

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA

MONOGRAFIAS

N.º 9

**ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS  
SOBRE LA  
CUEVA DE ALTAMIRA**



MINISTERIO DE CULTURA  
DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS

MADRID, 1983

ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS  
SOBRE LA  
CUEVA DE ALTAMIRA

**CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA**

**MONOGRAFIAS**

**N.º 9**

**ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS  
SOBRE LA  
CUEVA DE ALTAMIRA**

**DEPARTAMENTO DE FISICA FUNDAMENTAL  
FACULTAD DE CIENCIAS  
UNIVERSIDAD DE SANTANDER**

**MINISTERIO DE CULTURA  
DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS**

**MADRID, 1983**

Depósito Legal: M. 20873-1983  
I.S.B.N.: 84-7483-306-X  
Artegraf. Sebastián Gómez, 5. Madrid-26

## INDICE

<b>Caracterización cromática del techo policromado de la sala de pinturas de la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto .....</b>	<b>7</b>
<b>Evolución del color de la cierva pintada en la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L. Plaza, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto .....</b>	<b>27</b>
<b>Flujos de materia en la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto .....</b>	<b>45</b>
<b>El campo de temperaturas en la cueva de Altamira. E. Villar, P.L. Fernández, L.S. Quindós, J.R. Solana, J. Soto .....</b>	<b>67</b>

# **EL CAMPO DE TEMPERATURAS EN LA CUEVA DE ALTAMIRA**

**E. Villar; P.L. Fernández; L.S. Quindós; J.R. Solana y J. Soto\***

---

(\*) Departamento de Física Fundamental. Facultad de Ciencias. Universidad de Santander.

## **INDICE**

- I. INTRODUCCION**
- II. PREVISIONES TEORICAS**
- III. METODO EXPERIMENTAL**
- IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS CONCERNIENTES A LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES**
- V. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS TEMPERATURAS DEL AIRE DE LA CUEVA**
- VI. RESUMEN Y CONCLUSIONES**

## I. INTRODUCCION

Las características climáticas de un ecosistema en su estado natural vienen fijadas en gran parte por la distribución de temperaturas que posee. Por ello, resulta relevante para establecer las variaciones microclimáticas y la dinámica general de flujos de materia y de energía de la cueva de Altamira, conocer su campo de temperaturas. Este estudio debe extenderse tanto a las temperaturas de las superficies rocosas, como a las del aire ambiente de sus distintas salas, ya que ellas constituyen un factor determinante de los intercambios de energía calorífica y de masas de aire que tienen lugar en el interior de la Cueva y entre esta y el ambiente exterior.

Una descripción fenomenológica del campo de temperaturas en la cueva de Altamira requiere una referencia a sus causas, con el fin de poder realizar predicciones sobre temperaturas futuras y sus posibles variaciones. Por ello, se ha intentado hacer corresponder los resultados experimentales obtenidos con las previsiones teóricas, a la vez que se han extraído algunas consecuencias de esta correspondencia. La temperatura de las superficies rocosas interiores es de interés primario porque es en uno de los techos donde están situadas las pinturas más importantes. Estas temperaturas superficiales, conjuntamente con la humedad que presentan techos y suelos, constituyen los factores principales que influyen en los agentes que originan el deterioro de las pinturas y de ahí el interés de su estudio, así como el de sus variaciones naturales y el de las causas que las determinan. Por otra parte, debido a que la convección es generalmente el principal mecanismo de transporte dentro de una masa gaseosa, son los gradientes de temperatura del aire en el interior de la Cueva los que van a determinar los intercambios de los componentes del aire o de las sustancias que pueda transportar, como son el vapor de agua y el anhídrido carbónico. Sin duda, fueron estas razones las que motivaron que las primeras medidas de la temperatura del aire en el interior de la Sala de Polícromos se realizaran muy tempranamente (1), muy poco después del descubrimiento de la Cueva. Las medidas de las temperaturas del aire realizadas posteriormente (2), carecen, sin embargo, de una continuidad suficiente y además vienen afectadas por la presencia de visitantes.

En ausencia de visitantes, la temperatura del aire de cada una de las Salas de la Cueva debe venir dada básicamente por la temperatura de las superficies rocosas que lo rodean, dada la tendencia al equilibrio térmico entre las masas de aire y las masas rocosas. Esta tendencia dará como resultado el que el aire alcance rápidamente una temperatura semejante a la de la roca, debido a la gran cantidad de materia rocosa frente a la relativamente baja masa de aire en cada sala, aunque los calores específicos del aire y de la roca sean muy semejantes. La roca, debido a su gran capacidad calorífica (3) es capaz de intercambiar una cantidad importante de calor sin modificar apenas su temperatura y variando en cambio la temperatura del aire a pesar de la baja conductividad térmica de la capa límite de aire adherida a la roca. Por lo tanto, como el aire tiende a alcanzar la temperatura de la roca con la que está en contacto, si existe alguna diferencia entre las temperaturas del aire y de la roca de una misma sala, será debida fundamentalmente a que no ha podido ser alcanzado aún el equilibrio térmico entre ambos, o dicho de otro modo, a que se está intercambiando aire con otro compartimento. No hay que olvidar, sin embargo, que las masas de aire del interior de la Cueva podrían también desplazarse por efecto de la diferencia de presiones entre el interior y el exterior, establecida por la presencia de fuertes vientos en el exterior (Efecto Venturi).

## II. PREVISIONES TEORICAS

La temperatura superficial de las rocas que forman las distintas salas de la cueva de Altamira debe estar determinada fundamentalmente por tres causas:

- a) Flujo térmico de origen terrestre



- b) Flujo térmico de origen solar
- c) Flujos de calor sensible o latente debidos a intercambios de materia con el exterior

El flujo térmico de origen terrestre o flujo geotérmico fija la distribución de temperaturas existente a profundidades superiores a la del «nivel neutro» o profundidad para la que ya son imperceptibles las oscilaciones térmicas de origen solar, la cual depende fundamentalmente de la naturaleza y estructura del terreno. A cualquier profundidad superior al nivel neutro el gradiente de temperatura correspondiente al flujo geotérmico es positivo con respecto a la profundidad, pudiéndose asignar un valor medio terrestre de 3º C por cada 100 m.

