

LA CUEVA DE VALDELAJO



ESTUDIO REALIZADO
POR EL

**GRUPO
ESPELEOLÓGICO
DE
MATALLANA**

Mayo de 1999

LA CUEVA DE VALDELAJO

ESTUDIO REALIZADO

POR EL

GRUPO

ESPELEOLÓGICO

MATALLANA



ÍNDICE

Presentación	1
Localización geográfica de la Cueva de Valdelajo	3
Levantamiento topográfico de la Cueva de Valdelajo	5
Mineralogía	7
Geomorfología de la Cueva de Valdelajo y su entorno	12
La conservación de las cuevas turísticas desde la perspectiva de la climatología subterránea	18
La Luz Artificial y su empleo en cavidades para uso turístico	47
Conclusiones finales	50
Bibliografía	52

INFORME REALIZADO POR EL GRUPO ESPELEOLÓGICO DE MATELLANA PARA EL AYUNTAMIENTO DE SABERO SOBRE LA CUEVA DE VALDELAJO

Durante el mes de mayo de 1999 la *Cueva de Valdelajo* ha sido objeto de estudio por parte del Grupo Espeleológico de Matallana. Su dilatada experiencia obtenida a lo largo de numerosos años de estudios espeleológicos y del karst avalan cualquier trabajo de índole espeleológico, tanto a nivel deportivo como científico.

Las numerosas incursiones que se llevaron a cabo en la cueva en los primeros días del mes dieron sus frutos en forma de un estudio Geomorfológico de la Cueva y su entorno, así como un exhaustivo estudio Bioclimático. Se procedió a un minucioso levantamiento Topográfico, tanto de la cavidad como de sus alrededores y paralelamente se realizaron los siguientes trabajos de exploración en la cavidad:

1. Se reconocieron todas las posibles continuaciones objetivas que se presumía podían deparar nuevas salas o galerías. Lamentablemente, no dieron resultado positivo.

2. Sin embargo, una ventana superior situada en la pared izquierda de la galería final de la cavidad, más allá de la Gran Sala, ofrecía un inmejorable aspecto.

Para llegar a ella se realizó una muy arriesgada escalada de 8 metros de altura, hasta lo que parecía un ensanchamiento a nivel del techo, con métodos de escalada artificial limpia, es decir, sin dejar ningún tipo de anclaje permanente de seguro en la pared.

Este tipo de escalada implicó un gran riesgo ya que ningún seguro emplazado resultó ser fiable debido a la extremada fragilidad de las formaciones y grietas, añadido a la constante presencia de barro que recubría toda la pared.

Una vez en el lugar se constató que lo que era un hueco no era más que un pequeño ensanchamiento donde bloques de todos los tamaños dejaban entrever una pequeña gatera por donde era imposible pasar. No obstante ante lo precario de la situación y el peligro objetivo que comportaba la



En mitad de la escalada.

eventual caída de grandes bloques sobre la galería inferior, se procedió a realizar el descenso y a dejar la cavidad cerrada por este camino.

3. No obstante, una gatera impenetrable situada en el punto más alejado de la cavidad, justo debajo de un pequeño resalte, nos hacía albergar nuevamente esperanzas de que la cueva no acabara todavía, ya que se podía vislumbrar entre la gatera una pequeña salita, como de 3 metros de larga por 1 de ancha y de suelo descendente. El fondo de la sala no se podía ver debido a lo exiguo del “mirador” que teníamos.

Durante varios días estuvimos forzando el paso, de 0,5 metros de alto por 0,2 metros de ancho y parcialmente colmatado por unas lajas de calcita soldadas entre las paredes del hueco. Primero utilizando métodos clásicos, con maza y puntero. Se consiguió algún avance, pero lo fatigoso del trabajo unido a la imposibilidad de trabajar a gusto en aquel reducidísimo espacio, nos obligó a cambiar de táctica y esta no fue otra que

el empleo de micro-explosivos. Estos pequeños explosivos se pueden asemejar a los detonadores empleados en la minería para hacer estallar las pegas de goma-2. Consiste en un método casero a base de pistones para expandir remaches en acero u hormigón, unido a un pequeño iniciador a base de pólvora que se hace estallar mediante una resistencia.



Realizando la desobstrucción

Utilizando un taladro

eléctrico se realizaron múltiples agujeros en donde se colocaban los explosivos y nos permitían ir abriendo el paso poco a poco, haciéndolos estallar desde un lugar seguro. Después de varias jornadas de desobstrucción pudimos al fin forzar el paso y nuestra sorpresa fue que la concavidad no era tan grande como nos esperábamos, constatando que la única posibilidad de progresión era una grieta en el suelo que no ofrecía ningún signo objetivo de continuidad.

Por tanto se dio definitivamente por cerrada esta nueva alternativa.

Como conclusión se debe reseñar que la cueva no presenta ningún indicio de continuidad por ninguna parte, dando por finalizada su exploración y procediendo a realizar el presente informe.

LOCALIZACIÓN GEOGRÁFICA DE LA CUEVA DE VALDELAJO

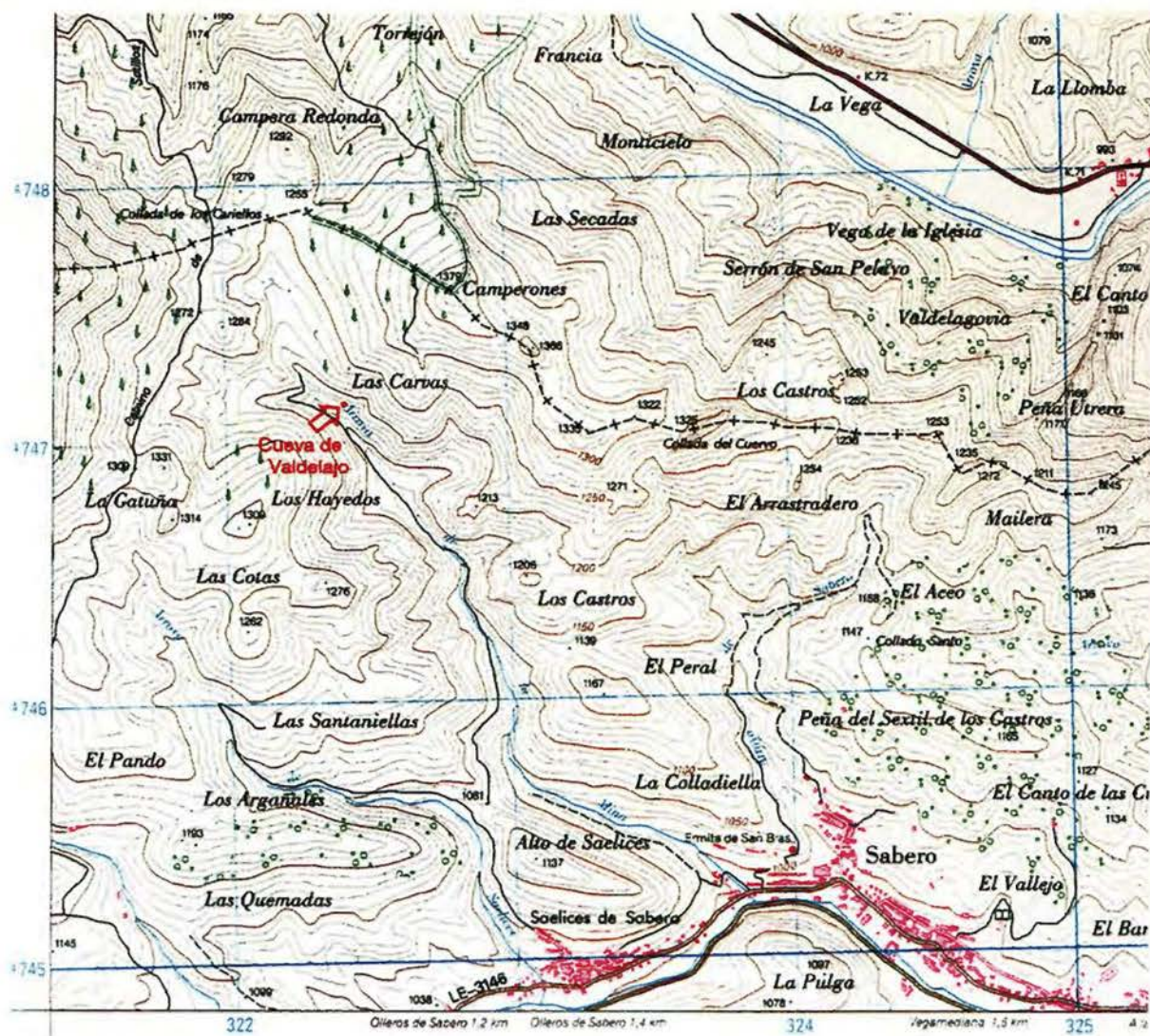
I. COORDENADAS U.T.M.

Huso 30T-UN

X.... 322.425
Y.... 4.747.128
Z..... 1.180mts

Del Mapa Topográfico Nacional de España.
Hoja 105-Sabero (111), escala 1:25.000

Término municipal: Sabero
Localidad más próxima: Sahelices de Sabero

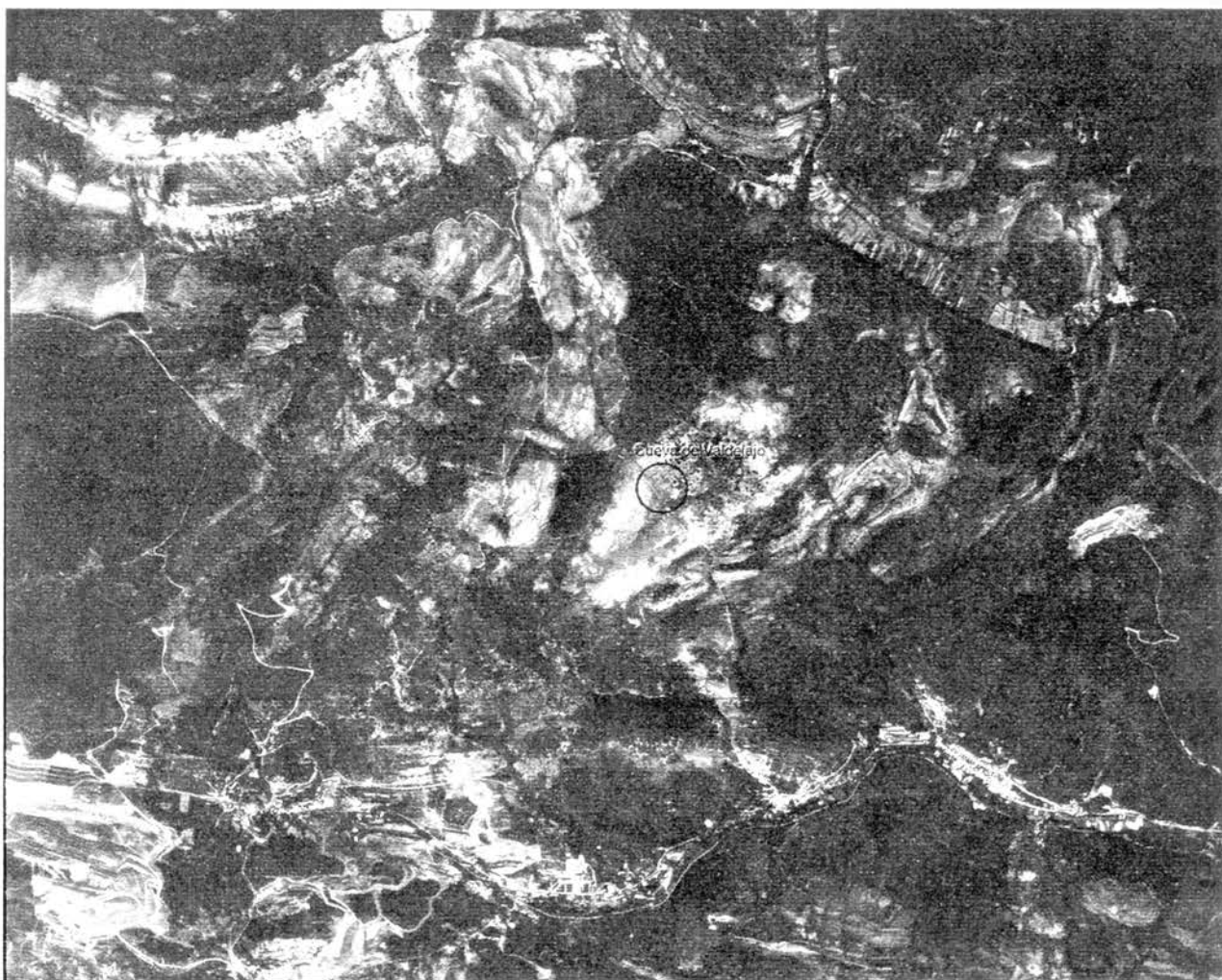


2. SITUACIÓN GEOGRÁFICA

A la altura del punto kilométrico 66 de la carretera nacional N-621 (León-Riaño) se encuentra el desvío a la localidad de Sabero (LE-3146). La localidad de Sahelices se encuentra a continuación.

De Sahelices parte una pista que se dirige al norte, bordeando por la ladera Oeste el monte llamado *Alto de Sahelices* y por la margen derecha del arrollo del mismo nombre, hasta llegar a unas cuadras con una fuente. En este punto convergen dos pistas. La de la derecha se dirige de nuevo hacia Sabero y la de la izquierda continúa en dirección norte.

Debemos tomar esta última y seguirla durante 2 kilómetros aproximadamente, subiendo poco a poco por la ladera izquierda un valle por el que discurre un pequeño cauce llamado *Arroyo de la mina*. Atravesamos una pequeña hoz y llegamos a un precioso paraje rodeado de montes y de bosques de encinas, estamos en el valle de Valdelajo. La cavidad se encuentra en su parte más septentrional.



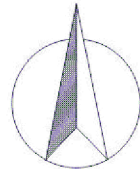
Fotografía Aérea de la Zona. Vuelo de 1984.

6,5

Afloramientos de arenisca

-4,5

N.M.



Línea del último afloramiento calizo visible

18,2

ARROYO

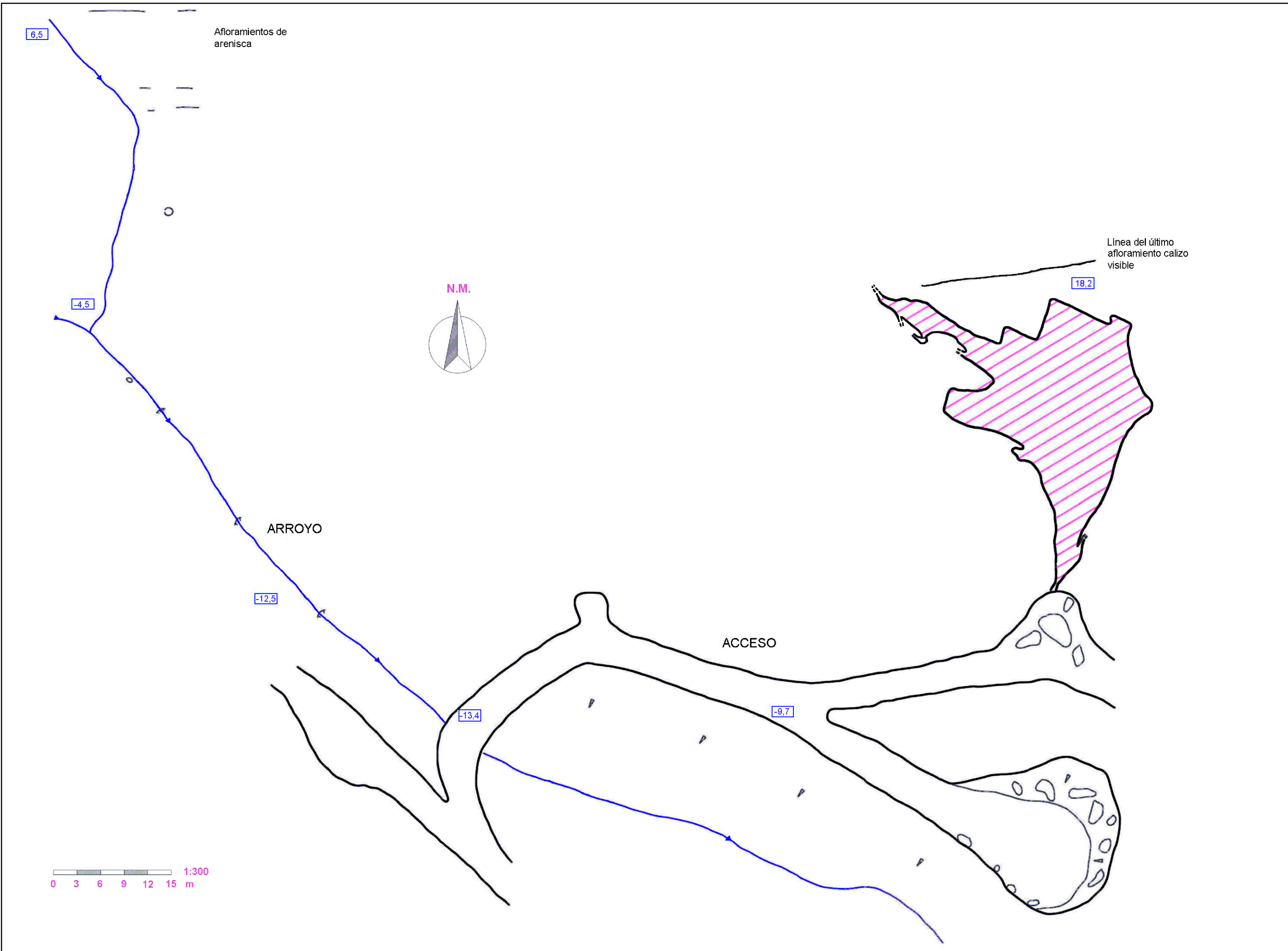
-12,5

ACCESO

-13,4

-9,7

0 3 6 9 12 15 m 1:300



LEVANTAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA CUEVA DE VALDELAJO

1. MATERIAL

El material utilizado ha sido el siguiente :

- Cinta indeformable 30 m (Tajima Symron-L)
- Brújula prismática precisión 1/6 grado (Sighn Master)
- Clinómetro (Sighn Master)

Con este material se pretende lograr una topografía de grado 5D en la escala BCRA (*British Cave Research Association*)

2. MÉTODO DE TRABAJO

Se establece una poligonal de 15 lados cerrada en 3 puntos, completada con varias radiales desde los vértices de la misma.

