

PROCESOS DE ALTERACION DE SOPORTE Y PINTURA EN DIFERENTES CUEVAS CON ARTE RUPESTRE DEL NORTE DE ESPAÑA: SANTIMAMIÑE, ARENAZA, ALTAMIRA Y LLONIN.

Manuel Hoyos Gómez*

I. INTRODUCCION

De forma general se puede afirmar que la conservación durante milenios de las pinturas rupestres que han llegado hasta nuestros días, otras habrán desaparecido, se debe más a la falta de agresividad de las diferentes condiciones kársticas que han estado sometidas durante ese tiempo, que a la estabilidad de dichas condiciones, ya que una cueva es algo dinámico que puede considerarse estable o no, en función de la unidad de tiempo que a su vez se considere.

Sin embargo es un hecho que una vez descubiertas las pinturas, en la mayoría de ellas se ha observado una cierta degradación en un corto periodo de tiempo, lo que implica una velocidad de alteración que de provenir del pasado no hubiera permitido su conservación. Desgraciadamente, la mayoría de las veces el factor desestabilizante añadido está relacionado de una forma u otra con actividades antrópicas en los medios endo y exokársticos.

En este sentido, en el presente trabajo se analizan las causas de los principales procesos de alteración, sobre todo en soportes y pinturas, que presentan algunas de las más importantes cuevas con arte rupestre en la Cornisa Cantábrica, donde la influencia antrópica posterior a su descubrimiento constituye un factor importante, tanto por ser en unos casos la causa directa de dichos procesos, como por acelerar en otros los procesos de alteración naturales.

Agradecemos la financiación de estos trabajos y la autorización para publicar los resultados a los siguientes organismos: Ministerio de Cultura, Diputación Foral de Vizcaya y Consejería de Educación y Cultura del Principado de Asturias. Así como al Prof. J.M. Apellaniz, Dr. J. Echeagaray y Prof. J. Fortea, por su ayuda y participación directa en los trabajos.

II. CUEVA DE SANTIMAMIÑE

II.1 Características Generales

La Cueva de Santimamiñe se encuentra en la vertiente meridional del monte "San Miguel de Areñosa", al oeste de la ría de Guernica (Guipuzcoa), teniendo su entrada orientada SSE a 180 m. s.n.m.

Aún siendo una cueva con importante desarrollo lineal, el grueso principal de las pinturas se encuentra en una pequeña cámara denominada "Sala Antigua de Pintura", de forma oval con unos 7,5 m. de eje mayor, situada a unos 50 m. de la entrada, en el flanco occidental de la galería principal y a 3,5 m. por encima del suelo actual.

La alimentación hídrica de dicha sala, teniendo en cuenta que se encuentra en la zona vadosa del karst muy por encima de la zona de circulación freática, se reduce a escasos puntos de goteo y de escorrentía parietal debidos a la infiltración de agua de lluvia. También debe tenerse en cuenta, dado lo reducido de este ámbito, el agua de condensación que aunque en mucha menor proporción juega un papel importante en los procesos de alteración.

La roca encajante en la que se desarrolló el karst corresponde a unas calizas pararrécificas, con intercalaciones de calizas apizarradas, margas y areniscas limolíticas del "Complejo Urgoniano" de edad Aptense. Son calizas grises oscuras formadas por una micrita arcillosa masiva con bajo grado de recristalización y distribución irregular de las arcillas. Presenta abundantes restos fósiles recristalizados y grietas rellenas de esparita, a veces con microtubos de karstificación con relleno parcial de arcillas rojas.

II.2 El Soporte de las Pinturas.

El soporte de las pinturas en esta sala lo constituyen corizas estalagmíticas parietales poligénicas que recubren las paredes. Están formadas por asociaciones de cristales de calcita en empalizada de longitudes variables siempre de orden milimétrico. La roca encajante aflora solo en el techo, encontrándose muy alterada en superficie y afectada por procesos de erosión diferencial por corrosión, en los que destacan los restos fósiles recristalizados sobre un fondo pulverulento grisáceo en seco o barroso oscuro en húmedo, producido por la descarbonatación parcial de la matriz micrítica dentro de un proceso general de "cholkización" de la roca.

II.3 Los Procesos de Alteración

Se han distinguido dos tipos de alteraciones de etiología diferente que afectan a las pinturas:

- Recrecimientos cristalinos sobre las pinturas.
- Alteraciones de la roca soporte.

II.3.1. Recrecimientos Cristalinos

Se han distinguido diferentes tipos de formaciones de cristales carbonatados que afectan tanto al soporte como a las pinturas, en función de su composición mineralógica determinada por difracción de R-X y morfología de las cristalizaciones.

II.3.1.1. Espeleotemas de Calcita

Corresponden a la formación de espeleotemas vadosos parietales sobre el soporte y las pinturas, afectando sobre

* Departamento de Geología. C.S.I.C. Museo Nacional de Ciencias Naturales. 28006 Madrid.



Foto 1.—SANTIMAMINE: Bisonte en negro con recubrimiento actual de una corteza estalagmítica en formación

todo a las situadas en la parte externa de la sala. Se distinguen dos tipos principales, por una parte la formación de una corteza estalagmítica que recubre un tema en negro, formada por la reactivación de la circulación vadosa de agua laminar por la pared. En segundo lugar se aprecia la generación de formas botroidales y oolíticas por ascenso capilar del agua, de pequeña talla.

II.3.1.2. Espeleotemas de Aragonito

Son dos tipos formas de desarrollo incipiente de orden milimétrico (4-5 mm. máximo), que se desarrollan sobre soporte y pinturas del interior de la sala. Unas correspon-

den a “Manchas Blanquecinas” de aspecto pulverulento, de tipo “moon milk” constituidas por microcristales fibrosos de aragonito agrupados de forma desordenada. Las otras forman “Manchas Blancas Estrelladas” formadas por microcristales fibroso radiados de aragonito, con diámetros comprendidos entre 3 y 5 mm. Son formas poco estables que necesitarían de un control fotográfico para seguir su crecimiento o disolución, ya que su formación puede estar relacionada con flujos capilares de agua carbonatada a través de las discontinuidades de alteración los planos de unión de los cristales de calcita de la roca soporte. Dichos flujos pueden estar relacionados a su vez con un proceso de desecación de la superficie del soporte de-

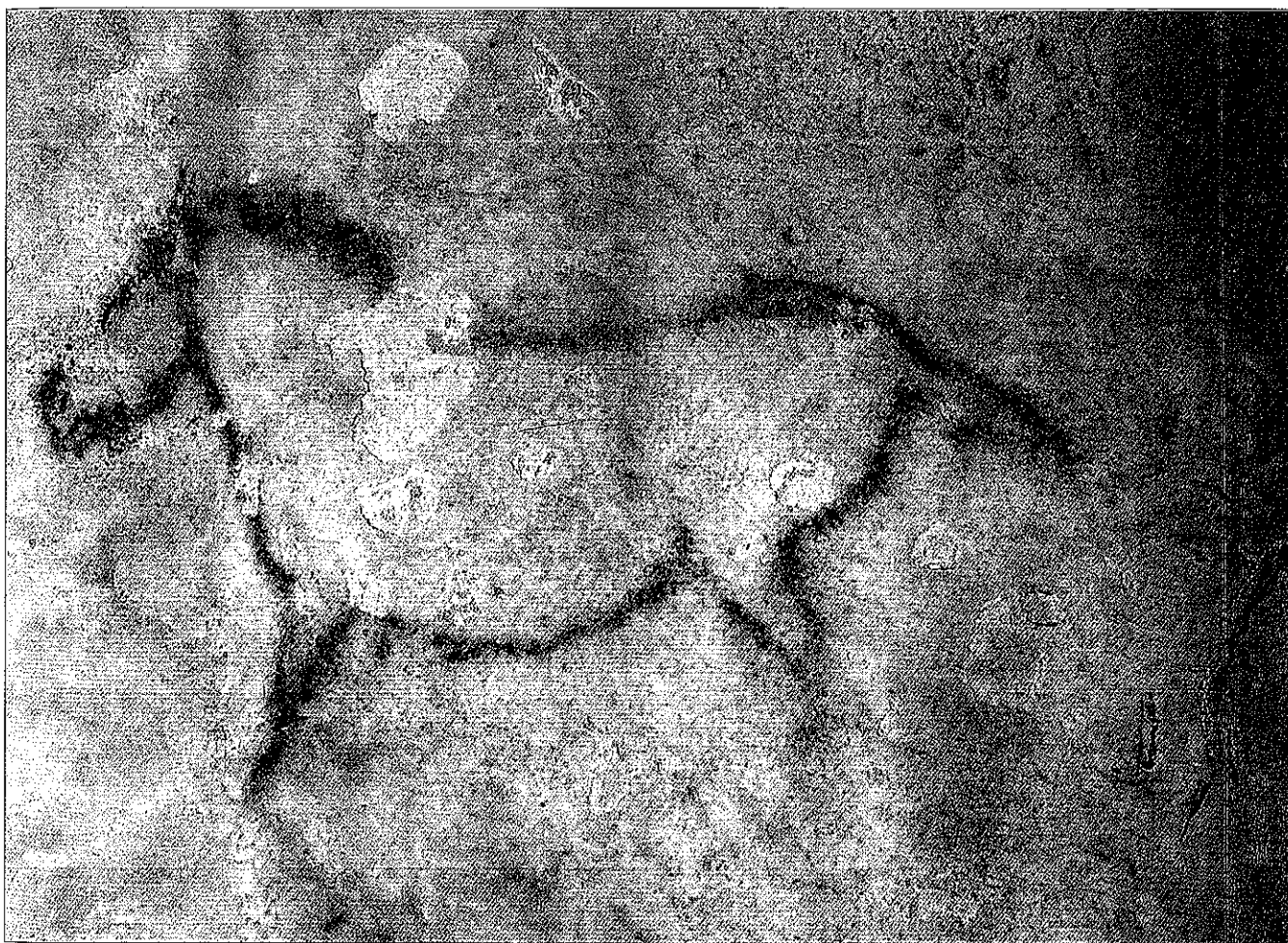


Foto 2.—SANTIMAMIÑE: Descamaciones afectando a la pintura

bida al aumento de temperatura (García y Ortiz 1986) que se produce de forma rápida en el interior de la sala por la presencia de visitantes, ya que antes de que se permitiesen estas visitas dichas formas no existían.

II.3.2. Alteraciones de la Roca Soporte

La roca soporte constituida como se ha visto por estalagmitas parietales adosadas directamente sobre la roca madre, con espesores comprendidos entre 5 y 7 mm. presenta tres tipos diferentes de procesos de alteración.

El primero de ellos, muy generalizado por toda la superficie externa de la corteza corresponde procesos de “en-

vejecimiento” natural por corrosión debidos a meteorización superficial de las caras externas de los cristales de calcita, afectando también a la zona externa de los planos de conjunción de los cristales. El inicio de estos procesos es anterior a las pinturas ya que estas los recubren.

El segundo y más importante, consiste en la generación de desconchados irregulares de orden centimétrico por desprendimientos parciales de fragmentos de la costra soporte que arrastran consigo partes de pintura, con la consiguiente destrucción parcial pero progresiva de ésta.

El análisis de la relación roca madre-roca soporte en las zonas de las descamaciones muestran lo siguiente:

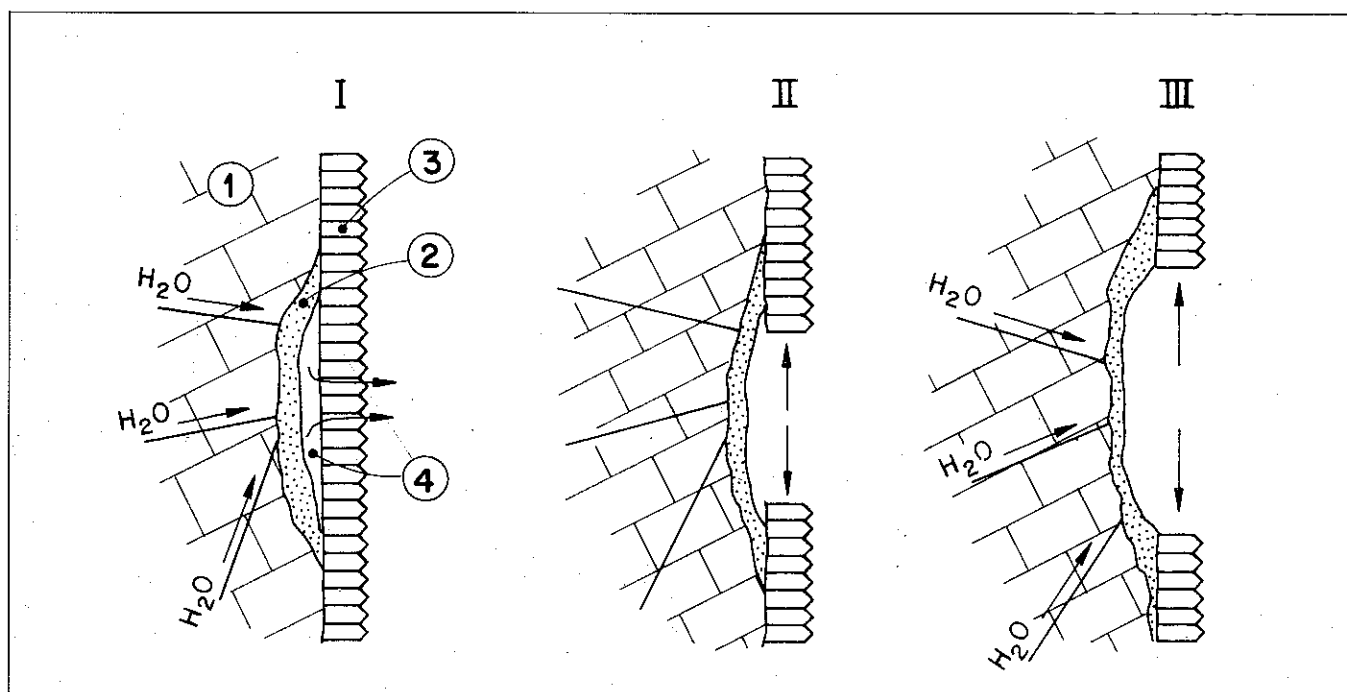


Fig. 1.—Santimamiñe: Esquema de formación de las descamaciones.