Por encima del nivel neutro, el flujo calorífico de origen solar da lugar a oscilaciones de temperaturas en el terreno, alrededor de un valor medio que para cada profundidad depende de la naturaleza del terreno, insolación y otros factores (5). En estas oscilaciones térmicas influyen las variaciones diarias de la insolación del suelo y fundamentalmente las variaciones térmicas anuales del suelo debidas a las fluctuaciones climáticas estacionales. Las oscilaciones periódicas de temperatura de la superficie exterior dan lugar a la propagación de una onda térmica cuyas características dependen de la conductividad térmica  $K$  y del calor específico  $c$  del terreno por el que se propaga. El estudio de la propagación de esta onda térmica conduce a que si las oscilaciones de temperatura son de tipo sinusoidal, se propaga una onda amortiguada con una velocidad dada por la expresión  $v = (4\theta D\nu)^{1/2}$  (6) siendo  $\nu$  la frecuencia de las oscilaciones térmicas y  $D$  la difusividad térmica del terreno que depende de la conductividad térmica, capacidad calorífica y densidad de éste. Por otra parte, la amplitud de las oscilaciones de temperatura que experimenta la superficie exterior se amortigua exponencialmente al propagarse la onda térmica en el terreno. Admitiendo una propagación térmica monodimensional, si  $\Delta\theta_0$  es la amplitud de las oscilaciones de temperatura en un punto de la superficie de un terreno homogéneo a una profundidad  $z$  en la vertical a dicho punto, la amplitud de la oscilación térmica viene dada por

$$\Delta\theta_z = \Delta\theta_0 \cdot \exp [ - (\theta\nu D^{-1})^{1/2} \cdot z ]$$

Con ello resulta el bien conocido fenómeno de que aun ocurriendo que la onda térmica diaria se propaga a una velocidad 19 veces mayor que la anual, en cambio se amortigua más rápidamente que esta, repercutiendo hasta una profundidad de aproximadamente 2 m como máximo.

La contribución conjunta del flujo geotérmico y del flujo solar determinarían la distribución de temperaturas en el interior de una masa rocosa homogénea, relativamente cercana a la superficie, si no existiesen intercambios de calor debidos a la posible circulación de agua y de aire en el caso de terrenos con profundas fisuras y oquedades. Estos intercambios de calor son difícilmente evaluables, por cuanto lo son los flujos de agua y de aire y la temperatura de estas masas fluidas. Sin embargo, puede deducirse que su contribución debe ser pequeña, en el caso de la cueva de Altamira debido a la pequeña intensidad de los movimientos convectivos y, al escaso caudal de agua que riega esta cueva, de carácter kárstico, ya en un estado de muy débil dinámica hidrogeológica.

### III. METODO EXPERIMENTAL

#### A. Medida de la temperatura de las superficies rocosas

La determinación experimental de la temperatura superficial de las rocas que componen los distintos techos y suelos de la Cueva se ha realizado mediante un termómetro de radiación, que posee un intervalo de medida entre 0 y 40º C y una precisión de 0,1º C. El calibrado del termómetro de radiación se realiza enfocando el aparato a los extremos de unas puntas metálicas introducidas en un baño cuya temperatura se determina con termómetros de décimas calibrados. Esta operación se ha realizado por lo menos una vez cada cuatrimestre. Estas temperaturas superficiales han sido determinadas en las ocho zonas señaladas en a figura 1, con una frecuencia media de seis medidas mensuales. Este ritmo de medidas fue fijado después de comprobar experimentalmente la inexistencia de variaciones diarias de temperatura. Las medidas realizadas con el termómetro de radiación abarcan el período de un año comenzando en junio de 1980. La profundidad a la que se encuentran los puntos de los techos y suelos de las diferentes salas en las que se han realizado esta medidas viene expresada en la Tabla I.

A partir de los datos obtenidos hemos calculado el valor medio mensual correspondiente a los

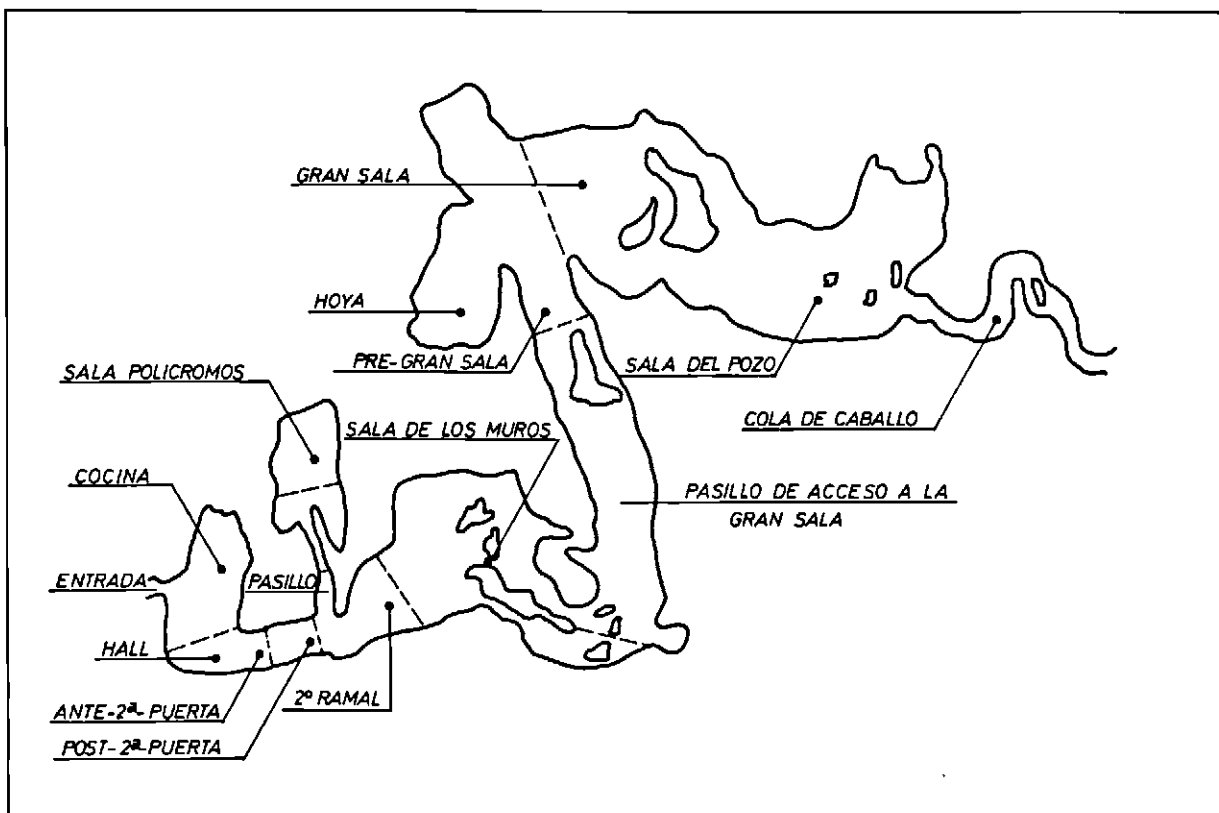


Figura 1.—Localización de los puntos de techos y suelos en las que se ha medido la temperatura mediante el termómetro de radiación (las líneas de puntos representan aproximadamente la proyección del plano que contiene dichos puntos).