Las coordenadas polares medidas en la cueva se transforman a rectangulares, calculándose los errores en los tres puntos de cierre y compensándolos en la propia poligonal.

El listado de puntos y coordenadas (reales) obtenidos es el siguiente :

Partiendo de estas coordenadas, se decide a efectos de representación, utilizar la escala 1:150

pto	N	E	H
1	0.00	0.00	0.00
2	4.40	1.96	-3.01
3	14.85	2.74	-7.42
4	20.21	6.49	-8.79
4'	22.79	10.17	-9.10
5	30.23	8.94	-14.81
6	32.47	0.72	-17.54
6'	33.26	8.21	-16.88
7	30.08	-8.81	-17.69
8	35.16	-14.67	-17.55
9	36.78	-20.75	-17.20
10	32.81	-13.31	-16.60
11	29.38	-4.86	-16.42
12	26.24	-1.85	-13.88
13	25.06	-6.40	-11.42
13'	22.38	-13.04	-13.88
14	24.80	0.03	-11.20
15	13.89	-0.12	-8.64

3. ESTUDIO DE LOS ERRORES

Según la teoría de errores admitida ¹, los errores esperables en esta poligonal son los siguientes:

		Error medio cuadrático	Tolerancia
Primer cierre	7 lados	0.77 m	2.09 m
Segundo cierre	5 lados	0.75 m	2.02 m
Tercer cierre	7 lados	0.81 m	2.20 m

Y los errores realmente obtenidos en los cierres de poligonal son asimismo los siguientes:

Primer cierre:

Se obtienen 0.42 m de error en coordenada N y 0.24m en la E, sobre 60.79 m de poligonal, es decir, 0.48 m, el 0.8 % sobre la longitud de la poligonal.

Segundo cierre:

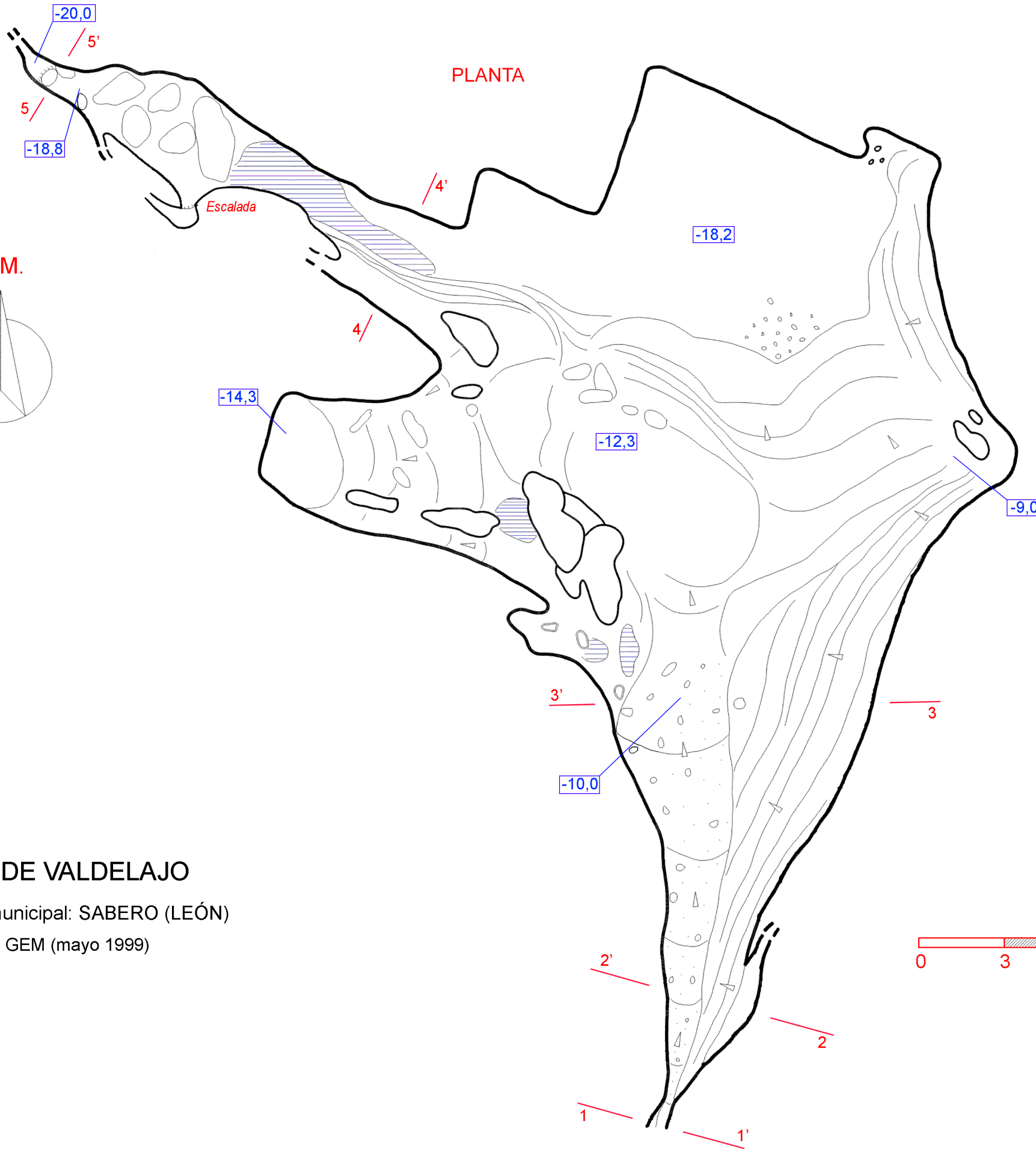
Se obtienen 0.90 m de error en coordenada N y 0.69 m en la E, sobre 50.46 m de poligonal, 1.13 m, el 2.25 % sobre la longitud de la poligonal.

Tercer cierre:

Se obtienen 0.07 m de error en coordenada N y 0.12 m en la E, sobre 64.45 m de poligonal, 0.14 m, el 0.22 % sobre la longitud de la poligonal.

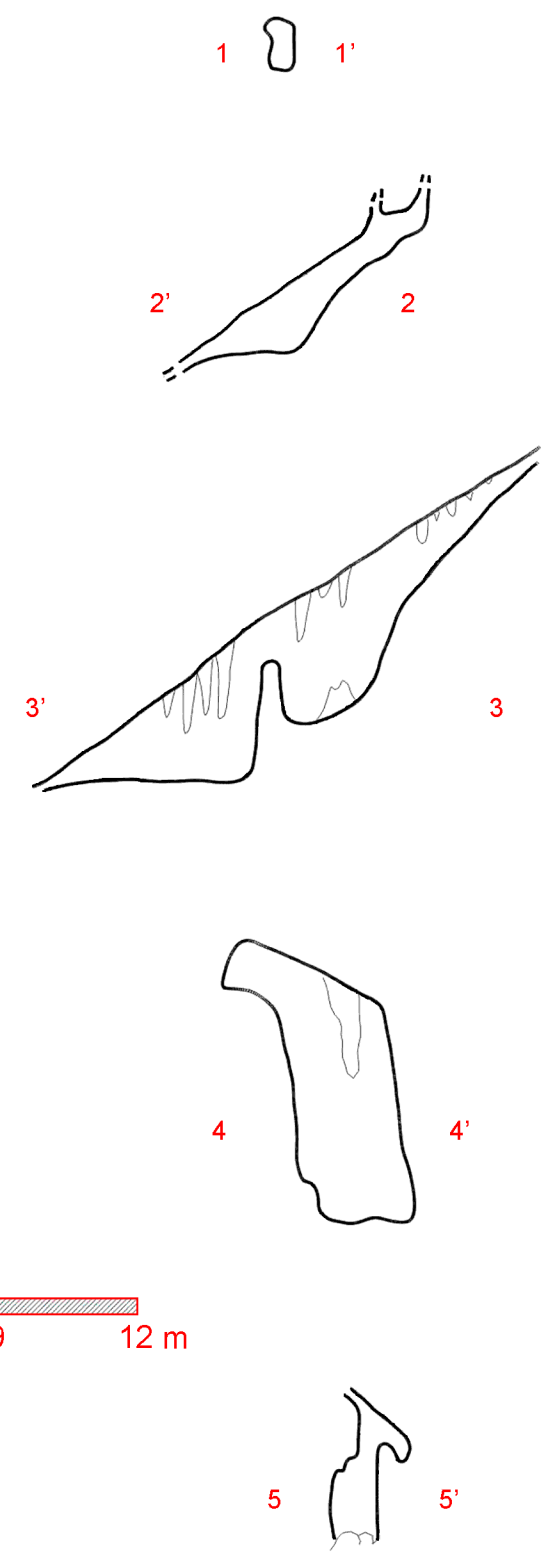
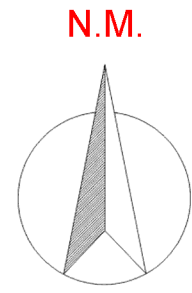
Esto confirma que la topografía realizada es válida

¹ Topografía Espeleológica - Aibert Martínez i Rius, Federación Española de Espeleología, 8/92



PLANTA

SECCIONES



CUEVA DE VALDELAJO
 Término municipal: SABERO (LEÓN)
 Topografía: GEM (mayo 1999)



MINERALOGÍA

1. ASPECTOS GENERALES

El relleno químico, llamado también *litogénico* ya que provoca la génesis de nuevas rocas, suele ser muy importante cuando las condiciones climáticas le son favorables. Y potenciado cuando el substrato vegetal de la cubierta del terreno donde se localiza la cueva, como en este caso, es notable.

Se trata del conjunto de depósitos resultantes de la cristalización de sustancias transportadas por el agua subterránea en estado de solución, a veces de pseudo-solución (estado “coloidal” o “gelatinoso”), depósitos que se denominan generalmente concreciones o espeleotemas.

A decir verdad, los únicos capaces de alcanzar un volumen notable son las concreciones de carbonato de calcio; pero existen muchos otros que realizan rellenos importantes si bien localizados, o crean curiosidades mineralógicas no desprovistas de interés.

Existen, en particular, otros carbonatos (por ejemplo el magnesio), sulfatos de calcio o de magnesio, sílice, diversos fosfatos (sobre todo de calcio pero a veces de aluminio), óxidos e hidratos de hierro, de manganeso, etc.

Todos estos depósitos sólo pueden adquirir amplitud en la fase de la historia kárstica en que aún se registren llegadas de agua que aporten cierta cantidad de sustancia, pero en las que la masa hídrica sea insuficiente para disolver o arrastrar mecánicamente la acumulación que acaba de originarse.

Como ya se ha dicho, el mineral principal que se encuentra en las concreciones es la *calcita* (CO_3Ca), es decir, el mismo elemento que constituye la parte fundamental de las rocas calizas en las que se abren la mayoría de las cavidades. Se podría decir que después de que el agua se ha esforzado por llevarse la calcita, hace todo lo posible por volver a depositarla en el mismo sitio, pero bajo una forma con frecuencia mucho más pura. En contacto con el aire, el bicarbonato de calcio se precipita y se convierte en carbonato de calcio.

Si bien este carbonato de calcio, cristalizado en el sistema “romboédrico”, es con mucho el más corriente, al mismo tiempo que el más estable, existe también un segundo, cuya composición química es idéntica pero que cristaliza en el sistema “ortorrómbico”, y que recibe el nombre de aragonito. Veremos que éste puede hacer su aparición bajo la influencia de diversas condiciones climáticas, aunque su inestabilidad sea muy grande. En la mayoría de los casos, empero, acabará por recrystalizar bajo la forma de calcita, hasta el punto que no se conoce ninguna concreción masiva antigua constituida por otro mineral.

Entre los tipos elementales de concreciones simples, se le llama *estalactita* a un saliente que desciende de la bóveda, mientras que una *estalagmita* es la forma inversa, generalmente más gruesa y maciza, y que surge del suelo. Cuando una estalactita se une con la estalagmita nacida bajo ella y se suelda con la misma, tenemos una *columna*. Una

bandera es una forma habitualmente ondulada, suspendida del techo como una estalactita, pero que se alarga hacia las paredes y tiene muy poco espesor. Una *colada* es un revestimiento cristalino, a veces espeso, aplicado sobre la pared de la cueva. Por último, un suelo estalagmítico es una formación equivalente, pero que tapiza de manera más o menos continua el suelo de la cavidad.

2. GÉNESIS DE LAS CONCRECIONES

2.1. Estalactitas

Para que se forme una estalactita, es necesario que el bicarbonato de calcio escurra, gota a gota, por el extremo de una estrecha fisura que constituye su canal de conducción a la bóveda. Si el agua rezuma con demasiada rapidez, no tendrá tiempo de dejar un depósito de calcita antes de caer al vacío, con el resultado de que la evaporación se producirá entonces en el suelo y podrá aparecer entonces una estalagmita sin estalactita en su vertical.

En cambio, si el agua rezuma con suficiente lentitud, la gota sólo caerá después de haber depositado a su alrededor un diminuto anillo cristalino en la roca, punto de partida de la estalactita naciente. Puede incluso suceder que aparezca una gota colgante constantemente pero sin caer, cuando la llegada de agua compense únicamente la evaporación: en este caso se formará una estalactita sin ninguna estalagmita bajo ella.

Sea como fuere, si el depósito anular a comenzado, proseguirá lentamente al irse añadiendo nuevos círculos de calcita, situados exactamente bajo los anteriores, y con la misma orientación cristalina, mientras esté asegurado el rezume favorable. Así se creará una estalactita tubular monocristalina, llamada también fistulosa o “*macarrón*”, cuyo diámetro medio casi siempre constante oscilará entre 6 y 10 milímetros y que, pese a su fragilidad, podrá alcanzar longitudes notables, incluso de varios metros.

Pero es raro que una estalactita tubular permanezca en este estado. Basta con que la alimentación en agua presente irregularidades, para que el tubo quede más o menos obstruido por los cristales. La solución bicarbonatada rezuma entonces hacia el exterior, formando tubérculos, mazas, esferas huecas, o, sencillamente, hace más espesa la estalactita mediante un revestimiento continuo de cristales radiales. Este mismo resultado, es decir, una estalactita maciza, puede obtenerse también directamente cuando la solución llega acarreada por el agua hasta el techo de una caverna y rezuma hasta una aspereza cualquiera, a cuyo extremo las gotas se detienen antes de caer verticalmente. Se produce entonces un depósito que aumenta la protuberancia y que sirve de raíz a una estalactita totalmente alimentada desde el exterior. Las colgaduras nacen de una manera idéntica, pero sin que una protuberancia particular localice la cristalización. El trazado ondulado del primer hilillo de agua a lo largo de una bóveda oblicua explica que comience a depositarse una franja de calcita, que a veces se irá alargando hasta crear unos cortinajes o banderas translúcidos del efecto más bello.

2.2. Estalagmitas

El nacimiento de las estalagmitas, en cambio, es el resultado de un fenómeno algo diferente. En la mayoría de los casos, la gota de agua que cae de la estalactita aún contiene una fuerte proporción de carbonato de calcio. Al caer, se evapora sin duda en parte y vuelve a encontrarse sobresaturada a su llegada al suelo. Esto puede originar un segundo depósito, con frecuencia mucho más importante que el primero.

Si el fondo es rocoso, en las salpicaduras que rodean a los puntos de impacto nacerán numerosas pústulas de calcita, que se reunirán poco a poco hasta dar una masa globulosa que sirve de base sólida al edificio estalagmítico. Si el suelo es arcilloso o arenoso, las gotas empiezan por lo general excavando una pequeña cavidad en la que la calcita formará una raíz alrededor de la cual los sedimentos muebles quedarán empastados en una especie de aureola o de plato sólido.

Sean cuales sean sus bases, las estalagmitas normales crecen poco a poco gracias a la precipitación de la calcita alrededor del punto de impacto principal de las gotas, que corresponde a una forma cóncava, al menos al principio. De todos modos, haciendo abstracción de una concavidad episódica, que a veces puede estar substituido progresivamente por una joroba redondeada, o incluso por una punta aguda hacia arriba, la estalagmita se muestra casi siempre llena y constituida por capas aproximadamente concéntricas de cristales dispuestos radialmente. Por lo tanto, puede compararse muy bien con las estalactitas gruesas, pero con una estructura más maciza todavía. Por otra parte, su base está casi siempre rodeada por caparazones de calcita, pisos y coladas estalagmíticas, resultantes del depósito de un último exceso de carbonato de calcio abandonado por el agua que chorrea.

