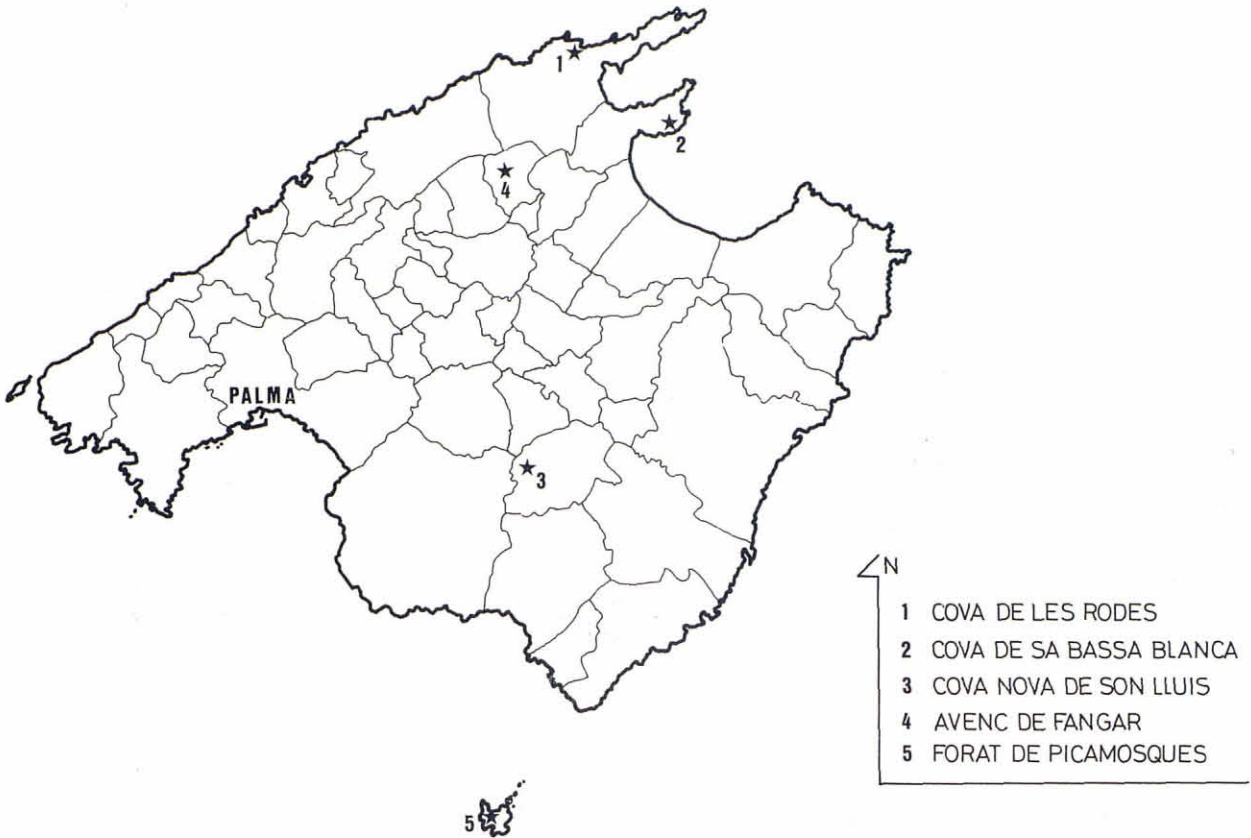


Figura 1. Localización de las cavidades más significativas citadas en el texto.

gía comienza una considerable expansión en nuestro país, están centradas sobre todo en los problemas de exploración planteados en algunas simas por niveles anormalmente altos de CO<sub>2</sub>. MONTORIOL-POUS (1961) indica la presencia en el Forat de Picamosques (Isla de Cabrera) de una «notable cantidad de anhídrido carbónico que llega a apagar las lámparas de acetileno haciendo la exploración peligrosa» y constata que en aquella sima la cantidad de CO<sub>2</sub> aumenta con la profundidad. Por su parte, ASTIER y VILLA (1967) exponen las dificultades con que se encontraron durante la exploración parcial del Avenc de Fangar (Campanet) como consecuencia de una importante acumulación de dióxido de carbono, aunque exageran tanto en la profundidad que atribuyen a la sima como en la casi imposibilidad de explorarla sin medios técnicos especiales. Datos cualitativos mucho más fiables y precisos son proporcionados por ESCOLÀ (1970), al comentar detalladamente la distribución del CO<sub>2</sub> en el Avenc de Fangar desde los 80 metros de profundidad hasta las cotas inferiores de la sima, establecidas en torno a los -163 metros. Entre tanto otras observaciones similares, pero no publicadas, se iban reuniendo por grupos espeleológicos mallorquines sobre cavidades en las que cerillas, velas y lámparas de acetileno funcionaban

irregularmente o donde se apreciaban condiciones de respiración dificultosa, como es el caso del Avenc Cremat (Puigpunyent), Avenc de Son Forté (Artà), Avenc de Son Mas (Valldemossa) y Cova de Sa Bassa Blanca (Alcúdia) entre otras.

Los primeros datos cuantitativos obtenidos sobre concentraciones de dióxido de carbono en la atmósfera de cuevas mallorquinas se deben a MESTRE (1980), quien realizó varias mediciones con detector Draeger en la Cova de les Rodes (Pollença). Sus observaciones, tanto las efectuadas en Febrero de 1979 (en las que se registraron valores que apenas superaban el 0,1 %) como las que llevó a cabo en Octubre del mismo año (alcanzándose concentraciones comprendidas entre el 3,1 % y 4,2 %) permitían comprobar la existencia de fluctuaciones estacionales que ya habían sido advertidas con anterioridad por algunos espeleólogos a lo largo de repetidas visitas a la cueva (J.A. Encinas, com. pers.). También mediante la utilización del detector Draeger, MAROTO y FONT (1981) dan cuenta de niveles de CO<sub>2</sub> superiores al 2 % en la Cova de Sa Bassa Blanca (2 de Marzo de 1981), aunque mediciones todavía inéditas han llegado a detectar hasta 2,5 % en Agosto de 1984. Más recientemente, GINÉS (1983) ha presentado los resultados de 33 mediciones del contenido en CO<sub>2</sub> de varias cuevas

vas de Mallorca, así como algunas interpretaciones provisionales dentro de un enfoque ecológico. La mayor parte de dichas mediciones son un avance de los datos que sirven de base al presente trabajo y han sido efectuadas en la Cova de les Rodes (Pollença).