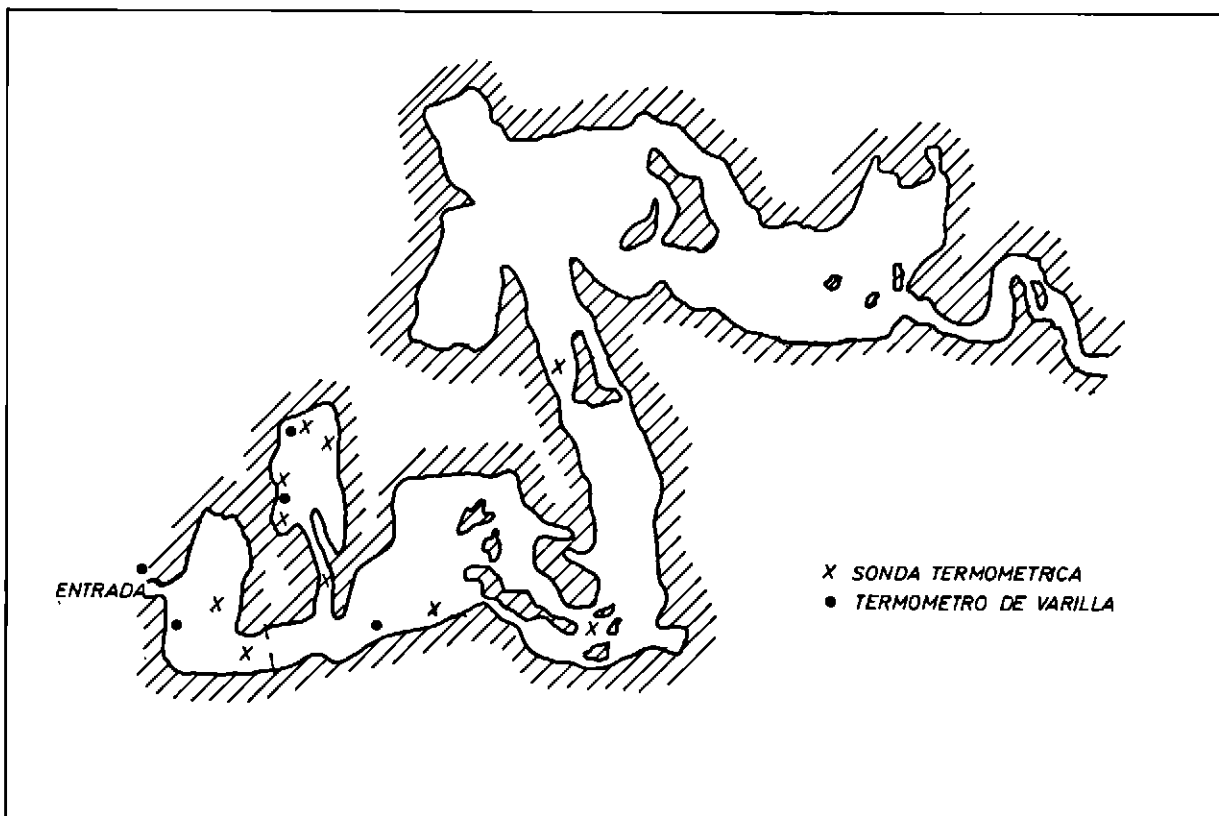


Figura 2.—Localización de las sondas termométricas y de los termómetros de varilla empleados para la medida de la temperatura del aire en el interior de la Cueva.

puntos de medida. Los valores promedios hallados para la temperatura de las superficies rocosas están expresados en las Tablas II y III relativas a techos y suelos, respectivamente. En ellas se indican del mismo modo los valores teóricos previsible mediante la aplicación del modelo de onda térmica lineal expuesto, al caso particular de la cueva de Altamira, en el que la estructura fundamental del terreno por el que se propaga la onda térmica está constituida por una capa rocosa, de espesor variable según la zona, de naturaleza caliza (calcarenitas con proporciones muy pequeñas de cuarzo, óxido férrico, feldespato y arcilla), en la que hemos supuesto que no existen discontinuidades significativas entre las diferentes estratos que la componen, y por una capa de tierra superficial de 40 cm de espesor medio, situada por encima de este grueso techo de estratos calizos.

## **B. Medidas de las temperaturas del aire**

Las temperaturas del aire de las diversas salas de la cueva de Altamira han sido medidas simultáneamente por dos métodos, durante un intervalo de más de un año desde mayo de 1980. Para el primer método de medida, se han utilizado sondas termométricas de resistencia de platino, que proporcionan una señal eléctrica que es recogida en un registrador gráfico. Este método proporciona un registro continuo de temperaturas en cinco puntos de la cueva, y aunque presenta el inconveniente de llevar asociado una sensibilidad baja, ya que el error alcanza los 0,2º C, sin embargo, presenta la ventaja de todo dispositivo de seguimiento continuo, que da cuenta detallada de las variaciones temporales del parámetro que se estudia, en nuestro caso la temperatura. Los valores registrados también han sido contrastados con los indicados por termómetros de décimas calibrados. El segundo método de medida ha consistido en utilizar termómetros de varilla que poseen una precisión de 0,1º C, colocados en diez puntos de la cueva. La medida de la temperatura se realiza en este caso por lectura directa, con una frecuencia media de cinco medidas cada mes. En la figura 2 se indican los puntos en los que se ha medido la temperatura por uno y otro método. Todos estos termómetros han sido calibrados a su vez con un termómetro patrón, calibrado por el NPL (\*).