(1) Roca. (2) Zona alterada de la roca. (3) Corteza estalagmítica. (4) Vacío creado por emigración de los productos de alteración de la roca. I. Inicio del proceso bajo la costra. II. Deseccación y desprendimiento de cristales. III. Ampliación del desconchado lateralmente.

- La roca encajante se encuentra muy alterada y húmeda.
- La superficie interna de la corteza estalagmítica presenta huellas de disolución que afectan a la base de los cristales y penetran por los planos de unión avanzando hacia el exterior, estando también muy húmeda.
- Los elementos recrystalizados de la roca madre y de la corteza, son más resistentes a la disolución que el resto de los componentes carbonatados de dicha roca madre.

En base a esto y a las características citadas de la roca madre, la modelización de la generación de los desconchados puede explicarse por:

- En zonas determinadas, un flujo de agua alcanza por microconductos kársticos la interfase roca madre-roca soporte. La menor competencia de la roca madre con respecto a la roca soporte frente a la disolución, da lugar a una disolución más rápida de la primera generándose un efecto de despeque entre ambas con la pérdida de cohesión consiguiente. (Fig. 1).

- El excedente de agua ataca también la base de la corteza y se infiltra de forma capilar por los planos de unión de los cristales de calcita avanzando hacia el exterior hasta alcanzar la zona de alteración externa.
- Una vez perdida la unión entre roca madre-roca encajante y ampliadas las discontinuidades entre cristales de la roca soporte, tanto por gravedad como por efecto de desecaciones periódicas o por ambas causas a la vez, comienza el desprendimiento de partículas de las zonas más inestables generándose el inicio de un desconchado que posteriormente se irá ampliando por los bordes.

El aumento rápido de temperatura y la pérdida de humedad que se produce por la presencia de visitantes (García y Ortíz 1986) puede ser la causa de desecaciones que favorecen estos procesos, a la vez que crean un gradiente de humedad entre las interfases roca madre-roca soporte y roca soporte-aire, que favorece la salida del flujo de agua hacia el exterior.

Un tercer tipo de alteraciones lo forman las denominadas vermiculaciones, consistentes en pequeñas acumula-

ciones arcillosas a favor de hendiduras, aunque no necesariamente, de 3 a 5 mm. de longitud en forma de gusano. Las de Santimamiñe corresponden a los tipos "pimple-like spots" y "hieroglyphic vermiculations" de Parenzan (1961), que afectan tanto a la superficie del soporte como a las pinturas (Bisonte sombreado del gran panel de la Cámara).

Son numerosas las teorías sobre la formación de las vermiculaciones, aunque la más aceptada se refiere a procesos de floculación de arcillas existentes en suspensión en el agua de la pared, relacionados con procesos de desecación. En Santimamiñe estas acumulaciones están relacionadas a su vez con la alteración de las zonas externas de unión de los cristales de calcita que configuran la superficie, en las terminaciones piramidales de estos.

II.4. Conclusiones

La presencia de nuevo en esta sala de un flujo de agua que da lugar a la reactivación de la formación de espeleotemas y a los procesos de alteración del soporte, puede deberse con mayor probabilidad a causas relacionadas con la evolución natural del karst, aunque no se descarta una posible influencia de los cambios hábitos en la zona externa del karst, no tanto morfológicos como de vegetación. En todo caso se trata de procesos irreversibles, en los que al menos cabría la posibilidad de estudiar la desviación de alguno de los flujos de agua para impedir la continuación de la formación de la corteza estalagmática que recubre la pintura.

La presencia de visitantes, en exceso para las dimensiones de la sala, produce unas modificaciones en las condiciones microambientales, que parecen favorecer la generación de espeleotemas de aragonito, no existentes antes, y la aceleración de los procesos irreversibles de descalcificación.

III. CUEVA DE ARENAZA

III.1. Características Generales

La cueva de Arenaza se encuentra en el paraje de El Bertal, en el barrio de Arenaza de San Pedro de Galdames (Vizcaya), abriéndose su entrada al SO, a unos 45 m. sobre el cauce del río Galdames y a 250-300 m. de una cantera que explota las mismas calizas en las que se encuentra la cueva. Las pinturas se sitúan a 128 m. de la entrada, en el "Santuario de las Pinturas", un pequeño ensanche de forma ovalada de unos 3.5-4.0 m. de eje mayor, origi-

nado por la confluencia de una galería lateral a la principal con otra perpendicular a ella colmatada de sedimentos, cuyo acceso se encuentra interrumpido por dos puertas metálicas que ocupan toda la sección del conducto.

Se trata de un karst maduro, con alimentación por agua de lluvia, con un nivel freático colgado en la cueva y el general del karst muy por debajo. La circulación hídrica en el Santuario se realiza fundamentalmente en régimen capilar por fisuras y microconductos kársticos lo que confiere una cierta humedad a las paredes, ya que solo existe algún punto de goteo de caudal ínfimo y carácter estacional. Es importante destacar que tanto el diaclasamiento y la morfología kárstica como la circulación hídrica subterránea natural, han sufrido modificaciones por el empleo de explosivos y realización de labores con apertura de galerías de prospección minera a partir de los conductos kársticos.

III.2. La Roca Encajante

Dadas las características de los procesos de alteración que afectan al soporte y pinturas, íntimamente relacionadas con la roca encajante como se verá después, ha sido necesario un estudio lo más completo posible de esta roca.

La roca encajante del karst es una caliza gris oscura de aspecto masivo, brechoideo y agamidaloide, muy diaclasada con abundantes grietas rellenas de calcita, con estructuras estilolíticas poco desarrolladas, que dan lugar a una cierta disyunción hojaldrada paralela a la estratificación. Los procesos de meteorización confieren a la roca un color grisáceo y una superficie rugosa y desigual por erosión diferencial.

El estudio petrográfico muestra que se trata de calizas micríticas y biomicritas con zonas arcillosas dispersas de contornos difusos. Además de fragmentos de conchas y foraminíferos en su mayor parte recrystalizados y algún grano de cuarzo aislado, presenta moldes de pequeños cristales de pirita (0.1-0.5 mm.) muy alterados, cuyo análisis por microsonda revela que están rellenos de silicatos (arcilla) y óxidos de hierro.

La composición química realizada por fluorescencia de R-X expresada en óxidos corresponde a:

Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe ₂ O ₃ + Fe O		Mn O	
4.40	1.40	0.69		0.00	
Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅
0.75	51.91	0.00	0.38	0.06	0.02

siendo el valor de SO₃ de 0.20 % y la pérdida por calcinación (H₂O + CO₂) de 40.10%.

La composición mineralógica determinada por difracción de R-X muestra como componente mayoritario a la calcita seguida de una pequeña proporción de arcillas illíticas, algo de cuarzo e indicios de sulfato cálcico (yeso). Las arcillas illíticas deben corresponder a un filosilicato del tipo hidroflogopita dada la existencia de Mg y K en el análisis químico precedente, ya que por su pequeña representación en la muestra, presenta picos poco definidos en el difractograma. El cuarzo libre debe corresponder con el cuarzo detrítico observado al microscopio.

III.3. La Roca Soporte

En el Santuario pueden distinguirse tres tipos de superficies parietales sobre las que se realizaron las pinturas en función de su composición, textura, grado de alteración y cronología. De más antigua a más moderna se tiene:

A.—Paneles correspondientes a la antigua superficie de erosión kárstica, que regularizó las paredes y configuró la cavidad. Presentan alteraciones superficiales por corrosión representadas por pequeñas cúpulas invertidas de orden milimétrico, a veces conectadas entre sí, que tapizan dicha superficie. Las características petrológicas, mineralógicas y geoquímicas son las de la roca encajante. Solo es de señalar las pequeñas acumulaciones de arcillas en el fondo de algunas cúpulas de corrosión procedentes de descalcificación y de decantación de polvo en suspensión.



Foto 3.—ARENAZA: Cierva afectada por el desprendimiento de plaquetas.

B.—Un segundo tipo lo constituyen superficies del tipo A, recubiertas por una corteza estalagmítica cristalina de espesor milimétrico (1.0-3.0 mm.), con cristales de calcita paralelos en empalizada, estando alterada en superficie por disolución. Dicha corteza presenta la particularidad de que sobre ella, en algunas zonas, se han depositado pequeños cristales blanquecinos o transparentes de sulfato cálcico. En otras zonas presenta fenómenos de disolución superficial e inclusiones de microcristales de yeso.

C.—El tercer tipo está representado por superficies rugosas e irregulares producto de fenómenos de descamación antigua que afectó a la superficie de tipo A. Se encuentra recubierta parcial o totalmente, según las zonas, por una delgada corteza compleja cristalina, de tipo estalagmítico, con o sin alteración superficial posterior.

La complejidad de dicha costra estriba en que no presenta como las otras una superficie de cristales regulares, sino que está formada por asociaciones concrecionales irregulares de cristales de diferente naturaleza y desarrollo con inclusiones de partículas finas de elementos detríticos como impurezas (arcillas), que determinados por difracción de rayos-X, dan calcita como dominante y yeso en menor proporción. El análisis por fluorescencia de R-X, expresado en porcentaje de óxidos confirman ésta casi exclusiva composición de la costra en los dos minerales citados, correspondiendo los bajos porcentajes de sílice, alúmina y potasio a las impurezas de arcillas que estando en suspensión se debieron decantar sobre la costra durante su formación.



Foto 4.—ARENAZA: Detalle de la cierva anterior.

Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe + Fe ₂ O ₃	Mn O		
0.31	0.10	0.03	0.00		
Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅
1.77	58.23	0.00	0.02	0.01	0.09

Pérdidas por calcinación (H₂O + CO₂ + SO₃) = 39.45%.

La costra de tipo C presenta por tanto un carácter mixto, complejo y policíclico, que geoquímicamente debió comenzar su formación con la precipitación discontinua de núcleos de cristales de yeso a partir de agua fisural rica en sulfato cálcico que alcanzaría la superficie de la roca por capilaridad, alternando posteriormente con ciclos de precipitación de calcita entre y sobre los cristales de yeso. Los aportes de agua con bicarbonato cálcico pueden haber tenido el mismo origen fisural —el carbonato precipitaría después de haberse agotado el SO₃— o bien procedería de agua de circulación laminar parietal. El carácter irregular de los cristales de calcita y de su disposición morfológica parece indicar con mayor probabilidad la primera posibilidad.

En alguna zona la existencia de levantamientos de escamas en la parte externa de la costra y la existencia de cristales prismáticos transparentes de yeso en la cicatriz, indica que la formación de yeso continuó después de la formación de la costra, incluso la presión de crecimiento de estos cristales está ligada a la producción de escamas como se verá después.

Es posible que las cristalizaciones parietales que se dan en el tipo C se superpongan en alguna zona a las del tipo B.

Hay que señalar que la pintura de una cierva puede ocupar uno o más tipos de las superficies descritas, ya que éstas se reparten de forma irregular por toda la pared.

III.4. Alteraciones de Soporte y Pinturas

En función de sus características morfológicas y físico-químicas se han determinado tres tipos de alteraciones que afectan a las pinturas y/o soporte.

I.—El primero, que puede ser denominado como natural, consiste en la desaparición lenta de la pintura por la acción combinada del agua de circulación laminar y/o de condensación de la atmósfera. Este fenómeno afecta a casi la totalidad de las ciervas del Santuario, aunque de forma más acusada a los conjuntos 5 y 6 de Apellaniz (1982).

