

UNIVERSIDAD DE SANTANDER  
FACULTAD DE CIENCIAS  
DEPARTAMENTO DE FISICA FUNDAMENTAL

INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE VISITANTES EN  
LAS CARACTERISTICAS NATURALES DE LA SALA DE  
PINTURAS DE ALTAMIRA. ESTUDIO DE LA VENTILA  
CION NATURAL.

Memoria presentada por  
Ma Isabel Gutiérrez Díaz-Velarde  
para optar al grado de  
Doctora en Ciencias, Sección de  
Físicas.

D. EUGENIO VILLAR GARCIA, Catedrático de Física General  
de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santander

CERTIFICO: Que la presente memoria INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE VISITANTES EN LAS CARACTERISTICAS NATURALES DE LA SALA DE PINTURAS DE ALTAMIRA. ESTUDIO DE LA VENTILACION NATURAL, ha sido realizada bajo mi dirección en el Departamento de Física Fundamental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santander, por la Licenciada M<sup>a</sup> Isabel Gutierrez Diaz-Velarde, y que constituye su Tesis para optar el Grado de Doctora en Ciencias, Sección de Fisicas.

Y para que conste, en cumplimiento de la legislación vigente, presento ante la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santander la referida Tesis, firmando el presente certificado en Santander a veinticuatro de Junio de 1985.



EL CATEDRATICO

## AGRADECIMIENTOS

El trabajo que se expone en la presente Memoria se ha desarrollado en el Departamento de Física Fundamental de la Facultad de Ciencias de la Universidad de Santander, bajo la dirección del Director de dicho Departamento ,Prof. Dr. EUGENIO VILLAR GARCIA, a quien deseo agradecer de forma muy especial su constante asistencia científica ,su apoyo, y sus constantes consejos en la elaboración del mismo.

Deseo expresar mi más sincera gratitud, a los miembros del equipo formado por los doctores, Dña. Aurelia Bonet, Dn. Pedro L. Fernández, Dn. Luis S. Quindós, Dn. Jesús Soto, y los licenciados Dña. Nieves Díaz-Caneja, Dn. Gonzalo Odriozola y Dn. Ramón Solana, que con su esfuerzo y bajo la dirección del Prof. Villar han llevado a cabo la investigación encaminada a la conservación de las pinturas de la Cueva de Altamira, y con los cuales he trabajado durante un periodo de tres años ,recibiendo de ellos una continua ayuda en el desarrollo de este trabajo.

A la Srta. Elena Barriuso, mi agradecimiento por su esmerada labor de mecanografiado.

Finalmente, deseo agradecer a mi familia y amigos ,su continuo apoyo durante la elaboración de esta Memoria.

I N D I C E

	<u>PAGINAS</u>
INDICE. . . . .	1
INTRODUCCION. . . . .	7
CAPITULO 1: VENTILACION NATURAL DE LA SALA DE POLI- CROMOS DE LA CUEVA DE ALTAMIRA.	
1.1) - Introducción. . . . .	16
1.2) - Radiactividad natural de la Cueva de Al- tamira. Técnica de medida del radionú- clido Rn-222. . . . .	17
1.3) - Método para la evaluación de la ventila- ción de la Sala de Pinturas. Análisis del intercambio de aire. . . . .	28
1.4) - Resultados obtenidos. . . . .	32
1.5) - Confirmación experimental de la ventila- ción de la Sala de Polícromos mediante otros índices cualitativos. . . . .	34
1.5.a) - La evolución del campo de temperaturas, como índice de la ventilación. . . . .	37
1.5.b) - Variación de la concentración de anhí- drido carbónico con la ventilación. . . . .	41
1.5.c) - La humedad relativa como índice cualita- tivo de la ventilación . . . . .	43
1.6) - Niveles de exposición radiactiva para visitantes y guías. . . . .	45
CAPITULO 2: INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE VISITANTES SOBRE LAS TEMPERATURAS DE LA SALA DE PO- LICROMOS.	
2.1) - Introducción. . . . .	55
2.2) - Descripción fenomenológica de las altera- ciones de temperatura de la Sala produci- das por la presencia humana. . . . .	56

	<u>PAGINAS</u>
2.3) - Convección natural. . . . .	59
2.4) - Absorción y emisión por radiación . . . .	61
2.5) - Variación máxima de la temperatura de la Sala de Pinturas durante el transcurso de una visita. . . . .	67
2.6) - Tiempos de recuperación de la temperatura de la Sala. . . . .	73
2.7) - Variación de la temperatura de la Sala de Pinturas con el tiempo, en el transcurso de la visita . . . . .	77
 CAPITULO 3: ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS VISITANTES EN LAS CARACTERISTICAS DEL AGUA QUE BAÑA LAS PINTURAS.	
3.1) - Introducción. . . . .	90
3.2) - Métodos de análisis . . . . .	91
3.2.a) - Medida del pH . . . . .	96
3.2.b) - Medida del contenido en materia orgánica.	98
3.2.c) - Medida de la concentración de nitritos. .	98
3.2.d) - Medida de la concentración de amoniaco. .	100
3.2.e) - Medida de la dureza. Concentración de los iones calcio y magnesio . . . . .	101
3.2.f) - Medida de la concentración de sulfatos. .	103
3.2.g) - Medida de la concentración de nitratos. .	104
3.2.h) - Medida de la concentración de cloruros. .	105
3.2.i) - Medida de la concentración de carbonatos y bicarbonatos. . . . .	107
3.3) - Tratamiento de datos obtenidos en los <u>aná</u> lisis químicos. Comparación de estos re- sultados con los obtenidos en ausencia de visitantes. . . . .	108

PAGINAS

3.3.a) - Comparación de la concentración de iones que permanece constante en el tiempo . . .	108
3.3.b) - Comparación de los factores que intervienen en el equilibrio $\text{CO}_2\text{-H}_2\text{O-CO}_3\text{Ca}$ . . .	120
3.4) - Discusión de los resultados . . . . .	128
3.5) - Índice de saturación . . . . .	131
 CAPITULO 4: INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE PERSONAS EN LA HUMEDAD DE LA SALA DE POLICROMOS DE LA CUEVA DE ALTAMIRA	
4.1) - Introducción . . . . .	140
4.2) - Variación de la humedad de la Sala de Polícromos por la presencia de visitantes. . . . .	141
4.3) - Tiempo para alcanzar la humedad saturante . . . . .	150
4.4) - Tiempos de recuperación de la humedad inicial. . . . .	153
4.5) - Variación del índice de saturación como consecuencia de condensación del vapor de agua, por la presencia humana en la Sala . . . . .	157
 CAPITULO 5: INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE PERSONAS EN LA CONCENTRACION DE ANHIDRIDO CARBONICO DE LA SALA DE POLICROMOS DE LA CUEVA DE ALTAMIRA.	
5.1) - Introducción. . . . .	165
5.2) - Variación del contenido de gas carbónico en la Sala de Pinturas por efecto de la presencia de seres humanos. Tiempos de recuperación del $\text{CO}_2$ . . . . .	167

PAGINAS

5.3) - Influencia de la variación de la concen  
tración de anhídrido carbónico, por la  
presencia de visitantes en la Sala de  
Pinturas, en el índice de saturación. . 176

CONCLUSIONES.....181  
BIBLIOGRAFIA.....188

I N T R O D U C C I O N

## Introducción

La Cueva de Altamira posee un extraordinario interés , tanto desde el punto de vista prehistórico, como del artístico, radicando éste principalmente en las manifestaciones de arte paleolítico que ella alberga, especialmente las pinturas existentes en la Sala de Polícromos, consideradas no sólo como la primera creación genial de la mano del hombre, sino como el primer testimonio que se halló del arte paleolítico, lo que constituyó un hito histórico.

La supervivencia de este soberbio legado de la Humanidad ha constituido, desde su descubrimiento ( 1 ), una preocupación constante, no sólo para los arqueólogos y artistas, sino para otros muchos sectores de nuestra sociedad y de otros países.

Los problemas asociados a su supervivencia se refieren a tres aspectos fundamentales; por una parte relacionados con la estabilidad estructural de la Cueva, es decir, con la posibilidad de derrumbamientos de carácter geológico; por otra, con el deterioro natural de las superficies policromadas a través del tiempo; y por último, los problemas asociados los efectos que sobre las pinturas puede ejercer la presencia de visitantes en la Cueva.

Evidentemente, si las pinturas realizadas hace unos dieciséis mil años ( 2 ), han subsistido hasta hoy, es debido a que en la Sala de Polícromos ha existido un microclima adecuado, que aunque haya ido variando desde las estribaciones de la última glaciación, sin embargo ha permitido la perdurabilidad de las mismas.

Los agentes que intervienen en el clima de la Cueva son principalmente la temperatura, la humedad, la concentración de los gases que componen la atmósfera de la misma, especialmente el anhídrido carbónico, las características físico-químicas de las aguas que bañan las pinturas, y la flora y fauna ( 3 ) existente en el aire, tierra y agua de la Cueva.

Estos agentes que durante miles de años, han actuado bajo determinados regímenes naturales de equilibrio, han sido totalmente alterados por diferentes causas, todas antropogénicas , entre las que cabe destacar por la intensidad de sus efectos:

a.- la existencia de una cantera encima mismo de la Sala de Pinturas;

b.- las obras de acondicionamiento de la Cueva para la recepción de las visitas;

c.- las inyecciones de cemento hidráulico que se realizaron rellenando grietas y fisuras y, el levantamiento de muros;

d.- un incontrolado y masivo sistema de visitas, desde que fue descubierta y que culminó en 1977.

Las convulsiones del terreno producidas por los barrenos durante la explotación de la cantera, que llegó a rebajar la superficie del suelo exterior en 1'5 m, a la altura del techo policromado, y que en algunos puntos arrancaron roca a apenas 5 m de las paredes interiores de la Sala de Pinturas, modificaron sin duda las dimensiones de grietas y fisuras, originando algunas nuevas y alterando profundamente la red hidrológica entramada en las calcarenitas,

proceso especialmente importante en los estratos del techo, de 7 m de espesor total, que permiten el acceso del agua de lluvia a las superficies policromadas.

Pero quizás desde el punto de vista hidrológico todavía fue peor el efecto que produjeron las inyecciones de cemento hidráulico, que al no rellenar completamente la red de fisuras, creó una canalización distinta, caracterizada posiblemente por la aparición de zonas de estancamiento del agua de lluvia, en su lenta travesía hasta el techo de la Sala. Es obvio además, que con ello, nuevos elementos químicos se incorporaran a la composición natural del agua que baña las pinturas.

Con el fin de facilitar el paso de los visitantes se rebajó el suelo rocoso de la Sala de Pinturas provocando fortísimas vibraciones en toda la Sala. Por otra parte, en el interior de la Cueva se levantaron gruesos muros de cemento, imitando la roca, que llegan hasta el techo, embotellando así la Sala de Pinturas, la cual comunica con un pasillo de 15 m de largo, un ancho variable entre 1'25 y 2'75 y 2 m de altura, a través de una boca de 2'5 m<sup>2</sup>. A estas drásticas transformaciones del recinto, hay que añadir la construcción de varios pabellones en el exterior, muy próximos a la Sala.

Si además de todo este conjunto de acciones antropogénicas se tiene en cuenta que durante años se llevaron a cabo regímenes de visitas masivas, que llegaron a alcanzar las 1500 personas diarias, es fácil deducir la profunda modificación que ha experimentado el microclima de la Sala de Polícromos y en consecuencia presuponer que las características actuales de este ecosistema puedan constituir un peligro para la conservación de las pinturas.

Nuestro objetivo primordial y prioritario cuando comenzamos a estudiar los problemas relativos a la perdurabilidad de las pinturas de la Cueva de Altamira, fué el de establecer que procesos fisico-químicos eran los que podían dar lugar al deterioro de las pinturas; una vez hecho esto, el paso siguiente era el de conocer como se desarrollaban estos procesos de un modo natural (4) a consecuencia de las características propias del ecosistema , y por último estudiar como puede influir la presencia de personas en la Sala sobre los factores que afectan a estos procesos(\*).

Por esta razón,partiendo de la investigación que se llevó a cabo sobre el comportamiento natural de la Cueva ,sin la presencia de personas (5),nuestro trabajo ha consistido,en una primera etapa ,en realizar sucesivas campañas de medidas en la Sala de Pinturas con regímenes de visitas diferentes utilizando tiempos de permanencia suficientes como para encontrar la variación que experimentan los principales factores determinantes de las características de la Sala.En una segunda etapa se ha explicado ,mediante razonamientos teóricos,la influencia que ejercen las personas sobre estos factores,comprobando las conclusiones alcanzadas mediante los ensayos de visitas llevados a cabo.

En esta memoria presentamos los estudios realizados, sobre el comportamiento de la Sala de Pinturas, como un ecosistema ocupado por personas, para diferentes índices de ocupación, así como los resultados obtenidos y las conclusiones más significativas. Hemos analizado las variaciones que experimentan

---

(\*) Es obvio que el encargo que el Ministerio de Cultura hizo al profesor Villar y su equipo, con el cual he realizado este trabajo, era que se estudiase si para conservar las pinturas era necesario cerrar la Cueva de Altamira, o si no era así, cual tendría que ser el régimen de visitas. La respuesta fue bien concreta pero no es el objetivo de esta Memoria (6).

la temperatura, la humedad y el contenido de anhídrido carbónico de la Sala de Polícromos determinando además como se recuperan estas variables una vez que los visi tantes la abandonan.

Por otra parte, hemos estudiado la ventilación natural de esta Sala, dato de gran importancia a la hora de ana lizar los efectos acumulativos producidos por la frecuen cia con que se puedan realizar las visitas. Hemos de tener en cuenta que las personas ceden calor al ambiente y además emiten de forma continua, anhídrido carbónico y vapor de agua (7). En un recinto pequeño como es la Sala de Polícromos en estas circunstancias iría aumentando la concentración de estas dos especies moleculares progresi vamente en función del número de personas y del tiempo de permanencia de estas, si no existiera ventilación. Para poder evaluar de forma cuantitativa la ventilación natural de la Sala de Pinturas, hemos llevado a cabo un exhaustivo estudio de la variación que experimenta la con centración del gas radiactivo natural Rn-222, en el Hall y en la Sala de Pinturas. Las medidas realizadas a lo lar go de un año en estas dos Salas, entre las que hemos admi tido que tiene lugar una corriente de convección, nos han permitido mediante un sencillo modelo matemático determi-  
nar la ventilación de la Sala. Por otra parte, hemos lle-  
vado a cabo análisis cualitativos de procesos en los que intervienen tiempos de renovación del aire, tales como las variaciones de humedad, de temperatura y de gas carbó-  
nico en la Sala, que nos han permitido realizar un "test" de los resultados obtenidos en nuestro estudio, encontran do una buena concordancia fenomenológica.

La determinación de la ventilación de la Sala es importan-

te a la hora de intentar conocer de forma precisa el tiempo de recuperación de la humedad, la temperatura y la concentración de gas carbónico, según el número de personas y el tiempo de permanencia, de las que dependen las modificaciones originadas en el ecosistema.

Como ya hemos indicado nuestro principal objetivo ha sido estudiar los factores que pueden influir en las alteraciones que pueden experimentar las superficies policromadas, por lo que hemos centrado especial atención en la Sala de Polícromos, que esquemáticamente describimos como un recinto de pequeño volumen, prácticamente cerrado, con una temperatura casi constante, con un contenido en gas carbónico que puede llegar a ser 25 veces superior al de la atmósfera exterior, con una humedad próxima a la de saturación, casi sin ventilación, y con el techo policromado impregnado de agua que gotea permanentemente.