## **IV. ANALISIS DE LOS RESULTADOS CONCERNIENTES A LAS TEMPERATURAS SUPERFICIALES**

De forma general, los resultados obtenidos en la medida de las temperaturas de las superficies rocosas sugiere, en primer lugar, una concordancia entre ellos y las predicciones teóricas enunciadas. Así, la temperatura en cada punto presenta una variación sinusoidal con un período de un año, como corresponde a la variación estacional de la temperatura de la superficie exterior.

Con el fin de realizar una comparación más detallada entre los resultados teóricos y los datos obtenidos experimentalmente hemos calculado para cada uno de los puntos de medida, los valores  $\theta$  de la temperatura media anual, del retraso temporal en la llegada de la onda térmica y de la amplitud de la oscilación anual de temperatura.

La temperatura media anual en cada una de las superficies ha sido obtenida promediando las temperaturas medias mensuales correspondientes. Los resultados encontrados están representados en la Tabla IV. De su observación, resulta que, teniendo en cuenta que la máxima diferencia de profundidad entre los techos de la Cueva es de 5 m, se deduce a partir del valor medio del gradiente geotérmico, que esta diferencia de espesores no puede justificar las diferencias de las temperaturas medias anuales observadas en los techos, que llegan a alcanzar los 0,8º C. Este hecho puede contemplarse apelando al carácter general, y no local, de esta teoría del gradiente geotérmico (8) o bien a la existencia de posibles flujos caloríficos por intercambio de agua entre la Cueva y el nivel freático (9), que podrían dar lugar a una mayor disminución de la temperatura en determinadas zonas de la Cueva. En todo caso, parece razonable que influya la convección de un modo decisivo ya que la temperatura media de los techos decrece a medida que aumenta el volumen de la sala y, por lo tanto, al incrementarse la posibilidad de ventilación.

El cálculo de la velocidad de propagación de la onda térmica anual para un terreno de naturaleza caliza, como es el de Altamira, ha dado  $6.6 \cdot 10^{-5}$  cm/s, de acuerdo con el calculado por otros autores

---

(\*) Este termómetro nos fue amablemente cedido por el Instituto Roca-Solano del C.S.I.C.

**TABLA I**

**Profundidades medias de los diferentes techos y suelos en los que se han realizado medidas de temperatura.**

SALA	Profundidad media del techo (m)	Altura media techo suelo (m)
HALL	3,5	2,5
POST-2ª PUERTA	5,5	2,0
PASILLO SALA	6,5	2,0
SALA DE POLICROMOS	7,0	2,5
SEGUNDO RAMAL	7,0	2,5
SALA DE LOS MUROS	6,5	3,0
PRE-GRAN SALA	9,0	4,5
GRAN SALA	9,0	8,5

**TABLA II**

**Temperaturas medias mensuales de techos, obtenidas tanto experimental ( $\theta_E$ ), como teóricamente ( $\theta_T$ ).**

SALA	$\theta(^{\circ}\text{C})$	Jun. 1980	Jul. 1980	Agos. 1980	Sept. 1980	Oct. 1980	Nov. 1980	Dic. 1981	Ener. 1981	Febr. 1981	Mar. 1981	Abril 1981	Mayo 1981
Hall	$\theta_T$	13,5	14,3	14,5	15,5	16,3	15,7	14,7	13,2	12,4	—	—	—
	$\theta_E$	14,0	14,6	15,2	16,2	16,6	15,6	14,8	13,7	13,1	12,6	13,0	13,3
Post-2ª Puerta	$\theta_T$	13,6	14,0	14,4	14,6	15,2	15,6	15,3	14,7	13,7	13,2	—	—
	$\theta_E$	13,5	13,8	14,3	15,2	15,6	15,5	14,6	14,7	14,1	13,5	13,4	13,3
Pasillo Sala	$\theta_T$	13,7	13,9	14,1	14,4	14,5	14,9	15,2	15,0	14,5	13,9	13,6	13,7
	$\theta_E$	13,4	13,6	13,9	14,4	15,0	15,2	15,3	14,9	14,3	13,7	13,5	13,3
Sala de Policromos	$\theta_T$	13,8	13,9	13,9	14,0	14,3	14,4	14,7	14,9	14,7	14,4	13,9	13,8
	$\theta_E$	13,4	13,4	13,5	14,0	14,5	14,8	15,1	14,9	14,4	13,9	13,5	13,4
Segundo Ramal	$\theta_T$	13,8	13,9	13,9	14,0	14,3	14,4	14,7	14,9	14,7	14,4	13,9	13,8
	$\theta_E$	13,4	13,4	13,6	14,1	14,7	15,0	15,2	14,8	14,3	13,7	13,5	13,3
Sala de los Muros	$\theta_T$	13,2	13,4	13,7	14,0	14,2	14,6	14,9	14,7	14,2	13,5	13,1	13,0
	$\theta_E$	13,3	13,4	13,8	14,2	14,8	15,0	15,3	14,8	13,9	13,6	13,4	13,2
Pre-Gran Sala	$\theta_T$	13,5	13,5	13,5	13,6	13,7	13,8	14,0	14,2	14,0	13,8	13,5	13,5
	$\theta_E$	13,2	13,2	13,3	13,4	13,8	13,9	14,2	14,1	13,8	13,5	13,5	13,3
Gran Sala	$\theta_T$	13,2	13,2	13,2	13,3	13,6	13,6	13,9	14,2	14,0	13,7	13,2	13,2
	$\theta_E$	13,1	13,1	13,1	13,3	13,4	13,5	14,0	13,9	13,6	13,5	13,3	13,1

**TABLA III**

**Temperaturas medias mensuales de suelos, obtenidas tanto experimental ( $\theta_E$ ), como teóricamente ( $\theta_T$ ).**