II.—El segundo tipo corresponde a procesos de descamación de la roca soporte con desprendimiento de plaquetas de roca que arrastran consigo la pintura que las cubría. Son plaquetas de espesor variable de orden milimétrico con anchura y longitud centimétrica. El desprendimiento de varias plaquetas adyacentes origina la apari-



Foto 5.—ARENAZA: Grieta de la pared rellena de cristales de calcita y yeso.

ción de grandes desconchones, en los que se observa la textura fresca de la roca normalmente recubierta, total o parcialmente, por una ligera película de microcristales blancuecinos o transparentes, con mayor concentración en grietas y fracturas de orden menor (inferiores a 1 mm. de anchura). Este tapizado cristalino aparece también en la cara interna de las plaquetas.

Un análisis detallado de estas descamaciones permite observar que en las zonas de fractura de orden mayor (superiores a 1 mm. de anchura), en los bordes de las cicatrices producidas por el desprendimiento de plaquetas, en los espacios libres que se producen entre la pared y la plaqueta antes de su desprendimiento y sobre la costra cristalina inicial, se encuentran cristalizaciones parecidas a las descritas para la superficie C, aunque con mayor desarrollo puntual.

La composición geoquímica de estas concreciones determinada por fluorescencia de R-X, es la siguiente:

Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe O + Fe ₂ O ₃	Mn O		
0.27	0.08	0.03	0.00		
Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅
1.51	57.86	0.00	0.02	0.01	0.07

Pérdida por calcinación: (H₂O + CO₂ + SO₃) = 40.15%.

Esta composición responde, según los resultados obtenidos por difracción de R-X, a la siguiente mineralogía:

Sulfato cálcico (yeso) como componente principal, acompañado de un pequeño porcentaje de carbonato cálcico en forma de calcita (1% a 2%) y aragonito (menos del 1%). La escasas proporciones de sílice y alúmina con el magnesio y el potasio corresponden a las inclusiones arcillosas.

Se trata por tanto de concreciones formadas casi exclusivamente por cristales de yeso prácticamente puros donde a diferencia de las concreciones de la superficie de tipo C, aquí predominan las asociaciones de cristales de yeso sobre los de calcita. Estos cristales euhedrales de yeso se encuentran en diferentes fases de crecimiento siendo los más transparentes los de mayor talla (hasta 3 mm) y forma prismática. El eje de crecimiento de estos cristales tiende a ser perpendicular a la superficie sobre la que crece, excepto en los engrosamientos de tipo botroidal en los que aparecen formas fibroso-radiadas. Los conjuntos blanquecinos están compuestos de microcristales de la misma naturaleza que los anteriores. Tanto unos como otros presentan inclusiones de partículas arcillosas aisladas.

Prácticamente la totalidad de los conjuntos pictóricos del Santuario están afectados, en mayor o menor grado, por este segundo tipo de alteraciones.

Aunque se observan cicatrices de aspecto antiguo la mayor parte de éstas son frescas, por lo que pueden calificarse de recientes, incluso existen plaquetas en curso de desprendimiento y plaquetas en el suelo caídas durante 1985 controladas directamente por el Prof. Apellaniz. También es significativa en este sentido la comparación de las fotografías del archivo del Museo Arqueológico, Etnográfico e Histórico Vasco con las obtenidas más recientemente por el Prof. Apellaniz muestra que la caída de plaquetas es un fenómeno que al menos recientemente se ha reactivado y/o ha aumentado su intensidad y que se está produciendo actualmente. A título indicativo, en dicha comparación fotográfica puede verse como en la cierva inferior del conjunto 1 se observan tres zonas donde se han desprendido plaquetas en el tiempo de unos 12 años. Por todo ello puede afirmarse que la mayor parte de las alteraciones se han producido en un corto espacio de tiempo y que la velocidad de degradación es preocupante, pues de seguir así las pinturas pueden desaparecer en unas decenas de años ya que se trata de procesos irreversibles.

III.—Un tercer tipo de alteraciones que afectan a las pinturas, aunque con carácter más restringido, está representado en la cierva superior del conjunto n.º 1 de Apellaniz,

donde el conjunto de la cierva casi ha desaparecido por el recrecimiento de una costra cristalina que ha ido levantando y abombando la pintura. Esta costra presenta las mismas características mineralógicas que las otras aunque aquí predominan las formas de tipo botroidal, apreciándose dos fases principales de crecimiento y algunas otras más secundaria en algún punto.

Los análisis realizados de las concreciones de tipo botroidal presentan una composición análoga a la anterior, con algo más de sílice, alúmina, magnesio y potasio.

Si O ₂	Al ₂ O ₃	Fe O + Fe ₂ O ₃	Mn O
4.54	0.42	0.16	0.00

Mg O	Ca O	Na ₂ O	K ₂ O	Ti O ₂	P ₂ O ₅
2.95	52.24	0.00	0.08	0.01	0.03

Pérdida por calcinación: (H₂ O + CO₂ + SO₃) = 39.60%

La mineralogía (DR-X) muestra al yeso como componente mayoritario, acompañado de una ligera proporción de arcillas e indicios de calcita, debiéndose a las arcillas los porcentajes de sílice, alúmina, magnesio y potasio.

Este tipo de alteración parece seguir un proceso de evolución más lento que el anterior o al menos no ha producido todavía daños irreparables, aunque es muy probable que siga su curso evolutivo en la actualidad.

La génesis de estos dos tipos de costras cristalinas de los tipos II y III de alteraciones está relacionada con un flujo de agua capilar que lleva en disolución SO₃ procedente de la oxidación de los sulfuros de hierro (pirita) existentes en la roca y bicarbonato cálcico procedente, a su vez, de la disolución de la caliza. Al aflorar dicha agua por las fisuras de la pared precipita, como es normal, el sulfato cálcico antes que el carbonato, y seguirá precipitando éste mientras exista ión sulfato.

La presencia de yeso como componente de espeleotemas ya fue estudiada por Polh and wite (1965) en Flint — Mammoth Cave de Kentucky, en la que atribuían su presencia a la oxidación de sulfuros dispersos en la caliza encajante del karst, siendo citado posteriormente dicho mineral por Bertolani et al (1976) en Grotta Grande del Vento — Grotta del Fiume (Italia), por Seeman (1982) en Dachstein-Mammuthöle (Austria) y en Carlsbad Cavern en New Mexico, aunque su génesis sigue siendo controvertida a nivel físico-químico proponiéndose diferentes modelos, sobre todo en relación con la procedencia del ión sulfato, suficientemente claro en el caso de Arenaza, donde la presencia de pirita ha sido detectada claramente dispersa en el interior de la roca encajante.



Foto 6.—ARENAZA: Detalle de cristales de yeso formados en las grietas.



Foto 7.—ARENAZA: Suelo al pié del panel de las ciervas con plaquetas desprendidas recientemente.

III.5. *Modelo de Formación de Plaquetas y Costras Cristalinas Asociadas.*

Se han establecido una serie de etapas que intentan explicar los procesos genéticos y evolutivos de las plaquetas y su relación con las costras cristalinas yesíferas.

III.5.1. Consideraciones Previas

De todo lo precedente es necesario resaltar lo siguiente:

1.—La cueva de Arenaza no ha sufrido modificaciones naturales recientes de importancia.

2.—Las labores mineras desarrolladas en la cueva han modificado la morfología kárstica, la circulación hídrica subterránea y han podido producir una fracturación artificial de la roca encajante y ampliar la red de diaclasas de dicha roca.

3.—Aunque existe un informe del Laboratorio de Ensayo e Investigación Industrial "L.J. Torrontegui" de la E.T.S. de Ingenieros Industriales de Bilbao (1980), en el que se asegura que las explosiones de la explotación de la cantera vecina, situada entre 250-300 m. de las galerías de la cueva, no afectan a la estructura de la cueva, nada se dice sobre la velocidad de vibración de la pared con pinturas del Santuario que se produce con dichas explosiones, y aunque no disponemos de datos —en su día se propuso un estudio de dichas vibraciones a la Diputación Foral de

Vizcaya— la proximidad de la cantera y la inexistencia de discontinuidades geológicas importantes entre ambas, nos hace suponer que dicha velocidad de vibración es superior a lo aconsejable.

4.—La descamación es un fenómeno que aunque ha existido antes de las pinturas, se ha reactivado recientemente y se produce actualmente, con una velocidad de degradación importante, pero no cuantificada.

5.—Las costras cristalinas del soporte son de carácter mixto, compuestas por yeso y calcita, mientras que las asociadas a las descamaciones y a abombamientos son de yeso, lo que implica un cambio en las características geoquímicas del agua que aflora a la pared.

III.5.2. Modelo de Formación

Etapas I. Preparación de la roca encajante.

La roca encajante además de diaclasas y grietas, presenta un tipo de fisuración paralela a la superficie de la pared y próxima a ésta como muestra la figura 2 (I y II). Este tipo de fisuración puede deberse a dos factores principales, por una parte a las tensiones de carga a que está sometido todo conducto subterráneo (Bogli 1980), sobre todo teniendo en cuenta las características favorables de la roca, y por otra a las vibraciones a que fueron sometidas las paredes por las explosiones de las prospecciones mineras.

En época reciente, ambos factores deben haber actuado conjuntamente, o dicho de otro modo, a la acción del pri-

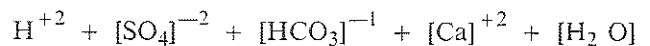
mero ya existente deben haberse sumado los efectos del segundo por las siguientes razones:

—Existen dos etapas de descamaciones, una anterior a las pinturas y otra reciente y actual. La primera de menor intensidad y asociada a costras de menor desarrollo y diferente composición mineralógica que la segunda. Si el primer factor es el responsable de la primera etapa de fisuración y descamación, alcanzándose un equilibrio posterior, es necesario introducir otro factor desestabilizante que sumándose al existente, rompa el equilibrio y cambie las características geoquímicas del agua kárstica originando una nueva fase de descamación más intensa. Dada la modernidad de esta segunda fase, es posible atribuir su causa a las prospecciones mineras, es decir a las vibraciones producidas en las paredes de la cueva por los explosivos empleados en su interior, y no a causas naturales ya que las condiciones kársticas no han cambiado recientemente.

En resumen, la suma de estos dos factores ha modificado la situación de "equilibrio" existente, generando nuevas fracturas y/o ampliando las existentes en longitud y anchura, lo que, a su vez, facilita la circulación de agua por éstas.

Etapas II. Formación de Cristales

Una vez ampliado el sistema de fisuras circula por ellas agua por capilaridad que tiende hacia el exterior (Fig. 2-III). En la composición del agua se encuentran en disolución iones sulfato y bicarbonato cálcico cuya procedencia ya se ha explicado anteriormente, que configuran un sistema geoquímico abierto que puede expresarse por:



del que no se conocen, por ahora, datos suficientes para determinar las condiciones físico-químicas de precipitación de las diferentes fases minerales encontradas, aunque se dispone del resultado final que es la formación de cristales de yeso, calcita y aragonito. En todo caso el mecanismo de precipitación debe estar ligado a concentraciones de saturación que son relativamente fáciles de alcanzar en la interfase roca-aire por evaporación, teniendo en cuenta las cantidades mínimas de agua aportada y el espesor de la lámina de ésta que se extiende por la superficie de la roca.