En realidad existen numerosas variedades entre las estalagmitas, y no todas corresponden al tipo elemental antes descrito. Según su altura de caída de las gotas de agua, el caudal de esta alimentación hídrica, su contenido en bicarbonato y las posibilidades de evaporación de la caverna, tendremos formas diversas: *agujas*, *cúpulas*, *taburetes*, *montones de platos*, *troncos de palmera* provistos a veces de "hojas" gigantescas, o poderosos fustes acanalados que se unen con las estalactitas del techo, dando las clásicas *columnas*.

2.3. Formaciones en aguas, embalsadas o no

Con independencia de estas concreciones, que son las más corrientes, se pueden encontrar otras, que se forman en la superficie, en los bordes o en el fondo de los ríos y lagos subterráneos.

La concreción superficial sólo se realiza con aguas muy tranquilas y prácticamente sobresaturadas. Como ya hemos dicho, al contacto con el aire, el bicarbonato se convierte en carbonato de calcio. En esta ocasión forma un finísimo velo, quizá monomolecular, que permanece en equilibrio gracias a la tensión superficial y que se llama *calcita flotante*. La menor agitación provoca su precipitación al fondo, donde forma una especie de arena de calcita, que puede recristalizarse parcialmente y contribuye sin duda a la formación de una

arenisca blanda, exclusivamente constituida por calcita microcristalina, denominada *calcarenita*. Los bordes de los lagos son también un punto de atracción de la calcita flotante, que se fija estrechamente en ellos y vuelve a cristalizar, trazando una línea blanca horizontal, o incluso una verdadera acera de pequeñas dimensiones a lo largo de las paredes verticales. Cuando se producen variaciones de nivel de agua, aparecen nuevos trazos o nuevas aceras. De modo que es fácil distinguir a donde han llegado las aguas altas o las aguas bajas en una zona lacustre actual o antigua.

Cuando el agua es menos tranquila y existe una pequeña corriente, las cosas suceden de manera distinta. Aparecen entonces los pequeños diques de calcita con cresta horizontal, llamados *gours*. Su posición privilegiada se encuentra en zonas de rebosaderos, entre dos planos de aguas. Su origen en estos lugares se explica por el hecho de que el agua discurre por ellos en capas finas, con remolinos que provocan su ventilación, y, por lo tanto, la fácil precipitación del carbonato de calcio excesivo.

Por lo general los *gours* constituyen barreras a través de las galerías, que pueden medir desde unos pocos a unas decenas de metros, y de plano, a menudo muy ondulado, con alturas que van desde unos centímetros a varios metros.

El principio de los *gours* es siempre el mismo, sean cuales sean sus dimensiones. Los hay, por ejemplo, de dimensiones insignificantes, “microgours” que apenas miden unos centímetros y se disponen escalonados sobre las coladas estalagmíticas por las que se escurre una corriente de agua suficiente. También se pueden formar en el suelo rocoso de una galería inclinada y recorrida por una pequeña corriente. El resultado de ello es siempre la substitución de la pendiente inicial por una serie de escalones horizontales tras los cuales subsiste una concavidad llena de agua relativamente tranquila. A decir verdad, suelen subsistir movimientos remolinos en este embalse, y entonces se pueden encontrar en él las *pisolitas* o *perlas de las cavernas*.

Estas curiosas formaciones están producidas por el depósito de finas películas de calcita alrededor de un núcleo constituido por una materia cualquiera: una partícula de cuarzo, de calcita, o incluso una bolita de arcilla, etc. Algunas son de forma bastante basta, otras parecen bayas de pequeños frutos, a veces erizadas de puntas cristalinas y otras veces, en cambio, regularmente esféricas, lisas y con apariencia de porcelana, tan perfectas como las perlas procedentes de las ostras, de los mejillones o de otros moluscos.

2.4. Concreciones Excéntricas

Hablando también de extrañas formaciones, hay que destacar a las llamadas concreciones excéntricas. El nombre que se les da procede del hecho de que en sección no tienen centro, o, mejor dicho, eje, como las estalactitas y estalagmitas normales. Son formaciones de calcita generalmente monocristalinas, es decir, que en ellas todo sucede como si estuviesen constituidas por un solo cristal que aumenta de tamaño de manera quizás muy desigual de un lado o de otro, pero conservando casi siempre una orientación privilegiada, impuesta por el principio mismo de la cristalización. Puede decirse que las fuerzas de esta cristalización predominan ampliamente respecto a las resultantes de la gravedad. No se debe hablar ya de estalactitas o de estalagmitas, sino solamente de

concreciones excéntricas, pues estas pueden formarse lo mismo en el techo, que en el suelo, en las paredes, en antiguas estalactitas o en estalactitas normales, en columnas, en banderas o incluso en coladas.

Las excéntricas no son huecas, pero sin embargo pueden descubrirse en su interior, entre los cristales de calcita, un fino capilar por el que la solución cálcica llega a su extremidad y asegura la continuidad de su crecimiento. Pudiera decirse que este canal capilar, en suma, no es más que la prolongación del de la roca o de la concreción que le sirve de soporte y permite su alimentación.

Estas excéntricas de calcita, cuya talla varía desde unos milímetros a varios decímetros, suelen presentar formas de lo más extravagante, y, en todo caso, indescriptibles. Han sido comparadas a hilos, gusanos, serpientes, espolones, arpones, etc., y una clasificación basada en estos aspectos sería trabajo perdido.

Hay formas que a primera vista parecen extrañísimas, pues parecen evitar un obstáculo (punta rocosa o cualquier otra concreción), mientras otras, en cambio, se dirigen manifiestamente hacia un punto privilegiado (fondo de una cúpula, perforación en la pared, espacio entre dos concreciones), o que se enrollan sobre sí mismas formando espirales. La mejor explicación para todas estas anomalías parece ser la de los circuitos de convección, ínfimas corrientes de aire circulares que se establecen entre el suelo y el techo, el centro de la galería y las paredes, etc., a causa de la diferencia de temperatura existentes entre estos puntos, lo cual basta para provocar una evaporación superior por el lado de donde viene el aire, orientando así el avance de la concreción.

2.5. Concreciones de Aragonito

Al lado de las concreciones de calcita, existen también, aunque con carácter más raro, *concreciones de aragonito*, este otro carbonato de calcio de la misma composición química, pero perteneciente a un sistema cristalino diferente.

El aspecto más sencillo que se puede encontrar es el de minúsculas borlitas, penachos o rosetones de cristales finísimos y muy agudos, semejantes a espinas, de una fracción de milímetro de anchura y de una longitud que va desde unos milímetros a un centímetro, aproximadamente. Pueden brotar en una roca desnuda o en cualquier tipo de concreciones de calcita anteriormente formadas. Una etapa más evolucionada produce varillas que alcanzan un decímetro. Una variedad más espectacular es la que constituye manojos enormes, de numerosas ramificaciones laterales de aspecto “plumoso” cuyas dimensiones globales suelen sobrepasar el decímetro. Los hay que brotan en la roca, directamente o por una base de calcita, pero muchos se desarrollan sobre estalactitas fistulosas cuya extremidad parece tapada y, de manera accesoria, sobre excéntricas también de calcita. En algunos casos, en fin, el aragonito se dispone en ramos cristalinos curvilíneos, muy distintos, pues, de los cristales precedentes, que son rigurosamente rectos.

GEOMORFOLOGÍA DE LA CUEVA DE VALDELAJO Y SU ENTORNO

1. ENTORNO GEOLÓGICO

Desde el punto de vista geológico, la cueva de Valdelajo se encuentra situada en la Región de Pliegues y Mantos de la Zona Cantábrica, más concretamente en la Unidad del Esla.

La Zona Cantábrica ocupa la parte más interna del arco que forman las estructuras hercínicas de la Península Ibérica. Aparece limitada al Oeste por el cabalgamiento del Narcea que la separa de la Zona Asturoccidental Leonesa, mientras que hacia el Este y el Sur desaparece bajo los sedimentos mesozoicos y terciarios de las cuencas vasco-cantábrica y del Duero respectivamente.

En la Zona Cantábrica, los sedimentos paleozoicos van acuíñándose progresivamente hacia la parte interna del arco que forma esta zona (Rodilla Astúrica), siendo el Paleozoico inferior eminentemente detrítico y el Superior, por el contrario, mayoritariamente carbonatado y que es donde se sitúa la cueva objeto de este estudio.

La deformación en la Unidad del Esla se caracteriza por un predominio de la tectónica tangencial, donde las estructuras más importantes son los cabalgamientos y los pliegues con ellos relacionados. Esta deformación se realiza en condiciones relativamente superficiales, sin apenas metamorfismo y con escaso desarrollo de la esquistosidad. Desde el punto de vista geométrico, resalta la presencia de un gran rellano cabalgante situado en la base de la Formación Láncara (Cámbrico inferior-medio), que descansa sobre un rellano cabalgado situado sobre los materiales del Devónico Superior.

Respecto de la estructura interna del manto, existen pequeños cabalgamientos que surgen de superficies de despegue situadas en la base de la Formación Santa Lucía (Devónico inferior-medio) o de la Formación Alba (Carbonífero inferior).

Como ya está dicho, la Cueva de Valdelajo se abre en los sedimentos carbonatados del Paleozoico Superior, en la formación de Calizas de Santa Lucía, de edad Devónico inferior-medio.

El espesor de esta Formación en el área de trabajo es de unos 220 mts., presentando un tránsito gradual con las unidades limítrofes (a muro el Grupo La Vid, constituido por dolomías, calizas y lutitas, y a techo la Formación Huergas, constituido por areniscas y lutitas). Está compuesta por calizas gris claras, algunos tramos dolomíticos y en menor proporción niveles margosos. Las calizas suelen estar bien estratificadas y en muchas zonas presentan dolomitización secundaria. Tanto su aspecto, como su contenido faunístico varían de un corte a otro, dependiendo de su posición respecto a la cuenca original.

2. DESCRIPCIÓN DE LA CAVIDAD

La actual boca de la cueva de Valdelajo, fue descubierta casualmente en el curso de unas prospecciones con vistas a la explotación de una cantera, cerca de la localidad de Sahelices de Sabero.

Dicha boca tiene unos 80 cm. de altura y forma triangular, siendo el suelo fuertemente descendente. A poca distancia, dos metros y medio, el techo ya permite ponerse en pié, si bien el suelo sigue con su acusada pendiente, estando compuesto de tierra suelta, cantos y bloques sueltos, lo que obliga a progresar buscando apoyos en la pared derecha, la más próxima a nosotros, ya que la pared izquierda nada más pasar la zona de entrada estrecha, se va alejando.

A unos 15 metros llegamos a un rellano, cuyo suelo está formado por una colada estalagmítica, que presenta varias estalagmitas de regular tamaño y hacia la izquierda, donde el techo está a metro y medio, aparecen estalactitas, banderas, macarrones de un blanco puro y pequeños gours en el suelo.

Continuando al frente, la colada que tapizaba el rellano, se desploma, haciendo conveniente el uso de una cuerda para ayudarnos en el descenso, de unos 5 mts., para llegar al fondo de la Gran Sala de esta cueva.



Algunas estalactitas miden casi dos metros



Detalle de varias formaciones



Vista panorámica de la Gran Sala, desde el piso superior

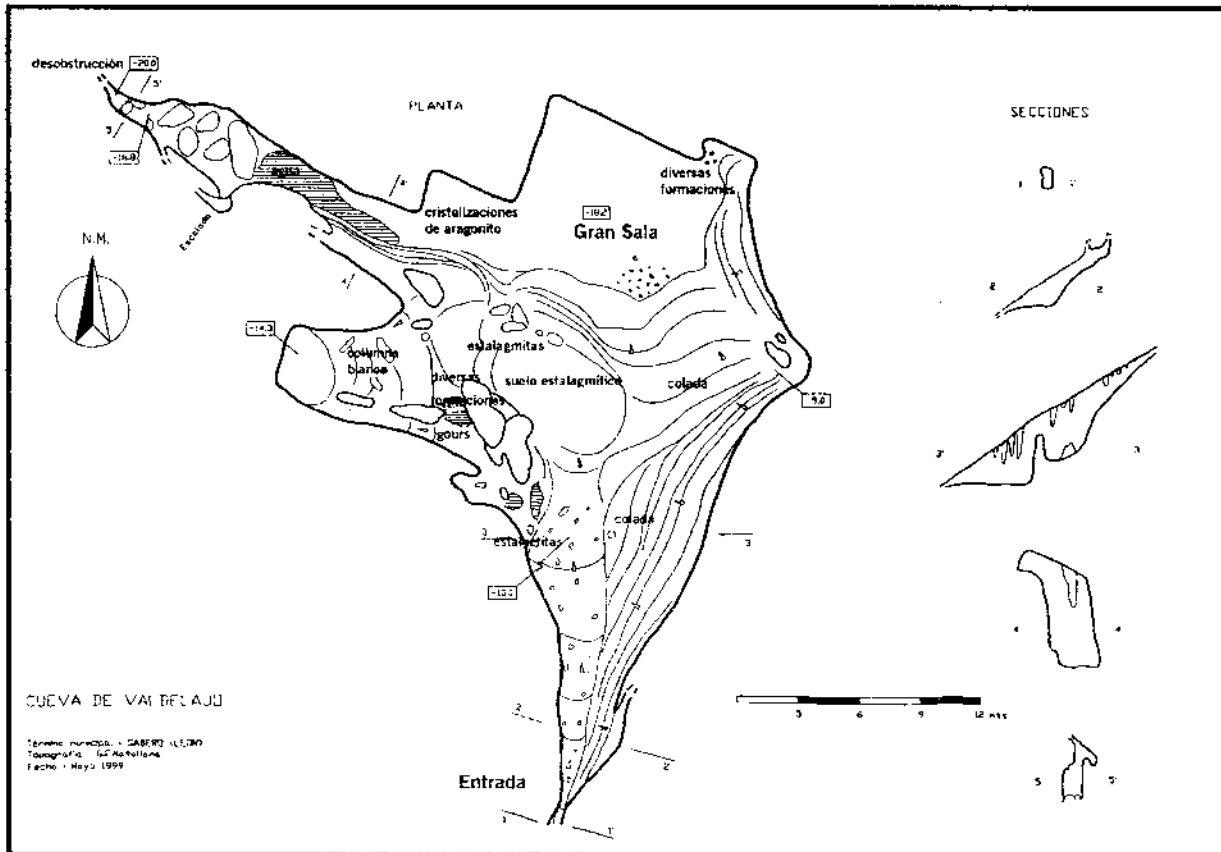
Esta Gran Sala, tiene una forma triangular, formado uno de los lados la colada que acabamos de descender, otro la pared derecha (en el sentido de entrada de la Cueva), y el tercero la pared del fondo que nos conduce hacia la continuación de la cavidad. El suelo de esta sala está cubierto igualmente con una colada estalagmítica, siendo sensiblemente horizontal. Al fondo, siguiendo el sentido de nuestra marcha, hay un pequeño hueco, que se cierra a escasa distancia, que está adornado con estalactitas, macarrones y columnas y levantando la vista hacia la derecha, donde la pared está formada por una colada que desciende desde el techo, a unos 12 metros de altura, se pueden distinguir varios macarrones de una longitud inusual.

Al volver la vista hacia la izquierda vemos unas estalactitas forradas con cristales de aragonito, radiales al eje de la formación en que se apoyan, de gran delicadeza y brillo.

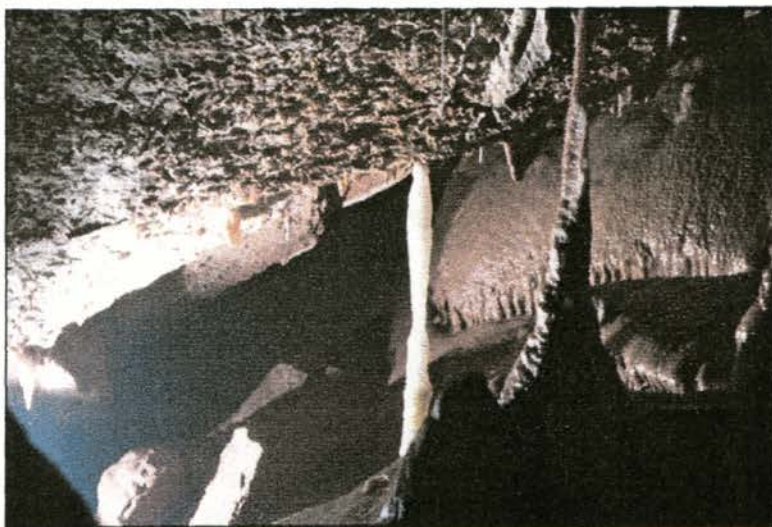
Continuando nuestro recorrido, el único camino que nos queda es hacia la izquierda, estrechándose la galería progresivamente, y donde aparecen a unos 10 metros, los primeros bloques que rompen la uniformidad del suelo, obligándonos a trepar por ellos. A poca distancia, la única posibilidad de continuación es a través de una estrecha grieta

Cueva de Valdelajo • Geomorfología

descendente que acaba cerrándose por medio de unas lajas desprendidas, pero que sin embargo nos permiten vislumbrar, hacia la derecha, una pequeña sala en la que no podemos penetrar y en cuyo suelo se aprecia una mandíbula, posiblemente perteneciente a un herbívoro que está cementada por una colada estalagmítica. Este paso fue objeto de una desobstrucción y, una vez forzado dio paso a una pequeña sala de 2x1,5 mts. que no dejaba posibilidad de continuación.



3. ESPELEOGÉNESIS



Columna blanca en el piso superior

En la cueva de Valdelajo se observa que la cavidad se desarrolla, fundamentalmente, en dos direcciones. La primera de ellas, a lo largo de los planos de estratificación, y la segunda, en dirección prácticamente perpendicular a ella, a lo largo de unas fallas, sensiblemente verticales, de escaso desplazamiento, cuyos planos son observables en el

fondo de la Gran Sala.