## Medidas realizadas

Las mediciones de dióxido de carbono que han hecho posible el seguimiento y estudio de la evolución de la atmósfera de la Cova de les Rodes, durante un ciclo anual completo, fueron obtenidas mediante la utilización de una bomba manual Draeger cuya denominación en el mercado es «Auer Gas Tester». Se necesitó dedicar 14 visitas a la cueva con el fin de conseguir una cuantificación suficientemente afinada de los cambios estacionales en su  $pCO_2$ , de tal manera que se cumpliera como mínimo una frecuencia mensual, además de completar la campaña con otras dos exploraciones adicionales en las que se buscó coincidir con momentos en que se preveían modificaciones bruscas en las concentraciones de  $CO_2$ .

El detector Draeger que fue empleado en las mediciones consiste en un aparato portátil, ligero y nada frágil, que permite evaluar con bastante precisión el porcentaje de gas carbónico contenido en el aire del entorno, sirviéndose de indicadores coloreados específicos para el  $CO_2$ . Este detector consta de una pera aspiradora de goma, calibrada para un volumen de 100 centímetros cúbicos y do-

tada de un elemento central de material plástico que sostiene la pieza porta-tubos, en donde se han de insertar los tubos colorimétricos. Después de comprimir y soltar la pera de goma, la longitud de la coloración que se alcanza en la columna interior del tubo proporciona una lectura directa, expresada en tanto por cien en volumen, de la concentración de dióxido de carbono que está presente en la muestra de aire analizada. El fundamento químico de los tubos colorimétricos del aparato Draeger se basa en la absorción del  $CO_2$  por las aminas. El desplazamiento en el valor del pH ocasiona el cambio de color de un indicador ácido-base.

Las 40 mediciones efectuadas en el curso de la campaña se repartieron a lo largo de 6 estaciones escogidas previamente en base a dos objetivos prioritarios: 1) las estaciones debían reflejar la complejidad topográfica de la cavidad, localizándose cerca de los más importantes estrechamientos o desniveles que presenta la galería principal de la cueva, obstáculos que quizás pudieran tener alguna significación en los movimientos de aire que renuevan periódicamente su atmósfera; y 2) las estaciones debían espaciarse con una cierta regularidad desde la entrada hasta el fondo de la caverna, jalonando su recorrido, a fin de intentar captar la procedencia interna o externa de los cambios estacionales en el contenido de  $CO_2$  del aire subterráneo y para poder delimitar al mismo tiempo los gradientes de  $pCO_2$  que pudieran aparecer.

La localización de las 6 estaciones que fueron seleccionadas aparece indicada en la Figura 2, sobre una topografía esquemática que procede de la bibliografía existente (ENCINAS, 1972). La estación

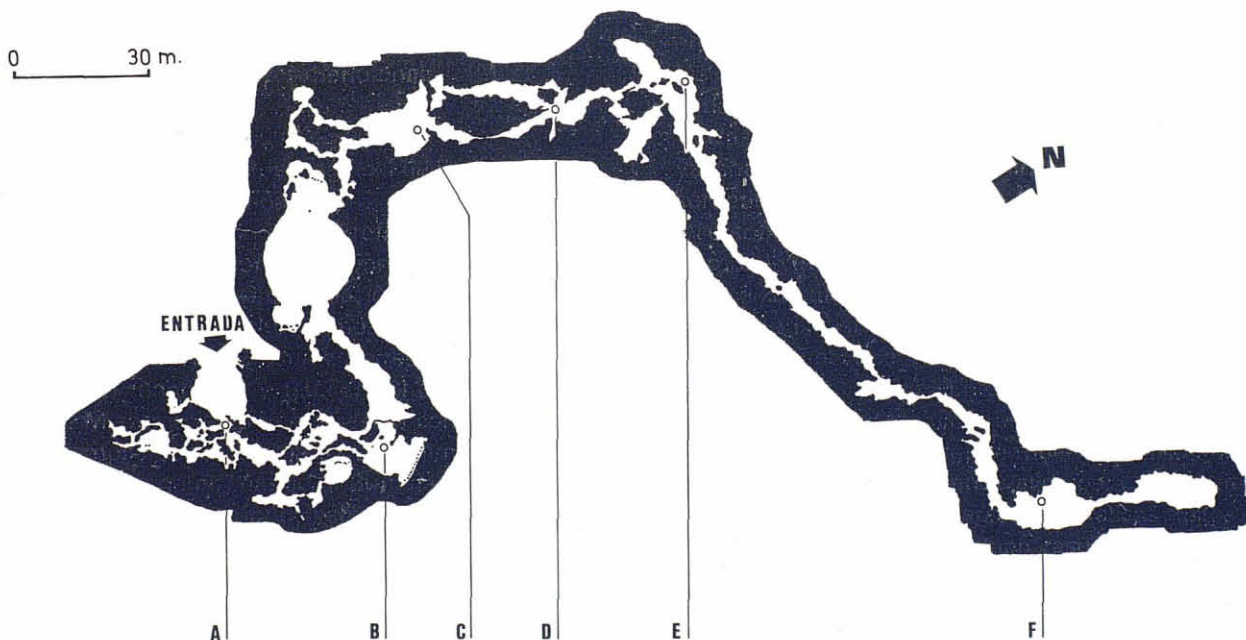


Figura 2. Emplazamiento aproximado de las estaciones de medición sobre una topografía esquemática de la Cova de les Rodes.

**A** se sitúa muy cerca de la entrada, al fondo de la primera sala, donde su trayectoria tuerce hacia el Norte para dar inicio a la galería principal. La estación **B** está emplazada en la sala del primer pozo, justo en el lugar en el que desemboca la galería de acceso. La estación **C** corresponde a la orilla del primer pequeño lago que presenta la cueva; se trata de un lago que interrumpe frontalmente la galería y obliga a sortearlo remontando por una pendiente arcillosa que permite comunicar con un tramo de conductos fósiles de techo bajo. La estación **D** se encuentra en el fondo del segundo pozo, antes de iniciar la sucesión de pasos estrechos en los que comienza a oírse el ruido del río subterráneo. La estación **E** ha sido ubicada deliberadamente en un ramal, que se desvía hacia el Oeste, de cuya pared brota buena parte del caudal del río formando una pequeña cascada. Por último, la estación **F** se halla en el extremo más alejado de la galería principal de la caverna, poco antes de llegar al sifón terminal y bajo unas cúpulas que muestran interesantes formas de corrosión.