A la vista de esta breve descripción resulta fácil preveer, que la Sala es extraordinariamente sensible a la presencia de personas.

El estudio de las modificaciones que experimentan las variables microclimáticas como consecuencia de la presencia de seres humanos en la Sala de Pinturas se ha abordado utilizando un tratamiento tal, en el que en todas las situaciones se consideran las condiciones iniciales de la Sala, el efecto que producen el número de personas presentes en ella, el tiempo de permanencia de estos, y la ventilación natural de la Cueva. De esta forma, hemos establecido una serie de relaciones matemáticas que nos permiten determinar el tiempo de recuperación de la Sala, una vez que la última persona ha abandonado el recinto. Con estas ecuaciones, podemos conocer de forma sencilla, como quedará afectado el microclima de la Cueva, cualquiera que sea el número de personas que entren a la Sala.

Por otra parte, resulta de gran interés conocer la influencia que tiene la presencia de personas en las características físico-químicas de las aguas que bañan las pinturas con el fin de determinar su acción sobre las superficies policromadas.

La acción química del agua depende fundamentalmente de su composición, es decir, de la concentración de iones y gases disueltos, adquirida primero a su paso por los estratos del techo y modificada después al entrar en contacto con la atmósfera de la Sala, sobre la que ha influido la presencia de personas en su interior. Resulta así de especial interés abordar los procesos que tienen lugar; es por ello que hemos puesto un cierto énfasis en los análisis de agua que han sido llevados a cabo tanto en régimen natural ( 5 ), como en régimen de visitas, con objeto de comparar los valores obtenidos en ambas ocasiones. Por esta razón se han realizado continuas campañas sistemáticas de recogida y análisis de agua.

El intentar conocer todos los procesos que pueden deteriorar las pinturas es evidentemente una labor muy compleja, por lo cual nuestro estudio sólo aborda algunos de ellos. Por otra parte, cabe destacar que algunos de los resultados numéricos que presentamos en esta Memoria hay que tomarlos como estimaciones límites, dentro de los modelos simplificadores que hemos utilizado, pero que resultan hipótesis aceptables avaladas por las medidas experimentales realizadas.

CAPITULO 1.-

VENTILACION NATURAL DE LA SALA DE POLICROMOS  
DE LA CUEVA DE ALTAMIRA.

- 1.1) - Introducción.
- 1.2) - Radiactividad natural de la Cueva de Altamira.  
Técnica de medida del radionúclido Rn-222.
- 1.3) - Método para la evaluación de la ventilación de la Sala de Pinturas. Análisis del intercambio de aire.
- 1.4) - Resultados obtenidos.
- 1.5) - Confirmación experimental de la ventilación de la Sala de Polícromos mediante otros índices cualitativos.
  - 1.5.a) - La evolución del campo de temperaturas, como índice de la ventilación.
  - 1.5.b) - Variación de la concentración de anhídrido carbónico con la ventilación.
  - 1.5.c) - La humedad relativa como índice cualitativo de la ventilación.
- 1.6) - Niveles de exposición radiactiva para visitantes y guías.

## 1.1) - Introducción

La dinámica atmosférica existente en un ecosistema hipogeo como la Sala de Pinturas de la Cueva de Altamira, originada por los intercambios de masas de aire que tienen lugar entre sus diferentes salas y entre su atmósfera interior y la exterior, juega un papel muy importante dentro del microclima de la Sala, como responsable directa de flujos de energía y de materia. Por esta razón hemos realizado un estudio sobre la ventilación de la Cueva, tanto desde un punto de vista cualitativo, como cuantitativo.

Concretamente como índices cualitativos de los intercambios de masas de aire de la Sala de Polícromos con su entorno, hemos utilizado las variaciones temporales que sufren tanto la humedad como el contenido de anhídrido carbónico en dicha Sala, así como las oscilaciones naturales que experimenta la diferencia de temperaturas existente entre las paredes rocosas y el aire de la Sala, y la diferencia entre las temperaturas del Hall y la Sala de Pinturas.

Como índice cuantitativo de la ventilación natural hemos estudiado la variación que experimenta la concentración del gas radon-222, en la Sala de Polícromos y en el Hall de la Cueva de Altamira, a través de medidas precisas de la actividad  $\alpha$  de las muestras de aire, a lo largo de las diferentes épocas del año. Para lograr esto último hemos puesto a punto la técnica de medida de la concentración del radio-núclido Rn-222, en muestras de aire tomadas del Hall y de la Sala de Polícromos, de modo que a partir de los resultados obtenidos a lo largo de un año nos permitiese mediante un modelo adecuado determinar el valor de la ventilación de la Sala.

Por último, las medidas realizadas, del contenido de radon en la Sala de Polícromos en las distintas épocas del año, nos han permitido calcular los niveles de radiación a que se encuentran expuestos los visitantes y los guías. Por tan

to el interés por determinar la concentración del gas radon en la Sala de Polícromos estriba no sólo en que los valores hallados permitan evaluar la ventilación, sino también la dosis de radiación que podría recibirse.

### 1.2) - Radiactividad natural de la Cueva de Altamira. Técnica de medida del radionúclido Rn-222.

Los isótopos del gas noble radón son miembros de las series de desintegración de los radionúclidos U-238, Th-232, y U-235. Los radioisótopos U-238 (99'3% del uranio natural) y Th-232, ambos emisores alfa de vida media larga, contribuyen junto con el potasio-40, prácticamente a toda la radiación ambiente natural de origen terrestre.

El isótopo más importante del radon es el Rn-222, miembro de la cadena de desintegración del U-238, el cual se desintegra por emisión  $\alpha$ , con una vida media de 3'82 días.

La tabla 1.1 presenta la cadena de desintegración del U-238 (8). Todos los miembros de la serie del radionúclido U-238, incluyendo al Ra-226, se encuentran generalmente en equilibrio secular con el uranio, pero una vez que se ha formado el radon, debido a que es un gas, y por tanto puede difundirse con rapidez, se producen mecanismos de escape desde las capas superiores del suelo hacia la atmósfera.

Existen tres importantes fuentes de radon en la tierra, que son: la superficie terrestre, los océanos y aguas subterráneas, y la vegetación.

Como un promedio global, el radon es exhalado desde la superficie de la tierra en una tasa de alrededor de 1600 pCi/cm<sup>2</sup> año (9), por lo que teniendo en cuenta el valor de la superficie terrestre de aproximadamente 1'5.10<sup>18</sup> cm<sup>2</sup>, resulta que se emana una cantidad total de radon de 2'4.10<sup>9</sup> Ci/año.

La concentración de radio en aguas marítimas, es de 0'05 pCi/Kg, por lo que la tasa de radon desde la superficie del océano es mucho menor que desde la superficie de la tie

TABLA 1.1

Cadena de desintegración del U-238

Isótopo	Símbolo	Nombre histórico	Vida Media	Radiación	Energía L MeV
Uranio-238	$U^{238}$	Uranio I	$4'5 \cdot 10^9$ años	$\alpha$	$4'18^{(77)}$ ; $4'13^{(23)}$
Torio-234	$Th^{234}$	Uranio X <sub>1</sub>	24'1 días	$\beta, \gamma$	$0'19^{(65)}$ ; $0'10^{(35)}$ $0'09^{(15)}$ ; $0'06^{(7)}$ ; $0'03^{(7)}$
Protactinio-234	$Pa^{234}$	Uranio X <sub>2</sub>	1'18 min.	$\beta, \gamma$	$2'31^{(93)}$ ; $1'45^{(6)}$ ; $0'55^{(1)}$ $1'01^{(2)}$ ; $0'77^{(1)}$ ; $0'04^{(3)}$
Uranio-234	$U^{234}$	Uranio II	$2'50 \cdot 10^5$ años	$\alpha, \gamma$	$4'77^{(72)}$ ; $4'72^{(28)}$ $0'05^{(28)}$
Torio-230	$Th^{230}$	Ionio	$8'0 \cdot 10^4$ años	$\alpha$	$4'68^{(76)}$ ; $4'62^{(24)}$
Radio-226	$Ra^{226}$	Radio	1622 años	$\alpha, \gamma$	$4'78^{(94)}$ ; $4'59^{(6)}$ $0'19^{(4)}$
Radon-222	$Rn^{222}$	Radon	3'82 días	$\alpha$	$5'48^{(100)}$
Polonio-218	$Po^{218}$	Radio A	3'05 min.	$\alpha$	$6'00^{(100)}$

Plomo-214	Pb <sup>214</sup>	Radio B	26'8 min	$\beta, \gamma$	1'03 <sup>(6)</sup> ; 0'66 <sup>(40)</sup> ; 0'46 <sup>(50)</sup> 0'40 <sup>(4)</sup> 0'35 <sup>(44)</sup> ; 0'29 <sup>(24)</sup> 0'24 <sup>(11)</sup> ; 0'05 <sup>(2)</sup>
Bismuto-214	Bi <sup>214</sup>	Radio C	19'7 min	$\beta, \gamma$	3'18 <sup>(15)</sup> ; 2'56 <sup>(4)</sup> ; 1'79 <sup>(8)</sup> 1'33 <sup>(33)</sup> ; 1'03 <sup>(22)</sup> ; 0'74 <sup>(20)</sup> 2'43 <sup>(2)</sup> ; 2'20 <sup>(6)</sup> ; 2'12 <sup>(1)</sup> 1'85 <sup>(3)</sup> ; 1'76 <sup>(19)</sup> 1'73 <sup>(2)</sup> ; 1'51 <sup>(3)</sup> ; 1'42 <sup>(4)</sup> 1'38 <sup>(7)</sup> ; 1'28 <sup>(7)</sup> ; 1'24 <sup>(7)</sup> 1'16 <sup>(2)</sup> ; 1'12 <sup>(20)</sup> 0'94 <sup>(5)</sup> ; 0'81 <sup>(2)</sup> ; 0'77 <sup>(7)</sup> 0'61 <sup>(45)</sup>
Polonio-214	Po <sup>214</sup>	Radio C'	160.10 <sup>-6</sup> seg.	$\alpha$	7'68 <sup>(100)</sup>
Plomo-210	Pb <sup>210</sup>	Radio D	19'4 años	$\beta, \gamma$	0'06 <sup>(17)</sup> ; 0'02 <sup>(83)</sup> 0'03 <sup>(4)</sup>
Bismuto-210	Bi <sup>210</sup>	Radio E	5'0 días	$\beta$	1'16 <sup>(100)</sup>
Polonio-210	Po <sup>210</sup>	Radio F	138'4 días	$\alpha$	5'3 <sup>(100)</sup>
Plomo-206	Pb <sup>206</sup>	Radio G	ESTABLE		

rra; del orden de  $6 \text{ pCi/cm}^2\text{-año}$  (9). Si tenemos en cuenta la superficie oceánica, que es de  $3'6 \cdot 10^{18} \text{ cm}^2$ , el total de radon es en este caso de  $2'3 \cdot 10^7 \text{ Ci/año}$ , cien veces menor que el de las tierras emergentes.

Las aguas subterráneas y la vegetación hacen el papel de vehículos de transporte del radon, estimándose que estos pueden contribuir como máximo en un 20%, a los desprendimientos de radon desde la tierra (8).

El contenido de radon en agua subterránea, suele ser de  $5.000 \text{ pCi/lt}$ , encontrándose en ocasiones valores de hasta  $100.000 \text{ pCi/lt}$ , (9). El radon es totalmente soluble en agua fría, disminuyendo esta solubilidad considerablemente con la temperatura, causa que puede dar lugar a desprendimientos de radon cuando el agua se calienta.

Aún cuando existan otras pequeñas fuentes de emisión de radon, tales como las instalaciones de plantas de reprocesado de combustible nuclear y laboratorios de isótopos radiactivos, no afectan prácticamente al total anual antes citado. El U-238 es un constituyente común en las rocas que constituyen la corteza terrestre, encontrándose en ellas con una abundancia de aproximadamente  $2'8 \text{ ppm}$  en la zona superior, y de  $1'8 \text{ ppm}$  en el suelo cerca de la superficie (10). Abundancias típicas en distintos tipos de rocas son;  $4'7 \text{ ppm}$  en granito,  $3'7 \text{ ppm}$  en pizarra,  $2'2 \text{ ppm}$  en caliza y  $0'45 \text{ ppm}$  en piedra arenisca (11). Es por ello que antes de proceder a llevar a cabo medidas del contenido de radon, hemos realizado algunas medidas del contenido de radio de las rocas que constituyen la Sala de Polícromos. Para ello hemos utilizado una cadena de espectrometría gamma. El método se basa en la medida del pico del descendiente del radio, Bi-214, de  $1'76 \text{ MeV}$ , una vez alcanzadas las condiciones de equilibrio entre ambos (12). Un espectro típico de los obtenidos puede observarse en la Figura 1.1. Los valores de las actividades de radio encontradas, en las muestras medidas, están comprendidos entre  $0'52 \pm 0'10 \text{ pCi/gr.}$  y  $0'70 \pm 0'14$

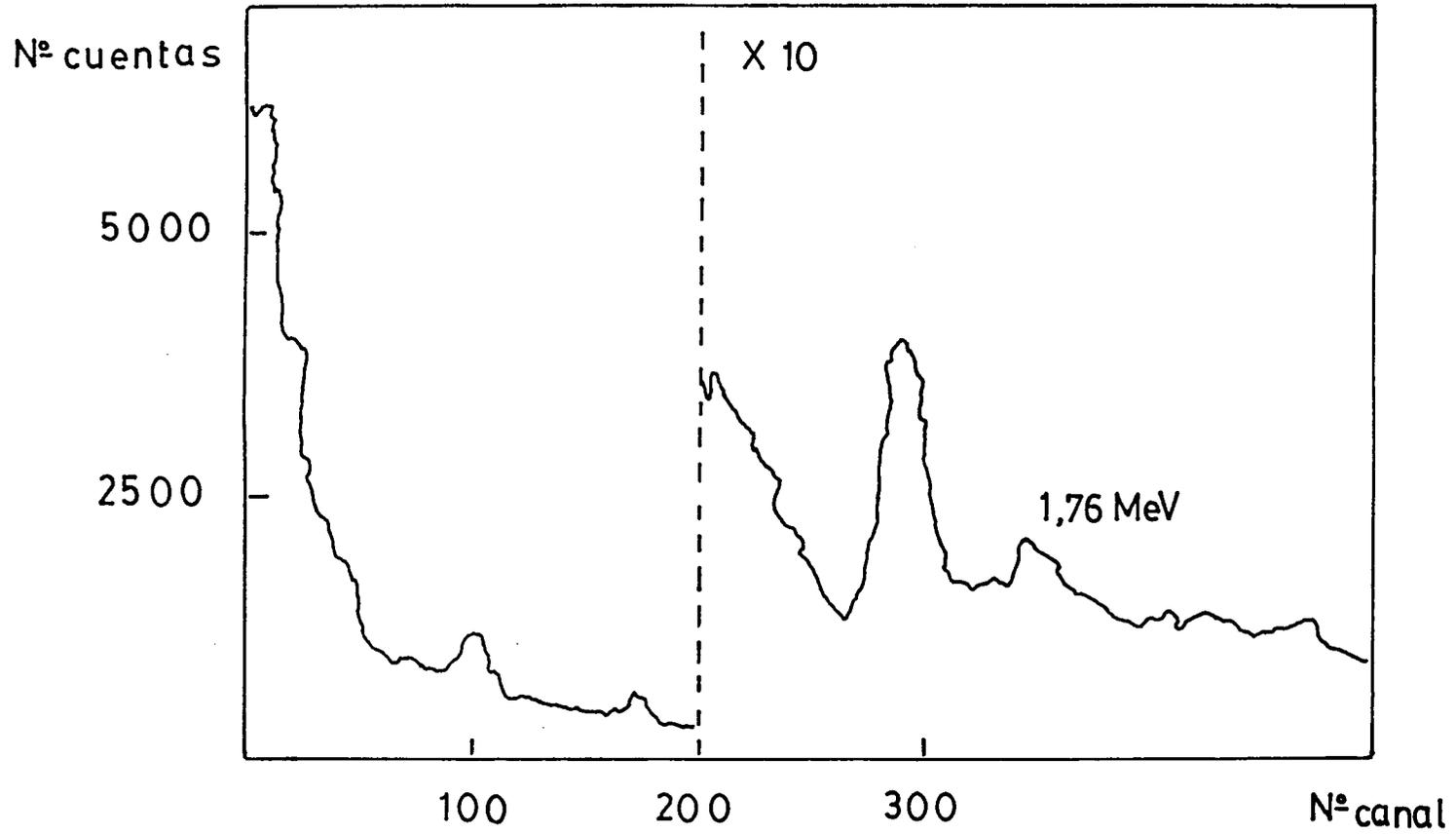


Figura 1.1

Espectro gamma característico de una de las muestras de tierra del suelo de la Cueva de Altamira.

pCi/gr. suelo; valores similares a los obtenidos en muestras de suelo "normales" (10), lo cual nos permite asegurar que los posibles altos valores de concentración de radon encontrados en la atmósfera de la Sala de Polícromos, no son debidos a concentraciones anormales de uranio en las masas rocosas que encierran el aire de la Cueva.