Formaciones de aragonito

Llama la atención al entrar en la cavidad el techo, que desciende de derecha a izquierda y hacia el fondo, siendo éste fundamentalmente liso. Presenta un buzamiento de unos 40°, en dirección 310° N, lo cual coincide con las medidas tomadas en el exterior de la

estratificación de la zona.

Las fallas que aparecen en el fondo de la Gran Sala, de las que se pueden observar tres planos, son prácticamente verticales y su dirección es sensiblemente perpendicular a los planos de estratificación, y se pueden relacionar con una familia de fallas que aparecen a nivel cartográfico algo más al Norte.

Por otra parte, toda la pared derecha de la cueva, siguiendo el sentido de entrada, está tapizada por una colada estalagmítica que desciende desde el techo, lo que sugiere un aporte de agua desde esa zona, siendo el suelo de la cueva, en el fondo de la Gran Sala, ligeramente descendente, en dirección perpendicular a esa colada y que coincide con la dirección que conduce a la gatera final y con la de las fallas observadas.



Gran estalagmita, y otras formaciones, en el piso superior.

Igualmente se aprecia que el suelo, desde la entrada actual, desciende, presentando una pendiente pronunciada, hasta el fondo de la Gran Sala, si bien existe un rellano a unos 5 mts. del fondo, tapizado por una colada, que desciende en el mismo sentido.

Todo ello nos sugiere que la cavidad se ha formado a favor de los planos de estratificación, favoreciéndose la ampliación de la cavidad por la existencia de las fallas que se han citado en el fondo de la repetida Gran Sala.

Los aportes de agua que han producido la disolución de la roca caliza y por lo tanto, responsables de la existencia de la cavidad, en este momento proceden de la parte derecha de la cavidad, ya que la formación de coladas en esa zona y el desnivel del suelo, así lo confirman.

Sin embargo, la rampa de entrada nos indica que también hubo, en su día, un aporte importante desde esa dirección, afirmación que se apoya igualmente en la destacable karstificación de la roca en lo que hoy es el exterior de la cueva y finalmente en la colada del rellano.

Queda otro aspecto que reseñar, que es la existencia de un estrato de unas margas de tono verdoso, observables en la parte de la gatera final de la cueva, y que afloran también en el exterior, en las cercanías de la boca actual, las cuales ha producido el desprendimiento de los bloques que aparecen en la parte de la gatera final y que también nos condicionan seriamente las posibilidades de continuación de la cavidad, ya que, debido a su buzamiento, se encuentran prácticamente al nivel del suelo, produciendo la colmatación de la galería y la imposibilidad de progresar por ella.

BIBLIOGRAFÍA

Mapa Geológico de la Provincia de León. E= 1:200.000
Instituto Tecnológico Geominero de España – Diputación de León (1.994)

Mapa Geológico de España. Hoja 105 –Riaño-. E= 1:50.000
Instituto Tecnológico Geominero de España (1.990)

LA CONSERVACIÓN DE LAS CUEVAS TURÍSTICAS DESDE LA PERSPECTIVA DE LA CLIMATOLOGÍA SUBTERRÁNEA

1. LA CONSERVACIÓN DEL MEDIO SUBTERRÁNEO

Esta excursión por la meteorología subterránea obedece a que es un factor fundamental en el microclima de una cavidad que, a su vez, es el condicionante de todo el ecosistema subterráneo. Como veremos más adelante, la modificación de los parámetros climáticos de una cueva, tanto por las instalaciones realizadas para adecuarla a las visitas turísticas: iluminación, nuevos accesos y aperturas hacia el exterior, etc., como por la propia presencia de los visitantes, puede llevar al extremo de propiciar la destrucción de aquello que motivó su apertura al público: la decalcificación o la corrosión de los espeleotemas y, lo que es más grave en el caso de las grutas con arte parietal, el deterioro de las pinturas rupestres, como lo demuestran, por desgracia, los casos de Lascaux (Francia) y de Altamira (España).

El tema ha venido preocupando a las autoridades culturales de algunos países y desde la UNESCO se han hecho recomendaciones al respecto. En nuestro ámbito federativo, la UIS (Unión Internationale de Spéléologie) cuenta con una Comisión de Cuevas Turísticas (aménagées). Por lo que respecta a nuestro país existe un limitado interés por esta cuestión pues, mención a parte a la urgente e inaplazable intervención de la Administración en el caso de la Cueva de Altamira, no parece existir mayor preocupación, salvo por parte de algunos estudiosos del asunto. (ERASO, 1969, 1972, 1981; FERNÁNDEZ et al., 1989; HOYOS et al., 1989 y LÓPEZ et al., 1989)

Cada cueva es un mundo diferente y de extrema complejidad derivado de los intercambios atmosféricos con el exterior (ventilación), y de los fenómenos de condensación, desecación y corrosión o cristalización, asociados. Existen, pues, dos fenómenos inter dependientes: por un lado los estrictamente meteorológicos y, por el otro, los de corrosión o cristalización química. Ambos, a su vez, interaccionan con los procesos biológicos.

2. LA CIRCULACIÓN DEL AIRE EN LAS CAVERNAS

A nadie se le escapan las notables diferencias existentes entre el medio ambiente subterráneo y el exterior. Por un lado una ausencia casi absoluta de radiación, que implica la existencia de mecanismos de difusión, frente a las turbulencias que se generan en el exterior; una elevada y constante humedad relativa en el medio, frente a la variabilidad exterior; una temperatura prácticamente constante en el tiempo, frente a las frecuentes variaciones del exterior y, finalmente, una gran inercia climática frente a los influjos perturbadores como consecuencia del alto contenido energético (entalpía) derivado de su elevado contenido en vapor de agua.

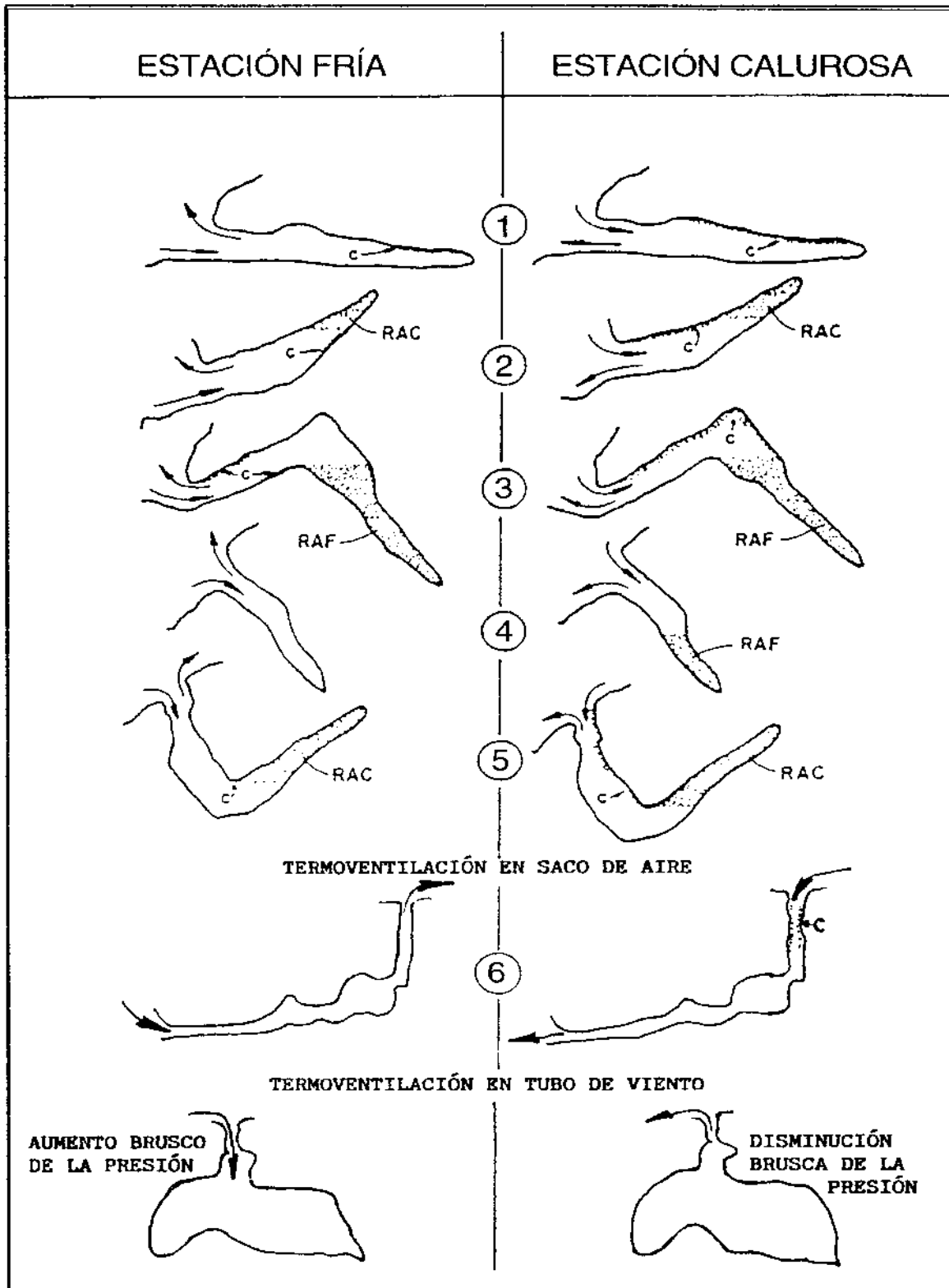
Las cuevas que nos son accesibles, por el mero hecho de serlo, disponen de una o varias bocas de acceso. A través de estas entradas se producen intercambios de masas de aire entre el interior y el exterior de la cavidad; a veces por fisuras impenetrables. (TROMBE, 1947, 1952; GÈZE, 1965; ERASO, 1969 y ANDRIEUX, 1981).

Cuando solamente existe un acceso a la gruta, los intercambios de masas de aire se realizan en base a la diferencia de densidades del aire interior de la cueva y del exterior. El aire más frío resulta, por tanto, más denso y tiende a depositarse en las partes más bajas. También puede producirse el intercambio atmosférico como consecuencia del brusco descenso de la presión atmosférica exterior, lo que ocurre frecuentemente con la presencia de un frente nuboso. En el primer caso hablamos de termocirculación (o termorrespiración) en saco de aire y, en el segundo, de barorrespiración (o barocirculación).

Cuando la cueva dispone de más de un acceso, aunque sean fisuras impenetrables al hombre, situados a diferente altitud, se produce una ventilación forzada que depende de la diferencia de cotas entre las bocas inferior y superior de la cavidad, y de las diferencias de temperatura del aire interior y exterior de la gruta, produciéndose la termocirculación en tubo de viento. Es el mismo principio por el que "tira" una chimenea.

Se pueden producir, y de hecho se producen, otros procesos que se superponen a los anteriormente explicados, causados por la acción directa del viento exterior: Por un lado, el efecto que podríamos llamar de "pistón", que se produce en aquellas circunstancias en que el viento sopla frontalmente contra la boca de la cueva, empujando a las masas de aire hacia el interior. Por otro lado, el efecto *venturi*, que se desarrolla cuando el viento circula paralelo al suelo (en el caso de las simas) o paralelo a la pared (en el caso de las cuevas), creando una depresión atmosférica y, en consecuencia, produciendo una absorción de las masas de aire del interior de la cavidad hacia el exterior.

Con el fin de simplificar la exposición y evitar enojosas explicaciones, se puede observar en las figuras adjuntas las diferentes formas se produce la ventilación de las cavidades subterráneas dependiendo de las estaciones o, quizás debiera decir con mayor precisión, dependiendo de que la temperatura del aire interior de la gruta sea inferior, o superior, a la temperatura del aire exterior.



REGÍMENES DE CIRCULACIÓN DEL AIRE EN LAS CUEVAS

LEYENDA

- c - Zonas de condensación
- RAC - Reserva de aire caliente
- RAF - Reserva de aire frío

2.1. El fenómeno endotérmico de la mezcla de dos masas de aire con diferentes contenidos de humedad

La mezcla de dos masas de aire con diferentes características climatológicas tiene lugar bajo las siguientes condiciones:

- A)* Aire proveniente del exterior, con temperatura y humedad muy variables, dependiendo de las estaciones.
- B)* Aire de la cueva, más inerte, de temperatura prácticamente constante y humedad relativa próxima a la saturación.

Intuitivamente pudiera pensarse que la mezcla de dos masas iguales de aire, de temperaturas y humedades relativas diferentes, daría como resultado una masa doble de aire con temperatura y humedad relativa resultantes del promedio de los valores iniciales. No obstante es lo cierto que los hechos demuestran lo contrario. La humidificación del aire es endotérmica (absorbe calor). El aire exterior que penetra en una cueva se humidifica lentamente y, en consecuencia, se enfría mientras que el aire interior mantiene su temperatura prácticamente invariable, pues la humedad cedida se recupera rápidamente por el goteo constante.

La humedad del aire es proporcional a su temperatura y, puede suceder que el aire exterior sobrepase ese límite, conforme se enfría al humedecerse. En tal caso el vapor de agua sobrante cambia de estado, entrando en la fase líquida, apareciendo el fenómeno de la condensación. Si las condiciones son más rigurosas puede dar lugar a la formación de hielo. (ABEL, 1953).

La evaporación del agua y la humidificación del aire son, por consiguiente, fenómenos endotérmicos, como ya dejamos señalado. Si una porción de agua está expuesta a la acción de una corriente de aire no saturado de humedad, el agua se evapora absorbiendo calor (calor latente de vaporización). Tal evaporación produce un enfriamiento, tanto del agua como del aire, cuando esto ocurre pueden suceder dos cosas:

- A)* Que el aire esté a mayor temperatura que el agua. En tal circunstancia se llega al equilibrio cuando el calor tomado por el agua es igual al calor latente del vapor que se forma.
- B)* Que el agua esté a mayor temperatura que el aire. En este caso el enfriamiento de la primera es más rápido, pero la temperatura no disminuye indefinidamente. Cuando la temperatura es bastante baja, el vapor de agua existente en el aire es condensado en agua, lo que equivale a un suministro de calor. Cuando el calor producido por la condensación de la humedad del aire es igual al calor que el aire toma por convección, se llega al equilibrio.

Ambas condiciones de equilibrio son idénticas y corresponden a la temperatura de saturación adiabática. (ERASO, 1965).

3. LA CORROSIÓN Y EL CLIMA SUBTERRÁNEO

La corrosión química de la caliza, en relación con el clima subterráneo, en principio, viene ligada a los cambios de estado del agua, que se producen en los intercambios de las masas de aire interior y exterior de las cavernas, en presencia de anhídrido carbónico. Dicho esto, no podemos dejar en el olvido otros elementos agresivos como son: los ácidos húmicos y los otros productos, igualmente ácidos, que se generan en complejas reacciones químicas (tipo red-ox) derivadas de las propias impurezas (iones oxidables) de la roca caliza, cuando es corroída. (ERASO, 1965).

La presencia en la atmósfera de una determinada cantidad de anhídrido carbónico (normalmente determinada por su presión parcial establecida conforme la Ley de DALTON), determina la cantidad de este gas que puede ser disuelto en el agua y, en consecuencia, en que ésta resulte más o menos agresiva frente a la roca caliza o al cristal de calcita. La solubilidad de un gas en un líquido viene determinada por la Ley de HENRY: Es directamente proporcional a la presión que dicho gas ejerce sobre el líquido, e inversamente proporcional a la temperatura. Como corolario cabe decir que a mayor presión parcial de CO₂, mayor capacidad de disolución de la roca e, igualmente mayor, cuanto más baja sea la temperatura del agua. (Paradójicamente, en los climas cálidos se produce una mayor corrosión derivada de la mayor concentración de CO₂ a nivel del suelo, producida por la vegetación, amén de la abundante presencia de ácidos húmicos).

Cuando se produce una variación en la concentración del CO₂ atmosférico, se pone en marcha toda una cadena de equilibrios sucesivos: En primer lugar, y como ha quedado dicho, una cadena de equilibrio físico entre la presión parcial del anhídrido carbónico en la atmósfera y su concentración en la solución acuosa. En segundo lugar una cadena química cuya velocidad de evolución está condicionada por la cinética de las reacciones químicas. Finalmente, en tercer lugar, una cadena cristalográfica de disolución / cristalización del carbonato cálcico. (ROQUES, 1961, 1962, 1963, 1964, 1965, 1968 y 1969; GIROU et al., 1969; STCHOUZKOI-MUXART, 1971).

Resumiendo, cuando la presión parcial del CO₂ en el aire de una caverna es baja, se disuelve en el agua condensada sobre las paredes, en poca cantidad, por lo que la capacidad de corrosión química del agua queda bastante limitada. Es más, si el agua infiltrada en la gruta tiene una mayor concentración de anhídrido carbónico que la atmósfera, aquel se liberará hacia ésta, produciéndose depósitos cristalinos de carbonato cálcico. Cuando el fenómeno se invierte, se produce corrosión.

3.1. Los diferentes tipos de corrosión

La corrosión podemos reducirla a tres tipos diferentes, si la relacionamos con la conservación del medio subterráneo (CAUMARTIN, 1964): La corrosión fisicoquímica, la corrosión bioquímica ligada a la fermentación de aportes orgánicos no dependientes de la luz, y la corrosión bioquímica ligada a la presencia de vegetales clorofílicos. A estos "clásicos" tipos de corrosión debemos añadir la corrosión *geomicrobiana*, de la que nos ocuparemos al final.