Debido a que sólo disponíamos de un limitado número de tubos colorimétricos, fue necesario administrar convenientemente la cantidad de mediciones a realizar y distribuir las en las 6 estaciones de tal modo que por lo menos se consiguieran varios datos significativos de todas ellas, sin detrimento de que algunas estaciones fueran muestreadas con mucha mayor regularidad. Precisamente era mediante estas observaciones, reiteradas con una frecuencia superior en determinadas estaciones, como se pretendía poder cuantificar el ciclo de oscilación anual que, según informaciones aportadas por las exploraciones de espeleólogos y de acuerdo con las medidas publicadas por MESTRE (1980), se suponía que caracterizaba a la atmósfera de la Cova de les Rodes. Para tal fin y considerando sus emplazamientos respectivos, se escogieron de entre los 6 puntos de observación las estaciones **B** (cercana a la entrada), **C** (representativa del tramo medio de la cavidad) y **F** (en las galerías finales) para la realización en ellas de muestreos regulares. Así, de entre las 40 mediciones verificadas durante la campaña, 11 pertenecen a la estación **B** y otras 11, aunque de fechas no necesariamente coincidentes, han sido obtenidas en la estación **C**. Los escasos datos procedentes de la estación **F** son consecuencia de las elevadas  $p\text{CO}_2$  que se registran desde finales del mes de Mayo, haciendo peligrosa la exploración de este tramo de la cueva durante el verano por alcanzarse valores superiores al 4,5 %. Las restantes estaciones, aunque insuficientemente muestreadas, proporcionan sin embargo datos puntuales interesantes: la estación **A** permitió detectar en Julio valores de hasta 4 % a menos de 15 metros de distancia del exterior; la estación **D** ayudaba a establecer posibles gradien-

tes; y la estación **E** posee la cualidad de estar situada en un punto de contacto con el río subterráneo, pudiendo informar sobre el papel del agua del río en los intercambios gaseosos con la atmósfera de la cueva.

Los resultados obtenidos (Tabla I) denotan en todas las estaciones una clara pauta de oscilación anual. Ninguna de las estaciones muestreadas es ajena a esa tendencia cíclica. Para mejor evidenciar este hecho, la Figura 3 representa gráficamente los valores registrados durante todo el año en las estaciones **B**, **C**, **D** y **F**. Así, en la Figura 3a se percibe con gran nitidez el incremento de la concentración de  $\text{CO}_2$  que comienza a producirse desde principios del mes de Abril, así como su progresiva disminución durante los meses de otoño. Debido al menor número de mediciones efectuadas, la Figura 3b es mucho menos precisa, aunque informa suficientemente sobre la tendencia que predomina a lo largo del ciclo anual. Si se comparan entre sí las gráficas correspondientes a esas 4 estaciones, se comprueba la existencia de un fuerte paralelismo que sólo resulta distorsionado por ligeros desfases. La forma de los picos que aparecen en la Figura 3a pone de manifiesto las diferencias en el comportamiento del dióxido de carbono a nivel de las estaciones **B** y **C**, presentando además la ventaja de que ambas gráficas están basadas en un conjunto de mediciones (11 en cada estación) relativamente significativo. La mayor frecuencia con que se repitieron las observaciones en la estación **B** durante el curso de los meses de Mayo a Julio, obedece a la oportunidad excepcional que se nos ofreció de registrar la fase de «crecida» del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de la cueva. En cambio, una mayor atención fue prestada, en la estación **C**, al proceso de «retirada» del gas carbónico durante los meses de invierno. Las gráficas pertenecientes a las otras dos estaciones (Figura 3b) son menos rigurosamente comparables ya que, mientras la estación **D** fue muestreada en 6 ocasiones, sólo se pudieron realizar 4 medidas en la estación **F** (localizada en el punto más profundo y lejano de la cueva) a causa de las mencionadas dificultades de exploración y de los pocos tubos de medición que poseíamos. No obstante, ambas gráficas parecen indicar una progresiva suavización de su perfil cuanto mayor es la distancia que separa las estaciones respecto de la entrada de la caverna.

En la Figura 4a se puede seguir el desenvolvimiento de la fase de «crecida» en el conjunto de las 6 estaciones que jalonan el recorrido de la Cova de les Rodes. Se aprecia cómo los valores registrados el 23-V-82 delimitan un gradiente muy acusado, que va desde 0,2 %, junto a la entrada, hasta 3,5 % en el fondo de la cueva; se trata de un gradiente sobre todo longitudinal puesto que los desniveles de la cueva no son demasiado relevantes.

Mediciones del contenido en dióxido de carbono de la Cova de les Rodes (Pollença)						
Fecha de la observación	Estaciones					
	A	B	C	D	E	F
4-IV-82 .....		ND	ND			
23-V-82 .....	0,2 %	0,2 %	1,5 %	2,0 %	2,2 %	3,5 %
5-VI-82 .....		0,7 %				
13-VI-82 .....		2,8 %	2,9 %	3,5 %		
20-VI-82 .....	2,7 %	2,8 %				
11-VII-82 .....	4,0 %	4,5 %	4,2 %	4,3 %		
8-VIII-82 .....		3,3 %	3,9 %	4,1 %		
5-IX-82 .....	2,8 %	3,5 %	4,2 %			
10-X-82 .....		1,0 %	4,0 %	4,0 %		4,9 %
14-XI-82 .....		0,2 %	2,7 %			
26-XII-82 .....		0,1 %	0,2 %	0,3 %	3,0 %	1,2 %
23-I-83 .....			0,1 %		0,3 %	
20-II-83 .....					1,5 %	0,8 %
27-III-83 .....			0,1 %			
.....						
18-II-79 .....		0,15 %	0,1 %		según MESTRE (1980)	
13-X-79 .....		3,1 %	4,2 %	3,6 %		

Mediciones del contenido en dióxido de carbono de otras cuevas mallorquinas		
2-III-81	Cova de Sa Bassa Blanca (Alcúdia), 30 mts. prof. ....	2 %
27-II-82	Cova de Sa Guitarreta (Llucmajor), 25 mts. prof. ....	ND
28-II-82	Cova Nova de Son Lluís (Porreres), 35 mts. prof. ....	3,5 %
12-VIII-84	Cova de Sa Bassa Blanca (Alcúdia), 30 mts. prof. ....	2,5 %

ND = valores de pCO<sub>2</sub> no detectables

Tabla I

Datos posteriores, especialmente los obtenidos el 11-VII-82, parecen sugerir una estabilización gradual de la concentración de CO<sub>2</sub> alrededor de valores próximos al 4,5 %. La secuencia de lecturas verificada con periodicidad casi quincenal en la estación **B**, durante las exploraciones de los días 23-V-82, 5-VI-82, 13-VI-82 y 11-VII-82 (Tabla I), terminan de ilustrar la rápida invasión de la zona de entrada por aire enriquecido considerablemente en dióxido de carbono.