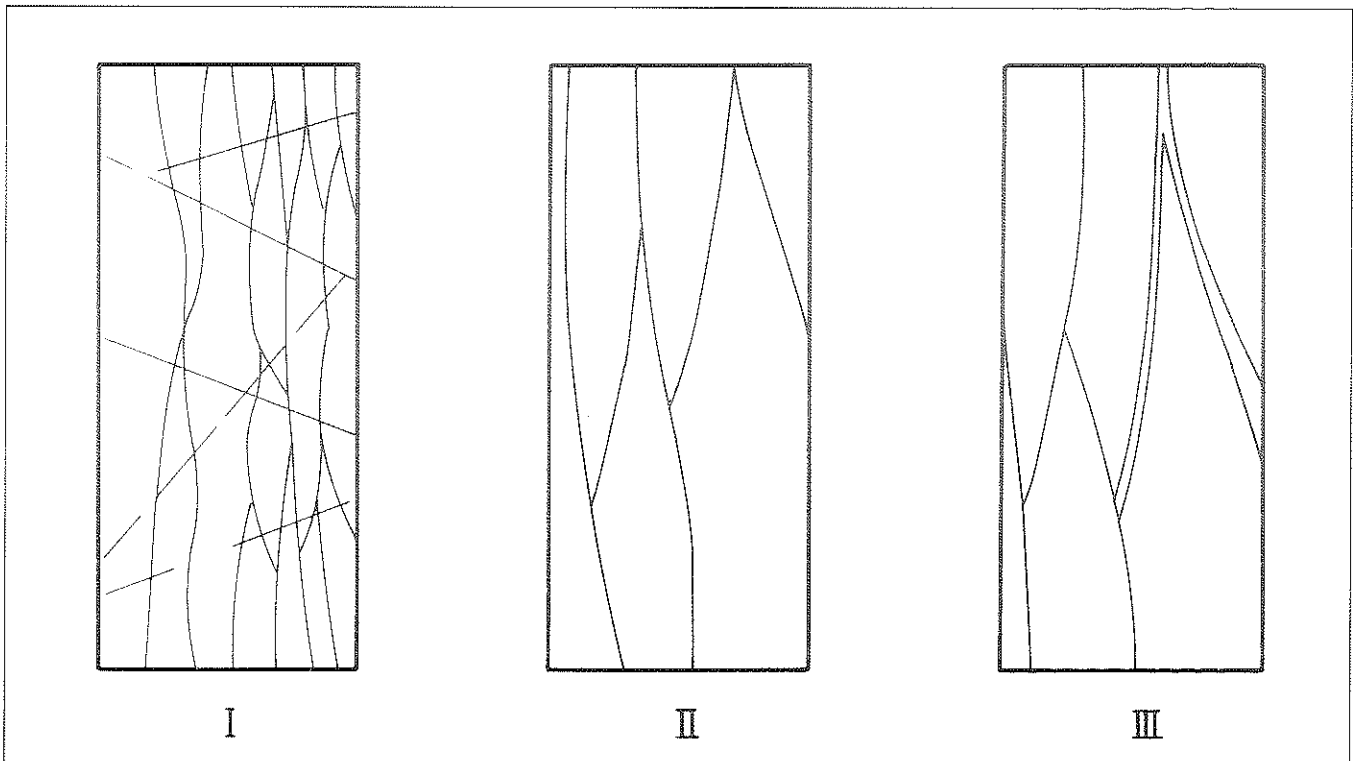


Figura 2

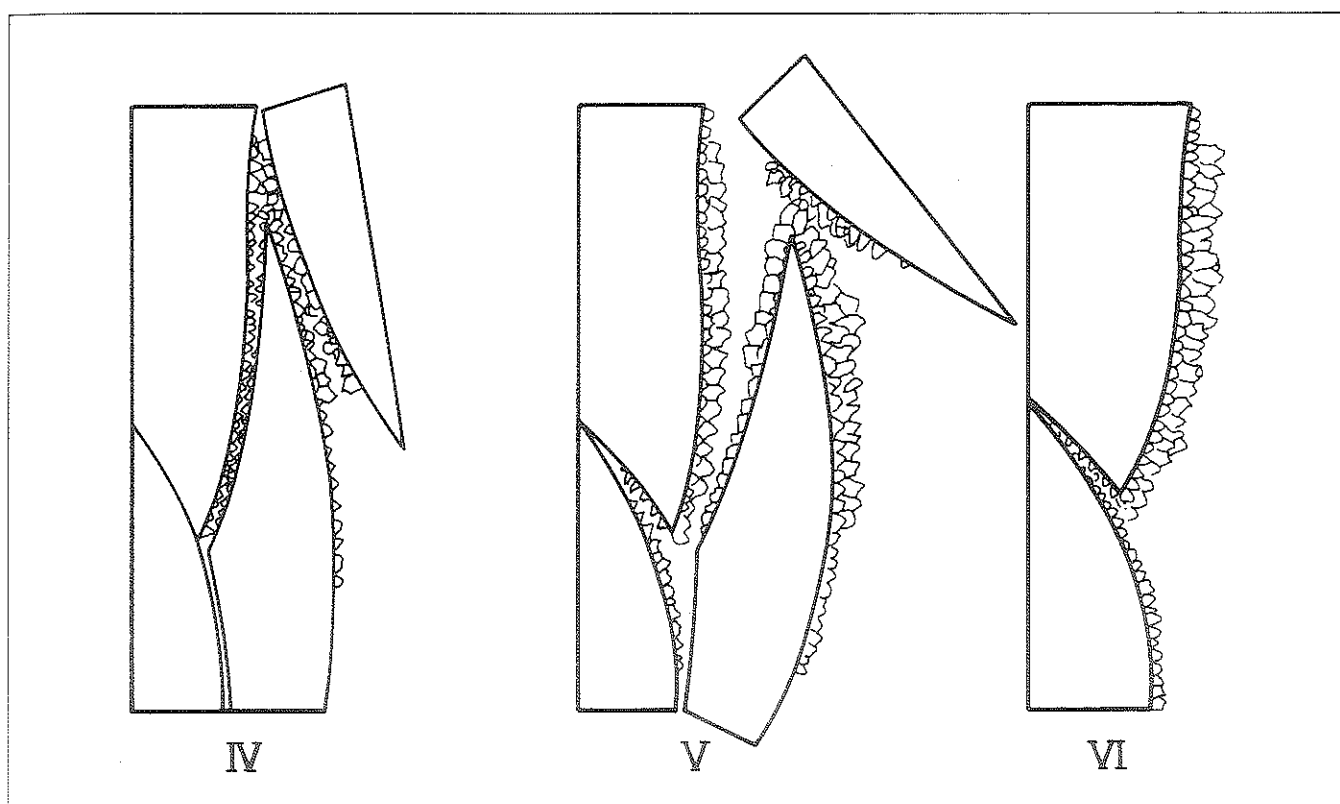


Figura 3

Aunque no se conocen las condiciones microambientales del Santuario, las tres puertas metálicas que lo aíslan del exterior (dos en la galería de acceso y otra en la sala exterior) confieren una cierta estabilidad ambiental al mismo, con muy escasa circulación de aire, lo que en principio favorece la formación de cristales.

Etapa III. Formación de Plaquetas

En una primera fase se produce una trama compleja de microcristales que tapizan ambas caras de la fractura tendiendo a rellenarla. A la vez se generan unos primeros esfuerzos perpendiculares a la superficie de crecimiento de los cristales, es decir perpendiculares a las paredes de la fractura, producidos por la presión de crecimiento de los propios cristales que tienden a ampliar la fractura separando sus caras (Fig. 3-IV). Dicho efecto puede ser favorecido por las vibraciones que

se producen en la pared debido a las explosiones de la cantera próxima.

En fases sucesivas el fenómeno se repite y la presión de crecimiento de nuevos cristales separará aún más las caras de la fractura definiendo cada vez más la plaqueta, hasta que ésta queda unida a la pared solo por la unión de los cristales. Cuando esta fuerza de unión sea inferior al peso de la plaqueta o se vea perturbada por otra causa, ésta caerá (Fig. 3-V). Esta perturbación puede ser verosimilmente la vibración producida en la pared por una voladura de la cantera próxima.

La formación de los cristales de mayor talla (3 mm.), prismáticos y con caras bien definidas es un fenómeno tardío que se produce cuando éstos tienen espacio libre suficiente para crecer, lo que ocurre cuando la fisura es suficientemente ancha antes del desprendimiento de la plaqueta o después de desprendida ésta (Fig. 3-VI).



Foto 8.—ARENAZA: Detalle de las plaquetas anteriores. Las de mayor talla están comprendidas entre 4 - 5 cm.

III.6. Conclusiones

Se trata de procesos irreversibles relacionados con las características físico-químicas de la roca encajante, que comenzaron a desarrollarse desde antiguo. No obstante, desde que las pinturas se realizaron hasta su descubrimiento, su velocidad de degradación fue muy inferior a la existente desde su descubrimiento hasta hoy.

Los desprendimientos de plaquetas están directamente relacionados con la presión de crecimiento de los cristales de sulfato cálcico y el grado de fisuración de la roca encajante. El cambio en las características geoquímicas del agua, con mayor abundancia en sulfatos, puede haber estado relacionado con los trabajos antiguos de prospección minera.

Dado que actualmente se observa una mayor velocidad de degradación en las pinturas, es más que probable que exista una relación directa de causa-efecto entre las explosiones de la cantera el desprendimiento de plaquetas. Las vibraciones producidas pueden ampliar las fisuras favoreciendo la precipitación de yeso, y pueden, a su vez, desprender las plaquetas que se encuentren en un equilibrio precario.

El que en otras zonas más externas de la cueva no se formen estas cristalizaciones, puede deberse a una diferente composición en sulfuros de los bancos calcareos en los que se generó el Santuario, aunque es posible una cierta influencia del cierre casi hermético de las dos puertas metálicas de la galería de acceso.

IV. CUEVA DE ALTAMIRA

IV.1. Introducción

La cueva de Altamira es suficientemente conocida como para no necesitar presentación, siendo la primera y durante mucho tiempo la única cueva española de cuyos problemas se han ocupado de una forma u otra diferentes investigadores, aunque siempre de una forma parcial e incompleta, distando mucho de estar resueltos. Este trabajo es un resumen de los resultados obtenidos en 1981, sin que hasta ahora se hayan podido continuar.

IV.2. Características Kársticas

La cueva de Altamira se encuentra en la zona superior de un pequeño cerro calcáreo (158 m.s.n.m.), en la divisoria de los términos municipales de Santillana del Mar y Reocín.

De de las características kársticas (Hoyos et al., 1981) más sobresalientes relacionadas con la conservación de la cueva puede resumirse lo siguiente:

Se trata de un karst tabular, poligénico y senil de edad Pliocena, cuyas cavidades superiores (Altamira) se encuentran próximas a la superficie. Su génesis y evolución han estado condicionadas por la estructura y la fracturación, donde los conductos y cavidades han evolucionado fundamentalmente por desplomes gravitacionales, existiendo escasa formación de espeleotemas.

En toda la zona externa de la cueva, hasta la Sala de los Muros, las galerías presentan secciones rectangulares o trapezoidales limitadas a techo por un plano de estratificación que nada tienen que ver con las antiguas formas relacionadas con la erosión de la circulación hipogea. Son formas inestables producidas por hundimientos, lejanas a las formas de equilibrio kárstico, en las que la potencia del estrato que forma el techo y el no excesivo ensanchamiento de las diaclasas por carga y disolución permiten su conservación. Este es el caso del techo de los Polícromos.

El desprendimiento de bloques del techo es un fenómeno generalizado por toda la cueva, siendo patente sobre todo en las zonas externa y media y algunos grandes bloques en la Gran Sala. Es conocida la caída de bloques durante la excavación de Obermaier.

Otro fenómeno de la misma índole es el hundimiento del suelo, patente en la Sala de la Hoya donde a ambos lados de la entrada existen restos de una antigua corteza estalagmítica cortada, correspondiendo aproximadamente el descenso del piso a favor de una cavidad inferior al desnivel existente entre ésta sala y la Gran Sala. Más al interior se encuentra una gran estalactita unida a su co-

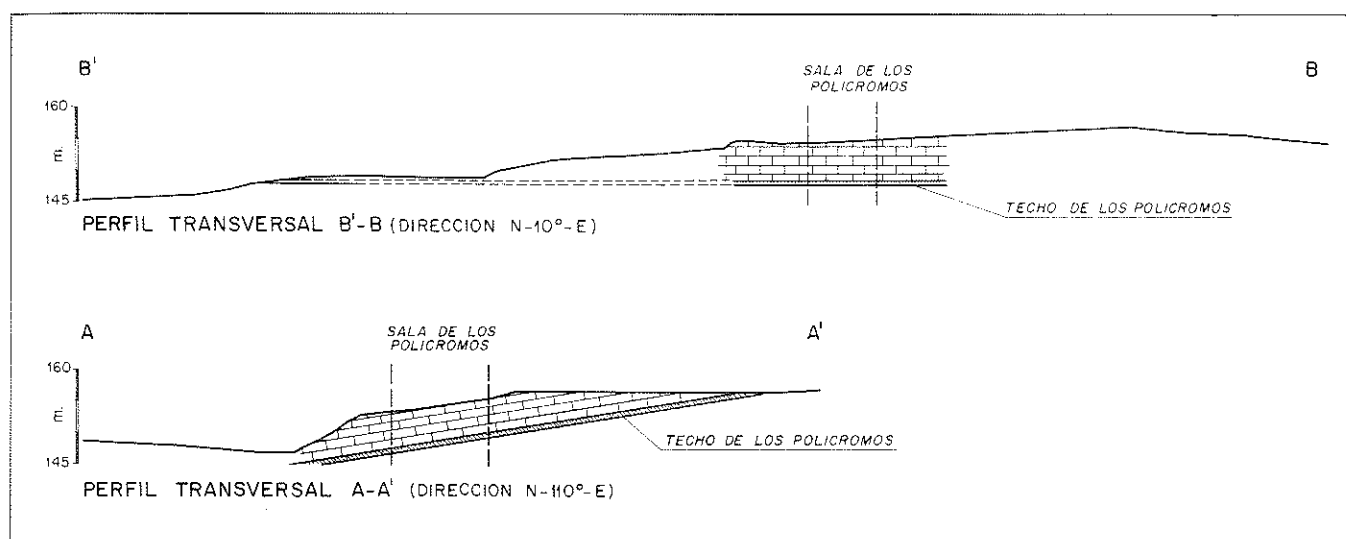


Figura 4

respondiente estalagmita rota por tracción debido al hundimiento del piso, siendo más reciente aún el desplazamiento vertical aparente de uno de los pilares construidos para la sustentación.