3.1.1. La corrosión fisicoquímica

En primer lugar tenemos la corrosión fisicoquímica. Este tipo de corrosión está ligada a la presencia de sustancias químicas que tienen la propiedad, bien de disolver el carbonato cálcico (principal constituyente de la roca caliza y, por supuesto, de los cristales de calcita y aragonito) en el agua (por ejemplo el anhídrido carbónico, del que hemos hablado en los párrafos anteriores); bien el de destruirlo mediante una neutralización química (como en el caso de la presencia de ácidos húmicos, ácido nítrico, etc.); o bien facilitar su suspensión en la fase líquida con finas partículas separadas de la superficie madre y, por tanto, acelerar su evacuación y puesta al descubierto de superficies sanas de la roca que son objeto, a su vez, de degradación. (Es el caso del amoníaco y de los compuestos amoniacales). Quedan eliminadas de esta catalogación aquellas sustancias que son ajenas a la cavidad.

Podemos decir que el anhídrido carbónico, al igual que los ácidos húmicos, el ácido nítrico y los compuestos amoniacales son de origen orgánico y, consecuentemente, reducir todo ello a una corrosión bioquímica. En realidad los ácidos húmicos y nítrico, y los compuestos amoniacales intervienen sobre los lugares en que se producen. El anhídrido carbónico, por el contrario, se produce, tanto por fermentaciones de materia orgánica en el interior de las cuevas, como es introducido por las aguas de infiltración en la espelunca. La formación de una concreción cristalina supone la precipitación de carbonato cálcico y el desprendimiento de anhídrido carbónico hacia la atmósfera, existiendo, en las cuevas abiertas al turismo, otro elemento productor de CO₂: la respiración de los visitantes. Por lo expuesto relacionaremos la corrosión fisicoquímica con el anhídrido carbónico, fundamentalmente.

En la red de fisuras, que alimenta los espeleotemas, se observa una disminución de la presión parcial del anhídrido carbónico, en función de la profundidad de circulación (ROQUES, 1963). Consecuentemente, cuando las aguas de infiltración alcanzan una cavidad subterránea, salvo contadas circunstancias, no son ya agresivas. No obstante, con cierta frecuencia, el anhídrido carbónico presente en la atmósfera de la cueva es susceptible de intervenir y hacer agresiva a la delgada capa de agua formada por condensación sobre alguna pared de la gruta. Cuando sobre la pared circula una película de agua de continuo, ésta limita considerablemente el intercambio

de gases en la interfase agua - atmósfera y, en consecuencia, las trazas de corrosión son eliminadas por cristalización.

Así, la pared sobre la que circula una película de agua nunca presenta trazas de corrosión fisicoquímica, con la sola excepción de aquellos períodos extraordinariamente secos. Sobre la pared húmeda, o aquella que está seca, los efectos de la corrosión fisicoquímica se suman a los de la corrosión bioquímica. Sobre una pared seca la corrosión fisicoquímica deja aparecer un depósito pulverulento blanquecino.

3.1.2. La corrosión bioquímica

Respecto a la corrosión bioquímica, a fin de facilitar la comprensión del problema, conviene hacer una distinción entre aquella ligada a la fermentación de aportes orgánicos de origen variado y correspondiente a un procesos sobre el que la iluminación de la cueva no ejerce papel alguno, incluso indirectamente, y aquella otra que está vinculada exclusivamente a la presencia de vegetales clorofílicos y a la humidificación *in si tu* de sus tejidos muertos, pues no pueden existir más que en una cavidad donde se mantienen condiciones de iluminación mal, o en absoluto, estudiadas y propicias para el desarrollo de estos vegetales.

3.1.2.1. La corrosión ligada a la fermentación de aportes orgánicos independientes de la luz

Pues bien, los aportes orgánicos sin dependencia de la luz están constituidos principalmente de compuestos orgánico-cálcicos elaborados por la acción de microorganismo a nivel de las capas podológicas, llevados hacia la cueva por la red de estrechos conductos y fisuras de la roca, y concentrados sobre las paredes gracias a procesos de evaporación. Los restos de animales y plantas transportados por las corrientes de aire y depositados sobre las paredes, bien húmedas, bien secas, pero susceptibles de humedecerse por condensación, intervienen igualmente. Cuando la cavidad está abierta a las incursiones turísticas, las fuentes contaminantes se ven incrementadas por el polvo y los desperdicios que siempre dejan, tras de sí, los visitantes, cuando no los animales domésticos que les acompañan.

Las fermentaciones que se producen en contacto con la roca, o con las formaciones cristalinas, dan lugar a la formación de un *humus* grisáceo, que se mineraliza muy rápidamente en las condiciones, casi constantes, de humedad, temperatura y pH de las cuevas, rico en aminoácidos caracterizados por la presencia de dos grupos químicos orgánicos: Uno el NH_2 , que evoluciona a amoníaco, otro el COOH , ácido, responsable de la movilización del calcio presente en el substrato. Aparecen igualmente los compuestos orgánico-cálcicos y los nitratos, como consecuencia de la liberación de compuestos amoniacales. Diversos mecanismos de corrosión están íntimamente

ligados a estas transformaciones:

A) En contacto con las concreciones, la desorganización de la calcita y del conjunto mineral al que aquella aparece asociada, conlleva a la formación de un *Mondmilch* calcítico.

B) Los óxidos metálicos, en especial el férrico y el manganésico, (fundamentalmente el primero) son reducidos químicamente en presencia del anhídrido carbónico, lo que permite la difusión (posteriormente la desaparición) de los pigmentos de las pinturas prehistóricas. Esta desaparición funciona, igualmente, bajo la acción de partículas procedentes de otros focos de corrosión, factor éste frecuentemente olvidado.

C) La nitrificación de los compuestos amoniacales, arrastrados por las corrientes de agua, da lugar a la formación de nitratos cuya neutralización se verifica a expensas de la calcita de los *gours*, los lagos naturales, cuya existencia depende de un revestimiento impermeable de calcita, que devienen porosos y se vacan. Ello conlleva a una modificación de la humedad y de la temperatura de la cueva, que son factores de conservación del ecosistema subterráneo.

D) Finalmente, como ya dejamos señalado, la presencia de compuestos amoniacales facilita la puesta en suspensión y el transporte de las partículas desprendidas por la corrosión, favoreciendo así la progresión en profundidad de las fermentaciones.

Es preciso, pues, insistir sobre el peligro de explotación irracional de una cueva; sobre la importancia de los estudios previos a cualquier instalación (el tan manido estudio de impacto ambiental) y sobre el mantenimiento integral, en algún caso mejora, del circuito original de circulación del aire.

3.3.2.2. La corrosión vinculada a la presencia de vegetales con clorofila

Respecto a este tipo de corrosión vinculada a la presencia de vegetales clorofilicos y a la humidificación *in si tu* de sus tejidos muertos, debemos indicar que su efecto es menor que el correspondiente al tipo anteriormente explicado, pese a la sensibilización que, en su día, tuvo el público en general, a través de los medios de comunicación (especialmente en Francia) al hablar de la "enfermedad verde" de las pinturas de Lascaux.

Es evidente que el desarrollo de las algas ejerce una acción directa sobre la roca carbonatada y, en su caso, el pigmento de las pinturas. Dichos organismos, esencialmente acuáticos, se desarrollan en presencia de luz en la película de agua que recubre

la roca o los espeleotemas, alimentándose con los elementos minerales de dicho substrato, de tal forma que las células vivientes utilizarán la solución mineral formada activando su reproducción.

Por otro lado, los procesos de humidificación que aparecen sobre las células muertas, reproducen los fenómenos de corrosión tratados en el apartado anterior, incluyendo la reducción de los óxidos metálicos.

Centrándonos, por su especial interés, en la degradación de las pinturas rupestres por la acción directa de las algas, pueden vislumbrarse diferentes enfoques: Puede formarse, conforme la hipótesis generalmente admitida, un chelato de hierro (es decir una combinación soluble entre un compuesto orgánico sintetizado por el vegetal y el hierro en estado férrico), de manera que el óxido de hierro sería, así, eliminado de los pigmentos de las pinturas. Asimismo se puede hacer intervenir un compuesto intermedio: el sulfuro de hierro, que es un fenómeno perfectamente reproducible experimentalmente en el laboratorio y puesto de manifiesto en numerosos hechos observados. Así, en los intercambios minerales aparecen, a nivel de la membrana celular del alga, en el medio reductor que forma, iones sulfuro que reducen el óxido férrico y lo transforman en sulfuro ferroso insoluble (provisionalmente inmovilizado). Posteriormente el CO₂ eliminado por el vegetal provoca un equilibrio carbonatado clásico y el sulfuro de hierro, en su presencia, es descompuesto en bicarbonato ferroso y sulfato de calcio, ambos solubles y asimilables por el vegetal.

Igualmente se deben tomar en consideración los compuestos carbónicos excretados por el alga ya que el hierro, en su presencia, sería reducido al estado de bicarbonato ferroso asimilable por el vegetal.

Por otro lado resulta totalmente imposible evitar el aporte de esporas. Evidentemente es la propia ventilación natural de la cueva el origen de tal contaminación sobre las paredes húmedas, cuando no son transportadas por los visitantes.

En relación con la naturaleza de la evolución de las poblaciones al amparo de la fotosíntesis artificial, de la que depende, lógicamente, cualquier posterior intervención, podemos establecer los siguientes pasos:

1°. En un primer momento se presenta una implantación de algas, fundamentalmente algas verdes. Las especies encontradas son, en su mayoría, unicelulares, lo que explicaría, en cierta medida, la rapidez de la expansión de las colonias. En este primer estadio, salvo que las pinturas estén recubiertas, no existen perturbaciones esenciales, pues el sustrato no ha sido penetrado y los efectos de la corrosión bioquímica son muy limitados.

2°. En el segundo paso de la evolución, sobre el soporte orgánico, creado por las algas, aparece toda la microflora de la humidificación y de la mineraliza-

ción: Bacterias, actinomicetos, mohos, etc.. La pared toma un aspecto oscuro fácilmente apreciable y todos aquellos procesos de corrosión del segundo tipo, anteriormente explicado, se reproducen. La movilización de los elementos minerales necesarios en las fermentaciones ocurren tanto en profundidad como en superficie, asegurando una desorganización de la capa superficial de la roca y preparando el terreno para la implantación de vegetales más complejos. La película de *humus* se desprende fácilmente, dejando al descubierto un soporte de aspecto terroso. En este estadio se impone un tratamiento vigoroso (se trate de espeleotemas de interés especial o pinturas rupestres). Es preciso tal sacrificio para destruir un foco de contaminación y de materia orgánica, debiendo procederse mediante un rascado meticuloso y una no menos cuidada desinfección.

3°. En el tercer estadio, sobre la capa de *humus*, precedentemente preparada y su correspondiente sustrato terroso, se implantan los musgos y helechos. La formación así atacada no tiene nada en común con la cueva: Los filamentos rizoides de los musgos y las raíces de los helechos se infiltran en la fisuras de la roca; la corroen, y preparan su dislocación. Es preciso subrayar que frecuentemente se observa, en la penumbra de la entrada de las cuevas, sobre las paredes húmedas y el soporte terroso, la presencia de *Hepáticas*, que nunca aparecen en las partes iluminadas y fuertemente degradadas del interior de la cueva, propiamente dicha. Parece que cuatro factores preludian aquí a la implantación de los vegetales superiores sobre la *facies* de corrosión en estado terroso: La humedad, la cualidad del espectro luminoso, la riqueza en calcio del medio, y un pH estrechamente tamponado por los equilibrios carbonatos - bicarbonatos.

Lo expuesto muestra que la evolución de los vegetales clorofílicos sobre un soporte calcítico, en una cueva iluminada, obedece a un proceso bien establecido, que es importante conocer y que, en un primer paso, corresponde siempre a la implantación de algas. Una atenta vigilancia permite intervenir a tiempo y en las mejores condiciones, evitando así importantes degradaciones. La iluminación inadecuada de una cueva puede hacer aparecer musgos y helechos sobre los sedimentos y, en tales circunstancias, es de todo punto importante impedir, a cualquier precio, un desarrollo generador de esporas contaminantes.

Señalemos, finalmente, lo deseable que resulta utilizar, para la iluminación, una serie de filtros que eliminen del espectro de la luz las longitudes de onda que favorezcan la fotosíntesis de las algas verdes que se desarrollan en las cuevas. ¡Pero cuidado! Antes de ejecutar un proyecto de filtrado de la luz para uso en una cueva turística, se deben estudiar muy cuidadosamente las experiencias y ensayos ya realizados, pues es posible que la eliminación de una especie conduzca a favorecer el desarrollo de otra.

3.1.3. La corrosión geomicrobiana.

Históricamente se ha venido reconociendo la presencia de microorganismo (bacterias) en determinados tipos de formaciones "podridas" y en el *Mondmilch*, atribuyéndoseles un papel destacado en la génesis de tales formaciones. No obstante, en los últimos años, han sido estudiados determinados depósitos coloreados (fundamentalmente en negro y rojo, que podrían confundirse con pinturas rupestres) sobre superficies totalmente libres de agua en circulación. (DRUET, 1993)

Las pátinas observadas son ferralíticas (rojo) o manganeso-ferruginosas (negras). En su formación intervienen: el agua proveniente del vapor saturante del aire de la cavidad, como agente metabólico; el carbono, procedente, tanto del anhídrido carbónico, como de la roca caliza y, finalmente, ciertas bacterias que reciben el nombre de *geomicrobianas*. Estas bacterias, reunidas en colonias, se desarrollan metabolizando los metales presentes como impurezas en la roca caliza, constituyendo su recurso energético, sin necesidad alguna de fotosíntesis.

En otros tipos de depósitos interviene el agua, en fase líquida, no como vapor, en su ciclo de formación. El proceso tiene lugar en tres fases:

A) En primer lugar las bacterias ferralíticas se desarrollan extrayendo energía mediante la oxidación de las sales ferrosas a férricas, provocando una continua disolución del metal.

B) En una segunda fase, bacterias parásitas se desarrollan sobre las cepas iniciales que han fijado el hierro, destruyéndolas por un proceso de sulfo-reducción, y liberando el metal retenido en la estructura bacteriana de partida, con formación de sulfuro de hidrógeno. Esta transformación se lleva a cabo en anaerobiosis y en presencia de materia orgánica.

C) Finalmente, las colonias parásitas sin asimismo destruidas por una tercera familia bacteriana que transforma la materia orgánica de la cepa precedente y detiene el ciclo que ha permitido la fijación de una microcapa de metal de orden monomolecular. A partir de este estadio puede recomenzar un nuevo ciclo permitiendo, a su término, la fijación de pátinas de algunas micras de espesor.

Se ha podido establecer que las cristalizaciones de hierro metálico se organizan orientadas según el campo magnético terrestre del lugar y momento, lo que en un futuro podría permitir dataciones absolutas precisas en el arte parietal.

4. DATOS METEOROLÓGICOS DE LA CUEVA DE VALDELAJO

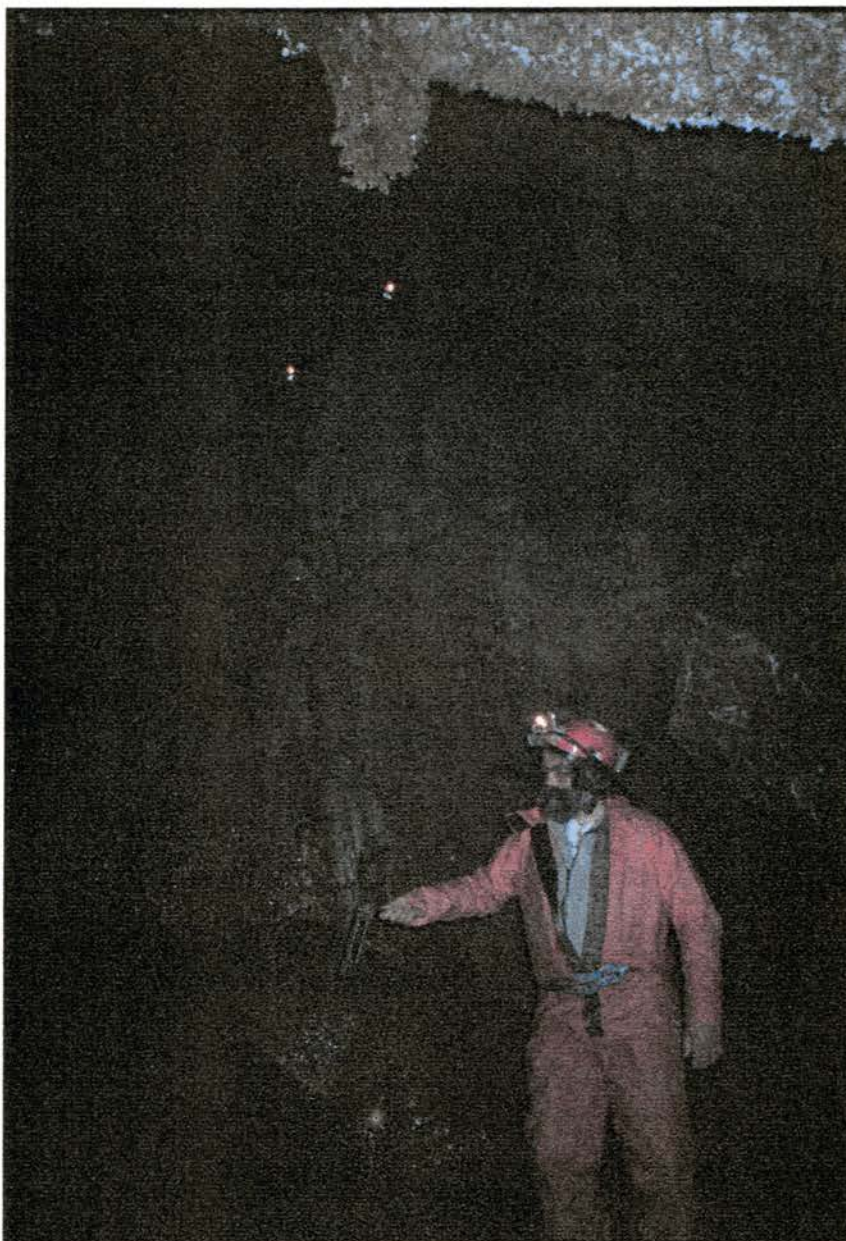
4.1. Sobre el método seguido en la toma de datos

Dado el poco tiempo disponible para la elaboración del presente trabajo se han realizado únicamente dos series de mediciones, durante los días uno y veinte de mayo de 1999, tanto en el exterior como en el interior de la gruta, consistentes en la determinación de la temperatura seca y húmeda auxiliados de un psicrómetro del tipo de "carraca", dotado de dos termómetros de mercurio, previamente calibrados, con escala en grados centígrados, con marcas cada 0,2 °C (apreciándose la décima de grado), lo que nos permite, además de determinar la temperatura, calcular la humedad, tanto absoluta como relativa.