El proceso inverso, que refleja la fase de «retirada» del CO<sub>2</sub>, ha podido ser documentado con amplitud en la Figura 4b, donde un grupo de datos conseguidos en las visitas de fecha 11-VII-82, 8-VIII-82 y 10-X-82 señalan una reaparición e intensificación del gradiente en las inmediaciones de la boca de la cueva. Si estas tres representaciones son confrontadas con la que describe, en la misma Figura 4b, los datos procedentes de la exploración del 26-XII-82, queda patente hasta qué punto la disminución del contenido en CO<sub>2</sub> se ha llegado a

propagar en esta época del año hasta la estaciones **C** y **D**, donde ya no se rebasa el 0,3 %. Incluso la estación **F** registra simultáneamente descensos notables, bajando desde 4,9 % en Octubre hasta sólo 1,2 % a finales de Diciembre.

Otro aspecto importante del comportamiento del CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la Cova de les Rodes se pone de manifiesto en la Figura 4c. Ésta consiste en una sencilla gráfica que pretende expresar el amplio margen de variación experimentado por la concentración de dióxido de carbono en todas las estaciones, mostrando la notable semejanza existente entre sus valores extremos a pesar de que las estaciones se encuentran espaciadas a lo largo de casi 400 metros de recorrido. De hecho, se han podido reunir medidas que van desde 0,05 % a más de 4 % en las estaciones **A**, **B** y **C** (Tabla I), siendo interesante constatar la lectura de 4 % registrada el 11-VII-82 en la sala de entrada, a menos de 15 metros del exterior. Las fluctuaciones son considerables también en las estaciones **D** y **F**, al

abarcar desde 0,8 % hasta 4,3 % para el sector que comprende los doscientos metros más distantes respecto de la boca. Los datos de la estación E, aunque incompletos, no contradicen la amplitud de variación previsible en ese tramo de la galería principal puesto que faltan mediciones en dicho punto durante la temporada de máximo enriquecimiento en CO<sub>2</sub>. Serían necesarias observaciones adicionales en los sectores más profundos de la

cavidad para conocer si el máximo de 4,9 %, registrado en la estación F, es superado en el transcurso del verano o si, por el contrario, la atmósfera de la Cova de les Rodes tiende a estabilizarse en torno a valores cercanos al 5 %.

Por último conviene indicar que, además de los datos incluidos en las Figuras 3 y 4, varias mediciones no utilizadas en la confección de las gráficas aparecen recopiladas en la Tabla I, junto con

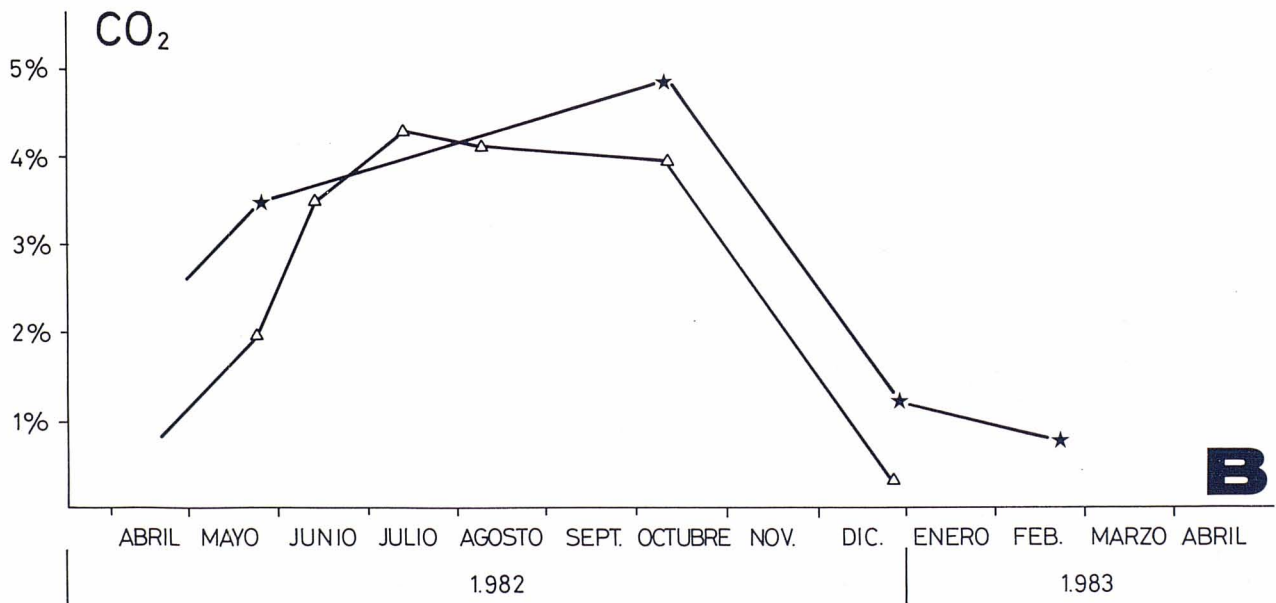
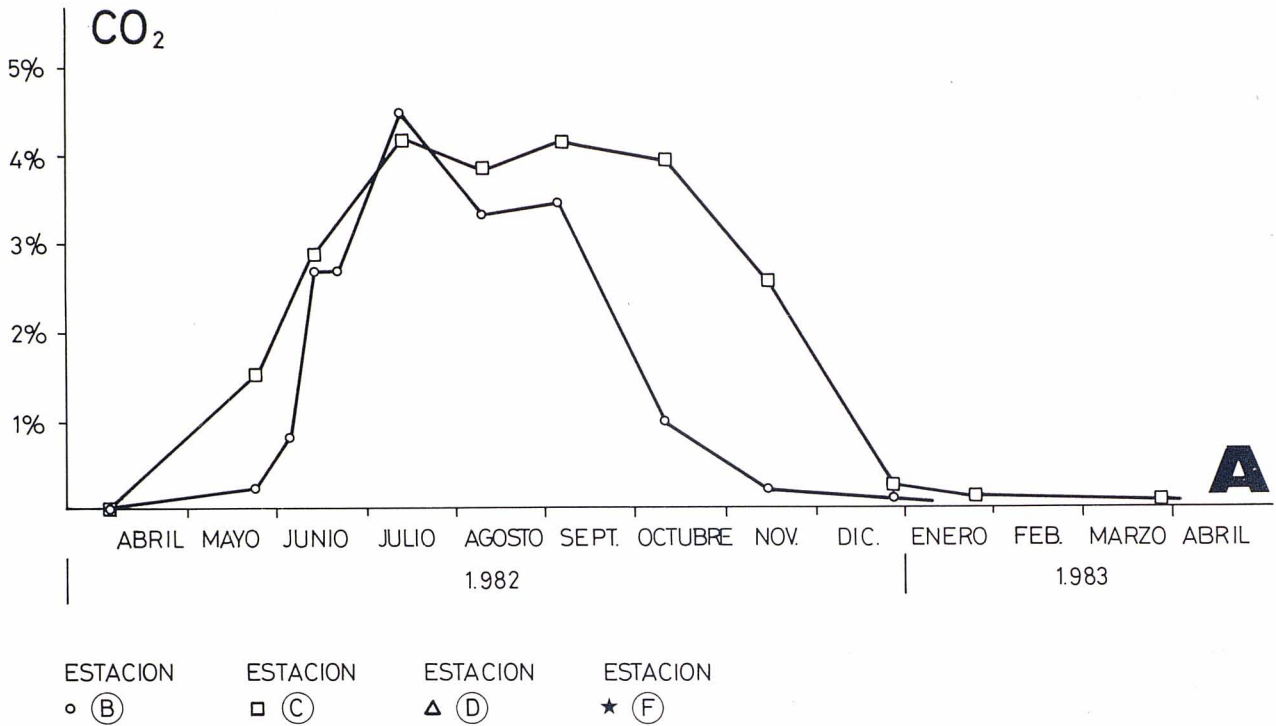