Se trata por tanto de una cavidad senil en fase de desmantelamiento o destrucción en sentido kárstico, de la que se desconoce casi por completo su grado de estabilidad estructural.

La cueva está situada en la zona vadosa del karst con alimentación hídrica por infiltración directa de agua de lluvia (Gómez Laá, 1980), siendo escasa la circulación de agua a nivel de la cueva produciéndose ésta preferentemente por fracturas dada la muy escasa permeabilidad de la roca, como se verá más adelante. El freático con niveles locales colgados se encuentra a cotas inferiores, siendo el nivel de base general del karst el río Saja. Las particularidades de la circulación relacionadas con la Sala de los Polícromos se exponen más adelante.

IV.3. Características de la Roca Encajante

Se realizó en su día (Hoyos et al., 1981), un estudio detallado del tramo calcáreo en el que se encuentra la cueva, con especial atención al techo de los polícromos, ya que una parte de los procesos de alteración que afectan a Altamira están relacionados con las características de la roca encajante.

El tramo de la serie carbonatada de edad Albiense en la que se encuentra Altamira está formado por calcarenitas

de color beige en bancos de 0.5-10.0 m., con intercalaciones de niveles arcilloso-limosos de color beige a gris verdoso, de orden centimétrico.

Dichas calcarenitas corresponden a biomicritas y bioesparitas con textura deposicional de tipo packstone, a veces parcialmente borrada por recrystalización o dolomitización, siendo los fósiles restos de orbitolinas, placas de pelmatozoos, microforaminíferos, bivalvos, etc. Muchos de los fragmentos fosilíferos presentan micritización total o incipiente en los bordes. Cuando la dolomitización es completa los fósiles y la matriz desaparecen quedando solo pequeñas huellas de placas de pelmatozoos.

Además de los minerales carbonáticos, se encuentran granos de cuarzo detrítico finos (inferiores a 60 micrones), asociados preferentemente a caparzones de orbitolinas, con aspecto aparente de formar laminaciones, que han sido interpretadas como estructuras deposicionales por Valle et al. (1978). Existen también detríticos finos de carácter arcilloso.

La recrystalización principal es de micrita a microesparita, lo que da lugar a una pérdida parcial o total, según las zonas, de la porosidad matricial de la roca. Las cementaciones tardías, bastante generalizadas, se encuentran rellenando fisuras lo que también contribuye a dar una mayor compacidad a la roca. La porosidad actual de estas rocas se debe fundamentalmente a disoluciones posteriores a estos procesos, lo que ha originado microporos y ampliado pequeñas grietas de origen tectónico. En todo caso

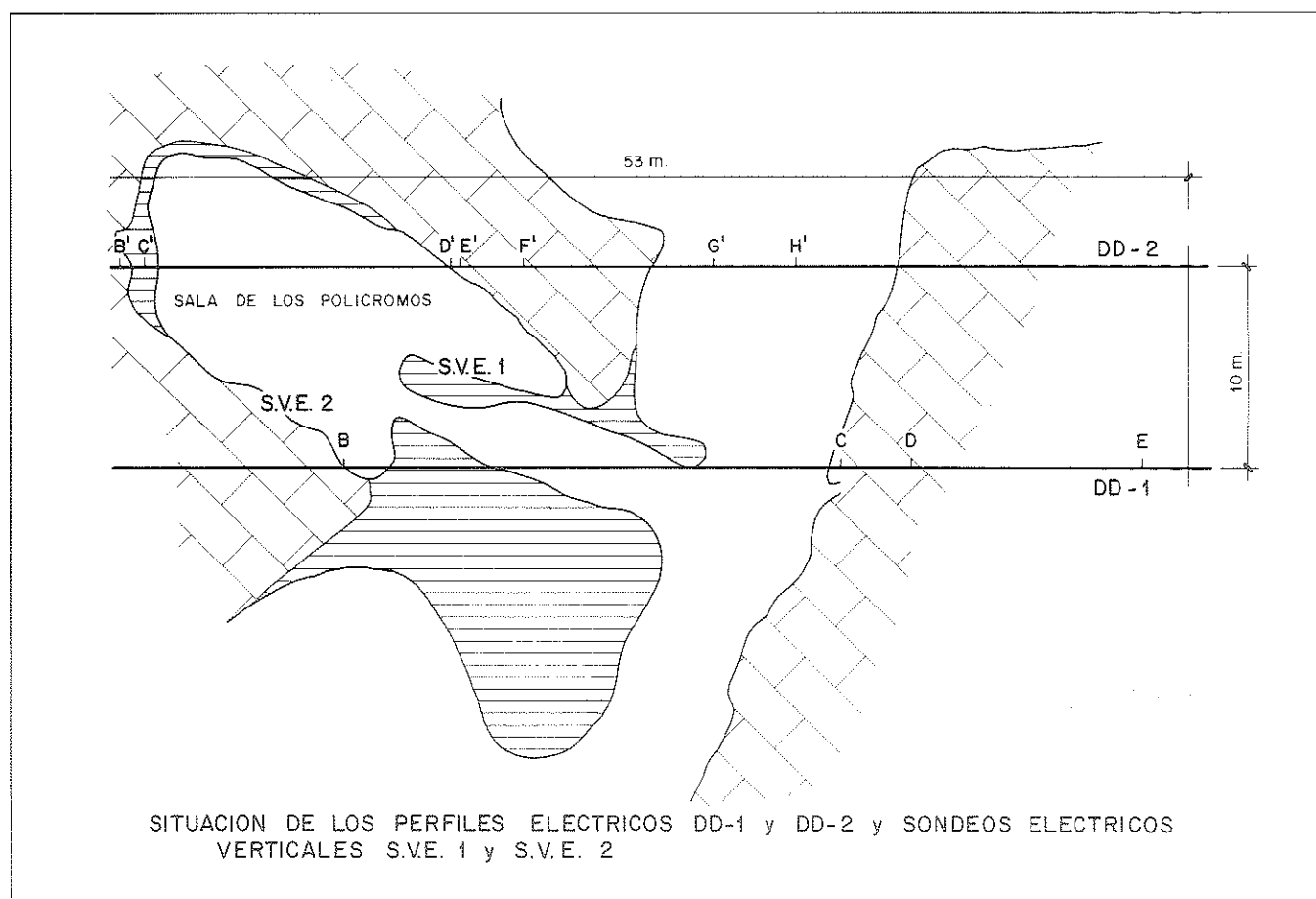


Figura 5

dicha porosidad no supera el 1% por unidad de superficie, siendo el tamaño de los poros de 400 a 30 micrones. Los ensayos sobre el grado de saturación en agua (Hamrol, 1961), muestran valores insignificantes. En resumen, puede afirmarse que la capacidad de adquisición y circulación de agua por la roca no está ligada a la textura de la misma que se comporta prácticamente como impermeable, sino a formas mayores como macrovacuolas y fracturas, sin que se pueda negar una cierta importancia a la microporosidad en los procesos de alteración de la roca.

El residuo insoluble de estas rocas oscila entre 3.3-11.1%, de los cuales un 45% lo constituyen arcillas, que de acuerdo con los datos analíticos de Valle et al (1978) corresponden mayoritariamente a montmorillonita y en menor proporción illita y caolinita.

Las direcciones de fracturación dominantes que afectan a la roca encajante en el interior de la cueva presenta un máximo N-60-70-E, seguido de otros dos relativos de direcciones N-40-50-E y N-80-90-E, sin una densidad de fracturación homogénea. Los planos de fractura son verticales o inclinados por encima de 70°. Existen planos de fractura próximos a la horizontal que afectan a depósitos kársticos pero son debidos a colapsos gravitacionales y no a la tectónica.

En consecuencia, la senilidad del Karst, la estructura tabular de las calizas y la fuerte pendiente de los planos de fractura explica la relativa facilidad existente en Altamira para que se produzcan desplomes gravitacionales. Además, ya que la litología se comporta prácticamente como impermeable, la circulación de agua debe realizarse

por estas fracturas favoreciendo su ensanche por disolución.

IV.4. La Roca Encajante y su Relación con el Entorno

Las características petrológicas de la roca soporte, tanto del techo de la Sala de los Polícromos como de otras partes de la cueva con pinturas son las mismas que las expuestas en el apartado anterior.

El techo de la Sala de los Polícromos lo forma el muro de un estrato calcareo de 40-45 cm. de potencia que se acuña hacia el Sur, aunque puede observarse en la entrada, donde está hundido en parte, y seguirse por otras zonas del interior de la cueva. Lo separan actualmente de la superficie exterior un paquete de calizas de solo 7 m. de potencia, a los que habría que sumar 1,5 m. que fueron extraídos por la explotación de una cantera.

Las formas abombadas que presenta el techo y que sirvieron para dar relieve a las pinturas corresponden a deformaciones hidroplásticas sinsedimentarias que afectan al muro del estrato.

La superficie del techo sobre la que se encuentran las pinturas está afectada por procesos de micro-corrosión que dan lugar a pequeñas cúpulas de diámetros milimétricos. Estos procesos son anteriores a las pinturas, al menos en parte, puesto que éstas las cubren, e indican que el techo de la Sala permaneció largo tiempo en condiciones subáreas.

Adherida al techo existe una película de arcillas discontinua, irregularmente repartida y a veces carbonatada, que puede atribuirse a acumulaciones por corrientes de convección de polvo arcilloso en suspensión en el aire, o bien en acumulaciones de arcillas por evaporación del agua capilar que aflora al techo y que las transportaba en suspensión en ínfima cantidad, antes de la realización de las pinturas. Esto último parece más probable puesto que no existen arcillas sobre las pinturas.

Los espeleotemas que afectan al techo son de escasa entidad y dos tipos diferentes. Por una parte estalactitas incipientes de las denominadas "macarroni" y por otra algunas placas calcáreas de microcristales de calcita precipitados por evaporación de la lámina de agua del techo y concentración de carbonatos. Pueden llegar a disolverse si el agua que llega de nuevo a la zona no está saturada de bicarbonato cálcico y la presión parcial de CO_2 en el aire es suficientemente alta.

La actividad hídrica que dio lugar a estas formas ha cambiado en el tiempo. Actualmente hay zonas del techo completamente secas en las que existen raíces de estalactitas abortadas y otras zonas húmedas donde la formación de estos espeleotemas es activa.

Al menos una parte importante de las pinturas presenta carbonatada la zona de contacto con el soporte. Esta carbonatación por microcristales de calcita engloba la pintura como si se tratase de una cementación.