Las medidas de la concentración del isótopo radiactivo Rn-222 en el aire del interior de la Cueva de Altamira, han sido llevadas a cabo utilizando el detector de gas, de la figura 1.2 Este consiste básicamente en un tubo fotomultiplicador de cinco pulgadas, montado con ventana; y un recinto hermético a la luz, que se utiliza para contener la vasija con la muestra de aire cuyo contenido en radon se desea determinar.

Para la toma de muestras se utilizan , células de centelleo de distinta capacidad, concretamente de 500 y 1400 cm<sup>3</sup>. Estas células de centelleo están hechas de un plástico transparente y las paredes internas están recubiertas del centelleador sulfuro de zinc dopado con plata (ZnS(Ag)). En la parte superior están provistas de dos válvulas, tales que el gas que va a ser medido, puede fluir a través de la célula cuando se recoge la muestra ó se limpia la vasija.

Las células de centelleo están diseñadas de modo que se las puede hacer el vacío a través de cualquiera de las espitas de forma que una vez se ha evacuado el aire de las células, basta abrir la espita en el seno de la atmósfera de la Cueva para que se llene con una muestra de este aire.

El contador de gas que hemos utilizado opera de la forma siguiente:

- 1.) El centelleador ZnS(Ag), que recubre las paredes de las células de centelleo, absorbe la radiación  $\alpha$  emitida por el isótopo radiactivo Rn-222.

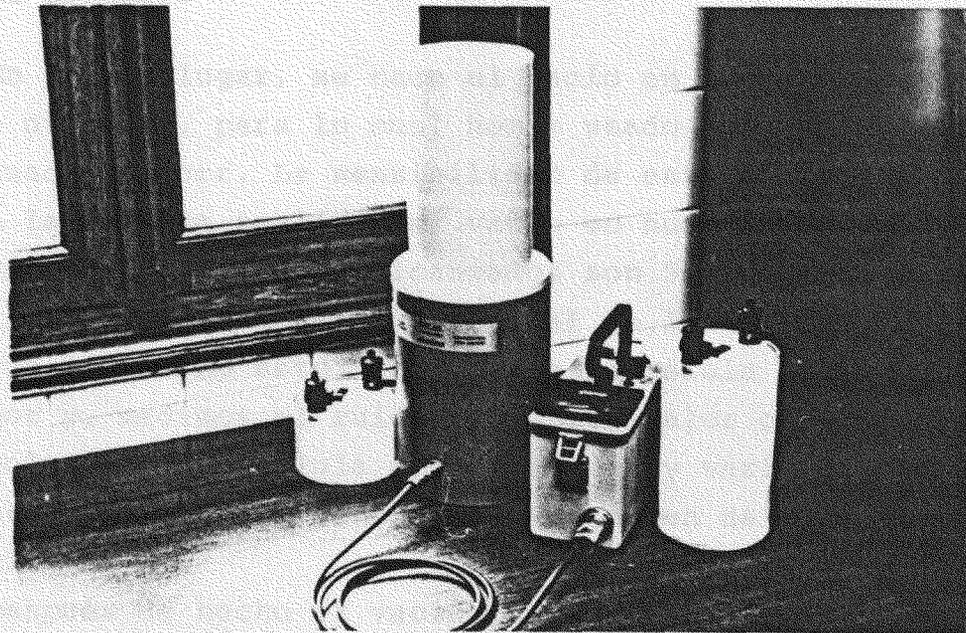


Figura 1.2.-

Contador de gas utilizado para la medida del contenido de Rn-222 en el aire de la Sala y el Hall, de la Cueva de Al tamira.

2.-) Seguidamente tiene lugar el proceso de centelleo, con la consiguiente emisión de luminiscencia de fotones.

3.-) Los fotones emitidos, son absorbidos por el cátodo del fotomultiplicador.

4.-) Emisión de foto electrones, que son recogidos en el primer dinodo, teniendo finalmente lugar, el proceso de multiplicación de electrones.

Las medidas del contenido de radon-222, en las muestras gaseosas tomadas en la Cueva, se realizan a través del siguiente proceso:

En primer lugar, se hace el vacío en la célula de centelleo a utilizar, para lo cual hemos usado una bomba de vacío graduada en torr. La sensibilidad de este aparato es de 10 torr. A la hora de realizar el vacío en nuestras células de centelleo, lo máximo que alcanzamos son 50 torr, suficiente para llevar a cabo la limpieza total de las mismas.

Una vez hecho esto, conectamos la célula vacía con el contador y, medimos el ruido de fondo, valor que dependerá del volumen de la célula de centelleo, y varía de unos días a otros; aunque en general es del orden de 11 a 20 cuentas por minuto.

Después de hecho el vacío, y medido el ruido de fondo, se procede a tomar la muestra de aire en el interior de la Cueva; y realizar seguidamente el recuento.

Cabe señalar, que las células de centelleo, se manipulan tapadas en todo momento, con un paño negro, para evitar que les dé la luz, lo que provocaría casi con seguridad recuentos anómalos. Por esta misma razón, tanto la medida del ruido de fondo, como el recuento de las muestras se llevan a cabo en una habitación oscura.

En la figura 1.3, se representa la variación de la tasa de re

fracción de equilibrio  
Rn-222

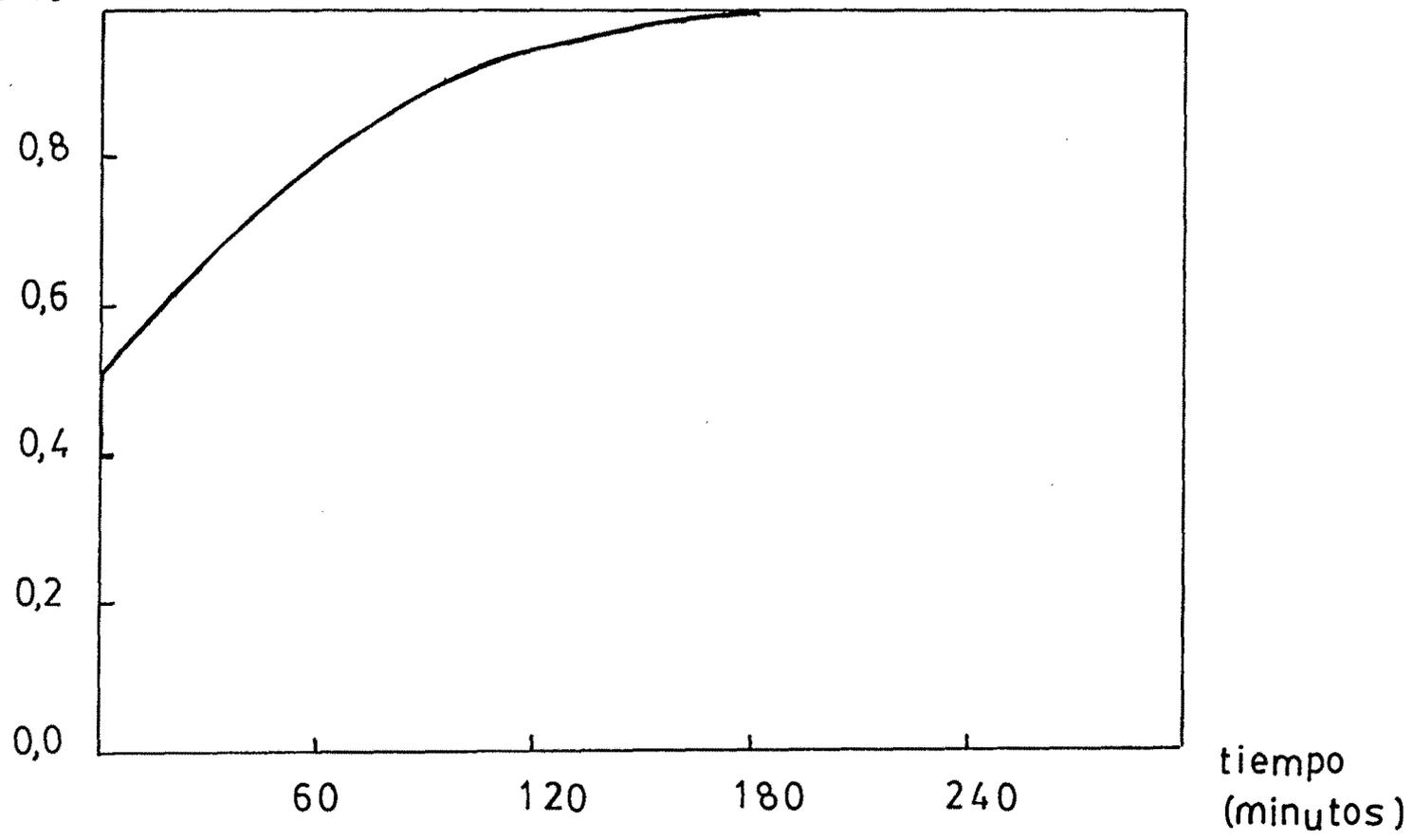


Figura 1.3  
Fracción de equilibrio del Rn-222 en función del tiempo (minutos),  
transcurrido después de tomada la muestra de aire.

cuento alfa en función del tiempo que transcurre después de la toma de la muestra.

Existen tres emisores alfa de la cadena radiactiva, y hasta alcanzar el equilibrio todos ellos contribuyen a la tasa de recuento  $\alpha$ . En la tabla 1.2, hemos representado la cadena de desintegración del radon (13).

Uno de estos emisores es el gas radon-222, y su contribución es inmediata y constante, razón por la cual la curva comienza en el 40% y no en cero. El primer descendiente del Rn-222, el Po-218, es un emisor  $\alpha$ , con un periodo de semidesintegración de tres minutos, que alcanza el equilibrio con el Radon, al cabo de veinte minutos. El tercer emisor  $\alpha$  es el Polonio-214, el cual alcanza el equilibrio con el radon al cabo de tres horas. Este hecho indica que la medida de la concentración del radionúclido Rn-222 en las muestras de aire tomadas en el interior de la Cueva, es conveniente llevarla a cabo después de tres horas de su recogida.

El calibrado de nuestro sistema de medida, ha sido realizado, utilizando una fuente de Plutonio-239, con una actividad de  $90400 \pm 1800$  cpm. El plutonio-239 es un emisor  $\alpha$ , y posee una vida media de 24'390 años (14).

De esta forma se obtiene, que para las células de centelleo, con un volumen de  $500 \text{ cm}^3$ , la tasa de recuento nominal en el equilibrio es de 4'6 cpm/pCi de Rn-222 en la célula, ó 2'3 cpm/pCi de Rn-222 por litro. Para las células de centelleo, de 1'4 lt. de volumen, se obtiene una tasa de recuento nominal en el equilibrio de 3'9 cpm/pCi de Rn-222 en la célula, ó 5'5 cpm/pCi de Rn-222 por litro.

Teniendo en cuenta, que para nuestras medidas, hemos utilizado, las células de centelleo de  $500 \text{ cm}^3$ , la expresión que nos ha permitido calcular la concentración de Rn-222, en las muestras de aire tomadas en el Hall y la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira, es:

TABLA 1.2

Cadena de desintegración de radionúclido Rn-222

Isótopo	Símbolo	Vida Media	Radiación
Radon-222	Rn <sup>222</sup>	3'82 días	$\alpha$
Polonio-218	Po <sup>218</sup>	3'05 min.	$\alpha$
Plomo-214	Pb <sup>214</sup>	26'8 min.	$\beta, \gamma$
Bismuto-214	Bi <sup>214</sup>	19'7 min.	$\beta, \gamma$
Polonio-214	Po <sup>214</sup>	160.10 <sup>-6</sup> seg.	$\alpha$
Plomo-210	Pb <sup>210</sup>	19'4 años	$\beta, \gamma$
Bismuto-210	Bi <sup>210</sup>	5'0 días	$\beta$
Polonio-210	Po <sup>210</sup>	138'4 días	$\alpha$
Plomo-206	Pb <sup>206</sup>	Estable	—

$$C \text{ (pCi/lit.)} = \frac{x}{t K}$$

donde:

X, es la diferencia entre la tasa de recuento de la muestra, y la tasa de recuento de fondo, en el equilibrio.

t, es el tiempo de recuento en minutos, que generalmente es de 5 minutos en nuestro caso.

K = 2'3, es el factor de calibrado obtenido y del que hemos hablado previamente.

Como veremos más adelante, hemos tomado las muestras de aire, para análisis de su contenido de Rn-222, en dos puntos de la Cueva, concretamente en el Hall y en la Sala de Polícromos. La periodicidad en la toma de muestras ha sido de tres veces a la semana, calculando, el error de la concentración, utilizando las reglas tradicionales del cálculo de errores.

En la tabla 1.3, aparecen las concentraciones de Rn-222, medidas en el Hall y en la Sala de Polícromos, durante todo el periodo de medidas que va desde Febrero de 1983, a Enero de 1984. Los errores de la concentración son inferiores al 10%, salvo en algunos casos de concentraciones bajas, en los que el error es algo mayor, pero en ningún caso supera al 15%.

### 1.3) - Método para la evaluación de la ventilación de la Sala de Pinturas. Análisis del intercambio de aire.

La concentración de Rn-222, que hemos medido en el interior de la Cueva de Altamira, depende de la exhalación neta de radon desde las superficies de la Cueva, del volumen de esta,

TABLA 1.3

Concentración del radionúclido Rn-222 en el aire del Hall  
y de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira.