Figura 3. a) Oscilación anual de la concentración de dióxido de carbono en las estaciones B y C.  
b) Oscilación anual de la concentración de dióxido de carbono en las estaciones D y F.

otras informaciones complementarias. Entre ellas se han incorporado también algunos datos procedentes de MESTRE (1980), los cuales pueden ser tabulados en sus respectivas columnas por coincidir aproximadamente con tres de las estaciones que sirvieron de base para la elaboración del presente estudio.

## Interpretación de los resultados

Son varios los problemas que quedan planteados al examinar el grupo de datos en los que se resume la campaña de mediciones efectuada en la Cova de les Rodes. Fundamentalmente es necesario explicar la procedencia del dióxido de carbono, junto con los procesos que intervienen en su formación, y discernir las causas de su comportamiento tan peculiar en la atmósfera de esta cueva, especialmente en lo que concierne a los mecanismos que provocan las fases estacionales de aumento y disminución de los contenidos en CO<sub>2</sub>. También hay que proponer ideas que justifiquen los valores tan altos que se registran en algunas estaciones, relacionando los datos cuantitativos con apreciaciones sobre los condicionantes topográficos que desempeñan un importante papel en el microclima de la cueva y en la generación de gradientes. Por último, no deben disociarse las observaciones realizadas en la propia caverna del contexto más amplio en que ésta se inscribe, como es en este caso el sistema subterráneo de la Vall den Marc. Se trata de un sistema kárstico cuya superficie está ocupada por una activa cubierta edáfica y vegetal, mientras que por debajo la circulación de aguas subterráneas, que toma contacto con la cueva en varios puntos, se desplaza siguiendo el fondo del valle hacia Cala Sant Vicent.

Varias hipótesis se han propuesto para explicar el origen del dióxido de carbono que se acumula dentro de las cavidades kársticas: 1) desprendimiento de CO<sub>2</sub>, a partir de las aguas que transitan por el interior del karst, como consecuencia de reajustes en su equilibrio químico al entrar en contacto con la atmósfera subterránea; 2) difusión de CO<sub>2</sub> en estado gaseoso, procedente del suelo donde se forma en grandes cantidades, hacia las galerías de las cuevas a través de la red de fisuras que presenta la roca; 3) producción de CO<sub>2</sub> debido a la actividad degradativa de los microorganismos que descomponen los restos vegetales y otros materiales orgánicos acarreados por las aguas de infiltración; y 4) otras causas diversas y sin duda excepcionales, como la contaminación ocasionada por el hombre, las emisiones de gases volcánicos, las acumulaciones de guano y la respiración de murciélagos o raíces de plantas.

Los resultados de la campaña de medidas,

junto con otras observaciones hechas sobre el terreno, parecen indicar que es la difusión de aire enriquecido en CO<sub>2</sub>, proveniente de las grietas que rodean las cuevas, la fuente principal del dióxido de carbono detectado en las cavernas mallorquinas. Anteriores estudios ya apuntaron esa posibilidad (ESCOLÀ, 1970; GINÉS, 1983) mientras que, por el contrario, no se han encontrado pruebas a favor de que la descomposición de materia orgánica o la presencia de murciélagos tengan influencia alguna en nuestro caso. Más difícil resulta descartar por completo el papel jugado por el agua en la transferencia de dióxido de carbono si nos atenemos a los argumentos desarrollados por BAKALOWICZ (1979) sobre los mecanismos responsables de la movilidad del CO<sub>2</sub> en la zona de infiltración. De cualquier modo, la mayor parte del transporte directo de gas carbónico es atribuible básicamente a los intercambios que tienen lugar entre la heterogénea atmósfera (pero rica en dióxido de carbono) de la red de grietas y el aire que ocupa los conductos y galerías de mayor tamaño, en los cuales los procesos de ventilación son mucho más eficaces. En lo que se refiere a la Cova de les Rodes, todavía falta por detallar el modo cómo se propaga la invasión de aire enriquecido en CO<sub>2</sub> desde el fondo de la caverna (Figura 4a), durante la temporada de primavera en que parece extinguirse la ventilación precedente de la zona de entrada.

Es difícil deducir cual es el motivo de la relativa reiteración con la que ciertas cuevas mallorquinas exhiben contenidos de CO<sub>2</sub> bastante apreciables. Los datos cuantitativos siguen siendo escasos y quizás, a medida que se generalicen, tenderán a demostrar cómo este fenómeno es incluso más frecuente de lo esperado. Cabe suponer que los elevados valores de CO<sub>2</sub>, puestos en evidencia por las medidas efectuadas, no son más que la expresión a nivel de las cuevas de las importantes concentraciones de dióxido de carbono que predominan en la red de grietas y fisuras existente en la zona de infiltración. Valores tan altos como los 3,5 % ó 4,9 % registrados en la Cova Nova de Son Lluís y en la Cova de les Rodes respectivamente, denotan un considerable grado de confinamiento del aire en estas cavidades, el cual puede estar relacionado con la intensidad de los procesos de estalagmitización que tanto caracterizan a los sistemas kársticos de Mallorca, limitando el intercambio del aire subterráneo con el exterior.