El método consiste en voltear o girar el psicrómetro durante algún tiempo, hasta que las lecturas de ambos termómetros se estabilicen. El bulbo del termómetro que llamamos húmedo se encuentra envuelto en una gasa o muselina empapada en agua destilada; si el ambiente se encuentra no saturado en humedad, el agua se evapora, lo que produce un descenso en la temperatura del referido termómetro. Comparando las temperaturas de ambos termómetros, seco y húmedo, podemos calcular el contenido de humedad en el aire.

En la tabla siguiente aparecen reflejadas las diferentes mediciones realizadas con el instrumental antedicho:

ESTACIÓN	DÍA 01 DE MAYO DE 1999			DÍA 20 DE MAYO DE 1999		
	TEMPERATURA Seca / Hú- meda	PRESIÓN DE VAPOR mm de Hg Seco / Húme- do	HUMEDAD RELATIVA %	TEMPERATURA Seca / Hú- meda	PRESIÓN DE VAPOR mm de Hg Seco / Húme- do	HUMEDAD RELATIVA %
Exterior	13,4/10,9	11,533/9,781	84,8	10,2/8,0	9,336/8,045	86,8
A 3 m. inter.	11,2/11,2	9,979/9,979	100	11,7/11,5	10,316/10,181	98,6
A mitad rampa	11,6/11,6	10,248/10,248	100	11,4/11,4	10,114/10,114	100
Balcón	11,6/11,5	10,248/10,181	99,3	11,4/11,4	10,114/10,114	100
Fondo	11,2/11,2	9,979/9,979	100	11,1/11,1	9,911/9,911	100
Pasillo	11,2/11,2	9,979/9,979	100	11,1/11,1	9,911/9,911	100
Bloque	11,2/11,2	9,979/9,979	100	11,2/11,2	9,911/9,911	100
Gatera final	11,0/11,0	9,844/9,844	100	10,9/10,9	9,816/9,816	100



Toma de datos con el psicrómetro en la parte inferior de la Gran Sala, donde se encuentran las espectaculares formaciones de aragonito

4.2. Análisis de los resultados

La cavidad consiste en una especie de fondo de saco descendente que, durante la estación cálida, está ocupada por una reserva de aire frío que, desde los primeros metros de la entrada presenta una humedad relativa prácticamente del 100 %; es decir completamente saturado. Esta elevada humedad es la causante del altísimo nivel energético del aire subterráneo (entalpía) que proporciona una elevada inercia térmica al medio; es decir pocas variaciones de temperatura. Esto lo hemos podido comprobar en las sucesivas visitas realizadas en la cavidad que no han producido aumento apreciable de la temperatura atmosférica de la misma. **Lo que sí resulta más problemático es la creación de gérmenes de condensación cuando el número de personas supera las ocho, lo que provoca la presencia de una persistente neblina dentro de la cueva.**

Esta última circunstancia agrava el problema de la condensación del vapor de agua sobre las agujas de aragonito que adornan el fondo de la sala principal de la cueva. Entre estas acículas aparecen gotas de agua procedentes de la condensación. Algunas de las formaciones aparecen “descompuestas”, habiendo sido sustituido el cristal de *aragonito* por *mondmilch*, una sustancia blanquecina de aspecto pulverulento, más o menos humedecida. El problema de la “descomposición” de las formaciones, nos tememos, irán en aumento debido a que el mineral de aragonito se encuentra fuera del dominio de estabilidad termodinámica, tal y como intentaremos establecer a continuación.

4.3. Consideraciones acerca de la estabilidad del aragonito

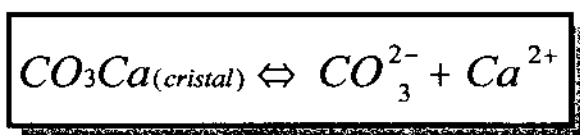
El *aragonito* es una variedad polimórfica del carbonato cálcico que cristaliza en el sistema ortorrómbico (la otra variedad, la calcita, cristaliza en el sistema romboédrico). Sus cristales presentan formas de prismas pseudo hexagonales, acículas y maclas.

Como veremos más adelante, en las condiciones ambientales ordinarias de presión y temperatura, la variedad estable del carbonato cálcico es la calcita, siendo, por tanto, el aragonito teóricamente inestable. No obstante podemos observar la cristalización del aragonito en tales condiciones normales (como en el caso que nos ocupa en la Cueva de Valdelajo): se trata de una *síntesis metaestable*; es decir, la formación de un mineral fuera de su dominio de estabilidad.

Trataremos de exponer, a continuación, y dar respuesta a determinadas cuestiones relativas a las referidas dos variedades polimórficas del carbonato de calcio, en particular sobre su solubilidad, sus condiciones de génesis y su transformación recíproca y estabilidad.

4.3.1. La solubilidad de los carbonatos de cal en el agua pura

Esta disolución puede esquematizarse mediante la reacción:



(1)

suponiendo una solución totalmente ionizada.

Se pueda aplicar al cristal en equilibrio con su solución saturada la *Ley de Acción de Masas* relativa a los sistemas heterogéneos:

$$a_{CO_3^{2-}} \cdot a_{Ca^{2+}} = K_1$$

(2)

en donde K_1 es la constante de equilibrio respecto a las *actividades* químicas. En esta caso dicha magnitud representa lo que se llama producto de solubilidad del carbonato, que se puede calcular fácilmente a partir de la ecuación:

$$\ln K_1 = - \frac{(\Delta G)_T^p}{RT}$$

(3)

en donde $-\frac{(\Delta G)_T^p}{RT}$ es la variación en la reacción de la *entalpía libre* que, calculada para las condiciones standard

$$\begin{aligned} (\Delta G)_{298}^0 &= +11404 \text{ cal / mol (calcita)} \\ (\Delta G)_{298}^0 &= +11055 \text{ cal / mol (aragonito)} \end{aligned}$$

de donde deducimos el valor de K_1 en condiciones de una atmósfera de presión y a 298 ° K (aproximadamente 25 ° C) de temperatura:

$$\begin{aligned} K_1 &= 10^{-8,36} \quad (\text{calcita}) \\ K_1 &= 10^{-8,17} \quad (\text{aragonito}) \end{aligned}$$

Destaquemos que, si la solución es extremadamente diluida (lo que puede verificarse a posteriori) la ecuación (2) puede escribirse:

$$x_{CO_3^{2-}} * x_{Ca^{2+}} = (K_1)$$

(4)

Pero existe otra relación entre $x_{CO_3^{2-}}$ y $x_{Ca^{2+}}$ deducida de la condición de electroneutralidad del sistema; es decir:

$$x_{CO_3^{2-}} = x_{Ca^{2+}}$$

(5)

Se deduce de (4) y (5)...

$$x_{Ca^{2+}} = x_{CO_3^{2-}} = (K_1)^{1/2}$$

de donde, en condiciones normales:

$$\begin{cases} x_{Ca^{2+}} = 10^{-4,18} \text{ (calcita)} \\ x_{Ca^{2+}} = 10^{-4,08} \text{ (aragonito)} \end{cases}$$

(6)

Resulta útil, con objeto de clarificar los conceptos, calcular la cantidad de n_{CO_3Ca} (carbonato cálcico) disuelto, en moles por litro. Un litro de agua contiene $10^3/18$ moles y, cuando la solución es muy diluida, se obtiene, en primera aproximación:

$$x_{Ca^{2+}} = x_{CO_3^{2-}} = \frac{18n_{CO_3Ca}}{10^3}$$

y comparando con (6)

$$\begin{aligned} n_{calcita} &= \frac{10^{-1,18}}{18} \text{ moles / litro} \\ n_{aragonito} &= \frac{10^{-1,08}}{18} \text{ moles / litro} \end{aligned}$$

(7)

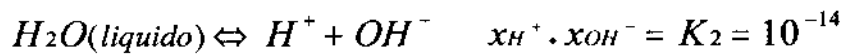
es decir: concentraciones del orden de 0,5 g / litro.

Debemos de tomar en consideración que el aragonito, fase inestable, es más soluble que la calcita. Es preciso resaltar que todos los resultados obtenidos concernientes al equilibrio



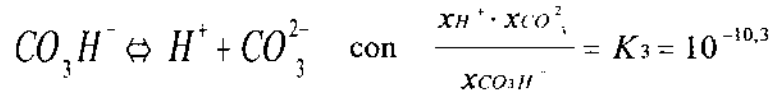
(1)

resultan sólo válidos en una primera aproximación. En efecto, sabemos que el agua pura se disocia débilmente según:

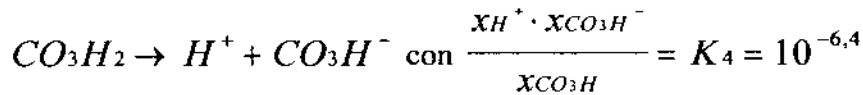


(8)

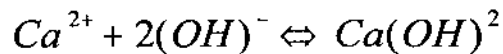
se obtienen así las tres reacciones posibles:



(9)



(10)



(11)

O expresado de otra manera: puede haber reacción entre los iones CO_3^{2-} y Ca^{2+} resultantes de la disolución del carbonato, y los iones H^+ y OH^- resultantes, a su vez, de la disociación del agua. De hecho la reacción (11) puede dejarse de lado pues siempre es casi total, en el sentido de derecha a izquierda. En cualquier caso, la toma en consideración de las ecuaciones (1), (8), (9) y (10) modifica un poco los resultados precedentes. El cálculo se desarrollará en el próximo párrafo; se encuentra así, para la disociación de los carbonatos en el agua pura:

$$\text{calcita: } x_{CO_3^{2-}} = 10^{-4,41}; x_{Ca^{2+}} = 10^{-3,95}$$

$$\text{aragonito: } x_{CO_3^{2-}} = 10^{-4,30}; x_{Ca^{2+}} = 10^{-3,87}$$

con una precisión que depende, esencialmente, de la correspondiente a las constantes de equilibrio; es decir, del orden de $10^{\pm 0,01}$.

4.3.2. La solubilidad de los carbonatos de cal en presencia de una atmósfera conteniendo CO_2

Vamos a continuar tratando un problema análogo al precedente, en este caso tomando en consideración la presencia del gas carbónico en la atmósfera (y en los suelos), situación que se presenta en el medio natural. Recapitulemos, en primer lugar, las reacciones a tomar en cuenta, así como las constantes de equilibrio, que se proporcionan siempre con relación a las condiciones standard de presión y temperatura; 1 atmósfera y 298 °K, respectivamente.

(1) Disolución del carbonato cristalizado: $CO_3Ca \Leftrightarrow CO_3^{2-} + Ca^{2+}$

$$K_1 = x_{CO_3^{2-}} \cdot x_{Ca^{2+}} = 10^{-8,36} \text{ (calcita) o } 10^{-8,17} \text{ (aragonito)}$$

(8) Disociación del agua: $H_2O \Leftrightarrow H^+ OH^-$

$$K_2 = x_{H^+} \cdot x_{OH^-} = 10^{-14}$$

(9) Disociación del ión bicarbonato CO_3H^- : $CO_3H^- \Leftrightarrow H^+ + CO_3^{2-}$

$$K_3 = \frac{x_{H^+} \cdot x_{CO_3^{2-}}}{x_{CO_3H^-}} = 10^{-10,3}$$

(10) Disociación del ácido carbónico CO_3H_2 : $CO_3H_2 \Leftrightarrow H^+ + CO_3^-$

$$K_4 = \frac{x_{H^+} \cdot x_{CO_3H^-}}{x_{CO_3H_2}} = 10^{-6,4}$$

(12) Disolución del anhídrido carbónico CO_2 : $CO_2 (gas) + H_2O (liq.) \Leftrightarrow CO_3H_2 (liq.)$

$$K_5 = \frac{x'_{CO_3H_2}}{CO_2} = 10^{-1,5}$$

Con objeto de clarificar el razonamiento, denominamos $x_{CO_3H_2}$ a la fracción molar del ácido carbónico procedente de la disolución del carbonato cálcico, y $x'_{CO_3H_2}$ a la fracción molar del ácido carbónico procedente de la disolución del anhídrido carbónico.

La constante de equilibrio K_4 (reacción 10) se escribe:

$$\frac{x_{H^+} \cdot x_{CO_3H^-}}{x_{CO_3H_2} + x'_{CO_3H_2}} = k_4 = 10^{-6,4}$$

(10')

Igualmente debemos considerar la electroneutralidad de la solución

$$2x_{Ca^{2+}} + x_{H^+} = x_{OH^-} + x_{CO_3H^-} + 2x_{CO_3^{2-}}$$

(13)

y los contenidos de iones carbonato procedentes de la calcita (o aragonito), ligados a la concentración de iones calcio mediante la relación:

$$X_{Ca^{2+}} = X_{CO_3^{2-}} + X_{CO_3H^-} + X_{CO_3H_2}$$

Disponemos en total de siete ecuaciones que nos permiten despejar las siete incógnitas:

$$X_{Ca^{2+}}, X_{CO_3^{2-}}, X_{CO_3H^-}, X_{CO_3H_2}, X^{'}_{CO_3H_2}, X_{H^+}, X_{OH^-}$$

eligiendo como parámetro la presión parcial del CO₂ en la atmósfera.

La resolución del sistema no presenta mayor dificultad teórica, salvo lo tedioso y laborioso del cálculo, así que, en mor de brevedad, nos contentaremos con facilitar los resultados de forma gráfica.

Las curvas de la figura 1 presentan la variación del pH de las soluciones en función de pCO_2 para la calcita y el aragonito.

Podemos observar que en ausencia de CO₂ atmosférico el pH está muy próximo a 10 (en concreto 9,95 para la calcita y 10,0 para el aragonito); permanece aún próximo a este valor para $pCO_2 < 10^{-3}$ atmósferas, para luego descender rápidamente y alcanzar 7 (solución neutra) para pCO_2 próxima a 0,1 atmósferas.

En la figura 2 volvemos a encontrar una situación análoga en lo concerniente a los iones CO₃H⁻.

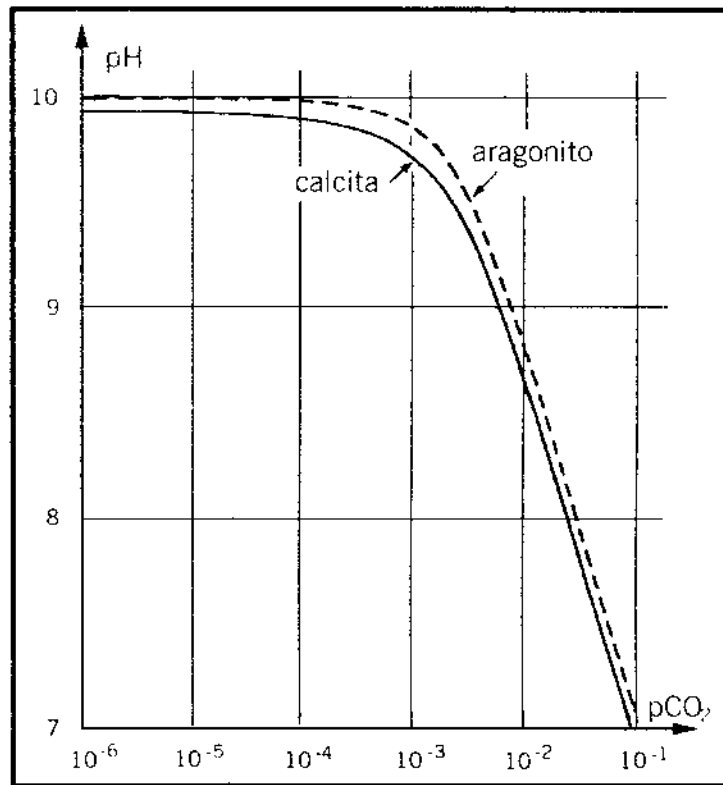


Figura 1. Presión parcial del CO₂ existente sobre el agua conteniendo calcita o aragonito en función del pH.