Mes	Punto de medida	Concentración Rn-222 (pCi/lt)
Febrero-83	Hall	47 $\pm$ 3
	Sala de Polícromos	76 $\pm$ 4
Marzo-83	Hall	149 $\pm$ 8
	Sala de Polícromos	159 $\pm$ 8
Abril-83	Hall	162 $\pm$ 8
	Sala de Polícromos	171 $\pm$ 9
Mayo-83	Hall	159 $\pm$ 9
	Sala de Polícromos	185 $\pm$ 12
Junio-83	Hall	43 $\pm$ 4
	Sala de Polícromos	67 $\pm$ 5
Julio-83	Hall	6'3 $\pm$ 0'8
	Sala de Polícromos	27 $\pm$ 3
Agosto-83	Hall	13'5 $\pm$ 1'4
	Sala de Polícromos	37 $\pm$ 5
Septiembre-83	Hall	16'0 $\pm$ 1'7
	Sala de Polícromos	38 $\pm$ 5
Octubre-83	Hall	37 $\pm$ 5
	Sala de Polícromos	58 $\pm$ 4
Noviembre-83	Hall	117 $\pm$ 7
	Sala de Polícromos	143 $\pm$ 8
Diciembre-83	Hall	173 $\pm$ 9
	Sala de Polícromos	180 $\pm$ 11
Enero-84	Hall	177 $\pm$ 9
	Sala de Polícromos	181 $\pm$ 9

y del grado de mezcla del aire de la Cueva con el exterior. Basándonos en esto hemos aplicado un modelo matemático que nos permite calcular la ventilación de la Sala de Polícromos, en función de las concentraciones del radionúclido Rn-222 medidas (15) (16).

Supongamos una cavidad hipogea de volumen  $V$ , y área  $S$ ; en la cual se tiene un flujo neto  $E$ , de átomos de radionúclido Rn-222, desde el material que constituye las superficies que limitan la cavidad.

La variación con el tiempo de la concentración,  $C$ , de átomos de radon-222, por unidad de volumen puede expresarse de la forma siguiente:

$$\frac{dC}{dt} = E \frac{S}{V} - \lambda C - \frac{Q}{V} (C - C_{ext}) \quad (1.1)$$

Los términos que aparecen en esta ecuación, tienen el significado siguiente:

$E \frac{S}{V}$ , representa a la fuente de producción de gas radon

$\lambda C$ , representa la desintegración radiactiva del radon

$\frac{Q}{V} (C - C_{ext})$ , da cuenta del proceso de ventilación, ó sea, de evacuación del radón.

El término  $Q$ , no es otra cosa que la tasa de flujo natural, y representa el intercambio de aire entre el interior de la Cueva y el exterior.

$\lambda$ , es la constante de desintegración del isótopo radiactivo Rn-222.

$C - C_{ext}$ , es la diferencia en concentración del radionúclido Rn-222 entre el aire de la Cueva y el exterior.

Una vez conocidos los términos que aparecen en la ecuación (1.1), pasamos a resolverla.

Es evidente que en el momento en que se alcanza el equilibrio, se verificará que  $\frac{dC}{dt} = 0$ ; condición que introducida en la ecuación (1.1), nos lleva a la expresión siguiente:

$$E \frac{S}{V} - \lambda C - \frac{Q}{V} (C - C_{\text{ext}}) = 0 \quad (1.2)$$

Por otra parte, se tiene una segunda condición para nuestra ecuación diferencial que resulta de considerar que cuando la concentración de Rn-222 es máxima, el aire de la Sala está estanco, y por tanto la ventilación es nula, es decir  $Q = 0$ . De esta forma tenemos:

$$E \frac{S}{V} = \lambda C^{\text{máx}}$$

Sustituyendo esta última condición, en la ecuación (1.2), se obtiene:

$$\lambda (C^{\text{máx}} - C) = \frac{Q}{V} (C - C_{\text{ext}}) \quad (1.3)$$

En el caso particular de la Cueva de Altamira ocurre que existe un intercambio de aire entre el Hall y la Sala de Polícromos (3), que podemos calcular sin más que tener en cuenta los valores obtenidos para las concentraciones del isótopo radiactivo Rn-222 en estas dos Salas de la Cueva, por lo que la ecuación (1.3), la escribimos en la forma siguiente:

$$Q = \lambda V \frac{(C^{\text{máx}} - C^S)}{(C^S - C^H)} \quad (1.4)$$

en donde  $C^S$  y  $C^H$  son las concentraciones de Rn-222 en la Sala de Pinturas y en el Hall, respectivamente.

#### 1.4) - Resultados obtenidos

Como ya hemos indicado, cuando hemos expuesto el método utilizado para evaluar la ventilación, se ha supuesto que existe un intercambio de aire entre el Hall y la Sala de Polícromos, motivo por el cual hemos tomado muestras de aire en estos dos lugares, para de esta forma medir su contenido en Rn-222, y posteriormente analizar la ventilación entre ambas Salas.

En la figura 1.4, aparece un mapa de la Cueva de Altamira, en el cual hemos representado mediante los números 1 y 2, al Hall y la Sala de Pinturas respectivamente.

Como podemos observar, en los resultados obtenidos, la concentración del radionúclido Rn-222, no es constante a lo largo del año, tal como cabía esperar, observándose un valor medio mensual en la Sala de Polícromos, máximo, en el mes de Mayo.

Para evaluar la ventilación, mediante la expresión (1.4) obtenida en el párrafo anterior, hemos tomado como valor máximo de la concentración de Rn-222 el valor máximo individual encontrado a lo largo de nuestra campaña de medidas. Los valores máximos, de la concentración de Rn-222, han sido obtenidos durante el mes de Mayo, resultando ser entre ellos

$$C^{\max} = 196 \pm q \frac{\text{pCi}}{\text{lt}}$$

Teóricamente este valor máximo, suponiendo que no fuera superado, correspondería a una situación en la que el aire está estanco, y por lo tanto la ventilación es nula, ya que es en esa época cuando el aire caliente de la Cueva que se dirige hacia el Hall, invierte su sentido de circulación (17). Una vez conocido el dato de  $C^{\max}$ ; correspondiente como hemos dicho a la concentración máxima del isótopo radiactivo Rn-222 en el aire de la Sala de Polícromos de la Cueva; podemos cal

entrada →

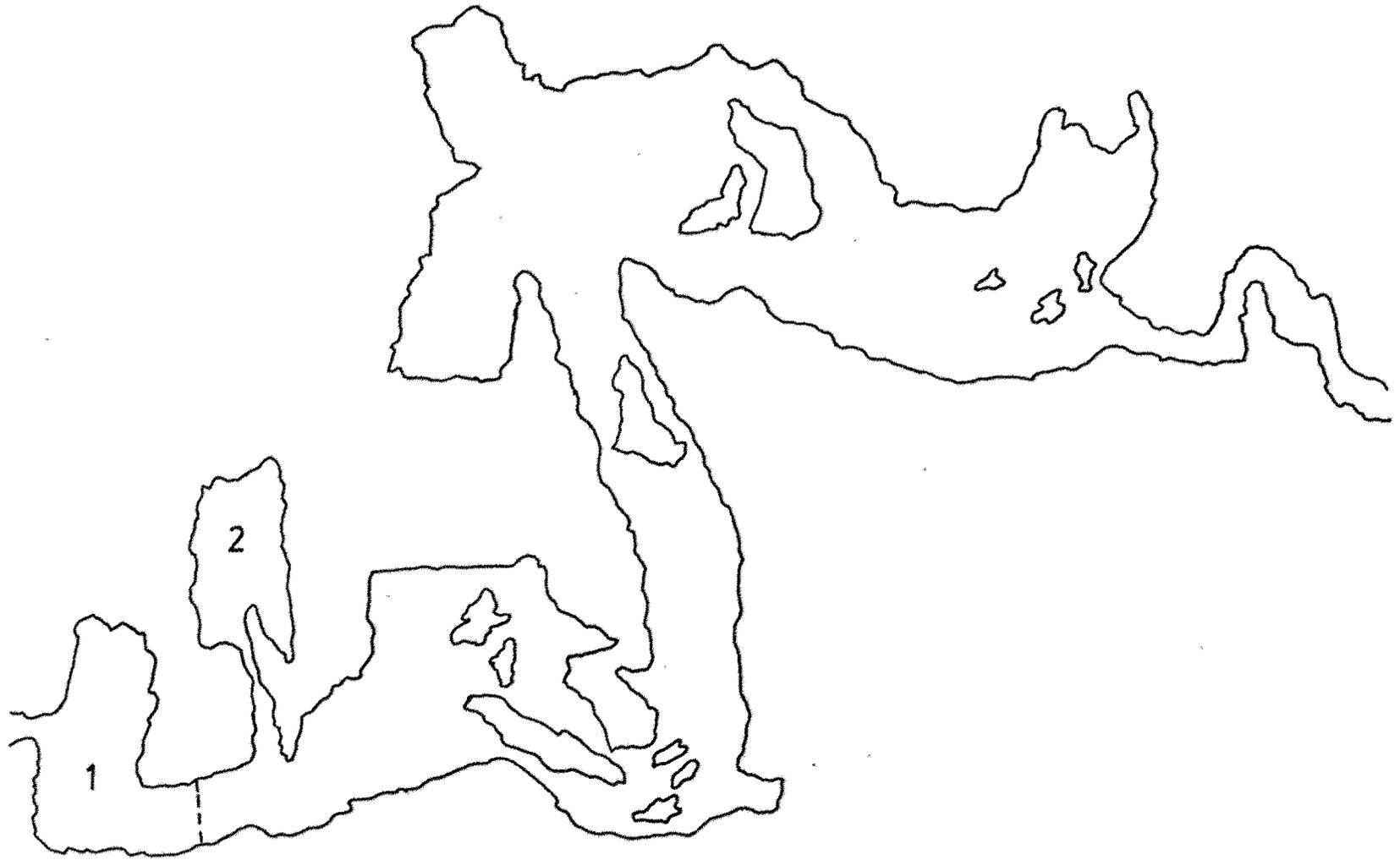


Figura 1.4

Puntos de la Cueva de Altamira donde se han recogido las muestras de aire para analizar la concentración del radionúclido Rn-222.

cular la ventilación  $Q$  de dicha Sala, en metros cúbicos de aire por hora, para todos los meses correspondientes al periodo de medidas, desde Febrero de 1983 hasta Enero de 1984 ambos inclusive, obteniendo así los resultados que aparecen en la Tabla 1.4.

En la figura 1.5, hemos representado la variación en el tiempo que experimentan, la ventilación natural y la concentración del radionúclido Rn-222 en la Sala de Polícromos a lo largo de nuestra campaña de un año de medidas. Si observamos la figura 1.5, encontramos un valor máximo de la actividad de Rn-222 en el mes de Mayo y un mínimo en Julio, lo cual corresponde a una ventilación mínima en el primer caso, y a una máxima en el segundo.

Como puede observarse en la tabla 1.4, la ventilación de la Sala de Polícromos puede considerarse pequeña; pues si tenemos en cuenta que el volumen de ésta es de  $330 \pm 30 \text{ m}^3$ , obtenemos que en el mes Mayo, al cual le corresponde una ventilación mínima, el aire en la Sala tardaría alrededor de 13 días en renovarse; y en Julio, que por el contrario corresponde una situación de máxima ventilación, el aire de la Sala se renovarían en unas 16 horas.

#### 1.5) - Confirmación experimental de la ventilación de la Sala de Polícromos mediante otros índices cualitativos.

Hemos visto que la evaluación cuantitativa de la ventilación de la Sala de Polícromos, es posible llevarla a cabo midiendo la evolución que experimenta la concentración del gas radon, con el tiempo, en una sala de volumen conocido. Sin embargo, también pueden dar cuenta de la ventilación de una Sala, si bien de una forma cualitativa, el campo de temperaturas que en ella existe, las variaciones que experimenta con el tiempo la concentración de anhídrido carbó-

TABLA 1.4

Ventilación natural de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira.

---

Mes	Ventilación de la Sala (m <sup>3</sup> /h)
Febrero - 83	10'3 ± 1'8
Marzo - 83	9 ± 3
Abril - 83	6'9 ± 2'4
Mayo - 83	1'1 ± 0'4
Junio - 83	13 ± 3
Julio - 83	20 ± 4
Agosto - 83	17 ± 4
Septiembre - 83	18 ± 4
Octubre - 83	16 ± 4
Noviembre - 83	5'1 ± 1'3
Diciembre - 83	5'7 ± 2'4
Enero - 84	9 ± 4

---

Ventilación  
(m<sup>3</sup>/h.)

(pCi./lt.)

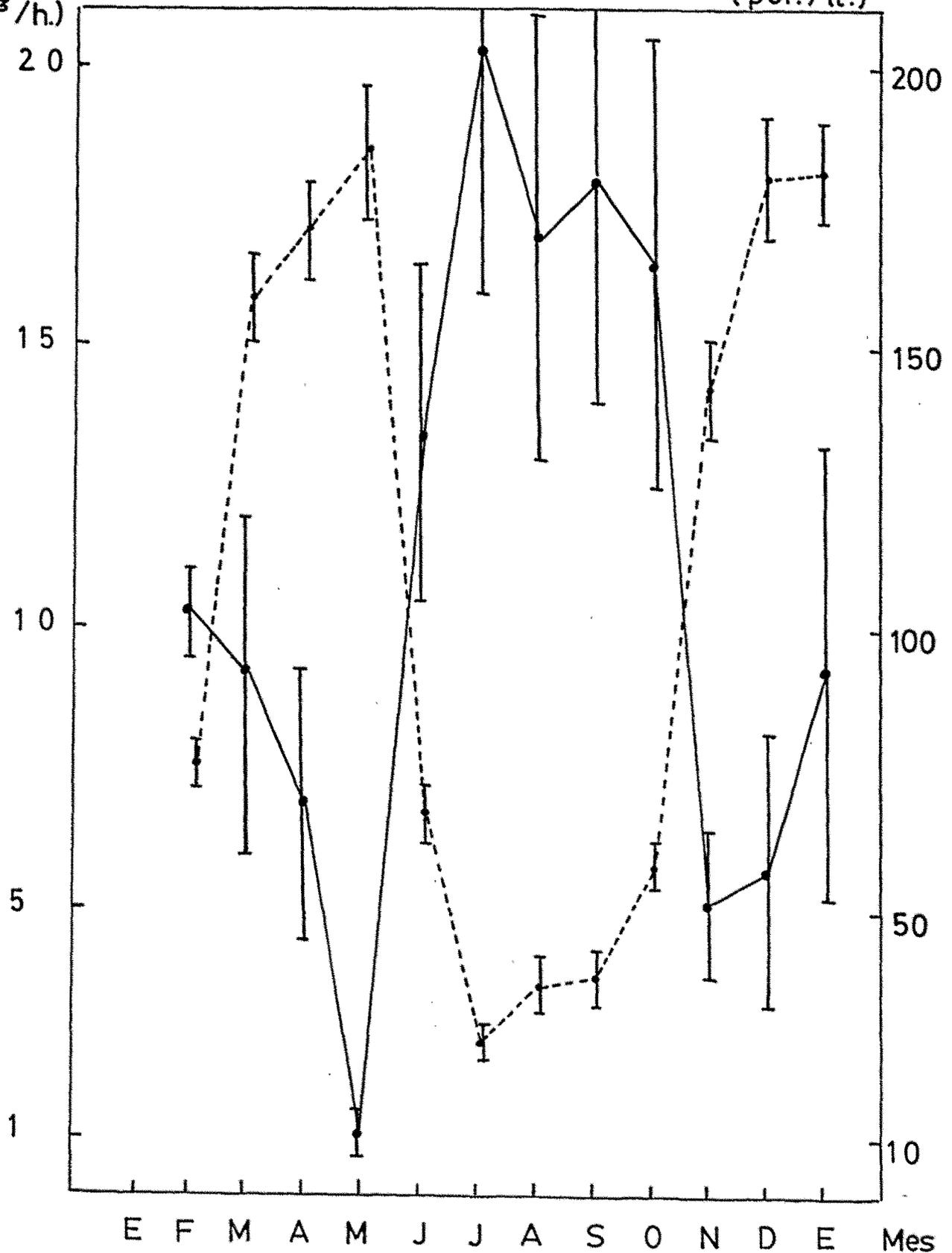


Figura 1.5

Variación de la ventilación natural (m<sup>3</sup>/h) de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira durante el periodo Febrero del 83 a Enero del 84. La línea de puntos re presenta la concentración media mensual de Rn-222.

nico en el aire que contiene, y las variaciones temporales que experimenta la humedad.