Las particularidades del comportamiento del gas carbónico en la atmósfera de la Cova de les Rodes son inseparables de los fenómenos de ventilación que la afectan y de sus modificaciones estacionales; siendo controlados ambos por los cambios de temperatura que rigen en el exterior de la cavidad. Es muy probable que algunos de los rasgos más definitorios de las Figuras 3a y 4b, tales



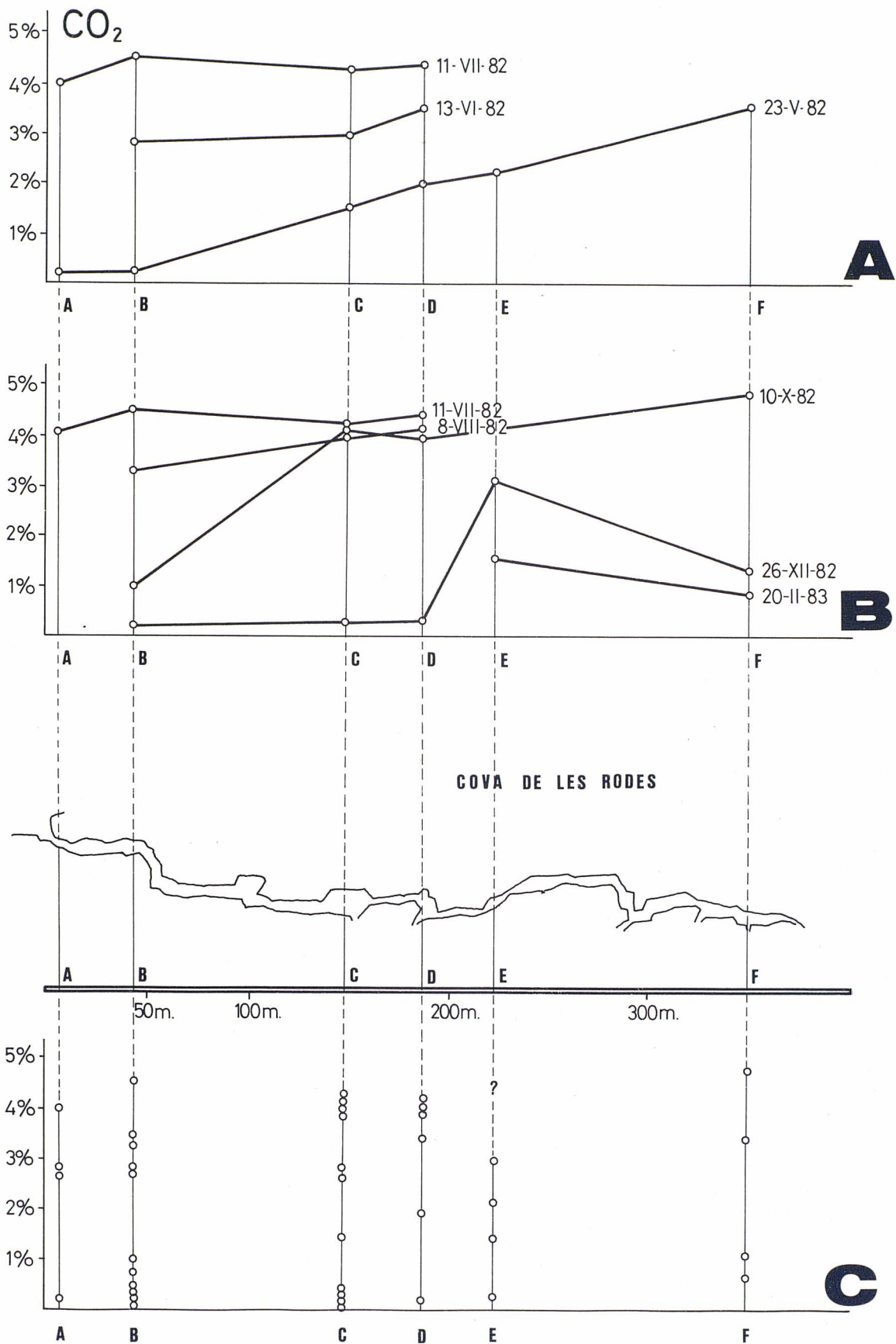


Figura 4. a) Comparación entre los valores de pCO<sub>2</sub> registrados en las 6 estaciones durante una secuencia de medidas que comprende desde Mayo hasta Julio.  
 b) Comparación entre los valores de pCO<sub>2</sub> registrados en las 6 estaciones durante una secuencia de medidas que comprende desde Julio hasta Febrero.

c) Comparación entre los valores extremos de pCO<sub>2</sub> registrados en cada estación a lo largo de la campaña.  
 (Algunos datos cuyos valores se solapaban han sido intencionadamente separados en esta gráfica para facilitar su interpretación.)

como el súbito incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la estación **B** durante los meses de Mayo-Junio o la disminución de ésta entre el 10-X-82 y el 26-XII-82, respondan a mecanismos de ventilación promovidos a partir de la entrada de la caverna. Sin embargo sería necesario llevar a cabo un estudio microclimático detallado para intentar resolver estos interrogantes, ya que las circulaciones de aire pueden adquirir una gran complejidad en cuevas con topografías tan accidentadas como ésta. Tampoco hay que olvidar la interferencia de las variaciones de la presión atmosférica externa, tanto en el previsible efecto de «bombeo» de CO<sub>2</sub> desde las fisuras hacia el interior de la galería principal (durante los momentos de bajas presiones) como en otras observaciones más localizadas. En este sentido, es probable que el peculiar ritmo de ascenso de la pCO<sub>2</sub> registrado en la estación **B** entre el 5-VI-82 y el 20-VI-82 pueda achacarse a circunstancias barométricas de este tipo: es sorprendente que en ese intervalo de quince días sólo haya una subida muy intensa en el curso de la primera semana (desde 0,7 % hasta 2,8 %) sin que sea detectable ningún aumento en los días siguientes, a pesar de que la tendencia prosigue todavía hasta mitad del mes de Julio.

Otro aspecto estrechamente relacionado con los problemas de ventilación o confinamiento del aire subterráneo radica en la propia fisiografía externa del sistema kárstico. Cuanto mayor es la altitud y el desnivel del terreno más importantes son las corrientes de aire que se generan y más eficaz la labor de su renovación. Por el contrario, las concentraciones de CO<sub>2</sub> más notables halladas en Mallorca corresponden a colinas de baja altura, incluso inferiores a los 300 metros s.n.m., cuyos relieves son suaves y poco enérgicos. Lamentablemente nuestro desconocimiento de la globalidad del sistema kárstico de la Vall den Marc, desde un punto de vista geoquímico, impide trasladar a un ámbito más general las observaciones puntuales obtenidas dentro de la Cova de les Rodes. Otro tanto sucede con las otras cavidades isleñas donde hasta ahora se han citado situaciones semejantes, con altos niveles de CO<sub>2</sub>.