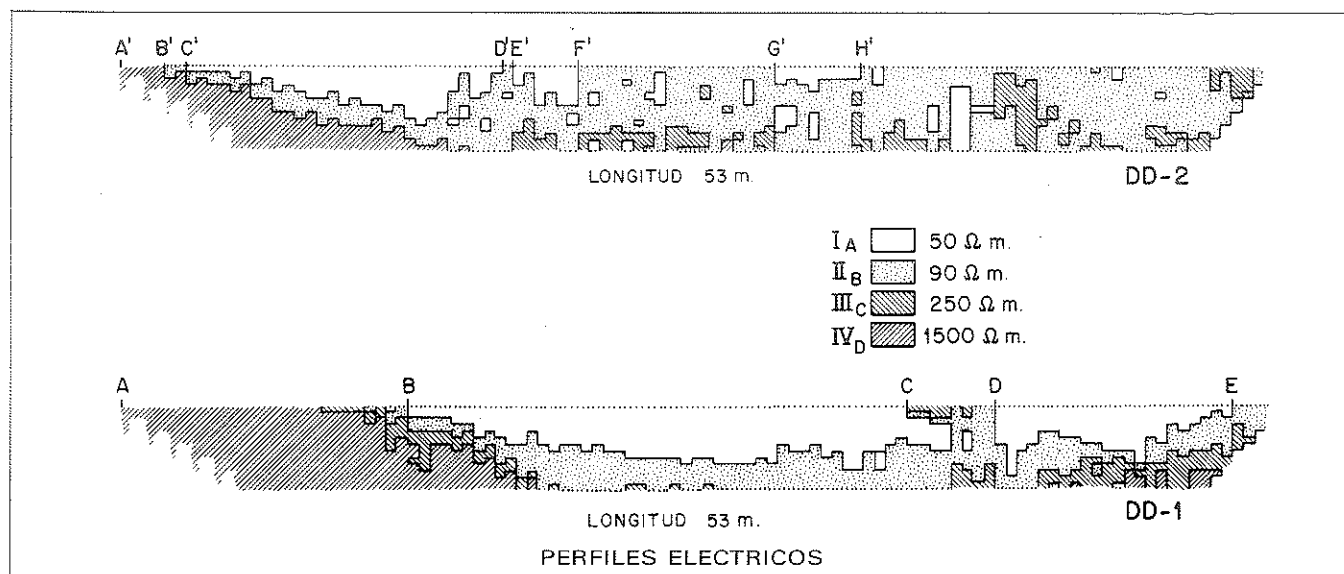


Figura 6

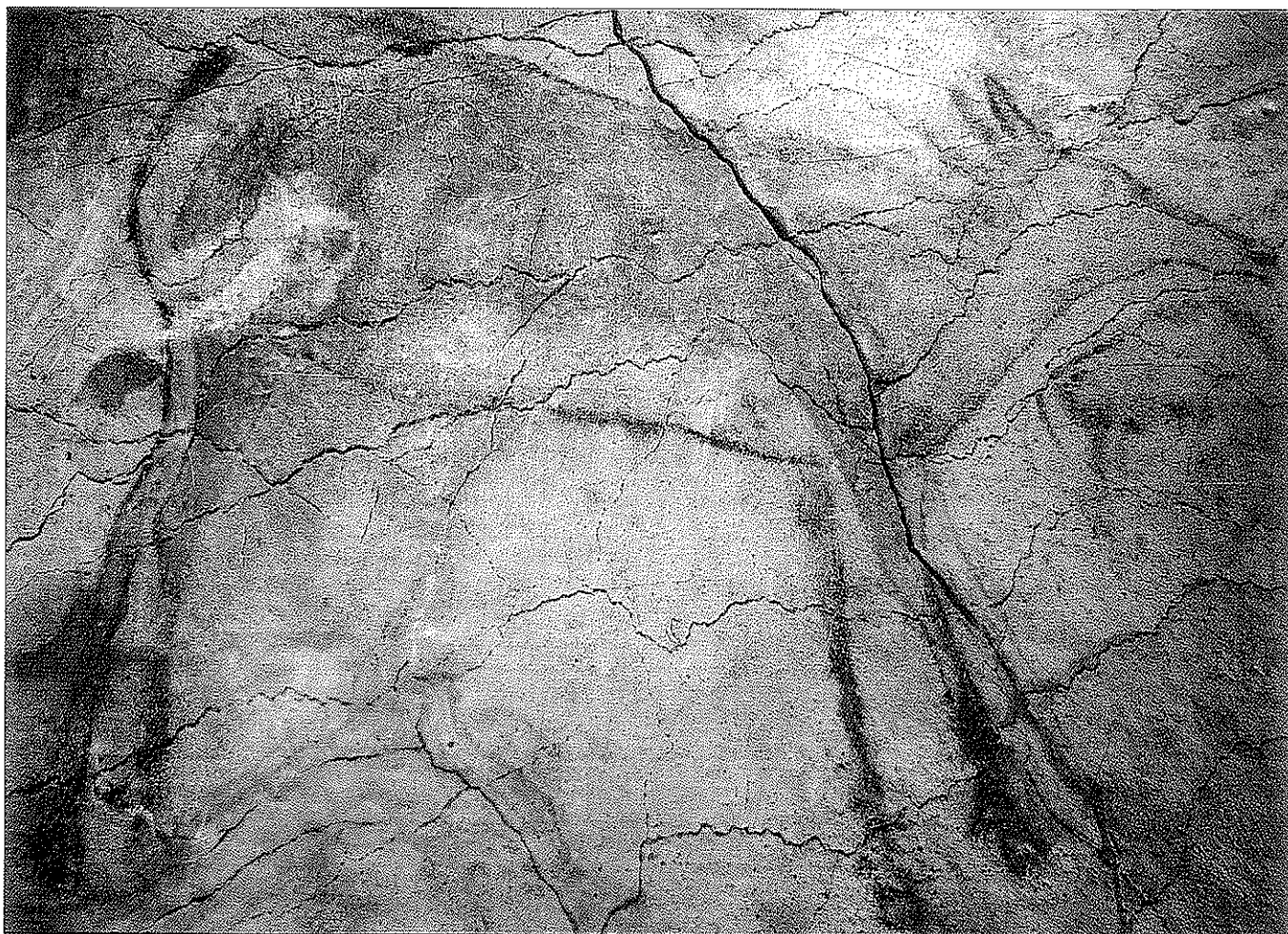


Foto 9.—ALTAMIRA: Cierva fotografiada en 1981, en la que se aprecia un cierto estadio de la veladura

Gran parte de la cueva y de su cobertera, incluyendo el estrato de la Sala de los Polícromos, se sitúan por encima de la cota máxima de influencia de los posibles aportes laterales de agua infiltrada en el karst procedente de zonas topográficamente más altas, por lo que el agua que aflora en el techo de los Polícromos se debe exclusivamente a la infiltración del agua de lluvia en un área muy reducida, limitada por la intersección del “plano” del techo de los Polícromos con la superficie del terreno y por la intersección de un plano vertical que pasando por el extremo E. SE. de la Sala de los Polícromos tenga dirección N.NE-S.SO, es decir

perpendicular a la dirección de buzamiento de las capas calcáreas. (Fig. 4).

Dentro de este área se encuentran parte de las alteraciones antrópicas que afectan a la zona externa del karst, como son el transformador, el depósito de agua de la parte superior, una parte del edificio del Museo (3), así como la antigua cantera y la lechada de cemento sobre la superficie exterior.

Los sondeos eléctricos dipolo-dipolo de 53 m. de longitud, paralelos y separados 10 m, y S.E.V. de 4 y 8 m. realizados en la superficie antes delimitada de influencia directa sobre la Sala de los Polícromos, con objeto de eva-



Foto 10.—ALTAMIRA: La misma cierva fotografiada en 1989, en la que se aprecia la evolución de la veladura en relación al estadio anterior.

luar la distribución del agua en las capas suprayacentes al techo de los Polícromos en función de la mayor o menor resistividad, teniendo en cuenta la impermeabilidad de la roca y que la circulación de agua se realiza por fracturas, han puesto de manifiesto lo siguiente: (Fig. 5 y 6).

- Una zona basal de resistividad alta, por tanto con escasa agua, que constituye una cubeta de fondo resistivo.
- Sobre ella se sitúa una banda de resistividad normal y forma de doble cubeta con un umbral intermedio de mayor resistividad. En esta zona la cantidad de agua existente es superior a la de la zona inferior.

—Sobre la anterior y hasta la superficie se encuentra una tercera zona con la misma forma de doble cubeta que la anterior y adaptada a ella, pero altamente conductora indicando un mayor almacenamiento de agua que en las dos zonas anteriores.

Dada la impermeabilidad de la roca y que por tanto el almacenamiento de agua debe producirse en fracturas, la zonación señalada implica una gradación en la densidad de fracturas desde el techo de los polícromos hasta la superficie. Si las fracturas fuesen de origen tectónico habrían afectado prácticamente por igual a todo el conjunto calcareo, como ocurre en otras zonas del mismo karst, y no

presentarían esta gradación, ni esta distribución en formas de cubeta en el almacenamiento de agua.

En consecuencia esta distribución y mayor abundancia anómala de la fracturación hacia el exterior debe atribuirse a causas antrópicas, siendo la antigua cantera con sus explosiones, la única actividad externa de la zona con capacidad para producir dicha fracturación. Además estas formas de cubetas pueden deberse a la penetración hacia el interior de la fisuración artificial en forma pseudorradiada por las explosiones de los cartuchos de pólvora empleados en la cantera.

El agua "almacenada" en la zona superior fluye hacia el interior hasta alcanzar el techo de la cueva ya sea por fracturas naturales donde no alcanzó la fisuración artificial, o continuando su descenso por la roca hacia zonas más profundas del karst, puesto que la cantidad de agua procedente de lluvia caída sobre la superficie exterior de influencia potencial en la Sala de los Polícromos es muy superior a la que gotea y se extiende por el techo de dicha sala Villar et al. (1983), existiendo un marcado desfase entre el máximo de pluviosidad y el máximo de infiltración. Ello implica una velocidad baja de infiltración o circulación vertical para un espesor de 7 m. de media entre superficie del techo y exterior, lo que indicaría una ausencia casi total de fracturas verticales abiertas, y puesto que fracturas existen, éstas deben tener rellenos de arcillas, recristalizaciones o simplemente presentar discontinuidades en los niveles arcillosos intracalcareos, que actúan como tapones frente a la circulación.

Un punto de excepción en la circulación vertical del agua lo constituye el inventariado por Villar con el n.º 20 (Villar et al., 1983) cuyo caudal, aunque no evaluado, es discontinuo pero importante teniendo una respuesta inmediata a las variaciones de la pluviosidad externa. Dicho punto corresponde a un estrecho conducto ascendente de sección irregular, generado en la confluencia de dos grandes diaclasas, una en la dirección de la generatriz de la galería que une la Sala de la Cocina con la Sala de los Muros, y la otra de dirección casi perpendicular a la anterior correspondiente a una de las generatrices de la Sala de los Polícromos. Un análisis geomorfológico de dicho tubo permite distinguir tres etapas de funcionamiento diferente, una primera erosiva de circulación libre que es la generadora del tubo, una segunda de circulación laminar con formación de espeleotemas estalagmíticos en cascada y una tercera de reactivación con las características de circulación actuales. Teniendo en cuenta su posición con respecto a la Sala de los Polícromos y el buzamiento de las capas hacia este lugar, el agua que actualmente surge es caudal que se le resta a la Sala de los Polícromos. La posible relación

entre esta última reactivación de la circulación por dicho conducto y las modificaciones estructurales producidas por la cantera no han podido establecerse con seguridad, pero no se descartan.

IV.5. Alteraciones de las Pinturas

Son numerosos los trabajos en los que de una forma u otra se han abordado los problemas de las alteraciones de las pinturas de Altamira. De los trabajos más recientes destacan los de García Lorenzo y Endériz García (1972), Valle, Moya y Cendrero (1978), Cabrera (1980) y Cendrero (1980). Todos ellos coinciden en el fondo de los problemas, aportando cada uno matizaciones de detalle.

Por nuestra parte, teniendo en cuenta la proximidad a la superficie de la Sala de los Polícromos y las particularidades características kársticas del entorno limitado que le puede afectar, los procesos de alteración de las pinturas de la Sala de los Polícromos pueden agruparse en dos tipos:

- Procesos de alteración directos. Aquellos que afectan directamente a la integridad de las pinturas.
- Procesos de alteración indirectos. Aquellos que afectan a alguna parte del karst y cuyas consecuencias pueden repercutir o han repercutido ya en la conservación de las pinturas.

IV.5.1. Procesos de alteración Directos

Se han distinguido tres tipos fundamentales:

IV.5.1.1. Descamación. Corresponde este fenómeno al desprendimiento de partículas de orden milimétrico, que partiendo de un núcleo central se extienden más o menos hacia la periferia, por lo que se trata de una alteración irreversible.

Su origen lo atribuimos, de acuerdo con Cendrero (1980), a las tensiones internas que se producen en las arcillas expansivas (montmorillonitas) por la alternancia de humectaciones-deseccaciones, dada la capacidad de absorción de agua y el consiguiente cambio de volumen de estas arcillas. Para Cendrero dichos fenómenos se producen en la película más externa de la roca soporte debido a pequeñas concentraciones de estas arcillas en el interior de la roca. En los análisis realizados por nuestra parte no hemos localizado dichas concentraciones de arcillas ni en la zona externa, ni en el interior de la roca soporte, por lo que nuestra interpretación difiere sustancialmente en cuanto a la localización de los procesos y los materiales afectados.

Para nosotros las arcillas en cuestión son las ya citadas al referirnos a las características de la roca soporte, constituyentes de la película existentes entre la roca y las pinturas. Dentro de las superficiales posibilidades de estudio

del problema sin dañar las pinturas, la interpretación del fenómeno parece más compleja, ya que parece producirse preferentemente donde la base de la pintura está carbonatada pero menos que en otras zonas. La fijación de carbonatos (cementación) de la base de la pintura le resta a ésta plasticidad confiriéndole a la vez mayor rigidez, lo que facilita la rotura al deformarse por hinchazón las arcillas situadas debajo, a la vez que se favorece el despegue entre pintura-arcillas-soporte en los momentos de desecación.

Se observa un mayor desarrollo de estos procesos en la zona de tránsito entre la parte del techo que actualmente permanece húmeda y la seca, lo que parece indicar que son procesos ligados a la regresión de humedad habida en el techo, siendo la zona de tránsito la que periódicamente se humedece y seca un mayor número de veces, mientras que la húmeda se seca un número menor de veces y la seca se humedece solo ocasionalmente.

Estos procesos no pueden producirse con las condiciones de impregnación constante por agua de toda la superficie del techo de los Policromos descritas por Villar (Villar et alii, 1983, 1984) como punto de partida para sus argumentaciones del flujo de agua y humedad. Por nuestra parte hemos podido comprobar a cueva cerrada y sin visitantes la existencia de los tres ambientes citados, húmedo constante, de transición y seco, por lo que dichos procesos pueden continuar desarrollándose en el caso de producirse cambios en las condiciones microclimáticas internas que den lugar a desecaciones-humectaciones.

La procedencia del agua se debe a circulación capilar y/o condensación, por ello los cambios de humedad y temperatura ambientales, y la circulación de corrientes de aire favorecen estos procesos.

IV.5.1.2. Lavado y Erosión por Disolución.