1.5.a) - La evolución del campo de temperaturas, como índice de la ventilación.

En principio, podemos dar una descripción cualitativa, de la ventilación de la Cueva, a partir del conocimiento del campo de temperaturas (18) en el aire y en las superficies rocosas. Evidentemente, si el aire estuviese estanco, se alcanzaría el equilibrio termodinámico y tanto las superficies rocosas, como él mismo, estarían siempre a la misma temperatura; cosa que como veremos más adelante no es así, lo cual nos indica la existencia de intercambios de aire.

Se han llevado a cabo, medidas de la temperatura de las superficies rocosas y del aire, en la Cueva de Altamira (5). La medida de la temperatura, de los techos y suelos de la Cueva, se ha hecho utilizando un termómetro de radiación Barnes, el cual posee un campo de visión de  $2^\circ$ , y está provisto de tres escalas analógicas de temperatura. Estas son de  $-2^\circ\text{C}$  a  $13^\circ\text{C}$ , de  $10^\circ\text{C}$  a  $25^\circ\text{C}$  y de  $22^\circ\text{C}$  a  $37^\circ\text{C}$ , cada una de las cuales posee una precisión de  $0'1^\circ\text{C}$ .

El calibrado de este termómetro de radiación, se ha realizado de forma periódica, cada 4 meses, empleando el sistema de calibración modelo 16-120 de la misma marca.

Las temperaturas del aire, han sido medidas por dos métodos: uno de ellos consiste en la utilización de 10 termómetros de varilla de mercurio, colocados en distintos puntos de la Cueva. La precisión de estos termómetros es de  $0'1^\circ\text{C}$ .

El segundo método consiste en la utilización de termopares. Las medidas en este caso se toman cada dos minutos mientras duran las visitas y de hora en hora durante el resto del día mediante un monitor de datos.

Las diferencias de temperatura entre techos y suelos son nulas ó muy pequeñas, lo cual nos permite pensar que el intercambio radiativo entre techo y suelo es el que iguala las temperaturas de ambos. Por otra parte, el hecho de que la diferencia de temperaturas sea casi nula, impide la existencia de un proceso de convección dentro de un recinto (ó sala). Lo que si puede asegurarse es que existen movimientos convectivos de las masas de aire, entre las distintas salas, y entre estas y el exterior, debido a la diferencia de temperaturas existente.

De forma particular cabe señalar, que la Sala de Polícromos y el Hall, poseen temperaturas diferentes a lo largo del año, por lo que en principio cabe esperar intercambios convectivos entre estos dos recintos. Estos intercambios de aire resultarán, máximos en los meses de invierno y de verano, pues la diferencia de temperaturas entre el Hall y la Sala de Pinturas es máxima en esta época. Por esta razón, hemos representado en la figura 1.6 la ventilación  $Q$  en  $m^3/h$ , de la Sala, así como el valor absoluto de la diferencia de temperaturas existente entre el aire del Hall y de la Sala, para todos los meses correspondientes al periodo de medidas realizado. En dicha, figura 1.6 podemos ver una correspondencia acorde con el proceso de convección que hemos hablado.

De manera similar, tenemos que en los meses de Agosto, Diciembre y Enero, ó dicho de otra forma, en verano e invierno, los intercambios de aire entre el Hall y la Boca de la Cueva son mayores, debido a que la diferencia de temperatura entre ambos resulta máxima, en esas épocas del año.

En la figura 1.7, hemos representado, la variación de la ventilación,  $Q$  ( $m^3/h$ ), de la Sala de Polícromos, así como la diferencia de temperaturas entre las superficies rocosas y el aire de la Sala. Se observa en esta figura, que durante la mayor parte del año, la temperatura de las superficies rocosas

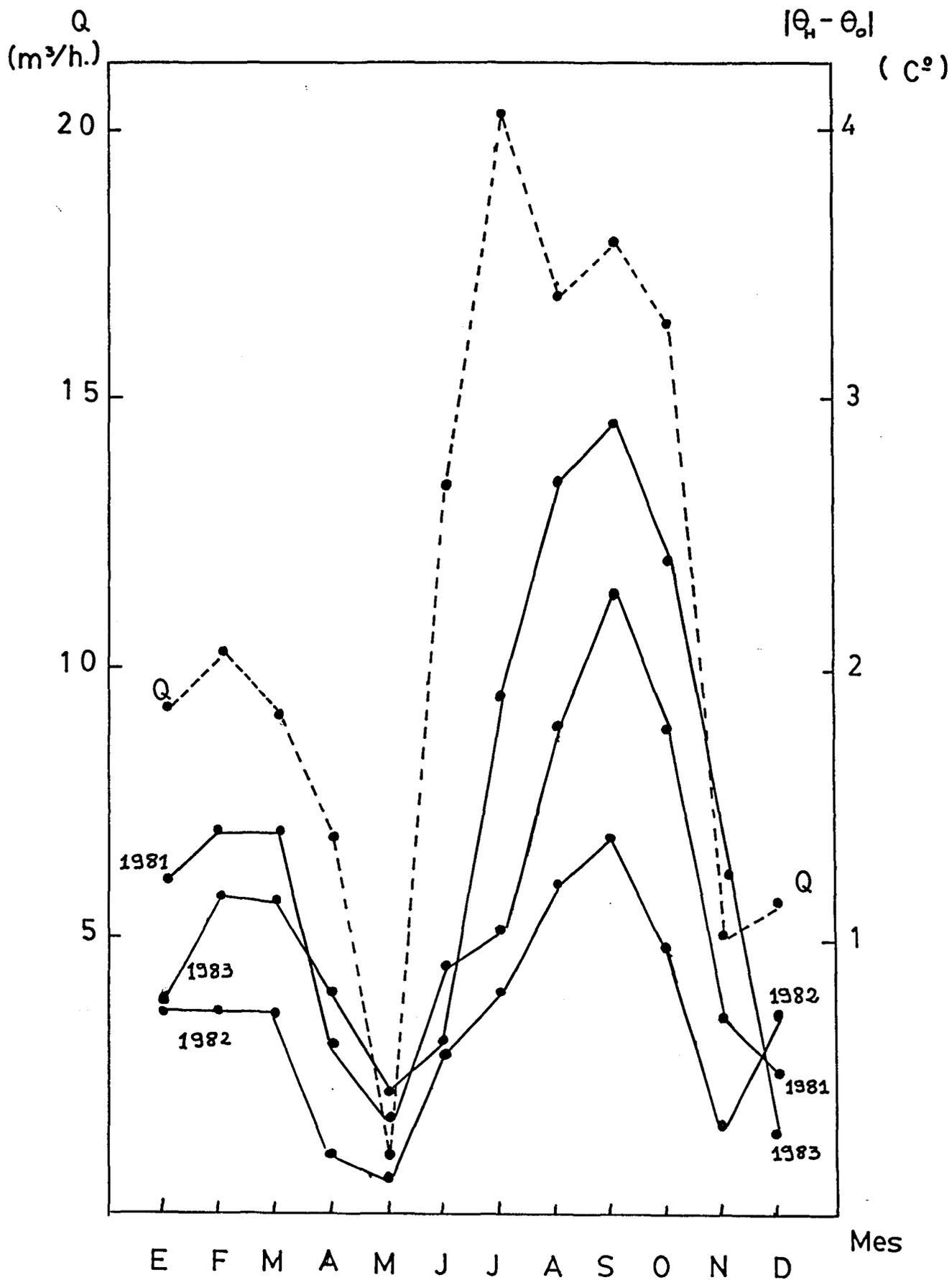


Figura 1.6

Variación de la ventilación  $Q$  (m<sup>3</sup>/h) de la Sala de Polí-cromos, y del valor absoluto  $|\theta_H - \theta_O|$  (°C) de la diferencia de temperaturas entre el Hall y la Sala, a lo largo de un año.

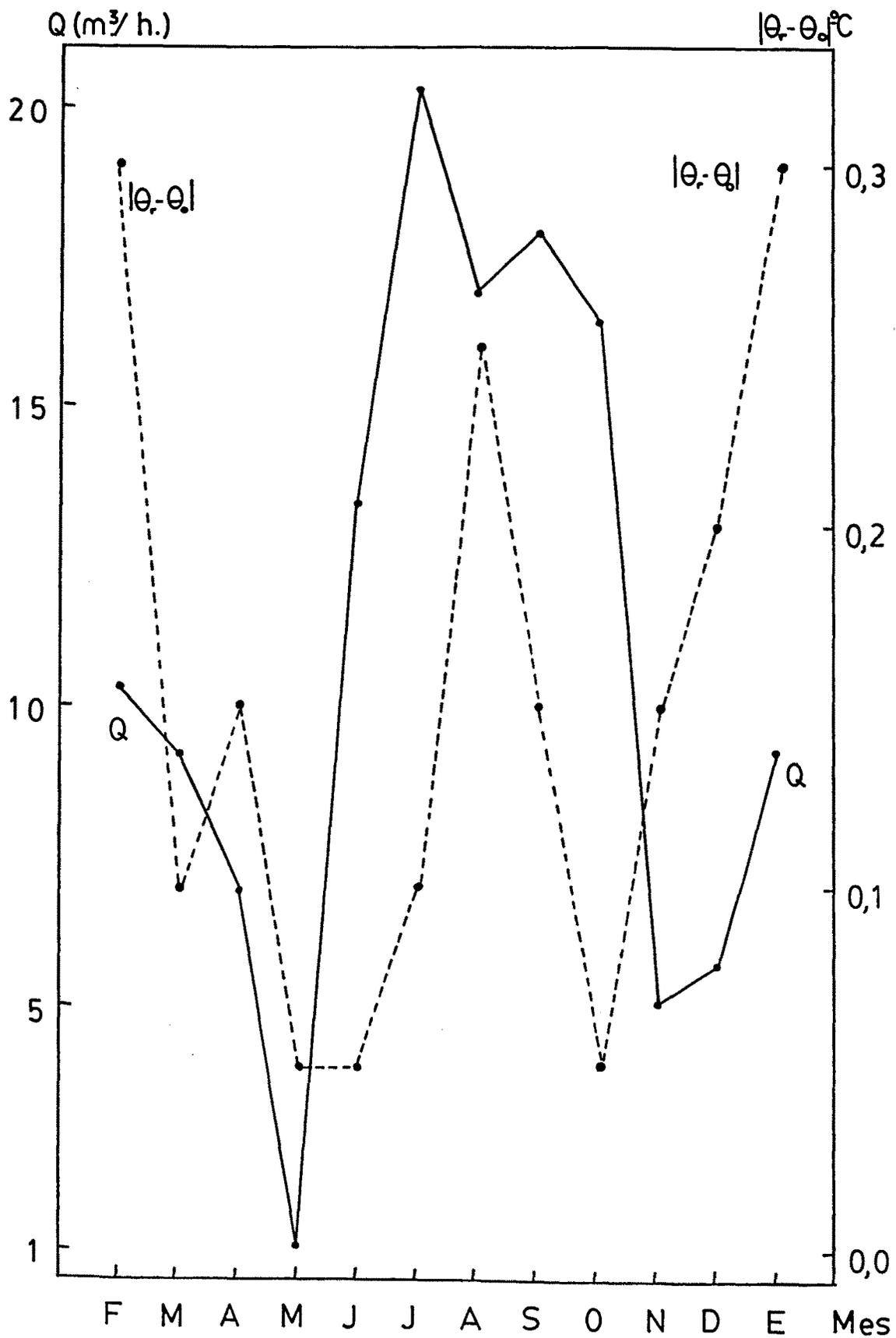


Figura 1.7

Variación de la ventilación  $Q$  ( $m^3/h$ ) de la Sala de Polícromos, y del valor absoluto de la diferencia de temperaturas  $|\theta_r - \theta_a|$  ( $^{\circ}C$ ), entre las superficies rocosas y el aire de la Sala, a lo largo de un año.

y la del aire de la Sala de Polícromos son diferentes (18). Por otra parte, como el aire caliente circula necesariamente al ras de los techos y el frío a ras del suelo, podemos asegurar, que cuando se igualan las temperaturas del aire y de las rocas, se invierte el sentido de la circulación del aire caliente en el interior de la Sala (18).

#### 1.5.b) - Variación de la concentración de anhídrido carbónico con la ventilación.

La determinación experimental de la concentración de anhídrido carbónico en el aire de la Sala de Polícromos, se ha hecho utilizando un analizador de gases Siemens acoplado a un registrador gráfico, de trazado continuo, con un error de medida del 0'03% en volumen.

El método de medida consiste en que, la sonda aspira aire de la Cueva lentamente, y lo somete a un proceso químico que permite comparar el contenido de CO<sub>2</sub> del aire de la Cueva, con el contenido de este gas en el exterior. Los resultados obtenidos, se basan en las diferencias de conductividad térmica, entre las dos muestras de aire comparadas.

La calibración de este analizador, ha sido realizada mensualmente, comprobando el "punto cero" del mismo. Por otra parte, se realiza periódicamente una limpieza de los tubos de conducción, a través de los que se aspira el aire, inyectando aire comprimido por los extremos conectados al analizador. Esta limpieza consiste en realidad en la expulsión del agua procedente de la condensación del vapor de agua contenido en el aire húmedo durante el proceso de aspiración a través de varios metros de tubo.

La concentración de CO<sub>2</sub> en el aire de la Sala de Polícromos de la Cueva, ha sido medida en trabajos anteriores (5), (17) utilizando el dispositivo descrito.

El contenido del gas carbónico en el aire atmosférico libre es de 0'03% (19), ó dicho de otra forma  $0'6 \text{ m}^3 \text{ CO}_2/\text{m}^3$  aire. Sin embargo en cuevas subterráneas de tipo calcáreo, como es el caso de la Cueva de Altamira, el contenido de anhídrido carbónico es mucho mayor, aún en condiciones naturales (20), (21).

Este exceso de gas en el interior de la Cueva es debido fundamentalmente a que es arrastrado por el agua que se filtra a través del terreno y fluye por las superficies rocosas de la Cueva (17),.

Como ya hemos indicado, se ha analizado la concentración de anhídrido carbónico en la Sala de Polícromos, durante el periodo que va de Mayo del 80 a Octubre del 81, ambos inclusive, épocas en las que la Cueva estaba cerrada al público. Los datos obtenidos, demuestran que no existen variaciones significativas de la concentración natural de  $\text{CO}_2$ , alrededor del valor medio mensual.

Ahora bien, estos fenómenos esporádicos no son significativos a la hora de hacer un estudio globalizado de la variación en el tiempo de la concentración de  $\text{CO}_2$  por lo que podemos suponer también estados estacionarios dadas las lentas variaciones de la concentración de dicho gas durante muchos días.

Las medias se realizaron cada tres horas, todos los días. En la Sala de Polícromos, se ha encontrado que el valor medio mensual máximo de la concentración de  $\text{CO}_2$  corresponde al mes de mayo y el mínimo a Septiembre (5).