Distintos e incluso contradictorios tipos de gradientes de pCO<sub>2</sub> han sido evidenciados con bastante precisión en cuevas kársticas, por lo que RENAULT (1971), basándose en datos de diversa procedencia, se encuentra en condiciones de establecer 4 situaciones posibles: gradientes normales, gradientes horizontales (longitudinales), ausencia de gradientes y gradientes inversos; considerándose como normales aquellos gradientes en los que el contenido de dióxido de carbono en el aire subterráneo tiende a aumentar con la profundidad como consecuencia de su mayor densidad y de la limitada ventilación. Buenos ejemplos de gradientes

de uno y otro tipo aparecen en DELECOUR et al. (1968), RENAULT (1972), JAMES (1977) y CHOPPY (1983). Por lo que respecta a las observaciones verificadas en cavidades mallorquinas destacan: 1) la ausencia de gradientes significativos que parece apreciarse en el Avenc de Fangar, donde se nota una desigual y aparentemente arbitraria distribución del CO<sub>2</sub> entre las cotas -70 y -160 metros; y 2) los buenos ejemplos de gradiente longitudinal que ofrece la Cova de les Rodes durante algunos estadios de su ciclo anual, circunstancia condicionada por la topografía de la cueva cuya profundidad apenas sobrepasa los 30 metros de desnivel. Las figuras 4a y 4b permiten distinguir gradientes longitudinales muy netos que denotan un claro incremento de las concentraciones de CO<sub>2</sub> a medida que la distancia con relación a la entrada se hace mayor. Los datos obtenidos en Mayo y en Octubre son especialmente ilustrativos en este sentido. En ambas situaciones, que se podrían calificar de transicionales dentro del ciclo anual, se acentúa la manifestación del gradiente pareciendo indicar con ello la existencia de una fuente de CO<sub>2</sub> profundamente radicada en el interior del sistema kárstico (véanse los datos del 23-V-82 en la Figura 4a) y por otra parte se deduce que el drenaje de ciertas cantidades de CO<sub>2</sub> hacia el exterior es más eficaz conforme aumenta la proximidad a la entrada de la cueva (véanse los datos obtenidos los días 11-VII-82, 8-VIII-82 y 10-X-82 en la Figura 4b).

La última interpretación que conviene sugerir aquí, con todas las precauciones que resultan de nuestro excesivo desconocimiento de las condiciones climáticas que posee la Cova de les Rodes, consiste en justificar las causas principales que pueden ser responsables de la importante oscilación que caracteriza a los niveles de CO<sub>2</sub> de su atmósfera a lo largo del año. Fluctuaciones periódicas de carácter anual en las pCO<sub>2</sub> de cuevas kársticas han sido frecuentemente referidas en la bibliografía, como lo atestiguan los trabajos de RENAULT (1971), JAMES (1977), RENAULT (1979), JAMES y DYSON (1981), CHOPPY (1983) y VILLAR et al. (1985) entre otros. Para explicar tales oscilaciones estacionales han sido postuladas varias hipótesis. Las más generalizadas se fundamentan en la posible generación de circulaciones de aire debidas a diferencias térmicas (existentes en determinadas épocas del año) entre el aire exterior y el aire subterráneo que ocupa la atmósfera de la cavidad. Estas corrientes de aire realizarían una labor de ventilación, renovando el aire subterráneo y sustituyéndolo en parte por aire externo empobrecido en CO<sub>2</sub>. Durante el comienzo de la estación cálida, cuando las temperaturas del exterior no llegan a decrecer por debajo de la media anual, sería cuando el aire relativamente frío y denso de la atmósfera de la caverna permanecería atrapado en las zonas inter-

nas de la cueva, cesando de esta forma la ventilación activa por termocirculación. Los intercambios mediante difusión desde las grietas circundantes así como las variaciones de presión atmosférica (especialmente las bajas barométricas) se encargarían entonces de enriquecer en CO<sub>2</sub> la atmósfera de la cavidad, aportando aire procedente del enrejado de fisuras que la rodea.

Otras posibles explicaciones alternativas, que han sido propuestas en la bibliografía como causantes de oscilaciones anuales de la pCO<sub>2</sub> en casos muy concretos, no parecen ser aplicables a los datos y mediciones proporcionados por la Cova de les Rodes. Ni las crecidas estacionales experimentadas por las aguas de infiltración después de las temporadas de lluvias, ni las llegadas de materiales orgánicos acarreados por el agua, que pudieran desencadenar la actividad degradativa de microorganismos, ni las variaciones estacionales en la fabricación biógena de CO<sub>2</sub> en el suelo pueden dar cuenta de la información reunida sobre las fluctuaciones del CO<sub>2</sub> en la atmósfera de la Cova de les Rodes. La estación E, situada junto al río no ha llegado a expresar nada destacable si se exceptúa la medición efectuada el 26-XII-82 (ver Figura 4b) en la que quizás se evidencia un desprendimiento de CO<sub>2</sub>, al margen del ciclo anual que afecta a la totalidad de la caverna. Tampoco parece que la tardía irrupción de dióxido de carbono entre Mayo y Junio (Figura 3a), con su perfil excesivamente abrupto, pueda ser atribuida a los cambios estacionales de la concentración de CO<sub>2</sub> en el medio edáfico cercano a la cueva. Por consiguiente, la renovación parcial de la atmósfera de la Cova de les Rodes ocasionada por corrientes de aire de origen térmico (termocirculación) parece configurarse como la explicación que resulta más coherente con los datos disponibles hasta la fecha.

## Conclusiones

Todavía es muy incompleto el conocimiento que poseemos sobre la dinámica del dióxido de carbono en nuestras cuevas y sería aún más aventurado cualquier intento de resituar lo poco que sabemos dentro del marco más amplio de los procesos de karstificación. Sin embargo, el análisis de los datos y mediciones, que se han podido reunir hasta la fecha, permite establecer las siguientes conclusiones:

1. En Mallorca son bastante frecuentes las cavidades que albergan elevadas concentraciones de CO<sub>2</sub>, probablemente como consecuencia del considerable grado de fosilización que han experimentado muchos de los sistemas kársticos de la Isla en el transcurso del Pleistoceno.

2. Observaciones llevadas a cabo en el Forat de Picamosques, Avenc de Fangar y Cova de Sa Guitarreta, entre otras cavidades, parecen descartar que el enriquecimiento en CO<sub>2</sub> sea debido a la degradación de materia orgánica o causado por acumulaciones de guano de murciélago en su interior.

3. Valores superiores al 2,5 % en volumen son detectables en algunas cuevas como la Cova de les Rodes, Cova de Sa Bassa Blanca y Cova Nova de Son Lluís, emplazadas en parajes cuya topografía exterior se caracteriza por colinas suaves y relieves moderados.

4. Las interpretaciones de ciertos datos, sobre todo los provinientes del Avenc de Fangar y Cova de les Rodes, sugieren que el principal lugar de origen del CO<sub>2</sub> es la red de fisuras que rodea las cuevas, debiendo alcanzarse en ella contenidos superiores al 5 %.