SALA	$\theta(^{\circ}\text{C})$	Jun. 1980	Jul. 1980	Agos. 1980	Sept. 1980	Oct. 1980	Nov. 1980	Dic. 1981	Ener. 1981	Febr. 1981	Mar. 1981	Abril 1981	Mayo 1981
Hall	$\theta_T$	13,4	13,6	13,9	14,2	14,4	14,8	15,1	14,9	14,4	13,7	13,3	13,1
	$\theta_E$	13,6	14,2	14,9	15,9	16,2	15,5	14,7	13,8	13,2	12,7	13,0	13,2
Post-2ª Puerta	$\theta_T$	13,8	13,8	13,8	13,9	14,2	14,4	14,6	14,8	14,6	14,3	13,8	13,8
	$\theta_E$	13,4	13,6	13,9	14,9	15,4	15,2	14,5	14,6	14,2	13,5	13,4	13,3
Pasillo Sala	$\theta_T$	14,0	14,0	14,0	14,1	14,3	14,3	14,5	14,7	14,5	14,3	14,0	14,0
	$\theta_E$	13,3	13,5	13,7	14,2	14,7	15,0	15,2	14,9	14,4	13,8	13,6	13,4
Sala de Policromos	$\theta_T$	13,9	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,6	14,5	14,3	14,0	14,0
	$\theta_E$	13,3	13,4	13,4	13,9	14,4	14,7	14,9	14,7	14,4	13,9	13,6	13,5
Segundo Ramal	$\theta_T$	13,9	13,9	14,0	14,1	14,2	14,3	14,4	14,6	14,5	14,3	14,0	14,0
	$\theta_E$	13,3	13,3	13,5	14,0	14,6	14,8	15,0	14,7	14,2	13,7	13,6	13,4
Sala de los Muros	$\theta_T$	13,6	13,6	13,7	13,7	13,8	13,9	14,0	14,2	14,4	14,2	14,0	13,8
	$\theta_E$	13,3	13,3	13,5	13,9	14,5	14,8	15,2	14,7	13,9	13,4	13,4	13,3
Pre-Gran Sala	$\theta_T$	—	13,5	13,5	13,5	13,5	13,6	13,6	13,6	13,7	13,8	13,7	13,6
	$\theta_E$	13,2	13,2	13,2	13,4	13,7	13,8	14,1	14,0	13,7	13,5	13,4	13,3
Gran Sala	$\theta_T$	—	—	—	—	—	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5	13,5
	$\theta_E$	13,1	13,1	13,1	13,2	13,3	13,5	13,8	13,8	13,6	13,4	13,3	13,2

**TABLA IV**

**Temperaturas medias anuales de los techos y suelos de diferentes galerías de la Cueva.**

SALA	Techos ( $\theta_T$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )	Suelos ( $\theta_S$ ) ( $^{\circ}\text{C}$ )
HALL	14,4	14,2
POST-2ª PUERTA	14,3	14,2
PASILLO SALA	14,2	14,1
SALA DE POLICROMOS	14,1	14,0
SEGUNDO RAMAL	14,1	14,0
SALA DE LOS MUROS	14,0	13,9
PRE-GRAN SALA	13,6	13,5
GRAN SALA	13,4	13,4

para rocas de esta clase (10). Con esta velocidad de propagación y tomando como referencia el que las temperaturas del aire y del suelo en el exterior no están desfasadas presentando su máximo anual durante el mes de agosto, se obtienen, unos valores para el retraso de la onda térmica que concuerdan de manera notable con los encontrados experimentalmente en los techos de la Cueva, como se expresa en la Tabla V, en donde las temperaturas vienen afectadas de un error de  $0,1^{\circ}\text{C}$ . En cambio, esta concordancia no tiene lugar para los distintos suelos de la Cueva. Para ellos el retraso en la llegada de la onda térmica es ligeramente mayor que en el techo correspondiente y no tan grande como correspondería a su profundidad, lo cual podría justificarse por la discontinuidad del terreno que supone la misma Cueva, mientras que el cálculo presupone un medio homogéneo.

Los valores experimentales obtenidos para la amplitud de la onda térmica anual se han comparado con los valores obtenidos teóricamente suponiendo una oscilación anual de la temperatura en la superficie exterior de  $10^{\circ}\text{C}$ . Obtenida a partir de los datos termométricos recogidos desde el mes de mayo de 1980 de los termómetros de subsuelo, cedidos por el Centro Meteorológico del Cantábrico, los cuales indican unas amplitudes para la oscilación térmica anual a 5 cm de profundidad de  $6^{\circ}\text{C}$  y teniendo en cuenta por otra parte, que las oscilaciones de temperatura son más importantes a nivel del suelo que por debajo de este, siendo a 5 cm de profundidad unos  $4^{\circ}\text{C}$  menos. Los resultados obtenidos se expresan en la Tabla VI en la que podemos asignar un error máximo de  $0,2^{\circ}\text{C}$  y de la que se concluye que las amplitudes de las oscilaciones de temperatura determinadas teóricamente y experimentalmente, para los techos de las distintas salas, coinciden con buena aproximación. En cambio, mientras la teoría predice oscilaciones mayores en los techos que en los suelos, experimentalmente resulta que ambas oscilaciones son iguales.

Estos resultados nos indican que deben existir intercambios de calor por convección y radiación, a través del aire de cada sala, que tienden a igualar las temperaturas de techo y suelo de manera continua.

## V. RESULTADOS OBTENIDOS PARA LAS TEMPERATURAS DEL AIRE DE LA CUEVA

Los resultados obtenidos del análisis de los datos de temperaturas del aire, obtenidos mediante el método de registro continuo indican, en primer lugar, que no existen variaciones importantes de la temperatura del aire en ninguno de los puntos de la Cueva, en respuesta a las variaciones diarias de la temperatura del aire exterior. Con mayor precisión puede decirse que no se aprecian variaciones de la temperatura superiores a  $0,2^{\circ}\text{C}$  en la Sala de Polícromos y en la Sala de los Muros como respuesta a oscilaciones del orden de  $8^{\circ}\text{C}$  en la temperatura diaria exterior. En cambio, en el Hall de la Cueva pueden darse variaciones de temperatura por la misma causa que, sin ser importantes, pueden superar el valor indicado anteriormente. Estas variaciones de temperatura de cierta entidad tienen lugar en condiciones particulares de la temperatura exterior, como son las que ocurren en algunas frías noches de invierno o en algunos días excesivamente cálidos del verano. Ambas condiciones dan lugar a saltos en la temperatura del aire del Hall que llega a alcanzar valores menores o mayores que los normales en dicha época. Estas variaciones bruscas temporales en la temperatura deben ser ocasionadas por la entrada de masas de aire del exterior que, sin embargo, no dan lugar a variaciones de temperatura en puntos más profundos de la Cueva debido a la lentitud de los procesos de difusión y convección, ocasionando en cambio, en el Hall, la igualación progresiva y suficientemente rápida de la temperatura del aire con la de las rocas de la Cueva. Cuando en el exterior se restablecen una condiciones climáticas normales, generalmente al cabo de algunas horas, la temperatura del Hall tiende a volver a su valor primitivo. Este proceso de variación de las temperaturas del Hall en función de las fluctuaciones de la temperatura exterior, no se ve afectado fuertemente por el hecho de que la puerta de entrada se halle abierta o cerrada, ya que esta puerta es metálica y no afecta seriamente al gradiente térmico entre el aire del Hall y el de la boca de la Cueva, permitiendo el movimiento convectivo del aire del interior del Hall, aunque demorando el proceso. Obviamente, en el caso de puerta abierta, el proceso es más rápido, sobre todo cuando la temperatura exterior es menor que la interior, caso que favorece los intercambios convectivos entre ambas masas de aire.