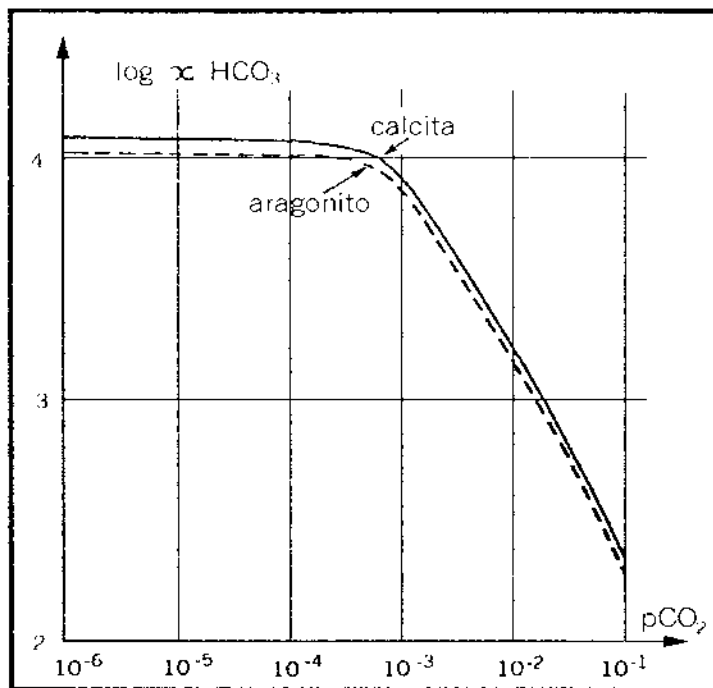


Figura 2. Concentración de iones bicarbonato en el agua conteniendo calcita o aragonito en función de la presión parcial del CO₂.

La figura 3 representa las variaciones de $x_{Ca^{2+}}$ y de $x_{CO_3^{2-}}$ en relación con pCO_2 . Éstas nos presentan con mayor nitidez la solubilidad de la calcita y del aragonito, puesto que $x_{Ca^{2+}}$ representa la suma total de la fracción de carbonato disuelto.

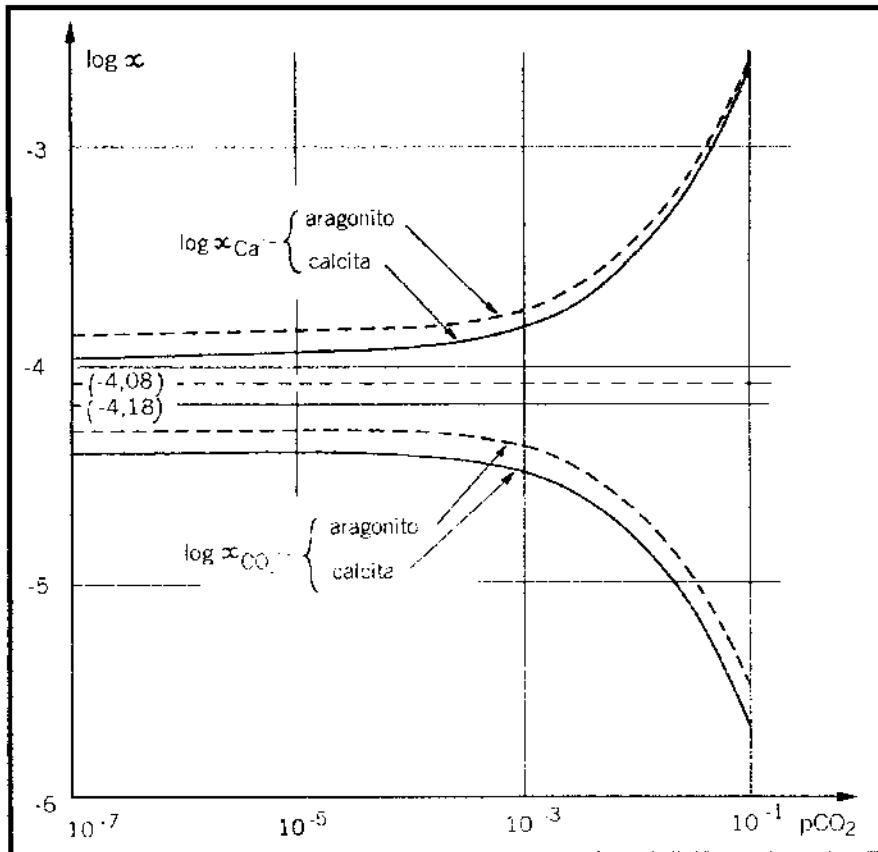


Figura 3. Solubilidad del aragonito y de la calcita en agua en función de la presión parcial del anhídrido carbónico.

Conviene resaltar el hecho aparentemente paradójico que el contenido de iones carbonato de la solución disminuye en tanto que aumenta la concentración de pCO_2 . Por el contrario, la solubilidad de los carbonatos aumenta con la presión parcial del anhídrido carbónico; la del aragonito permanece siempre superior a la de la calcita, a cualquier valor de pCO_2 , pero se constata que esta diferencia

de solubilidades de las dos variedades tiende a desaparecer cuando pCO_2 alcanza valores muy elevados.

4.4. Formación de la calcita y del aragonito

Consideremos un agua cualquiera que, a lo largo de su circulación subterránea, se ve impelida a atravesar una zona calcárea, en presencia de un medio rico en CO_2 . Consecuentemente se carga de iones calcio, en equilibrio con los iones carbonato, según la ecuación:

$$x_{Ca^{2+}} \cdot x_{CO_3^{2-}} = K_1 (pCO_2)$$

(15)

Siendo $p\text{CO}_2$ la presión parcial del gas carbónico a nivel de la caliza (que puede alcanzar valores muy elevados en presencia de una cubierta vegetal).

Supongamos que este agua desemboca en una atmósfera pobre en gas carbónico, sea en el exterior, sea en el interior de una gruta. En este momento preciso se encuentra en la siguiente situación: el agua contiene siempre la misma cantidad de Ca^{2+} , es decir $x_{\text{Ca}^{2+}}$. Por contra, dada la disminución de la presión parcial del anhídrido carbónico ($p'\text{CO}_2 < p\text{CO}_2$), la fracción molar del ión carbonato toma un nuevo valor $x_{\text{CO}_3^{2-}} + \Delta x_{\text{CO}_3^{2-}} > x_{\text{CO}_3^{2-}}$ y se puede escribir:

$$x_{\text{Ca}^{2+}} \cdot (x_{\text{CO}_3^{2-}} + \Delta x_{\text{CO}_3^{2-}}) = k > K_1$$

(16)

La solución no está en equilibrio; un carbonato de cal (calcita o aragonito) se precipitará hasta que las concentraciones obedezcan de nuevo a las relaciones:

$$\begin{cases} x'_{\text{Ca}^{2+}} \cdot x'_{\text{CO}_3^{2-}} = K_1; (p'\text{CO}_2); (\text{calcita}) \\ x''_{\text{Ca}^{2+}} \cdot x''_{\text{CO}_3^{2-}} = K'_1; (p'\text{CO}_2); (\text{aragonito}) \end{cases}$$

(17)

Previamente a que comience toda precipitación, la solución debe estar sobresaturada y puede caracterizarse por su grado de sobresaturación

$$\beta = \frac{x_{\text{CO}_3^{2-}} + \Delta x_{\text{CO}_3^{2-}}}{x_{\text{CO}_3^{2-}}} = \frac{k}{K_1} > 1$$

(18)

Tomemos en consideración que este “exceso”, debido aquí a la variación de la presión parcial del anhídrido carbónico, podría también ser consecuencia de la evaporación del agua, de una variación de la temperatura, etc.

Dicho de otra manera, la calcita no puede cristalizar a partir de una solución, más que

cuando ésta se encuentra en un grado de sobresaturación tal que $\beta_{(calcita)} = \frac{k}{K_1} > 1$. De

igual manera, en el caso del aragonito, debe existir $\beta_{(aragonito)} = \frac{k}{K'_1} > 1$

De donde, a partir de la ecuación (18)

$$\beta_{(calcita)} = \frac{k}{K_1} = 1 + \frac{\Delta x_{CO_3^{2-}}}{x_{CO_3^{2-}}}$$

(19)

se deduce que la calcita puede formarse a partir de que $\Delta x_{CO_3^{2-}}$ (sobresaturación) alcance un valor positivo, por pequeño que sea. Por el contrario, en el caso del aragonito, tenemos:

$$\beta_{(aragonito)} = \frac{k}{K'_1} = \frac{x_{Ca^{2+}} \cdot (x_{CO_3^{2-}} + \Delta x_{CO_3^{2-}})}{K'_1}$$

y como $x_{Ca^{2+}}$ se identifica con la fracción molar de CO_3^{2-} procedente de la disolución de la calcita del banco calizo atravesado inicialmente,

$$\beta_{(aragonito)} = \frac{K_1 + x_{Ca^{2+}} + \Delta x_{CO_3^{2-}}}{K'_1}$$

y la condición $\beta_{(aragonito)} > 1$ tomará la forma:

$$\frac{\Delta x_{CO_3^{2-}}}{x_{CO_3^{2-}}} > \frac{K'_1 - K_1}{K_1}$$

Así pues, para que el aragonito pueda formarse es preciso que el cambio at-

mosférico produzca una variación en el contenido de CO_3^{2-} del orden del 60 %, como mínimo. Esto ocurre cuando $pCO_2 \approx 10^{-2}$ y $p'CO_2 \approx 10^{-3.5}$ atmósferas, valor este último correspondiente al promedio del contenido del aire ordinario.

De todas formas se observa que, en el caso de aguas suficientemente cargadas de Ca^{2+} y de, CO_3^{2-} pueden depositar tanto calcita como aragonito en las condiciones ordinarias de presión y de temperatura.

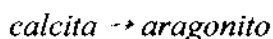
Veremos en el párrafo que sigue, como ya apuntábamos al principio, que la variedad estable del carbonato cálcico en las condiciones ordinarias es la calcita, resultando teóricamente inestable el aragonito. No obstante podemos observar, con cierta frecuencia, cristalizaciones de aragonito en condiciones normales de presión y de temperatura; se trata de una *síntesis metaestable* (es decir, la formación del mineral fuera de las condiciones de dominio de estabilidad). El estudio de este fenómeno compete al dominio de la cinética del crecimiento cristalino, que no vamos a desarrollar aquí, pero del que destacaremos:

- Es preciso que el aragonito se forme a una velocidad superior a la de la calcita en las condiciones de aventajamiento adecuadas; lo que no es imposible a priori, pues no son los datos termodinámicos clásicos quienes rigen esta cinética, sino “*las energías de activación de la germinación*” que dependen , entre otras, de las energías de superficie de los minerales.

-Es igualmente preciso que el aragonito, así formado, no se transforme espontáneamente en calcita, al menos que lo haga con una velocidad infinitamente lenta. Esta cuestión no presenta problemas puesto que se pueden observar muestras de aragonito en las condiciones ordinarias.

4.5. La estabilidad de la calcita y del aragonito

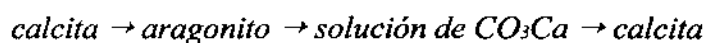
Nos queda por estudiar las condiciones de equilibrio de la transformación polimórfica



Las funciones termodinámicas de las reacciones, relativas a esta reacción son muy pequeñas y es necesario, con el fin de establecer el diagrama de equilibrio, conocerlas con precisión.

El método más preciso para su determinación consiste, al parecer, en pasar por las solubilidades respectivas de los dos minerales.

Escribamos el ciclo:



se tiene

$$(\Delta G_{trans})_T^P = (\Delta G_{dis \cdot calc})_T^P - (\Delta G_{dis \cdot arag})_T^P$$

o sea

$$(\Delta G_{transf})_T^P = RT(\text{Ln}K'_1 - \text{Ln}K_1)$$

y siendo K_1 y K'_1 los productos de solubilidad de la calcita y del aragonito a la temperatura y a la presión consideradas.

La condición de equilibrio calcita - aragonito se escribe $(\Delta G_{transf})_T = 0$, o

$$K_1(T, P) = K'_1(T, P)$$

Un dispositivo ingenioso basado en la comparación del comportamiento eléctrico de dos soluciones saturadas (JAMIESON, J.C. 1953, 1957) [en KERN, R. & WEISBROD, A., 1964] ha permitido medir directamente el conjunto de valores (P, T), para los que las solubilidades son iguales y, en consecuencia, existe equilibrio entre la calcita y el aragonito. Los resultados son los siguientes:

T °K	P Kg/cm ²
302,1	3 950
311,2	4 130
325,6	4 500
350,1	4 800

Los puntos así obtenidos se alinean siguiendo una recta cuya ecuación empírica es:

$$P = 17,86T - 1405 \text{ (P en Kg/cm}^2\text{, T en grados K)}$$

Ver la figura 4.

Conociendo la variación de (ΔV) con T y P, se obtiene, mediante la utilización de las ecuaciones de CLAPEYRON, el valor de $(\Delta H)_T^P$ y de $(\Delta S)_T^P$

$$17,864 = \frac{dP}{dT} = \frac{(\Delta H)}{T(\Delta V)} = \frac{(\Delta S)}{(\Delta V)}$$

T °K	$(\Delta H)_T^P$ cal/mol	$(\Delta S)_T^P$ cal/grado/mol
302,1	375	1,24
311,2	385	1,24
325,6	401	1,23
350,2	426	1,22

Estos resultados han sido confirmados en trabajos más recientes sobre un dominio (P,T) diferente (CLARK 1957) [*ibidem*], a lo largo de un estudio directo de las condiciones de transformación calcita - aragonito. Igualmente por parte de (MAC DONNALD. 1957; GIROU, A. & ROQUES, H., 1969 y ROQUES, H., 1965).

Podemos observar en el diagrama que las rectas, con pendientes análogas, aparecen desplazadas dependiendo de los diferentes autores; este desplazamiento se debe fundamentalmente a las imprecisiones de las medidas de presión y a que, en el caso de MacDonnald, ha operado con "presiones orientadas".

En cualquier caso, **observamos que el aragonito es inestable a la presión ordinaria, con independencia de la temperatura** (transformación monótrapa). Su formación en condiciones normales, como hemos evidenciado en el párrafo anterior, es, en efecto, una síntesis metaestable, de lo que se deduce que el conjunto calcita - aragonito constituye un indicador termométrico de lo más peligroso.

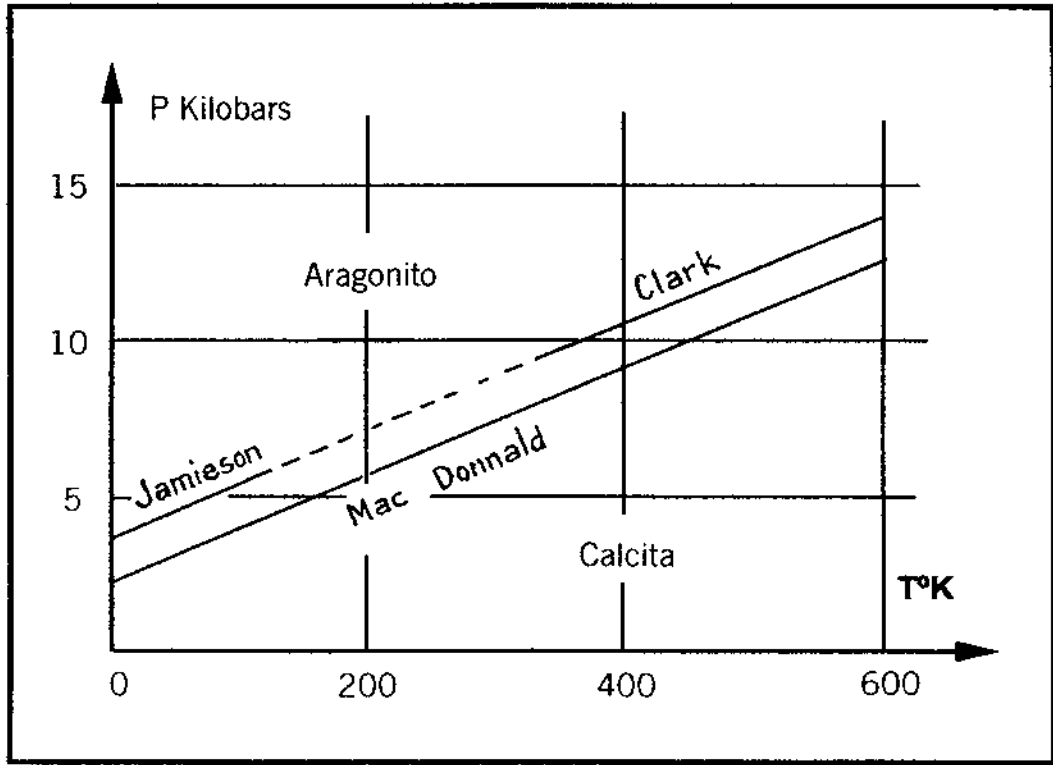


Figura 4: Diagrama de estabilidad calcita - aragonito.