5. Las medidas periódicas obtenidas en varias estaciones de la Cova de les Rodes, durante un ciclo anual completo, han aportado un registro muy preciso y esclarecedor de los drásticos cambios estacionales, en la concentración de CO<sub>2</sub>, que muestra la atmósfera de esta caverna.

6. Variaciones temporales en la composición química del aire de ciertas cuevas, como las que se han podido ejemplificar en la Cova de les Rodes, plantean la posibilidad de que algunos ritmos climáticos exteriores lleguen a manifestarse de este modo en el interior de las cavidades kársticas, incidiendo quizás en alguna medida sobre las comunidades de organismos troglobios.

## Agradecimientos

La realización de este trabajo ha sido posible gracias a la ayuda económica que nos fue concedida por el Institut d'Estudis Baleàrics (organismo dependiente de la Conselleria d'Educació i Cultura de les Illes Balears) con la intención de ampliar los conocimientos que se tenían sobre la Cova de les Rodes, debido a su interés ecológico y a su notable singularidad dentro del conjunto de cavidades kársticas de Mallorca. Agradecemos al Institut d'Estudis Baleàrics la sensibilidad mostrada al subvencionar esta campaña de recogida de datos, que ha requerido la visita a la cueva en 14 ocasiones durante un ciclo anual completo.

Nuestra gratitud se extiende asimismo a los compañeros del Grup Espeleològic EST que nos han acompañado durante las exploraciones y muy especialmente a Benet Morey.

También debemos manifestar nuestro agradecimiento al Departament d'Ecologia y al Departament de Geologia de la Universitat de les Illes Balears

por habernos facilitado el equipo Draeger necesario para la obtención de las mediciones.

## Bibliografía

- ASTIER, L. y VILLA, E. (1967): «Serra Nord 65. Campaña espeleológica en Mallorca». *Geo y Bio Karst*, 10: 18-20.
- ATKINSON, T.C. (1977): «Carbon dioxide in the atmosphere of the unsaturated zone: an important control of groundwater hardness in limestone». *Journal of Hydrol.*, 35: 111-123.
- BAKALOWICZ, M. (1979): «L'anhydride carbonique dans la karstogenèse». Actes Symposium Int. sur l'érosion karstique U.I.S., Aix en Provence - Marseille - Nîmes. *Mém. A.F.K.*, 1: 41-48.
- BOVER, J.M. (1839): «Gruta de Son Lluís». Imprenta Nacional de D. Juan Guasp. 4 págs. Palma de Mallorca.
- CHOPPY, J. (1983): «Processus climatiques dans les vides karstiques. 2 Composition de l'air». 88 págs. Paris.
- DELECOUR, F.; WEISSEN, F. y EK, C. (1968): «An electrolytic field device for the titration of CO<sub>2</sub> in air». *Natl. Speleol. Soc. Bulletin*, 30 (4): 131-136.
- EK, C. (1979): «Variations saisonnières des teneurs en CO<sub>2</sub> d'une grotte belge: le Trou Jouly à Comblain-au-Pont». *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 102: 71-75.
- EK, C.; DELECOUR, F. y WEISSEN, F. (1968): «Teneur en CO<sub>2</sub> de l'air de quelques grottes belges. Technique employée et premiers résultats». *Annales de Spéléologie*, 23: 243-257.
- ENCINAS, J.A. (1972): «Contribuyendo al estudio del karst del valle de Sant Vicenç de Pollença (Mallorca). Espeleogénesis y espeleografía». *Geo y Bio Karst*, 31: 15-22.
- ESCOLÀ, O. (1970): «Resultats de la campanya 1970 a Mallorca». *Espeleòleg*, 13: 624-634.
- GINÉS, A. (1983): «Bioespeleología del karst mallorquín. Datos ecológicos preliminares». Federació Balear d'Espeleologia (xerocopiado). 219 págs. Tesis de Licenciatura. Palma de Mallorca.
- JAKUCS, L. (1977): «Morphogenetics of karst regions». Akadémiai Kiadó. 284 págs. Budapest.
- JAMES, J.M. (1975): «Cold water mineralization processes in an Australian cave». *Trans. British Cave Research Assoc.* 2 (3): 141-150.
- JAMES, J.M. (1977): «Carbon dioxide in the cave atmosphere». *Trans. British Cave Research Assoc.*, 4 (4): 417-429.
- JAMES, J.M. y DYSON, J. (1981): «CO<sub>2</sub> in caves». *Caving International*, 13: 54-59.
- JENNINGS, J.N. (1985): «Karst geomorphology». Blackwell. 293 págs. Oxford.
- JOLY, R. (1929): «Explorations spéléologiques à Majorque». *Rev. Géog. Phys. et Géol. Dyn.*, 2: 1-13.
- MAROTO, A.L. y FONT, A. (1981): «Proyecto Hades. Desarrollo de las campañas de 1981». *Endins*, 8: 81-90.
- MARTEL, E.A. (1903): «Les cavernes de Majorque». *Spelunca. Bull. et Mém. de la Société de Spéléologie*, 5 (32): 1-32.
- MESTRE, G. (1980): «La incógnita del mundo subterráneo mallorquín». Ant. Imprenta Soler. 101 págs. Palma de Mallorca.
- MONTORIOL-POUS, J. (1961): «El karst de la Isla de Cabrera». *Speleon*, 12 (1-2): 85-113.
- RENAULT, P. (1971): «La teneur en anhydride carbonique des atmosphères des grottes». *Bull. Assoc. Géogr. Français*, 389-390: 241-245.
- RENAULT, P. (1972): «Le gaz des cavernes». *Science, Progrès, Découverte*, 3442: 12-18.
- RENAULT, P. (1979): «Mesures périodiques de la P CO<sub>2</sub> dans les grottes françaises au cours de ces dix dernières années». Actes Symposium International sur l'érosion karstique U.I.S., Aix en Provence - Marseille - Nîmes. *Mém. A.F.K.* 1: 17-33.
- RENAULT, P. (1985): «Historique de l'étude du CO<sub>2</sub> souterrain atmosphérique karstique et applications pratiques». *Annales de la Société Géologique de Belgique*, 108: 233-238.
- ROQUES, H. (1963): «Sur la repartition du CO<sub>2</sub> dans les karsts». *Annales de Spéléologie*, 18 (2): 141-184.
- TROMBE, F. (1952): «Traité de Spéléologie». Payot. 376 págs. Paris.
- TRUDGILL, S. (1985): «Limestone geomorphology». Longman. 196 págs. Londres.
- VILLAR, E.; FERNÁNDEZ, P.L.; QUINDOS, L.S. y SOTO, J. (1985): «Natural temporal evolution of the CO<sub>2</sub> content in the air of the "Paintings Chamber" at Altamira Cave». *NSS Bulletin*, 47: 12-16.