Los resultados obtenidos mediante el método de lectura de la temperatura, conjuntamente con los correspondientes al registro continuo de la misma, pueden resumirse en las figuras 3, 4 y 5. En ellas se ha representado la variación de la temperatura media mensual a lo largo del año, obtenida como promedio de los valores medidos de la temperatura del aire, en el conjunto de los puntos elegidos de la Cueva. Esta variación anual es semejante en todos los puntos, presentando una forma

**TABLA V**

**Tiempo que tarda la onda térmica en alcanzar los techos de las diferentes galerías de la Cueva.**

SALA	Retraso térmico (meses) (experimental)	Retraso térmico (meses) (teórico)
HALL	2 (Octubre)	2,5 (Octubre)
POST-2ª PUERTA	2 (Octubre)	3,0 (Noviembre)
PASILLO SALA	4 (Diciembre)	4,0 (Diciembre)
SALA DE POLICROMOS	4 (Diciembre)	4,5 (Diciembre-Enero)
SEGUNDO RAMAL	4 (Diciembre)	4,5 (Diciembre-Enero)
SALA DE LOS MUROS	4 (Diciembre)	4,0 (Diciembre)
PRE-GRAN SALA	4-5 (Diciembre-Enero)	5,0 (Enero)
GRAN SALA	4-5 (Diciembre-Enero)	4,8 (Enero)

**TABLA VI**

**Amplitudes experimental (E) y teórica (T) de las oscilaciones anuales de temperatura en las superficies rocosas de las diversas salas de la Cueva.**

SALA	TECHOS		SUELOS	
	$\Delta\theta^E$ (°C)	$\Delta\theta^T$ (°C)	$\Delta\theta^E$ (°C)	$\Delta\theta^T$ (°C)
Hall	2,2	2,4	1,9	1,1
Post-2ª Puerta	1,3	1,5	1,0	0,8
Pasillo Sala	1,1	1,0	1,0	0,5
Sala de Polícromos	1,0	0,8	0,9	0,4
Segundo Ramal	1,1	0,8	1,2	0,4
Sala de los Muros	1,3	1,1	1,3	0,5
Pre-Gran Sala	0,6	0,5	0,6	0,1
Gran Sala	0,6	0,7	0,4	0,1

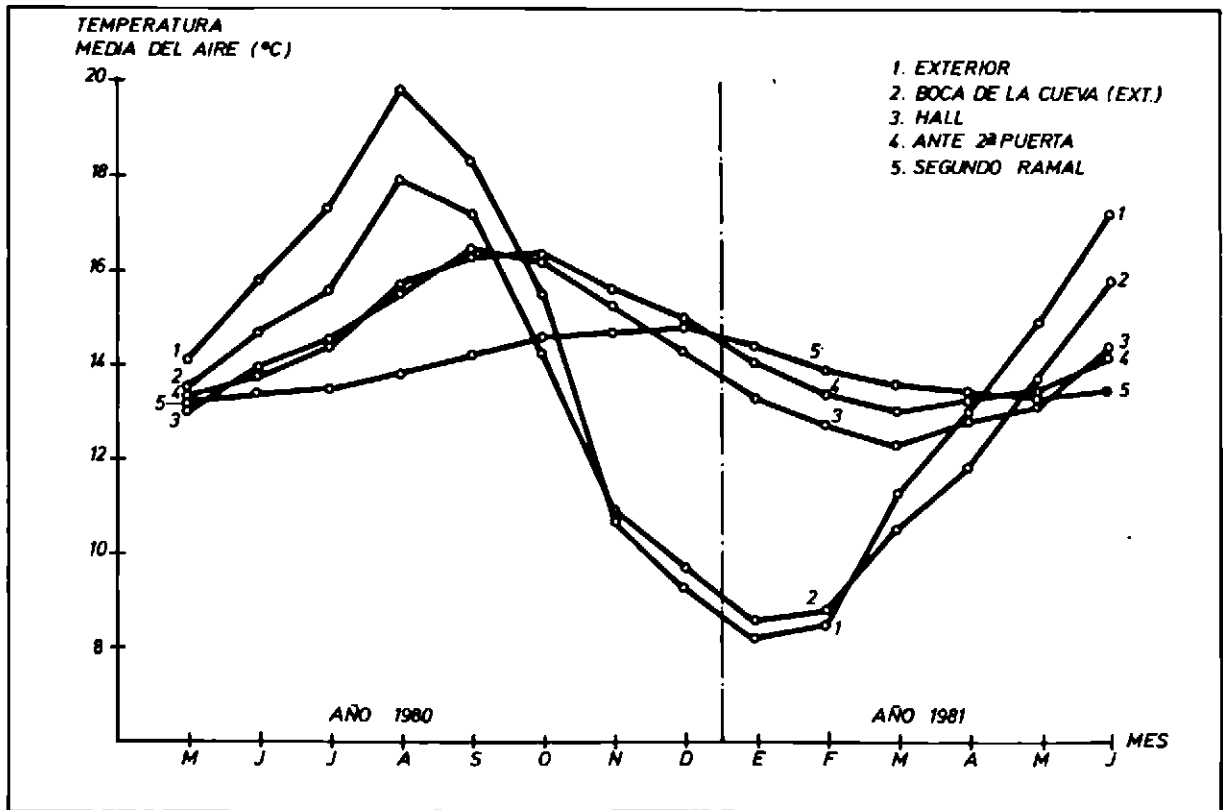


Figura 3.—Variación con el tiempo de las temperaturas medias del aire de los lugares que se indican.