Los componentes minerales de las pinturas, óxidos de hierro, óxidos de manganeso y carbón vegetal, se disuelven muy lentamente en agua, sobre todo teniendo en cuenta la mayor resistencia adquirida por las pinturas debido a la cementación carbonatada de su base, pero con el tiempo la disolución es apreciable. La erosión por circulación de agua, al menos con los caudales laminares ínfimos existentes hoy, es un fenómeno difícil de apreciar a simple vista, siendo necesario para su evaluación análisis geoquímicos del agua del techo en los que se determine la presencia y cantidad de los óxidos citados, sobre todo el de manganeso ya que este no existe en la roca encajante. Es un hecho que algunas de las pinturas han sufrido deterioros por estos procesos, incluso alguna ha desaparecido, pero no parece en este momento un problema acuciante, sobre todo si las aguas son "incrustantes" según los resultados de Villar (Villar et al., 1984).

IV.5.1.3. Formación de Espeleotemas

Es un fenómeno ligado a la circulación kárstica, grado de saturación en bicarbonato cálcico del agua, presión parcial CO_2 en la atmósfera interior y temperatura. Se han distinguido dos tipos de espeleotemas vadosos cenitales actualmente en formación aunque con escaso desarrollo.

IV.5.1.3.1. Concrecciones Calcáreas

Se produce en zonas normalmente asociadas a fracturas por las que llegan los aportes de agua con bicarbonato cálcico en disolución, saturada o no, que se extiende por capilaridad a ambos lados de la fractura, de forma irregular y según la microtopografía existente, en forma de una lámina finísima cuyo espesor está controlado por la tensión superficial del líquido. Por evaporación parcial o total del agua, debida normalmente a un aumento de temperatura, se alcanza la saturación en la solución y precipita el carbonato cálcico en forma de microcristales de calcita o aragonito según las condiciones físico-químicas. Estos son susceptibles de disolverse si llega un nuevo aporte de agua no saturada y existe suficiente presión parcial de CO_2 en el ambiente. Por el contrario, si a partir de los primitivos cristales que actúan como núcleos de cristalización, los nuevos aportes de agua reúnen las condiciones iniciales, el crecimiento de los cristales continuará y una vez que alcancen suficiente desarrollo el proceso ya no será reversible aunque posteriormente cambien de nuevo las condiciones ambientales.

En este caso tampoco es admisible la afirmación de Villar de que el agua impregna constantemente el techo de los Policromos y que el flujo de agua es constante pues no podrían formarse ni modificarse dichas concrecciones. Sin embargo un ejemplo de que los procesos citados existen actualmente, y por tanto los flujos de agua no son constantes, puede observarse en la diferencia existente en dos fotografías de la cierva, una de 1981 y otra de 1989 (esta última cedida amablemente por el Prof. F. Bernaldo de Quirós), en las que se aprecia lo siguiente:

- La concreción carbonatada blanquecina del anca de la cierva se ha extendido de forma difuminada (veladura) por gran parte de la pata trasera alcanzando la parte inferior del vientre, prolongándose fuera de la pintura por una fisura hasta unirse a favor de ésta con otra concreción situada algo más bajo.
- La misma concreción en 1981 se prolongaba fuera de la parte posterior del anca de la cierva, mientras que en 1989 casi se ha disuelto en su totalidad.
- La concreción situada encima de la cabeza prácticamente se mantiene en las mismas condiciones sin que se observen en ella cambios apreciables.

- La concreción asociada a una fisura situada algo a la izquierda del extremo de la pata izquierda delantera es activa y ha engrosado su tamaño rellenando parte de la sección de la misma.

De todo ello se deduce que en las condiciones actuales de cueva cerrada nuestras apreciaciones discrepan de los resultados de Villar et al. (1983, 1984) en lo siguiente:

- El flujo de agua que se extiende por el techo de los Polícromos no es constante ni permanente como afirma Villar et al., pues con las condiciones actuales es un hecho que se producen desecaciones parciales que dan lugar a los precipitados de las concreciones carbonatadas, aunque sea “cuasi” constante el agua de goteo.
- Tampoco es constante por tanto el flujo de CO_2 , hecho por otra parte normal, ya que este aporte constante de carbónico lo asocian dichos investigadores a la constancia del flujo de agua que llega al techo de la sala.
- Las características geoquímicas del agua que llega al techo tampoco son constantes por las mismas razones, ni siempre tiene que corresponder a aguas “incrustantes”, ya que también es un hecho que se producen disoluciones de carbonatos. Por otra parte no se observan indicios de generación de espeleotemas cenitales en ninguno de los puntos de muestreo de goteo que sería lo normal con este tipo de agua.

A nuestro entender estas diferencias están motivadas por el enfoque dado al problema, que entre otras razones obvian aspectos importantes, como considerar que:

- Los análisis de las aguas procedentes de goteo recogidas durante un tiempo en las probetas no corresponden a las características del agua del punto de partida del techo, puesto que en el impacto de caída en la probeta y durante el tiempo de recogida que permanecen en la misma (1 semana) sufren, al menos, una degasificación en la que se pierde CO_2 , con el consiguiente cambio en la composición y características físico-químicas del agua de las probetas en relación al agua del techo (Bögli, 1980)
- En estos micro-procesos puede jugar un papel relevante, aunque no continuo, el agua de condensación como factor dilución de la concentración de bicarbonatos en el agua, que no se ha tenido en cuenta en el estudio del equilibrio gas carbónico-agua-carbonato cálcico, así como las variaciones de temperatura del aire de la sala y la posible actividad del catión Mg en los precipitados de carbonatos.

IV.5.1.3.2. Estalactitas

Están ligadas directamente al agua de los puntos de goteo, a su composición química, a su velocidad de circula-

ción y los parámetros ambientales. En todo caso son siempre formas incipientes o de escaso desarrollo y poco numerosas, de las denominadas “macarroni” situadas en la zona del techo próxima a la pared occidental de la sala. Aunque representan procesos irreversibles.

En ambos casos de formación de espeleotemas, éstos son favorecidos teóricamente por la fracturación anómala debida a la cantera, puesto que se han creado nuevas vías de penetración del agua y nuevas superficies de disolución susceptibles de aportar carbonatos en disolución.

Tanto las descamaciones como los concrecionamientos calcáreos se verán favorecidos por los cambios en los parámetros microambientales de la Sala de los Polícromos, producidos por visitantes o la utilización de aparatos con desprendimiento de calor.

IV.5.2. Procesos de Alteración Indirectos

De alguna forma ya nos hemos referido a ellos en los apartados anteriores, pues corresponden a alteraciones estructurales del karst relacionadas con la Sala de los Polícromos. De ellos los más significativos se expresan a continuación.

IV.5.2.1. Explotación de la Cantera

Ha sido la alteración más importante por las siguientes razones:

- Ha sustraído una parte importante de las capas suprayacentes al techo de los Polícromos.
- Ha provocado una fisuración anormal de los estratos suprayacentes a dicho techo, con implicaciones en el almacenamiento y circulación del agua, y a su vez en los de disolución de la roca y procesos de disolución-precipitación de carbonatos en el techo de los Polícromos. Implicaciones conocidas y explicadas pero no suficientemente evaluadas.
- Ha motivado la caída de bloques y contribuido a la inestabilidad estructural de la cueva.

IV.5.2.2. Muro de Cierre de la Sala de los Polícromos

Es de señalar que el motivo de su construcción fue la marcada inestabilidad del techo de la Sala, siendo apreciable hoy en las zonas externas el despegue existente entre el estrato que constituye el techo y su inmediato suprayacente. No obstante la construcción del muro creando una sala artificial, el rebaje del suelo y el cierre con su correspondiente puerta han producido cambios en:

- La morfología kárstica.
- Los parámetros microambientales.
- La circulación de aire.

IV.5.2.3. Lechada de Cemento

La lechada de cemento con la que se cubrió la zona externa correspondiente al techo de los Polícromos y cuya misión era la de actuar como impermeabilizante, es posible que se encuentre ya fracturada y alterada por la acción del suelo que hoy la cubre. En todo caso se desconoce por completo la influencia de ésta y de sus productos de alteración en las aguas de infiltración.

IV.5.2.4. Construcciones

Una parte de los edificios del Museo (3) y un transformador son las construcciones sobre la zona de influencia directa sobre la Sala de los Polícromos, desconociéndose su posible actividad.

IV.6. Conclusiones

Por todo lo expuesto anteriormente puede decirse que las condiciones naturales de la Cueva de Altamira han cambiado sustancialmente desde poco antes de su descubrimiento, y aunque se conocen los actuales parámetros ambientales interiores, sus características kársticas y los problemas que la han afectado y afectan, se desconoce un modelo de integración y evaluación que defina si con todas estas variaciones sufridas, las condiciones actuales de la cueva son las idóneas para su conservación y la de las pinturas, o si por el contrario necesitan algún tipo de corrección.

V. CUEVA DE LLONIN

V.1. Características Generales

La Cueva de Llonín se encuentra en el concejo de Peñamellera Alta próxima a la localidad del mismo nombre. Se trata de un karst actualmente en estudio del que puede adelantarse su carácter maduro, policlínico, de edad pleistocena, relacionado con la acción y el encajamiento de la red fluvial de la zona, que se desarrolla en unas facies calcáreas de la denominada Caliza de Montaña del Carbonífero.

La circulación actual de agua es escasa, reduciéndose al goteo procedente de infiltración de agua de lluvia y circulación capilar que en ocasiones se acumula localmente llegando a reactivar algún "gours", ya que el nivel de base kárstico local se encuentra unos cuarenta metros por debajo de la cueva, marcado por un pequeño arroyo afluente del Cares.

La cueva, conocida de antiguo, se ha empleado durante mucho tiempo como almacén para la curación de quesos, adecuándose para ello una parte de la sala principal donde se encuentran las pinturas.

V.2. Características de la Roca Soporte

El grueso de las pinturas se sitúan al fondo de la gran sala, en un gran panel constituido en un 95% por la roca encajante del karst y en un 5% por una delgada corteza estalagmítica muy degradada de 2-3 mm. de espesor y algún otro espeleotema parietal. La roca encajante está formada por una caliza gris-blancuecina, muy diaclasada, con abundantes rellenos de calcita en las fisuras. La superficie del panel se encuentra afectada por procesos de erosión diferencial con desarrollo de abundantes y pequeñas cúpulas de corrosión de orden milimétrico, destacando en alcorelieves las zonas más resistentes recrystalizadas de los rellenos calcíticos de las fisuras o de los fósiles, lo que de forma general confiere al conjunto de la superficie un aspecto poroso y áspero en detalle, en gran parte generado en una época previa a las pinturas, ya que éstas rellenan dichas microcúpulas y cubren los resaltes citados. En algunos huecos de erosión kárstico-fluvial quedan restos de escasa entidad de depósitos alóctonos de gravas y arenas cementadas por carbonatos, relacionadas con aportes antiguos del arroyo exterior.

La composición en óxidos de las calizas de diferentes zonas de la cueva, determinada por fluorescencia de rayos-x, corresponde a lo expresado en la tabla siguiente:

Si O ₂	1.35	0.23	0.48
Al ₂ O ₃	0.89	0.07	0.29
Fe ₂ O ₃	0.43	0.07	0.29
Mn O	0.13	0.11	0.12
Mg O	0.09	0.23	0.21
Ca O	52.88	55.30	55.38
Na ₂ O	0.97	1.46	0.59
K ₂ O	0.26	0.03	0.11
Ti O ₂	0.04	0.00	0.01
P ₂ O ₅	0.04	0.04	0.05
P.C.	42.91	42.42	42.66

En dichos resultados el calcio se encuentra como elemento mayoritario y prácticamente único con muy bajos porcentajes de sílice, alúmina y óxidos metálicos relacionados con silicatos (arcillas) ocasionales. La difracción de R-X muestra a la calcita como componente mineralógico prácticamente exclusivo.

V.3. Espeleotemas del Panel de las Pinturas

Son escasos y de poco desarrollo los espeleotemas parietales anteriores y posteriores a las pinturas que se encuentran sobre el panel, destacando las formas siguientes:

A) *Espeleotemas parietales*. Son restringidos y de escaso desarrollo.

Corteza estalagmítica de carácter local ya citada. Anterior a las pinturas.

Formas botroidales y coralinas situadas en la parte inferior oriental del panel. Son formas muertas que en su día afectaron a la pintura roja que tiñe gran parte del panel.

B) *Estalactitas activas*. De escaso desarrollo y poco abundantes, siendo la más significativa la asociada a un saliente de la roca en la zona oriental del panel, con pintura roja recubierta por nuevos aportes de calcita. Se trata de un espeleotema reactivado de carácter local anterior y posterior a las pinturas.

C) "*Moon-Milk*". En algunas zonas del panel sin afectar a las pinturas, se han generado por corrosión vacuolas más amplias (3-4 cm. de eje mayor) a favor de la conjunción de un grupo de microcúpulas, con un relleno de tipo "moon milk" de microcristales de calcita. Estas formas pueden ser tanto anteriores como posteriores a las pinturas.