LA LUZ ARTIFICIAL Y SU EMPLEO EN CAVIDADES PARA USO TURÍSTICO

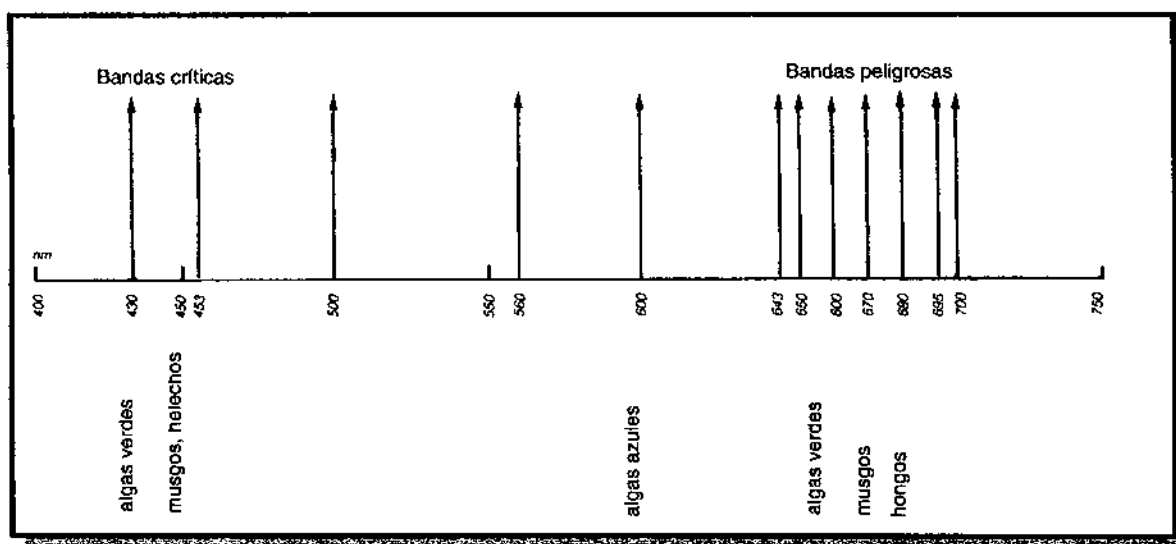
1. LA LUZ ARTIFICIAL

Tal y como hemos descrito anteriormente, los fenómenos de corrosión que afectan a las formaciones cristalinas son tanto de origen fisicoquímico como bioquímico, aunque es difícil, cuando no imposible, separar ambos fenómenos. En la mayoría de las ocasiones está presente la materia orgánica, lo que resulta esencial para la comprensión del problema.

Tanto en la obscuridad como en bajo la luz, la materia orgánica es aportada por corrientes de aire y depositada sobre la película de agua que recubre las formaciones, especialmente en determinadas estaciones; además, en cualquier caso, una profusión de bacterias le acompaña. En tales circunstancias: agua, materia orgánica, bacterias, equilibrio iónico del medio, se desarrolla una fermentación muy activa. En una primera etapa aparecen los ácidos orgánicos, que se neutralizan con la caliza, corroyéndola; en una segunda etapa, el gas carbónico, que acentúa el efecto corrosivo. Todo desperdicio dejado por los visitantes sufre la misma suerte; es una fuente de corrosión y contaminación.

En condiciones de iluminación, ya sea la luz del día que penetra por las entradas, o bien la procedente de los sistemas de iluminación artificial de las instalaciones, las esporas de los vegetales clorofílicos se desarrollan; pronto aparecen manchas verdosas de algas y, si no se pone coto, aparecen los musgos y helechos. A partir de aquí la corrosión se hace espectacular. Esta vegetación puede sobrevivir a expensas del gas carbónico del aire, gracias a la función clorofílica, pero necesita igualmente elementos minerales que extrae de las formaciones dejando marcas indelebles en ellas. Por otra parte, los residuos vegetales resultantes fermentan y proporcionan recursos a las especies que se desarrollan en la oscuridad. De aquí una importante conclusión: la necesidad de eliminar la vegetación clorofílica.

La lucha contra la vegetación clorofílica es un problema de iluminación. Los vegetales verdes, tanto en las grutas como en el exterior, captan ciertos componentes de la luz blanca, gracias a la clorofila, componentes que conocemos como color: rojo, anaranjado, amarillo, verde, azul, añil y violeta, definidos científicamente por su longitud de onda en *nm* (nanómetros). A partir de la absorción de esta energía los vegetales pueden sintetizar los compuestos orgánicos, a partir de elementos químicos, que les son imprescindibles para la vida. Pero no todos los vegetales captan las mismas radiaciones: los hongos, los musgos y las plantas verdes utilizan el azul-violeta, además el rojo; las algas azules, el rojo-naranja; las algas rojas no intervienen en las cuevas.



A continuación presentamos una escala graduada en nanómetros en que, señaladas con flechas, se presentan las principales longitudes de onda captadas. Las flechas corresponden a las máximas, pero en realidad la absorción se realiza en bandas más o menos establecidas, entre 430 y 453 nm., alrededor de 600 nm., y entre 643 y 700 nm.; la zona especialmente peligrosa es la situada entre 643 y 700 nm.

Hay que destacar igualmente que el calor desprendido por la fuente de luz activa los desarrollos de la vegetación templando las superficies concrecionadas.

Por estas razones es imprescindible instalar sistemas de iluminación artificial que no emitan las radiaciones peligrosas antes reseñadas, por favorecer la función clorofílica, y que su emisión térmica sea lo más reducida posible. Por lo que respecta al espectro de emisión el problema no está resuelto pues los fabricantes de lámparas buscan, contrariamente a nuestros intereses particulares, aproximarse al máximo a la luz solar.

2. TECNOLOGÍA

La moderna tecnología se aparta del sistema de filamento incandescente, de todos conocido, mediante la descarga eléctrica en una atmósfera de vapor de mercurio a baja presión; la radiación ultravioleta así obtenida se transforma en radiación visible mediante el uso de polvos fluorescentes que tapizan la ampolla de la lámpara; el color de la luz obtenido depende del tipo de polvo empleado. El sistema exige la presencia de una reactancia (inductancia) que estabilice la corriente de descarga, su principal ventaja, pese a su coste más elevado, es su prolongada vida y un consumo muy bajo. La radiación de tales lámparas se asemeja a la luz solar, pese a no disponer del espectro continuo; sólo determinadas bandas. Igualmente existen dispositivos de descarga a alta presión; la

radiación visible de un arco eléctrico es mantenida por un *plasma*, a alta temperatura, de gas y de vapores metálicos encerrados en un recinto isotérmico de vidrio. Los vapores metálicos que se utilizan son los del mercurio, sodio, o de una mezcla de sodio, thorio e iridio.

Existen ingenios con conexión directa a la red, o mediante reactancia; uno de ellos, monocromático, resulta prácticamente acolorofílico y la radiación infrarroja, muy calorífica, es reflejada por el tubo de descarga: **se trata de la clásica lámpara de vapor de sodio a baja presión**, cada vez más utilizada en la iluminación de nuestras calles. Esta lámpara tiene el récord de eficacia luminosa, posee un excelente rendimiento con un consumo muy débil y una larga vida y, pese al inconveniente de precisar la correspondiente reactancia y tener un amplio retardo en su encendido, es la más recomendable para iluminaciones de carácter permanente. En cuanto a las lámparas llamadas de luz fría, éstas no son necesariamente acolorofílicas, aunque tienen bien merecido el apelativo.

3. RECOMENDACIONES AL RESPECTO DE LA ILUMINACIÓN DE LA CUEVA

- * **Los caminos y accesos, así como los lugares que deban permanecer siempre iluminados, deberán estar equipados con lámparas acolorofílicas del tipo de vapor de sodio de baja presión.**
- * **Las formaciones de todo tipo y curiosidades deberán estar equipadas con lámparas de las llamadas frías, o de un sistema intermitente de alumbrado, que únicamente se conectará durante el tiempo preciso de la visita. Las lámparas deberán ser cuidadosamente elegidas para evitar las longitudes de onda peligrosas e indeseables; en otro caso deberán dotarse de los correspondientes filtros.**

CONCLUSIONES FINALES

La primera conclusión, y la más importante, es resaltar la belleza e interés de la cavidad y de sus formaciones, que la hacen merecedora, al menos, de un alto grado de protección.

Este grado de protección no está reñido en modo alguno con la posibilidad de visita de la cavidad, de modo singular, o bien integrada en un circuito turístico rural a determinar.

Pero este interés está unido a dos aspectos a tener en cuenta:

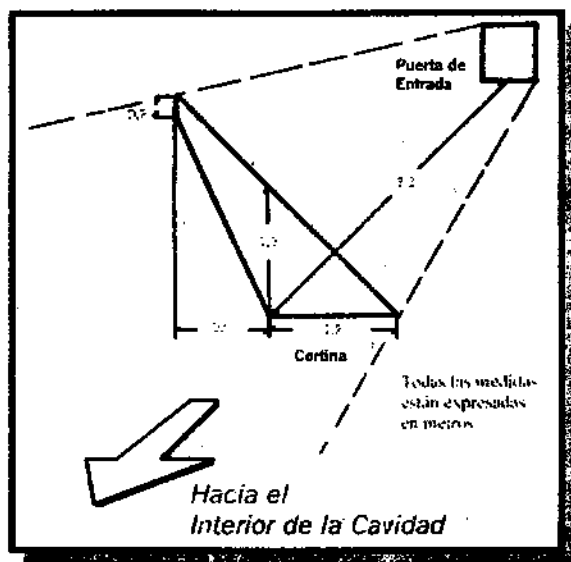
- 1.- El escaso tamaño de la cavidad.*
- 2.- La inestabilidad de las formaciones de aragonito, las más interesantes.*

No obstante, la calidad de las formaciones y su variedad hacen que esta cavidad tenga un atractivo turístico de primer orden.

Por lo anteriormente expuesto, se hace necesario recomendar la limitación de visitantes, tanto en número, como en duración de la visita.

Así mismo, y como añadido a las medidas a tomar para el posible acondicionamiento del acceso a la cueva (firme de la pista, ampliación de la entrada, acometida de energía, etc.), se deberán tomar las siguientes medidas:

- 1.- Establecer un cierre totalmente estanco de la cueva, incluida una segunda puerta o cortina más interior.
- 2.- Iluminar el pasillo y accesos con lámparas de sodio de baja presión y para las formaciones se utilizarán lámparas de luz fría.



Esquema donde se indica el emplazamiento sugerido de la segunda puerta o cortina. También se indican las dimensiones de la galería en ese punto.

BIBLIOGRAFÍA

- ABEL, G.** (1953) - "Temperatures et formation de glace dans les Grottes de Salzburg (Autriche)". *Act. I Congr. Int. Spéléol. Paris.* 2:321-325.
- ANDRIEUX, C.** (1981) - "Sobre el papel de la climatología en las investigaciones subterráneas". Introducción al Estudio del Karst. Madrid. pp:93-111.
- BRUNET, J.; VIDAL, P. & STEFANAGGI, M.** (1980) - "Grotte de Font de Gaume aux Eyzies (Dordogne). Etude du taux de gaz carbonique de l'atmosphère. Consequences pour la conservation des figurations préhistoriques". *Speleon.* 25:37-45.
- CAUMARTIN, V.** (1964) - "Spéléologie physique, biospéléologie et conservation des grottes. Application au cas particulier de Lascaux". *Spelunca Bull.* 4 (3):5-15.
- CAUMARTIN, V.** (1964 b) - "Les corrosions de Cavernes. Quelques principes de conservation des cavernes aménagées". *Spelunca Bull.* 4 (4):5-12.
- CAUMARTIN, V.** (1965) - "Conservation des grottes a peintures. Inventaire des foyers de réduction par une technique biologique". *Spelunca Bull.* 5 (2):9-16.
- CAUMARTIN, V.** (1970) - "Interpretation biologique du pouvoir corrodant des argiles". *Act. 4eme. Congr. Nat. Spéléol. Suisse. Stalactite* (6):88-93.
- CAUMARTIN, V.** (1986) - "La conservation des concrétions dans les cavernes". Intern Espeleol . España. Barcelona. :223-225.
- DELBROUCK, R.** (1970) - "Influence climatique sur la corrosion des cavernes". *Act. 4eme. Congr. Nat. Spéléol. Suisse. Stalactite* (6):94-97.
- DELEGACIÓN LEONESA DE LA FED. DE CAST. Y LEÓN DE ESPELEOLOGÍA.** (1989) - "Estudio sobre la posibilidad de apertura al público de la Cueva de Villavieja". León. 9 pp. (Inédito).
- DELEGACIÓN LEONESA DE LA FED. DE CAST. Y LEÓN DE ESPELEOLOGÍA.** (1992) - "Estudio sobre la viabilidad de apertura de la Cueva del Carrascal en Santa Olaja de la Varga, Cistierna, León". León. 67 pp. (Inédito).
- DROGUE, C. & PLEGAT, R.** (1971) - "Température et phénomènes biochimiques dans la dissolution du calcaire". *Bull. Ass. Géogr. France.* (389-390):235-239.
- DRUET, Y.** (1993) - "Patines et dépôts géomicribiens". *Spéléos.* 89.

- ERASO, A.** (1965) - "A Tentative Nomogram for Cave Climate Calculations". *Problems of the Speleological Research*. Czechoslovak Acad. of Scienc. Praga. **I**:175-185.
- ERASO, A.** (1965 b) - "Sobre la intensificación de la acción corrosiva del agua en la génesis de las cavernas, en presencia de iones oxidables". *Proc. 4th. Internat. Congr. Speleol. Yugoslavia*. Ljubljana. **3**:79-89.
- ERASO, A.** (1969) - "La corrosión climática en las cavernas". *Bol. Geol. Min.* **80** (6):564-581.
- ERASO, A.** (1972) - "El control ecológico de las cavernas mediante sencillas mediciones climáticas. Aplicaciones a la bioespeleología y a la conservación del patrimonio cultural". *Act. II Congr. Nnal. Espeleol. España*. Oviedo. pp:1-12.
- ERASO, A.** (1981) - "La entalpía como escala energética de la ecología de las cavernas". *Introducción al Estudio del Karst*. Madrid. pp:155-164.
- FERNÁNDEZ SERRANO, M.E. & HERRÁEZ, I.** (1989) - "Problemática medioambiental ligada al karst en España". *El Karst en España*. Soc.Esp.Geomorf. Monografía **4**:403-413.
- GÈZE, B.** (1965) - "La Spéléologie scientifique". *Ed. Seuil*. Paris. 256 pp.
- GIROU, A. & ROQUES, H.** (1969) - "Etude des conditions de précipitation a 30° C. des différentes variétés allotropiques de CaCO₃ en fonction du degré de sursaturation". *C. R. Acad. Sc. Paris*. **268**:1244-1248.
- HOYOS GÓMEZ, M. & JORDA PARDO, J.F.** (1989) - "Los yacimientos arqueológicos y paleontológicos asociados a los depósitos kársticos cuaternarios en España". *El Karst en España*. Soc. Esp. Geomorf. Monografía **4**:381-390.
- KERN, R. & WEISBROD, A.** (1964) - "Termodynamique de base pour Minéralogistes, Pétrographes et Géologues". *Masson et Cie*. Paris. 243 pp.
- LÓPEZ MARTÍNEZ, J. & DURÁN, J.J.** (1989) - "Usos y aprovechamientos de cavidades y paisajes kársticos". *El Karst en España*. Soc. Esp. Geomorf. Monografía **4**:391-402.
- PALLARÉS PERSONAT, J.** (1979) - "Nota sobre la influència de la presència humana en la climática d'una cavitat". *Gours.* (6):9-12.
- RENAULT, Ph.** (1971) - "La teneur en anhydride carbonique des atmosphères de

- grottes". *Bull. Ass. Geogr. Franç.* (389-390):241-245.
- ROQUES, H.** (1961) - "Eléments pour une cinétique des phénomènes karstochimiques". *Ann. Spéléol.* **16** (4):329-339.
- ROQUES, H.** (1962) - "Considérations théoriques sur la chimie des carbonates. (1ere. memoire)". *Ann. Spéléol.* **17** (1):11-41.
- ROQUES, H.** (1962 b) - "Considérations théoriques sur la chimie des carbonates. (2eme. memoire)". *Ann. Spéléol.* **17** (2):241-284.
- ROQUES, H.** (1962 c) - "Considérations théoriques sur la chimie des carbonates. (3eme. memoire)". *Ann. Spéléol.* **17** (3):463-467.
- ROQUES, H.** (1963) - "Sur la répartition du CO₂ dans les karst. (2eme. memoire)". *Ann. Spéléol.* **18** (2):141-184.
- ROQUES, H.** (1963 b) - "Observations physico-chimiques sur les eaux d'alimentation de quelques concrétions". *Ann. Spéléol.* **18** (4):377-404.
- ROQUES, H.** (1964) - "Contribution a l'étude statique et cinétique des systèmes gaz carbonique-eau-carbonate". *Ann. Spéléol.* **19** (2):255-484.
- ROQUES, H.** (1965) - "Sur la genèse des formations aragonitiques naturelles". *Ann. Spéléol.* **20** (1):47-54.
- ROQUES, H.** (1968) - "Chimie des carbonates et hydrogéologie karstique". *Mem. et Doc. Phénomènes karstiques.* **4**:113-141.
- ROQUES, H.** (1969) - "Problèmes de transferts de masse posés par l'évolution des eaux souterraines". *Ann. Spéléol.* **24** (3):455-494.
- ROQUES, H.** (1969 b) - "A Review of Present-day Problems in the Physical Chemistry of Carbonates in solution". *Trans. Cave Research Group G.B.* **2** (3):139-163.
- STCHOUZKOY-MUXART, T.** (1971) - "Contribution a l'étude de la solubilité de la calcite dans l'eau en présence d'anhydride carbonique à 20° C et 30° C". *Bull. Ass. Géogr. Franç.* (389-390):215-233.
- TROMBE, F.** (1947) - "Météorologie et hydrologie souterraine. Application aux massifs d'Arbas et Paloumère". *Ann. Spéléol.* **2** (2-3):1-25.
- TROMBE, F.** (1952) - "Traité de Spéléologie". *Ed. Payot.* Paris. 376 pp.

Camperones

CUEVA DE VALDELAJO



Camino de Sotillos

Arroyo de Sahelices

Arroyo de la Mina

SABERO

SAHELICES DE SABERO

OLLEROS DE SABERO

LE-5146