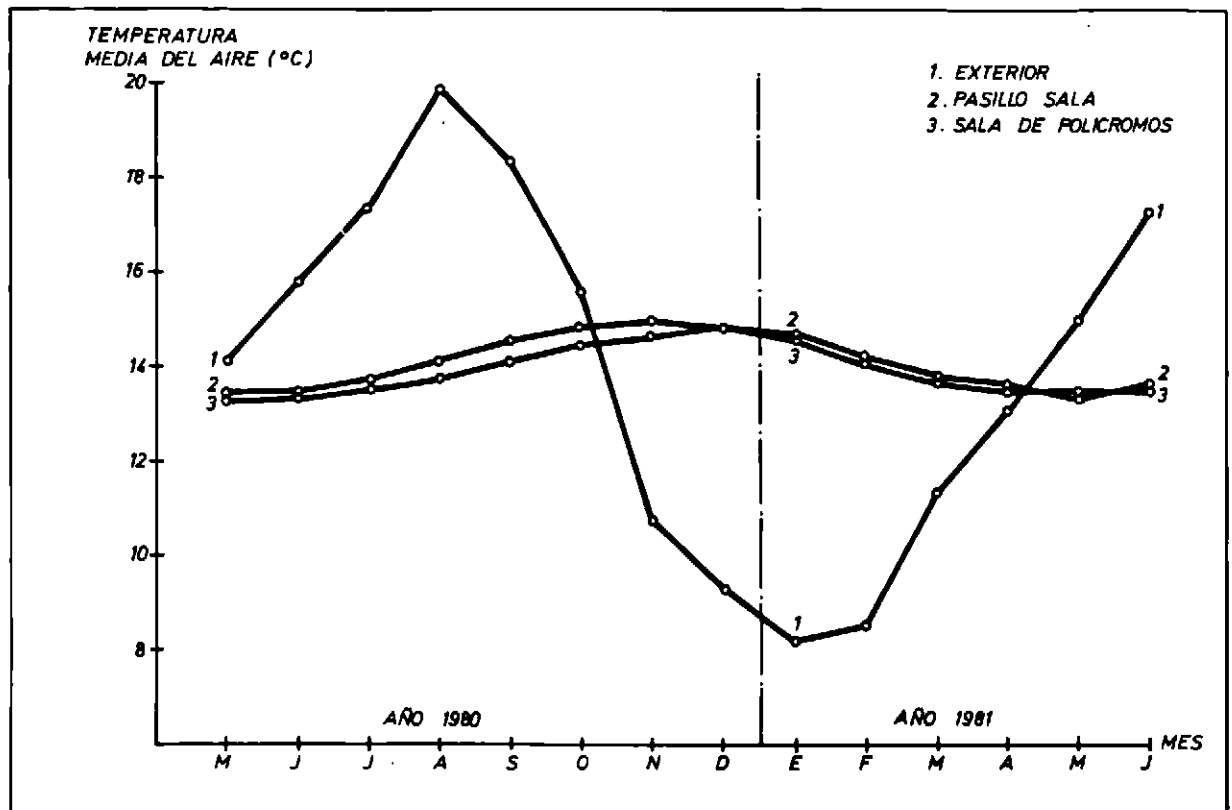


Figura 4.—Variación con el tiempo de las temperaturas medias del aire de los lugares que se indican.



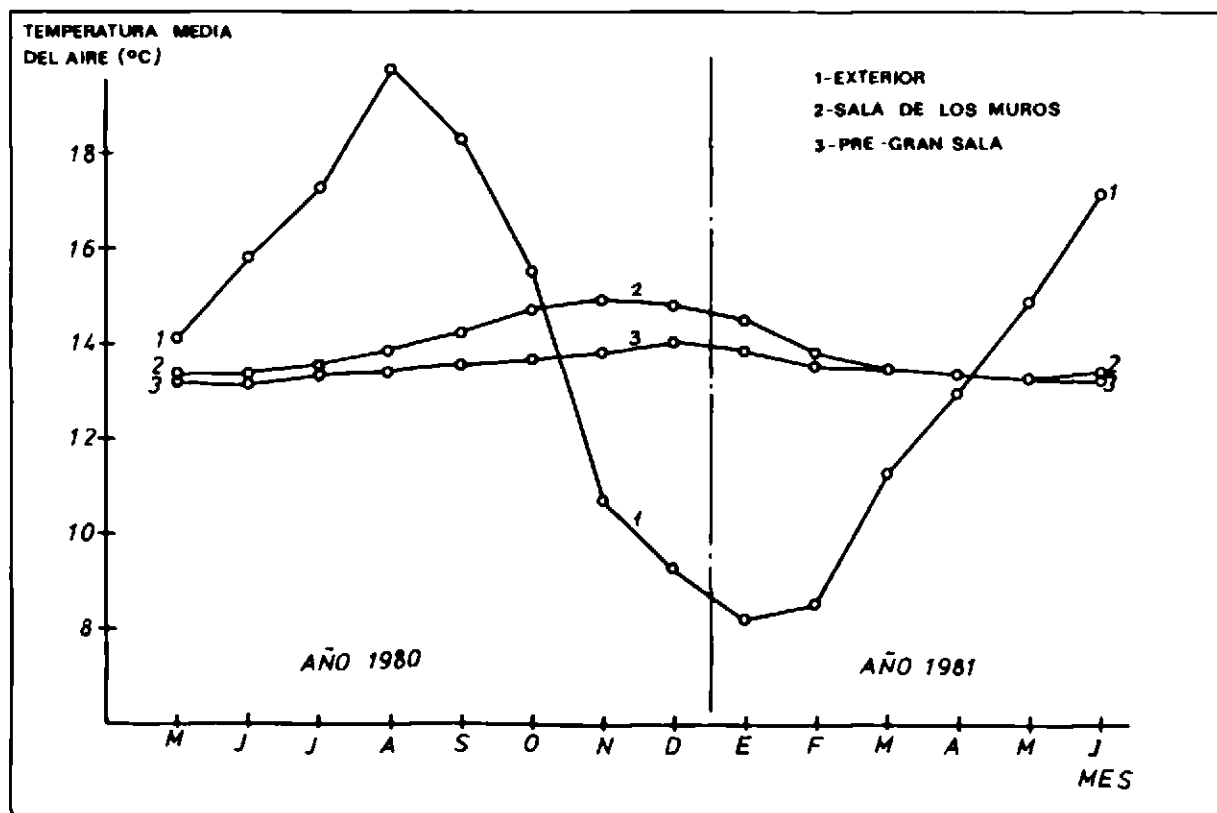


Figura 5.—Variación con el tiempo de las temperaturas medias del aire de los lugares que se indican.

básicamente sinusoidal, con un período igual a un año. Sin embargo, tanto la amplitud de la variación de la temperatura del aire como la fase de esta son distintas en los diferentes puntos medidos. La amplitud de las oscilaciones de temperatura del aire es mayor en el Hall y menor en las salas más profundas. La aparición de la máxima variación de temperatura ocurre con anterioridad en el Hall que en las otras salas. En conjunto, las características generales de la variación de la temperatura del aire en las distintas salas de la Cueva, coinciden con las encontradas para la temperatura superficial de las rocas de las salas correspondientes. Teniendo en cuenta que las variaciones de la temperatura de las superficies rocosas están determinadas por la influencia de la onda térmica anual, resulta que la temperatura del aire de cada sala esta condicionada fundamentalmente por la misma causa.