D) *Concreciones globosas blanquecinas aisladas*. Son formas subesféricas o arriñonadas, a veces claramente asociadas a diaclasas, con tallas comprendidas entre 3 y 5 cm. de diámetro mayor, y 1.5-2.0 cm. de altura. Están formadas por una zona externa muy porosa con vacuolas interiores de espesor variable comprendido entre 0.5 y 1.2 cm. y otra zona interior compacta.

La zona externa está constituida exclusivamente por una trama de microcristales aciculares de aragonito (Difracción de R-X), distribuidos en todas las direcciones del espacio, incluso con microexcentricas en las zonas más vacuolares, y/o núcleos de microcristales fibroso-radiados del mismo mineral. En las muestras estudiadas se han observado un máximo de dos etapas de crecimiento separadas por una discontinuidad en las que se ha detectado restos de pintura negra (pirolusita).

La zona interior muy recrystalizada está formada por cristales de calcita que llegan a alcanzar los 3 mm. de longitud. Está separada de la zona externa en general por una superficie irregular difusa, siendo en algún caso neta y marcada por una ligera tinción de los cristales de calcita por arcillas, correspondiendo con una etapa de discontinuidad en el crecimiento y/o erosión. En la zona externa de las concreciones poligénicas se observa la existencia en la zona interna de micro-tubos de disolución posiblemente asociados al crecimiento de dichas capas externas. Esta zona interior parece corresponder a un proceso de recrystalización secundario que partiendo del interior hacia el exterior fagocita y digiere los cristales de la zona externa transformando el aragonito en calcita.

El origen del aragonito en los espeleotemas sigue siendo controvertido y en todo caso sujeto a diferentes facto-

res cuya influencia no siempre ha sido suficientemente probada; una discusión resumida sobre el tema se encuentra en Hill y Forti (1986). En todo caso dada su posición en el panel, situándose por encima de los 2 m. sobre el suelo actual, se descarta su posible relación con espeleotemas subacuáticos, teniendo que estar relacionados con aguas de infiltración en ambiente vadoso.

Estas formas son anteriores y posteriores al menos a la primera fase de pinturas. Su distribución en el panel es irregular, ligeramente más abundantes en la zona oriental y en su mayor parte por encima de 1.0 m. sobre el suelo.

E) *Concreciones blanquecinas globosas de pequeña talla*. De forma externa análogas a las anteriores aunque de menor tamaño, de orden milimétrico (2-5 mm), encontrándose separadas entre sí pero agrupadas en conjuntos más o menos extensos de tallas similares. Están formadas exclusivamente por microcristales de yeso sin una estructuración interna bien definida. Este tipo de concreciones afecta a la pintura negra de una cabra.

F) "*Velo Blanquecino*". No alcanza la densidad de microcristales de una "moon milk", ya que prácticamente es una película de microcristales discontinua o con huecos internos, que afecta a la zona W del panel en un resalte con restos de pintura negra difusa. En su composición se encuentran calcita y yeso, siendo dominante la primera.

G) *Concreciones blancas brillantes*. Presentan formas abombadas en la parte central y bordes difusos extendiéndose sobre la roca. La parte prominente puede alcanzar un máximo de 2 cm - 3 cm de diámetro por 1 cm de altura, presentando su interior hueco, con un grosor de la cúpula en torno a 1.0-1.5 mm. Está formada por microcristales transparentes adosados entre sí, destacando algunos aciculares en posición perpendicular a la superficie. La composición mineralógica de estas costras determinada por difracción de R-X muestra que se trata exclusivamente de cristales de yeso. La forma de burbuja puede deberse a un precipitado inicial de anhídrita que al hidratarse y pasar a yeso aumenta de volumen abombándose y agrietándose, siendo en estas grietas donde se generan los cristales aciculares perpendiculares a la superficie.

La forma de ampolla hueca podrá atribuirse a la presencia inicial de anhídrita que al hidratarse y pasar a yeso aumentando de volumen se deformase hacia el exterior generándose entonces los cristales prismáticos de mayor desarrollo y perpendiculares a la superficie.

La presencia de espeleotemas de yeso en el karst ya ha sido comentada en Arenaza, pero la ausencia de sulfuros y/o sulfatos en los resultados analíticos de la roca encicante plantea el problema de la procedencia del ión sulfato, para lo que se han establecido las siguientes hipótesis:



Foto 11.—LLONIN: Concrecciones de sulfato cálcico (yeso) afectando a una pintura situada en la zona inferior del panel

1) Las facies calcareas de la Caliza de Montaña presentan a veces niveles con una pequeña proporción de materia orgánica y por tanto es posible encontrar sulfuros asociados. Aunque en este caso los resultados analíticos obtenidos son negativos en este sentido, no se descarta la presencia localizada de ésta o de sulfuros que den lugar al sulfúrico y éste sea aportado por aguas de infiltración a través de fisuras hasta la superficie del panel.

A favor de esta hipótesis está la posición localizada de estas concrecciones en el panel, ya que ocupan una zona en la parte occidental comprendida entre el suelo y 1.5 m. de altura.

En contra de la misma, además de los resultados analíticos, está el hecho de que las concrecciones yesíferas son al menos en parte posteriores a las pinturas, incluso bastante más recientes dada la escasa alteración de los cristales superficiales de éstas.

2) Una segunda hipótesis se ajustaría en esencia al modelo de "Solution-replacement" de Egemieier (1973, 1981), aplicado también por Calandri y Grippa (1978) a la Grotta del Fiume, en el que el SH_2 procedente de emanaciones se oxida a sulfúrico, y atacando éste al carbonato cálcico precipita yeso y se desprende CO_2 .

Las emanaciones de SH_2 en este caso deben ser muy pobres dado el desarrollo y volumen de las concrecciones, y su procedencia debe estar relacionada bien con un nivel de materia orgánica en ambiente reductor enterrado debajo del panel (nivel arqueológico) o materia orgánica,

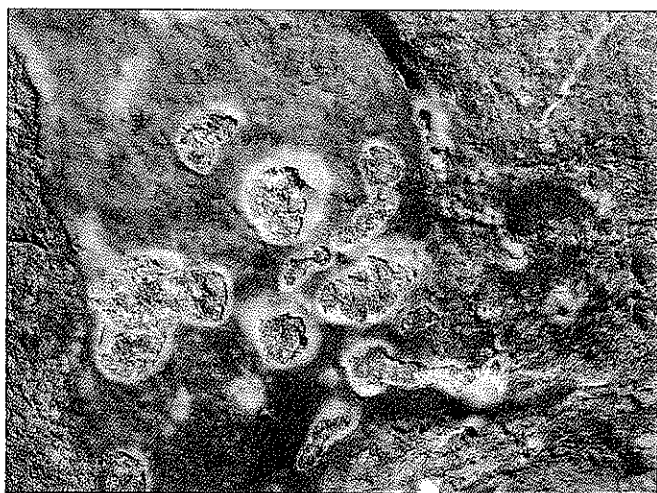


Foto 12.—LLONIN: Concrecciones de sulfato cálcico abombadas y huecas después de recogidas las muestras.

siempre en ambiente reductor, situada en la cavidad del nivel inferior, en ambos casos la liberación de SH_2 se produciría por el hundimiento existente en el extremo W del panel, hundimiento que se produjo bastante después de las pinturas. Otra posibilidad es que procediese del lavado de la materia orgánica existente en el yacimiento del talud o bien relacionado con la actividad bacteriana de la fermentación de los quesos y/o los productos de deshecho.

A favor tanto de la primera como segunda posibilidad está la frescura de las concrecciones y que algunas afectan a las pinturas, es decir su modernidad. También a favor de las mismas está la posición cercana al suelo de las concrecciones, lo que se ajusta a las condiciones del modelo.

En contra de la primera posibilidad hay que señalar que no está demostrada la existencia clara de un nivel de materia orgánica en ambiente reductor debajo de esa zona del panel, aunque se ha detectado por un pequeño sondeo la presencia de ésta debajo de la estalagmita y gours que forman el suelo al borde de éste.

V.4. Conclusiones

Aparte de los procesos de alteración antiguos que afectaron en su día a las pinturas, está claro que las concrecciones yesíferas de formación aparentemente más reciente afectan también directamente a las pinturas y puesto que su origen es todavía hipotético, se considera necesario un seguimiento fotográfico de la evolución de las mismas, así como el estudio y comprobación de las diferentes hipótesis de procedencia de los aportes de azufre.

VI. BIBLIOGRAFIA

- APELLANIZ, J. M. (1982). El Arte Prehistórico del País Vasco y sus vecinos. Editorial Descle de Brouwer S. A. Bilbao. 227 p.
- BERTOLANI, M.; GARUTI, G.; ROSSI, A.; BERTOLANI, M. D. (1976). Motivi di interesse mineralogico-petrografico nel complesso carsico Grotta Grande del Vento—Grotta del Fiume (Genga, Ancona). *Grotte d'Italia* ser. 4, V. 6, 109-144.
- BÖGLI, A. (1980). Karst hydrology and physical speleology. Springer Verlag. Berlín.
- CABRERA, J. M. (1980). Conservación de la cueva de Altamira. Sugerencias para un programa de trabajo Altamira Symposium. 612-642.
- CALANDRI, G. (1979). I cristalli di gesso in grotte calcaree. *Soc. Speleol. Ital.* v. 2, 45-47.
- CALANDRI, G. (1980). The deposition of gypsum in cave. *Cving Int. Mag.* v. 9, 44-47.
- CALANDRI, G. and GRIPPA, C. (1978). Cristalli di gesso in cavità del flysh dianese (Liguria occidentale). *Boll. Gruppo Speleol. Imperia* v. 11, 47-51.
- CENDRERO, A. (1980). Influencia de la composición de la roca soporte en el deterioro de las pinturas de Altamira. Altamira Symposium. 579-580.
- EGEMIEIER, S. J. (1981) Cavern development by thermal waters. *Natl. Speleol. Soc. Bull.* v. 43, n° 2, 31-51.
- GARCIA GARCIA, A.; ORTIZ RAMIS, R.; SUAZO ALCONADA, C. (1986). Características medioambientales de la Cueva de Santimamiñe (Vizcaya). Informe Diputación Foral de Vizcaya.
- GARCIA LORENZO, A. y ENDERIZ GARCIA, J. (1972). La conservación de las cuevas prehistóricas y las pinturas ubicadas en ellas. Santander Symposium. Actas Symp. Inter. Arte Prehistórico. 525-555.
- GOMEZ LAA, G. (1980). Nota geológica e hidrogeológica sobre la situación de las cuevas de Altamira en la provincia de Santander. Informe Ministerio de Cultura.
- HILL, C. A.; FORTI, P. (1986). Cave Minerals of the World. National Speleological Society, Huntsville, Alabama 35810. U.S.A. 238 p.
- HOYOS GOMEZ, M.; BUSTILLO REVUELTA, A.; GARCIA GARCIA, A.; MARTIN ESCORZA, C.; ORTIZ RAMIS, R.; SUAZO ALCONADA, C. (1981). Características geológico-kársticas de la cueva de Altamira (Santillana del Mar, Santander). Informe Ministerio de Cultura, Madrid.
- PARENZAN, P. (1961). Sulle formazioni argillose-limose dette vermicolare. *Atti. Int. Symp. Varenna.* v. 1, p. 120-125.
- POHL, E. R.; WHITE W. B. (1965). Sulfate minerals: their origin in the Central Kentucky karst. *Am. MINERALOGIST* v. 50, 1462-1465.
- VALLE, F. J.; MOYA, J. S.; CENDRERO, A. (1978). Estudio de la roca soporte de las pinturas rupestres de la cueva de Altamira. *Zephyrus* XXVIII-XXIX, 5-15.
- VILLAR, E.; FERNANDEZ, P. L.; QUINDOS, L. S.; SOLANA, J. R.; SOTO, J. (1983). Flujos de materia de la cueva de Altamira. en "Estudios físico-químicos sobre la cueva de Altamira" Cent. Inves. y Museo de Altamira. Monografía n° 9 Ministerio de Cultura. 45-66.
- VILLAR, E.; BONET, A.; DIAZ-CANEJA, B.; FERNANDEZ, P. L.; GUTIERREZ, I.; SOLANA, J. R.; SOTO, J. (1984). La humedad natural de la cueva de Altamira. "Cueva de Altamira". Cent. Inv. y Museo de Altamira. Monografía n° 11. Ministerio de Cultura. 7-20.
- VILLAR, E.; BONET, A.; DIAZ-CANEJA, B.; FERNANDEZ, P. L.; GUTIERREZ, I.; SOLANA, J. R.; SOTO, J. Estudio del equilibrio gas carbónico-agua-carbonato cálcico, en las aguas que bañan las pinturas de Altamira. "Cueva de Altamira". Centr. Inv. y Museo de Altamira. Monografía n° 11. Ministerio de Cultura. 35-64.