Como el aire del Hall posee siempre una proporción menor de  $\text{CO}_2$  que el de la Sala, un aumento de la intensidad del proceso convectivo debido a una mayor diferencia de temperaturas entre ambos recintos dará lugar a una disminución de la concentración de gas carbónico en la Sala de Pinturas.

Aunque las épocas en que se realizaron las medidas de la ventilación,  $Q$ , y de la concentración de  $CO_2$  son diferentes, la periodicidad de los procesos que tienen lugar en la Sala de Polícromos, permite comparar los resultados, sobre todo desde un aspecto cualitativo.

En la figura 1.8, hemos representado la ventilación  $Q$  en  $m^3/h$ , y la concentración de anhídrido carbónico en función del tiempo. En esta figura, podemos comprobar que la concentración de  $CO_2$  es máxima cuando la ventilación es mínima y viceversa, resultado completamente acorde con el proceso convectivo indicado.

#### 1.5.c) - La humedad relativa como índice cualitativo de la ventilación.

Las medidas de humedad relativa, han sido hechas utilizando un psicrómetro de aspiración, durante un año, tres veces a la semana, en ausencia de visitantes. El error de medida es del 1%.

El techo de la Sala de Polícromos está constantemente bañado de agua tanto en verano, como en invierno. Este agua va deslizándose por el techo siguiendo sus desniveles, alcanzando así determinados puntos desde los que gotea hacia el suelo. Esta situación nos explica los niveles tan altos de humedad que existen en la Sala. Concretamente se han encontrado valores para la humedad relativa del aire que varían entre el 99'2% y el 96'9% (5).

La Sala de Polícromos posee una determinada humedad relativa  $h_0$ , que nunca llega a ser saturante a la temperatura de la roca, lo cual se debe a la ventilación natural que existe en la Sala.

Admitiendo corrientes convectivas que comunican las masas de aire del Hall con las de la Sala de pinturas, debe ocurrir

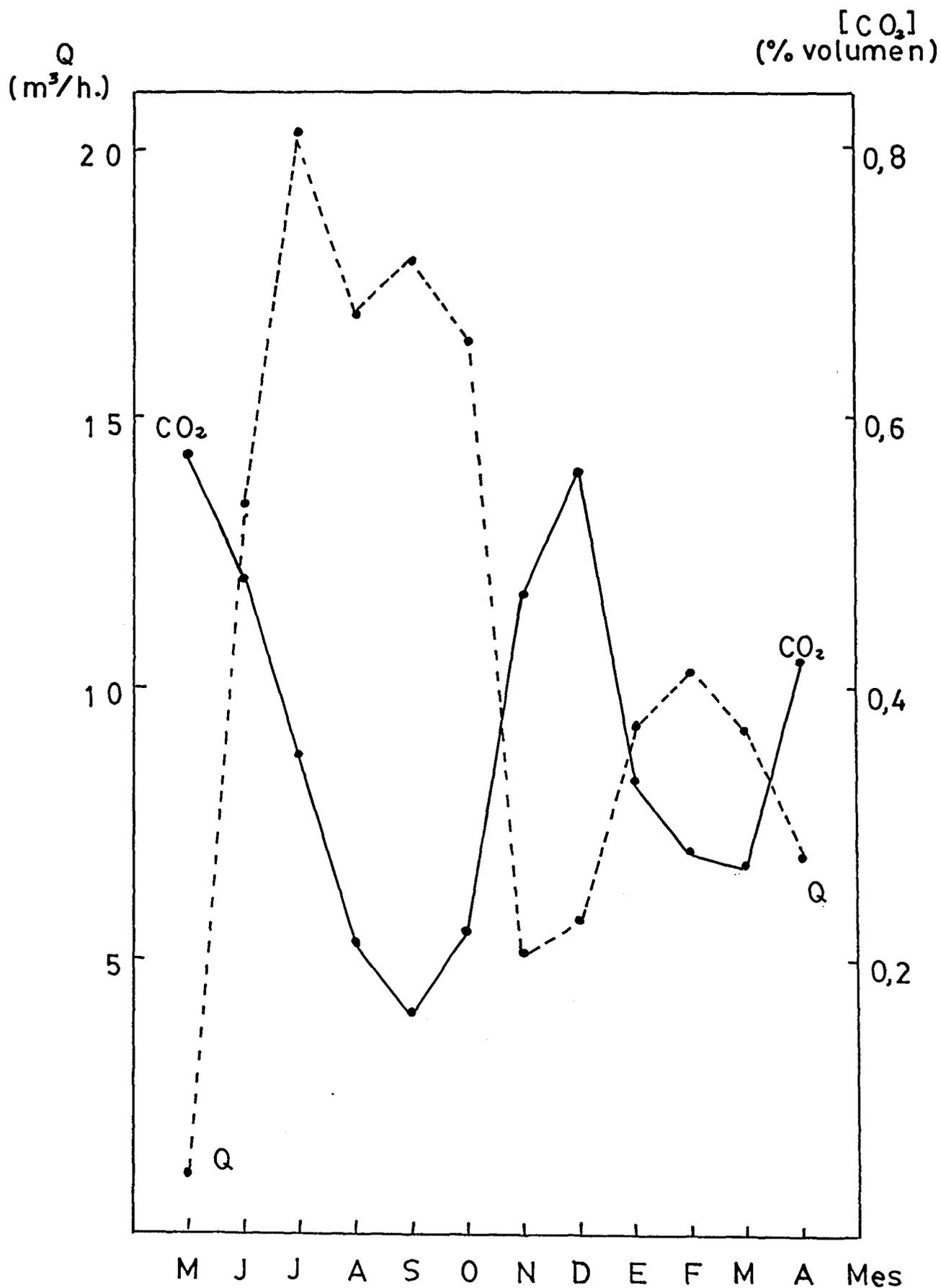


Figura 1.8

Variación de la ventilación  $Q$  ( $\text{m}^3/\text{h}$ ) de la Sala de Polí-cromos, y de la concentración del gas anhídrido carbóni-co (% volumen), a lo largo de un año.

que entre las humedades de ambos recintos, existan relaciones coherentes con los resultados cuantitativos encontrados en nuestro estudio de la ventilación.

Efectivamente puede observarse en los datos de humedad obtenidos durante 1980-1981, en ausencia de visitantes (22), que existe un leve descenso del grado de humedad relativa en los meses de invierno, y un ligero aumento durante el periodo del verano, hecho debido, sin duda alguna, a la ventilación natural de la Cueva. Por esta razón hemos representado en la figura 1.9, la ventilación y la humedad relativa del aire de la Sala de Polícromos, en función del tiempo.

#### 1.6) - Niveles de exposición radiactiva para visitantes y guías.

El isótopo radiactivo Rn-222 ha sido utilizado de forma importante como un trazador, en el estudio del origen y trayectoria de masas de aire (23), para determinar los coeficientes de difusión vertical de la materia (24), y como indicador de la estabilidad vertical en la baja atmósfera (25).

Actualmente se publican gran número de trabajos, con medidas de la concentración del isótopo radiactivo Rn-222, en minas de uranio, cuevas y casas, bien para determinar los niveles de exposición a que están sometidas las personas, ó bien para determinar las diferentes condiciones de ventilación (26).

La normativa que debe aplicarse con el fin de establecer los niveles de exposición permisibles para personas expuestas a las radiaciones ha sido motivo de estudio en muchos países. De esta forma se tiene que para exposición ocupacional, el máximo es generalmente tomado como 4 WLM (Working Level Months) al año; este valor equivale a 68.000 pCi-hr/lt. suponiendo que el radioisótopo Rn-222 y sus descendientes de vida corta están en equilibrio secular (27).

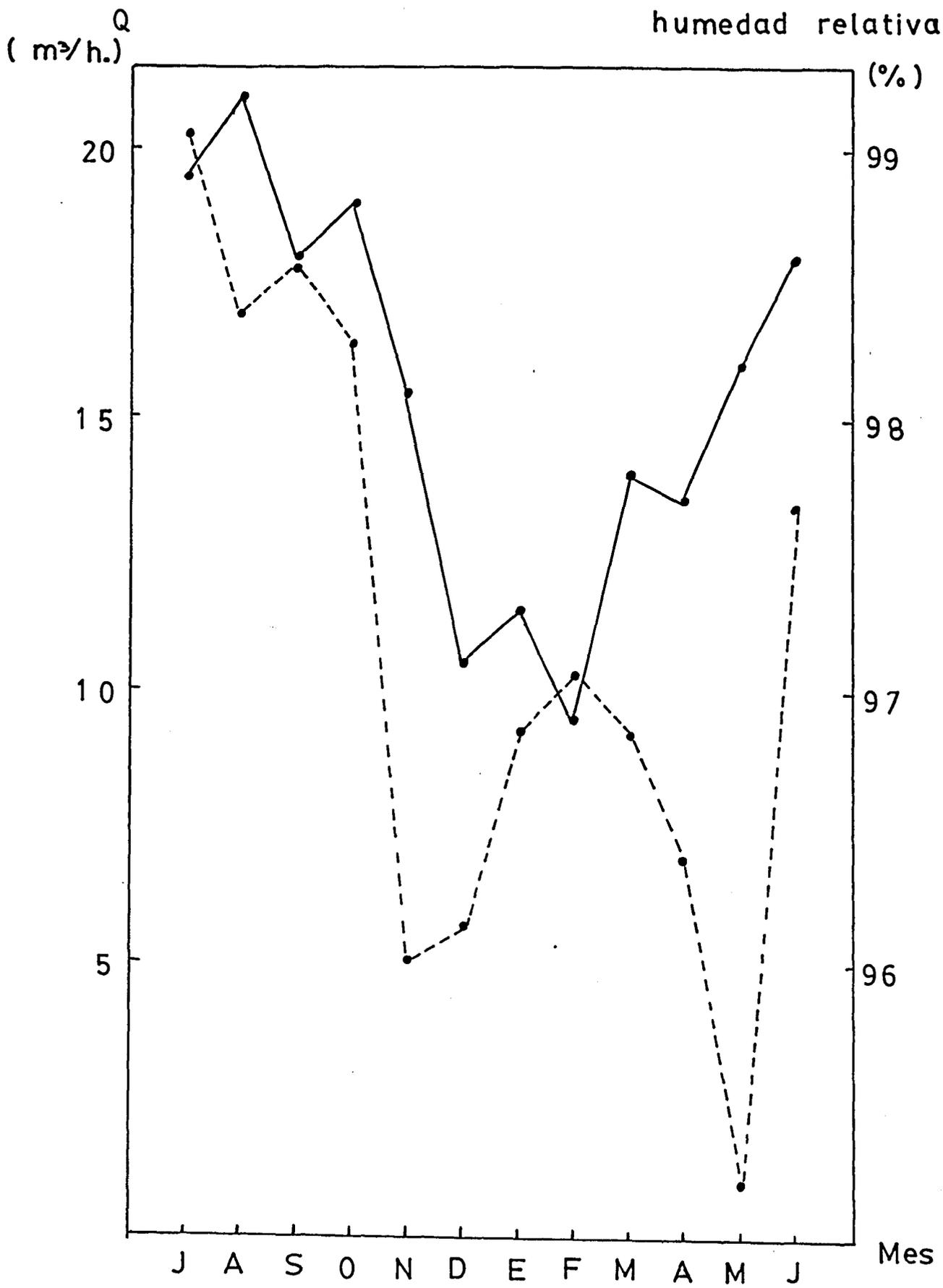


Figura 1.9

Variación de la ventilación  $Q(m^3/h)$  y de la humedad relativa (%) del aire de la Sala de Polícromos a lo largo de un año.

Es posible convertir la concentración de Rn-222, dada en pCi/lt., a "working levels", si se conoce el grado de equilibrio, entre este radionúclido y sus descendientes de vida corta. Este grado de equilibrio no ha sido específicamente medido en la Cueva de Altamira, sin embargo cabe señalar que los resultados obtenidos, en otras cuevas (28) con ventilación natural débil, como es nuestro caso, este grado de equilibrio varía entre un 30% y un 90%.

Ahora bien, no obstante podemos suponer la existencia de equilibrio para aquellos meses, en los cuales la concentración de Rn-222 en la Sala de Polícromos presente los máximos valores. Concretamente tenemos que en el mes de Mayo, la concentración de radon-222 en la Sala de Pinturas resulta ser máxima, razón por la que le asignaremos un grado de equilibrio de 100%, y así tomando los valores de la tabla 1.3, a modo de información, y poniéndonos en el caso más desfavorable que correspondería a un grado de equilibrio del 100%, podemos obtener los distintos niveles de exposición que aparecen en las tablas 1.5 y 1.6. En la tabla 1.5 hemos expresado los niveles de exposición a que están sometidos los guías, y en la tabla 1.6 para el caso de los visitantes teniendo en cuenta la permanencia de cada uno de ellos en la Sala, durante el régimen actual de visitas\* .

Hemos de destacar que para el caso de los visitantes por no tratarse de personal que cumple un horario diario de trabajo, la dosis máxima permisible es mucho más baja, concretamente 2.300 pCi-hr/l. (27)

Por otra parte, para realizar los cálculos correspondientes a las tablas 1.5 y 1.6 que presentamos hemos tenido en cuen

---

(\*) Los visitantes sólo están diez minutos en la Sala y los guías de 20 a 80 minutos.

TABLA 1.5

Niveles de exposición en pCi-hr para los guías de la Cueva de Altamira.

---

Mes	Concentración media en la Sala de Polí-cromos(pCi/l)	Tiempo de exposición de los guías al día(min.)	Niveles de exposición (pCi-hr/l)	% respecto al máximo permi-sible.
Febrero-83	76	50	20900	30'7
Marzo-83	159	50	43725	64'3
Abril-83	171	50	47025	69'2
Mayo-83	185	20	20350	29'9
Junio-83	67	80	29480	43'4
Julio-83	27	70	10395	15'3
Agosto-83	37	70	14245	20'9
Septiembre-83	38	70	14630	21'5
Octubre-83	58	80	25520	37'5
Noviembre-83	143	40	31460	46'3
Diciembre-83	180	60	59400	87'4
Enero-84	181	50	49775	73'2

---

TABLA 1.6

Niveles de exposición en pCi-hr/l para visitantes dentro del régimen de visitas propuesto.

Mes	Concentración media en la Sala de Polí-cromos(pCi/l)	Niveles de exposición (pCi-hr/l)	% respecto al máximo permi-sible.
Febrero-83	76	12'67	0'55
Marzo-83	159	26'5	1'15
Abril-83	171	28'5	1'23
Mayo-83	185	30'83	1'34
Junio-83	67	11'17	0'49
Julio-83	27	4'5	0'19
Agosto-83	37	6'17	0'27
Septiembre-83	38	6'33	0'28
Octubre-83	58	9'67	0'42
Noviembre-83	143	23'83	1'04
Diciembre-83	180	30	1'3
Enero-84	181	30'17	1'31

ta, en el caso de los guías, que dentro del régimen de visitas establecido en la Cueva de Altamira (29), ellos permanecen en el interior de la Sala distinto número de horas según el mes de que se trate.