## VI. RESUMEN Y CONCLUSIONES

El conjunto de los resultados experimentales obtenidos y presentados en este trabajo, fijan las características del campo de temperaturas de la cueva de Altamira, en régimen natural, sin visitantes, y en particular de la Sala de Polícromos.

Por una parte, la distribución de temperaturas en la superficie rocosa y su evolución anual, presentan una concordancia aceptable con los resultados previstos, tanto en cuanto a la magnitud de las temperaturas existentes, como a sus variaciones temporales. De una manera general, las fluctuaciones de temperatura de la superficies internas de la Cueva son predecibles mediante la teoría de la propagación de la onda térmica, y los resultados experimentales confirman esta descripción, ya que en cada punto se observan unos valores adecuados y unas variaciones de temperatura que no superan las 3 décimas de grado, margen de error muy aceptable, si se tienen en cuenta los efectos de intercambio calorífico entre techo y suelo y las aproximaciones hechas sobre las características térmicas y calóricas del terreno en que se propaga la onda térmica.

Las temperaturas medias más elevadas de los techos de las diferentes salas oscilan entre los 16,6º C en octubre en el Hall y los 14,0º C en diciembre en la Gran Sala, y las más bajas entre los 12,6º C en marzo en el Hall y los 13,1º C en los meses de verano en la Gran Sala, con fluctuaciones anuales que oscilan entre los 2,2º C en el techo del Hall, que es la zona más afectada por las variaciones de la temperatura del exterior hasta fluctuaciones de solamente 0,6º C que tienen lugar en la Pre-Gran Sala y en la Gran Sala.

Particularmente el techo de la Sala de Polícromos tiene una temperatura media anual de 14,1º C con fluctuaciones de  $\pm 1,0^\circ$  C, presentando un máximo de 15,1º C en el mes de diciembre, y una temperatura mínima de 13,3º C en el mes de junio.

Por otra parte, cabe decir que los datos obtenidos sobre las temperaturas del aire ambiente de las distintas salas de la Cueva durante el período de un año, se corresponden básicamente con las temperaturas de las superficies de las rocas en contacto. Precisamente, la pequeña diferencia entre las temperaturas de las superficies rocosas y las de el aire que encierran pueden dar cuenta de la ventilación de la sala, ya que si tuviesen la misma temperatura nos indicaría que el aire era estanco. Durante los meses de verano la temperatura media de las superficies rocosas de la Sala de Polícromos es inferior a la del aire, llegando a alcanzar esta diferencia el medio grado en el mes de agosto. En invierno, la temperatura media de las rocas es superior a la del aire, alcanzando esta diferencia un valor máximo también de medio grado en el mes de enero. Es entonces, en estas fechas cuando los intercambios de aire con las restantes salas de la Cueva adquiere más importancia.

El resumen general que puede deducirse de los datos experimentales obtenidos es que el campo de temperaturas de la cueva de Altamira presenta una gran estabilidad en régimen natural, debido no solamente a las pequeñas diferencias de temperaturas existentes entre el aire y la superficie de cada sala y, a las también pequeñas diferencias de temperatura existentes entre ellas y a que las pequeñas fluctuaciones de temperatura en cada punto son extraordinariamente lentas, sino también a que la interacción del aire de la Cueva con el ambiente climático exterior de Altamira se ve entorpecida por dos factores: por una parte el amortiguamiento térmico que origina la situación y configuración de la Boca de la Cueva (basta observar la curva (2) de la figura 3), y por otra parte el hecho de que en general las masas de aire interiores alejadas de la entrada de la Cueva poseen constantemente una temperatura inferior a la que presentan las zonas más próximas, y como la topografía de la Cueva (7) nos dice que las primeras se encuentran a mayor profundidad que las segundas, se concluye que esta situación no favorece precisamente los intercambios convectivos del aire con el exterior.

Las conclusiones obtenidas pueden generalizarse ya que aunque los datos numéricos serán diferentes cada año, de acuerdo con la climatología correspondiente, sin embargo, discreparán bien poco de los que se presentan en este trabajo.

Evidentemente el registro continuo de datos permite además abordar otros aspectos del comportamiento natural de la Cueva, sobre todo en lo que se refiere a reacciones instantáneas y detalladas que requieren un tratamiento estadístico y que no cabría dentro de los objetivos, bien concretos de este trabajo, aunque puede serlo en el futuro.

Los resultados de la presente publicación son básicos para el resto de las investigaciones que se están realizando.

## BIBLIOGRAFIA

- (1).— «The Cave of Altamira at Santillana del Mar». H. Breuil, H. Obermaier. Madrid, 1935, (edic. española, 1935).
- (2).— Informe realizado por A. García Lorenzo y J. Endériz sobre el estado de conservación de la Cueva de Altamira (1970).
- (3).— «Nouveau traité de Chimie Minérale». Paul Pascal. Tome IV, págs. 514-29. Masson et al. Editeurs (1958).
- (4).— «The Dynamic Earth» P.J. Wyllie. John Wiley and Sons, Inc. (1971).

- (5).— «Geophysical methods in Geology». P.V. Sharma. Elsevier Scientific Publishing Company (1976).
- (6).— «Transmission de la chaleur». W.H. Mc.Adams. Ed. Dunod (1964).
- (7).— Planos de Altamira. FOESTRA (1975).
- (8).— «Applied Geophysics». W.M. Telford et al. Cambridge University Press (1976).
- (9).— «Nota geológica e hidrológica sobre la situación de la Cueva de Altamira, en la provincia de Santander». G. Gómez-Laá. Universidad de Santander (1980).
- (10).— «The microclimate in Carlsbad Caverns, New Mexico». J.S. McLean. U.S. Geological Survey for the National Park Service (1971).