Admitiendo que:

$$\text{dosis de exposición} = \text{grado equilibrio } (C^S \cdot X \frac{\text{hr}}{\text{mes}} \cdot 11 \text{ meses})$$

en donde:

$C^S$ , concentración de Rn-222 en pCi/lt; en la Sala. Hemos tomado 11 meses de trabajo para los guías, ya que hay que tener presente el mes de vacaciones. Para el caso de las visitas la situación es algo diferente, pues permanecen en la Sala de Polícromos, por espacio de diez minutos sólo, con lo cual:

$$\text{dosis de exposición} = \text{grado equilibrio } (C^S \cdot \frac{1}{6} \text{ hora})$$

Si analizamos los resultados obtenidos, encontramos que son similares a los dados por Ronaky en 1972 (30) en tres cuevas húngaras, y superiores a los encontrados por Wilkening en 1976 (16), en la cueva de Carlsbads en New México. En todo caso, los niveles de exposición, calculados por nosotros, tanto para el personal como para el público visitante, resultan inferiores, a los niveles máximos de exposición establecidos. Resulta interesante calcular las dosis de exposición, a que han estado sometidos los guías durante los años 1970-76, periodo que corresponde a un número de visitantes máximo. En estas condiciones, un guía permanecía entre 5 y 6 (28) horas aproximadamente, en el interior de la Cueva, lo que da lugar a 170 hr/mes aproximadamente, obteniéndose así para

el mes de Mayo (mes en el cual tiene lugar la máxima concentración del radioisótopo Rn-222), una dosis de exposición de 345.950 pCi-hr/lt. Este nivel de exposición es cinco veces superior, al permitido para los trabajadores de las minas de uranio.

En cambio para los visitantes, que permanecían, media hora aproximadamente en la Sala, la dosis de exposición a que estaban sometidos era de 92'5 pCi-hr/lt, para el mes de Mayo, valor que representa el 4% del máximo permisible, para el personal expuesto no siendo profesional.

Tales exposiciones no están, evidentemente, ocurriendo actualmente en la Cueva, pues como ya hemos explicado anteriormente, los tiempos de permanencia son muy inferiores.

En resumen los resultados cuantitativos obtenidos a partir de la medida de la concentración del isótopo radiactivo Rn-222, en el Hall y en la Sala de Polícromos, son coherentes con las estimaciones que nos permiten hacer las tres variables, temperatura, humedad y concentración de CO<sub>2</sub>, escogidas como índices cualitativos de la ventilación natural de la Sala de Pinturas. Las variaciones de estas tres magnitudes son también muy pequeñas, lo cual concuerda con el hecho de que la ventilación es débil.

Los resultados demuestran, en todos los casos, que a lo largo del año es en el mes de mayo cuando la ventilación es mínima, lo cual coincide con una concentración máxima de gas carbónico, la temperatura de la roca y del aire se igualan, y también se igualan las presiones parciales del vapor de agua en la Sala y en el Hall. Por el contrario en el Verano (Julio-Agosto), la ventilación obtenida a partir de la medida de Rn-222, alcanza unos valores máximos, y es precisamente en esta época del año cuando las diferencias de temperaturas entre la roca y el

aire son mayores, la concentración de carbónico es mínima, y en cambio la humedad absoluta aumenta considerablemente. Los resultados son por lo tanto coherentes.

CAPITULO 2.-

INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE VISITANTES SOBRE  
LAS TEMPERATURAS DE LA SALA DE POLICROMOS DE  
LA CUEVA DE ALTAMIRA.

- 2.1) - Introducción.
- 2.2) - Descripción fenomenológica de las alteraciones de temperatura de la Sala producidas por la presencia humana.
- 2.3) - Convección natural.
- 2.4) - Absorción y emisión por radiación.
- 2.5) - Variación máxima de la temperatura de la Sala de Pinturas durante el transcurso de una visita.
- 2.6) - Tiempos de recuperación de la temperatura de la Sala.
- 2.7) - Variación de la temperatura de la Sala de Pinturas con el tiempo, en el transcurso de la visita

## 2.1) - Introducción

Se han llevado a cabo estudios exhaustivos acerca de las características microclimáticas (3), (31), (18), (32), (22), e hidrológicas (33) de la Cueva de Altamira, con la Cueva exenta de visitantes, a fin de determinar, en primer lugar, el ambiente natural en el que se hallan las pinturas, para posteriormente llevar a cabo un estudio de las alteraciones producidas por la presencia de personas, que es precisamente el objetivo primordial de esta Memoria.

Es evidente que si las pinturas de la Cueva de Altamira, realizadas hace aproximadamente 16.000 años (2), han perdurado hasta nuestra época, ha sido porque dentro del recinto en el que están ubicadas, han existido climas adecuados, que han permitido la conservación de las mismas. Estos climas han estado determinados por unas condiciones dadas de los tres agentes físico-químicos que juegan un papel fundamental en sus características, y que son, la temperatura, la humedad, y la concentración de anhídrido carbónico en la atmósfera de la Sala.

Las condiciones naturales por las que ha pasado la Sala de Pinturas durante miles de años, se han visto profunda y brúscamente alteradas al someter a la Cueva a un sistema masivo de visitas: sistema que evidentemente habrá creado un régimen artificial y extraño a aquellos que rigieron tantos siglos en la misma, lo cual puede significar un peligro para la perdurabilidad de las pinturas.

El campo de temperaturas natural se modifica al introducir visitantes en la Sala de Polícromos; motivo por el cual hemos determinado experimentalmente la variación de temperaturas

en la Sala, introduciendo en la misma grupos de distinto número de personas con tiempos de permanencia diferentes; obteniendo así una serie de datos que posteriormente hemos interpretado haciendo uso de un sencillo modelo termodinámico que hemos elaborado para explicar el fenómeno, permitiendo además el cálculo del tiempo de recuperación del campo de temperaturas de la Sala.

## 2.2) - Descripción fenomenológica de las alteraciones de temperatura de la Sala producidas por la presencia humana.

Para llevar a cabo el estudio de la influencia que sobre el campo de temperaturas de la Sala de Polícromos ejerce la presencia de visitantes, se han realizado campañas sistemáticas de medida de la temperatura del aire y de las rocas durante todo el año 1982. En todos los casos estas medidas se han realizado en tres momentos bien definidos de la visita, que son: antes de entrar el grupo de personas que constituye la visita, durante la presencia del grupo en la Sala y después de haber salido el último visitante hasta la recuperación de las temperaturas iniciales.

Para determinar las temperaturas del aire hemos utilizado termo-pares conectados a un monitor "on line" con un micro

---

(\*)Para ello se solicitó del Ministerio de Cultura que se abriese la Cueva al público y fuese visitada según regimenes de visitas previamente establecidos por nosotros.

procesador. La temperatura de las rocas se ha determinado con un termómetro de radiación.

Concretamente se han tomado datos de temperatura para grupos con distintos números de personas y con diferentes secuencias temporales.

Las secuencias de visitas que se han utilizado, permaneciendo siempre cada grupo durante 10 minutos en el interior de la Sala, han sido:

- 1 grupo de 6 personas (5 visitantes y 1 guía).
- 2 grupos consecutivos de 6 personas.
- 3 grupos consecutivos de 6 personas.
- 4 grupos consecutivos de 6 personas.
- 1 grupo de 11 personas (10 visitantes y 1 guía).
- 2 grupos consecutivos de 11 personas.
- 1 grupo de 16 personas (15 visitantes y 1 guía).
- 1 grupo de 21 personas (20 visitantes y 1 guía).

El modelo teórico que hemos elaborado se basa en lo siguiente: una persona por su propio metabolismo produce una emisión de calor, entre 71 y 100 Kcal/h. (7), (34), (35), sin incluir las 17 Kcal/h aproximadamente, que se consumen en evaporar el agua de los pulmones y la piel, la cual contribuye a aumentar el contenido de vapor de agua del aire, pero no su temperatura. En las condiciones existentes en la Cueva de Altamira, con una temperatura del orden de los 14°C (18), una humedad relativa próxima a la saturación (22), y muy poca ventilación, podemos considerar que alrededor del 70% de la energía calorífica que desprende el cuerpo humano, es emitida por radiación, y un 30% por convección, incluyendo en este último término el calor

necesario para que los pulmones aumenten la temperatura del aire inhalado desde la ambiente hasta cerca de 37°C, aire que posteriormente es exhalado cediendo energía calorífica al aire de la Sala, que se irá distribuyendo de forma más ó menos uniforme.

Esta Sala posee un volumen aproximado de 330 m<sup>3</sup> y está limitada por una superficie de unos 450 m<sup>2</sup>. Por otra parte, podemos suponer que se comporta como un recinto cerrado, ya que no intercambia apenas materia y energía con el exterior en los intervalos de tiempo que se ponen en juego durante las visitas y además la superficie de la puerta de comunicación con el pasillo de acceso a la Sala es muy pequeña, del orden de los 3 m<sup>2</sup>, comparada con la superficie interior total del recinto.

En el intervalo de temperaturas de interés, el calor específico del aire húmedo a presión constante, que tiene un valor de  $\sim 0'41$  cal/gr.°C a 15°C, (36) permanece prácticamente constante; razón por la cual el calor transferido por convección por los visitantes, será empleado en elevar de forma apreciable la temperatura del aire de la Sala.

Ya hemos dicho que el ser humano, emite una cierta cantidad de calor por convección y otra por radiación.

De ellas se ha considerado que la cantidad emitida por radiación se emplea en parte en aumentar la temperatura del aire de la Sala debido a la absorción de las radiaciones infrarrojas por el vapor de agua y por el anhídrido carbónico, y el resto es absorbido por las rocas húmedas que constituyen las paredes y el techo, superficies que consideraremos se comportan como un cuerpo negro, aunque prácticamente no modifican su temperatura, debido a la alta capacidad calorífica de la roca.

Finalmente, cabe señalar que el incremento de entalpía del aire al aumentar su temperatura, se disipa en las superficies internas de la Sala, merced a los fenómenos de convección y radiación.

### 2.3) - Convección natural.

Con el nombre de convección natural, englobamos, evidentemente, a la convección propiamente dicha más la conducción. Los débiles gradientes de temperatura que entran en juego en nuestro caso, dan lugar a que la convección natural tenga efecto en régimen laminar (37).

El calor transferido por convección natural entre las paredes y el aire de la Sala de Polícromos, puede expresarse de la forma siguiente (37).

$$\dot{q} = h_c A (\theta_p - \theta_a) \quad (2.1)$$

donde los términos que en ella aparecen tienen el significado siguiente:

$\theta_p$  , la temperatura de la superficie de transmisión, que en nuestro caso son las paredes internas del recinto.

$\theta_a$  , la temperatura del aire en contacto con la superficie, que en nuestro caso es el aire encerrado en la Sala.

$h_c$  , el coeficiente de transferencia calorífica desde la superficie al fluido circundante.

$A$  , el área en  $m^2$ , de la superficie que interviene en la transmisión de calor.

En el caso concreto de tratarse de aire a la temperatura ordinaria, y a presión atmosférica, se tiene para el coeficiente de transferencia calorífica,  $h_c$ , la expresión siguiente (37):

$$h_c = \frac{c \Delta \theta^n}{L^{1-3n}} \quad (2.3)$$

siendo:

$L$ , el coeficiente geométrico, que en general representa una dimensión característica de la superficie de transferencia, la altura en el caso de superficies verticales y el lado en el caso de una superficie cuadrada horizontal.

En nuestro caso, igualando los exponentes, escribiremos:

$$h_c = k (\Delta \theta/L)^{0'25} \quad (2.3)$$

Ahora, teniendo en cuenta las ecuaciones (2.1) y (2.3) podemos obtener la cantidad de calor,  $\dot{q}$ , transferida mediante el proceso de convección natural, por unidad de tiempo, entre las paredes rocosas y el aire de la Sala de Polícromos, que vendrá dada por :

$$\dot{q} = k (\Delta \theta/L)^{0'25} \cdot A \cdot \Delta \theta \quad (2.4)$$

ó sea:

$$\frac{dq}{dt} = \frac{k \cdot A}{L^{0'25}} \cdot (\Delta \theta)^{1'25} \quad (2.5)$$

donde  $\Delta \theta$ , la expresaremos en grados centígrados, el área  $A$ , en metros cuadrados, y la cantidad de calor  $dq/dt$  en kilocalorías/hora. Tomando estas unidades el coeficiente  $k$ , tiene el valor de 1'27 para superficies verticales, de 1'18 para el techo y de 0'525 para el suelo (37).

Esta energía calorífica se empleará en elevar la temperatura del aire de la Sala, verificándose:

$$\frac{dq}{dt} = m C_p \frac{d\theta}{dt}$$

A efectos, de calcular los coeficientes de convección,  $h_c$  podemos considerar que la Sala de Polícromos es equivalente a un paralelepípedo, con una base de 16 m de longitud, 10 m de anchura y una altura media de 2 m, es decir, dos superficies horizontales de  $160 \text{ m}^2$ , dos superficies verticales de  $32 \text{ m}^2$  y dos superficies verticales de  $20 \text{ m}^2$ , teniendo en cuenta las irregularidades.

Como podemos observar los coeficientes de convección, no son muy sensibles a la forma geométrica, pues la dimensión característica,  $L$ , aparece elevada a la potencia 0'25.

Por otra parte, la densidad del aire saturado a una temperatura de  $15^\circ\text{C}$  es  $\rho_s = 1'205 \text{ Kg/m}^3$  (36), por lo cual la masa total de aire presente en la Sala de Polícromos puede estimarse que es aproximadamente  $m = 393 \text{ Kg}$ .

Pasamos ahora a estudiar los otros fenómenos que tienen lugar en nuestro recinto, es decir, los procesos de absorción y emisión de la energía de radiación.

#### 2.4) - Absorción y Emisión por radiación.

Debido a la presencia de vapor de agua y de gas anhídrido carbónico en el aire de la Sala de Polícromos, éste absorbe y emite en la zona de frecuencias del infrarrojo.

Podemos formular el intercambio neto de calor radiante entre un gas que contiene anhídrido carbónico y vapor de agua, y la superficie que lo limita, de la forma siguiente (37):

$$\frac{\dot{q}}{A} = \sigma (\epsilon_G T_G^4 - \alpha_{G_1} T_1^4) \quad (2.6)$$

siendo:

$\alpha_{G_1}$ , absorptividad media del gas.

$\epsilon_G$ , emisividad media del gas.

$\sigma$ , constante de Stefan-Boltzmann.

$T_1$ , temperatura absoluta de la superficie.

$T_G$ , temperatura absoluta del gas.

Esta ecuación puede escribirse también de la forma:

$$\frac{\dot{q}}{A} = [ (4 + a + b - c) \epsilon_G \sigma T_m^3 ] (T_G - T_1) \quad (2.7)$$

que es la que vamos a utilizar, siendo  $T_m$  la temperatura media entre  $T_1$  y  $T_G$ , y los coeficientes a, b y c:

$$a = \frac{\partial \ln \epsilon_G}{(\partial \ln P_G \cdot L)}$$

$$b = \frac{\partial \ln \epsilon_G}{\partial \ln T_G}$$

$$c = \frac{T_G}{T_1}$$

con:

$P_G$ , la presión parcial del gas emisor.

$L$ , la longitud característica del recinto.

Hemos utilizado la ecuación (2.7), porque proporciona resultados de precisión en el caso en que las temperaturas del gas,  $T_G$ , y de la superficie,  $T_1$ , no son muy diferentes, que es precisamente lo que ocurre en la Sala de Pinturas entre la temperatura del aire de la Sala y la de las superficies rocosas. Es más, aún cuando las temperaturas  $T_G$  y  $T_1$ , verifiquen que una sea el doble de la otra, el error que se comete debido a la utilización de la ecuación (2.7), rara vez excede al cinco por ciento.

En nuestro caso nos encontramos que las diferencias entre  $T_G$  y  $T_1$  son extraordinariamente pequeñas, razón por la cual podemos sustituir en la ecuación (2.7), el valor de  $T_m$  por el de  $T_1$ , a la hora de realizar los cálculos pertinentes. El siguiente paso, en nuestro modelo, va a ser el cálculo de los valores de  $a$ ,  $b$  y  $c$  por una parte, y de  $\xi_G$  por otra, teniendo en cuenta las concentraciones de vapor de agua y anhídrido carbónico, presentes en la Sala de Pinturas, a la hora de calcular una media ponderada.

Los valores de la emisividad del gas, los hemos obtenido por interpolación gráfica en función de la temperatura del aire,  $T_G$ , y del producto,  $P_G \cdot L$ , de la presión del gas por la longitud media de radiación, para un valor de  $P_G X = 0$ , donde  $L$  es función de la dimensión,  $X$ , característica del recinto, y de su forma.

Si tenemos en cuenta la simplificación geométrica que hemos hecho de la Sala de Polícromos, tenemos que sus dimensiones están aproximadamente en la relación 1:5:8, a la que le corresponde una dimensión característica  $X = 2m$ . (37).

Para conocer el valor de  $L$ , hemos de multiplicar  $X$ , por un factor correctivo, que se encuentra tabulado (37), y depende

de la forma geométrica. Extrapolando, tenemos que el valor de este factor correctivo es de 1'50.

Llamaremos  $L_0$ , a la longitud media del haz de radiación cuando el producto  $P_G X$  es nulo. Para obtener el valor de la emisividad de ambos gases, es necesario conocer además el cociente  $L/L_0$ , el cual varía muy poco, en el rango de concentraciones de anhídrido carbónico y vapor de agua, que encontramos en la Sala, concretamente tenemos que la concentración de  $CO_2$  varía entre el 0'65% y el 0'15%, y la concentración de vapor de agua entre 10'18 g/Kg y 9'27 g/Kg. (38).

De esta forma se tiene para el gas carbónico que  $L/L_0 = 0'86$  y para el vapor de agua,  $L/L_0 = 0'96$ . Así, resulta que el  $L$  corregido para la Sala, es 2'9 m, para el vapor de agua y 2'58 para el anhídrido carbónico.

Ya estamos, definitivamente en condiciones de conocer la emisividad de ambos gases. Para ello hacemos uso de los datos obtenidos, y de las presiones parciales del  $CO_2$  y el vapor de agua; obteniendo en la tabla correspondiente (37) los siguientes resultados:

$$\epsilon_{H_2O} = 0'16$$

$$\epsilon_{CO_2} = 0'06$$

Como ya conocemos, la emisividad de un gas depende de su presión parcial y de su temperatura. Ahora bien, dentro de los márgenes habituales de variación de estas variables en la Sala de Polícromos resulta que, las variaciones experimentadas por la emisividad del gas, son muy pequeñas: en concreto para el anhídrido carbónico varía entre 0'06 y 0'07, y para el vapor de agua entre 0'15 y 0'16.

Por tanto, podemos considerar que la emisividad total del aire de la Sala varía entre 0'21 y 0'23 con un valor medio de 0'22, que a efectos prácticos puede considerarse constante.

Realicemos ahora, el cálculo de  $(a + b - c)$ .

Como en el aire de la Sala existe una mezcla de dos gases calcularemos los parámetros  $a$ ,  $b$  y  $c$ , tomando la media pesada de los factores para los dos gases, en proporción a sus emisividades. Ahora bien, es suficiente, una sola aproximación para el valor total de  $a + b - c$ , ya que por ejemplo, un error de 0'1 en dicho valor da lugar tan sólo a un error del 2'5% en  $\dot{q}/A$ .

La concentración media anual de gas carbónico en la Sala de Polícromos, puede evaluarse en un 0'2% (3) es decir, que podemos tomar para su presión el valor de  $2 \cdot 10^{-3}$  atm. Resulta, entonces que para el anhídrido carbónico el factor  $c$  tiene un valor de 0'65.

Por otro lado, consideramos que el aire se encuentra prácticamente saturado de vapor de agua a la temperatura de 13'5 °C, con lo que tomaremos la presión de vapor de 11'61 mm. de Hg, ó sea de  $15'3 \cdot 10^{-3}$  atmósferas. De esta forma, resulta que para el vapor de agua  $c$  toma el valor de 0'45. Si tomamos ahora la media ponderada, tenemos finalmente que  $c$  vale 0'50.

Los valores de  $a$  y  $b$ , los hemos obtenido por interpolación gráfica (37), lo cual no es muy preciso, pero esto no tiene gran importancia como hemos indicado, pues la expresión (2.7) es muy poco sensible a las variaciones de término  $a + b - c$ . Tenemos así, en primer lugar, para el gas anhídrido carbónico que  $a = 0'37$  y  $b = - 0'50$  y para el vapor de agua  $a = 0'45$  y  $b = - 0'25$ .

Al igual que para c, calculamos a como media ponderada de los valores obtenidos para el vapor de agua y el CO<sub>2</sub>, resultando así para a el valor de 0'42. Para obtener b, llevamos a cabo el mismo porcedimiento, es decir, calculamos la media ponderada entre - 0'50 y - 0'25, obteniendo para b, - 0'31.

Tenemos así los datos siguientes:

$$\xi_G = 0'22$$

$$\sigma = 4'88 \cdot 10^{-8} \text{ Kc/m}^2 \cdot \text{h}^{\circ} \text{K}^4$$

$$a = 0'42$$

$$b = - 0'31$$

$$c = 0'50$$

$$A = 450 \text{ m}^2$$

que sustituidos en la ecuación (2.7), nos dá la expresión:

$$\frac{dq}{dt} = 1'64 \cdot 10^{-5} T_p^3 (T - T_p) \quad (2.8)$$

siendo:

$T_p$ , la temperatura media de las paredes de la Sala de Pinturas.

$T$ , la temperatura del aire de la Sala.

2.5) - Variación máxima de la temperatura de la Sala de Pinturas durante el transcurso de una visita.

Durante el transcurso de cada uno de los regímenes de visitas establecidos para realizar este estudio, hemos medido las variaciones de temperatura en el aire de la Sala de Polícromos, mediante tres termo-pares situados en las proximidades del bisonte, en las proximidades de la cierva y en las inmediaciones de una protuberancia rocosa central.

Las medidas se tomaron cada dos minutos, mediante el monitor de adquisición de datos durante todo el tiempo que dura la visita, y después de ésta hasta que las temperaturas vuelven a tener los valores iniciales, previos a la entrada de personas en la Sala.

A partir de estos datos, hemos calculado las temperaturas medias en función del tiempo y los tiempos medios de recuperación. Para calcular el tiempo de recuperación hemos adoptado el criterio de considerar que la Sala de Pinturas se ha recuperado cuando las tres sondas señalan la temperatura inicial.

Hemos llevado a cabo la medida de las temperaturas durante todo el año 1982, variando el número de visitantes según se ha indicado anteriormente.

Recordando lo que ya hemos dicho del calor emitido por radiación, por los visitantes, la parte que no es absorbida por el aire, llega directamente a las paredes del recinto, que lo absorben prácticamente todo, pues el coeficiente de absorción de las paredes es aproximadamente de 0'95, por lo que a efectos prácticos consideramos que se comportan como cuerpo negro, no modificándose prácticamente su temperatura, ya que las rocas poseen una alta capacidad calorífica. En consecuencia, la

energía calorífica que absorbe el aire por cada visitante, será:

$$\frac{dH}{dt} = \frac{30}{100} \cdot 71 + \frac{70}{100} \cdot 71 \cdot 0'22 = 33 \text{ Kcal/h.}$$

cuando se considera la emisividad del aire y la pérdida total del cuerpo humano es 71 Kcal/h. Ahora bien si suponemos que la pérdida total es de 100 Kcal/h, resulta  $\frac{dH}{dt} = 45'4 \text{ Kcal/h}$ . Por otro lado, esta energía se disipa en las paredes del recinto por medio de procesos de convección y radiación. El balance entre producción y pérdida de energía calorífica, es favorable a la producción, por lo que tiene lugar un incremento de la temperatura del aire de la Sala, aunque si la visita se prolongase suficientemente, al final se conseguiría un equilibrio entre producción y pérdida, adecuándose una temperatura media constante.

Con los cálculos realizados anteriormente estamos en condiciones de evaluar teóricamente estas variaciones de temperatura. Para conocer la máxima variación de temperatura, establecemos la igualdad entre el calor suministrado al aire por el cuerpo humano, y la pérdida hacia las paredes por convección y radiación, dadas por las ecuaciones (2.5) y (2.7)

$$n \frac{dH}{dt} = \frac{K.A}{L^{0'25}} (T_e - T_p)^{1'25} + A \cdot \sigma \cdot \sum_G \cdot (4 + a + b - c) T_p^3 (T_e - T_p) \quad (2.9)$$

siendo, los términos que en ella aparecen:

$T_p$  , temperatura absoluta media de las paredes.

$T_e$ , temperatura de equilibrio.

$n$ , número de personas del grupo.

$\frac{dH}{dt}$ , variación de entalpia del aire debido a lo que emite por convección y radiación una persona por unidad de tiempo.

Entonces, la energía calorífica absorbida por las paredes en la unidad de tiempo, y que no contribuye a elevar la temperatura del aire de la Sala de Polícromos vendrá dada por:

$$71 \text{ Kcal/h} - 32 \text{ Kcal/h} = 39 \text{ Kcal/h.}$$

en el caso de que la pérdida total del cuerpo humano sea de 71 Kcal/h; ó de 54'6 Kcal si admitimos que la pérdida total del cuerpo humano es de 100 Kcal/h.

Resolviendo la ecuación (2.9) se obtienen los valores que aparecen en la tabla 2.1, donde  $\Delta T_e$  representa la diferencia  $T_e - T_p$ , que hemos calculado con la ecuación (2.9) considerando que la cantidad total de calor emitida por una persona es de 71 Kcal/h;  $\Delta T'_e$  representa la misma diferencia, pero en este caso suponiendo que la cantidad de calor emitida por el cuerpo humano es de 100 Kcal/h., y  $\Delta T_e(\text{exp.})$  es la diferencia, observada experimentalmente.

En la tabla 2.1, observamos que cuando se trata de varios grupos consecutivos, los valores obtenidos experimentalmente son mayores que los calculados teóricamente, si se considera que la emisión total por persona es de 71 Kcal/h.; por el contrario si ésta se considera que es de 100 Kcal/h., se encuentra que los valores experimentales son algo inferiores a los teóricos. En el caso de grupo individuales, el valor observado está por debajo del calculado, lo cual es lógico, pues éste es un valor límite para un tiempo de permanencia

TABLA 2.1

Incremento máximo de la temperatura

Número de personas	$\Delta T_e$ (71 Kcal/h)	$\Delta T'_e$ (100 Kcal/h)	$\Delta T_e(\text{exp.})$
1 grupo de cinco	0'30	0'65	0'21
2 grupos de cinco	0'30	0'65	0'23
3 grupos de cinco	0'30	0'65	0'31
4 grupos de cinco	0'30	0'65	0'37
1 grupo de diez	0'52	1'20	0'36
2 grupos de diez	0'52	0'74	0'54
1 grupo de quince	0'73	1'74	0'51
1 grupo de veinte	0'94	2'29	0'72

infinito, mientras que la duración de la visita es limitada. Por otra parte resulta interesante comparar el incremento de temperatura máximo teórico, durante el tiempo que dura la visita, que en valor medio suele ser de unos diez minutos, con el incremento de temperatura máximo observado experimentalmente. Para obtener este incremento máximo establecemos la ecuación siguiente:

$$n t \frac{dH}{dt} - \left[ \frac{K A}{L^{0'25}} (T_v - T_p)^{1'25} \right. \quad (2.10)$$

$$\left. - A \cdot \nabla \cdot \xi_G^{(4+a+b-c)} \cdot T_p^3 (T_v - T_p) \right] t = m C_e (T_v - T_o)$$

en la cual hemos considerado que la energía calorífica cedida al aire por los visitantes durante el tiempo  $t$ , menos la energía calorífica cedida al aire por las paredes de la Sala de Polícromos, mediante los procesos de convección y radiación, es igual al incremento de entalpía del aire, que eleva su temperatura, siendo  $T_o$  la temperatura inicial del aire, el cual alcanza su máxima temperatura  $T_v$  al acabar la visita.

La ecuación (2.10) puede escribirse, también de la forma:

$$T = \frac{t}{m C_e} \left[ n \frac{dH}{dt} - \frac{K A}{m C_e L^{0'25}} (\Delta T_v)^{1'25} - \frac{A \cdot \nabla \cdot \xi_G}{m C_e} \cdot (4 + a + b - c) T_p^3 \cdot \Delta T_v \right] \quad (2.11)$$

que resolvemos numéricamente. Cuando  $\Delta T = \Delta T_v$ , es decir cuando la temperatura inicial del aire  $T_o$  coincide con la de las paredes  $T_p$ . Los resultados obtenidos aparecen en la tabla 2.2. En ella  $\Delta T_v$  es la diferencia  $T_v - T_p$  cuando se

TABLA 2.2

Variación máxima de la temperatura durante la visita

Número de personas	Tiempo de visita (minutos)	$\Delta T_v$	$\Delta T'_v$	$\Delta T_{v \text{ exp.}}$
1 grupo de cinco	9'5	0'16	0'26	0'21
2 grupos de cinco	21'0	0'21	0'38	0'23
3 grupos de cinco	27'7	0'23	0'42	0'31
4 grupos de cinco	35'0	0'24	0'45	0'37
1 grupo de diez	11'8	0'31	0'54	0'36
2 grupos de diez	19'8	0'37	0'69	0'54
1 grupo de quince	11'9	0'44	0'79	0'51
1 grupo de veinte	10'7	0'58	0'97	0'72

supone que el cuerpo humano emite una energía calorífica de 71 Kcal/h. y  $\Delta T_v'$  es la misma diferencia de temperaturas, pero esta vez suponiendo que la emisión total es de 100 Kcal/h.

Si observamos la tabla 2.2, vemos que  $\Delta T_v(\text{exp})$ , está comprendido en todos los casos, entre los dos valores teóricos extremos.

#### 2.6) - Tiempos de recuperación de la temperatura de la Sala.

Evidentemente una variable de gran importancia, en nuestro estudio acerca del comportamiento de la Sala de Polícromos, con visitantes, es el tiempo de recuperación.

El tiempo de recuperación, como ya digimos se define como el tiempo transcurrido desde que se desaloja la Sala, hasta que la temperatura vuelve a su valor inicial. Del valor que tenga dicho tiempo de recuperación, dependerá el intervalo de tiempo permisible entre la salida y la entrada de dos grupos consecutivos, a fin de evitar que se produzcan efectos acumulativos.

Una vez que los visitantes desocupan la Sala de Pinturas, la temperatura comienza a recuperarse, mediante la cesión del calor del aire a las paredes del recinto a través de los fenómenos de convección y radiación.

De esta forma, tenemos que la disminución de entalpía, debida a estos procesos de radiación y convección en la unidad de tiempo, vendrá dada por la expresión siguiente:

$$-\frac{dH}{dt} = A \cdot \sigma \cdot \epsilon_G (4 + a + b - c) T_p^3 (T - T_p) + \frac{K A}{L^{0.25}} (T - T_p)^{1.25}$$

siendo esta disminución de entalpía igual al calor cedido, en la unidad de tiempo, por el aire de la Sala de Pinturas, al enfriarse, que venderá dado por:

$$\frac{dq}{dt} = m C_e \frac{dT}{dt}$$

Así, igualando, se tiene:

$$m C_e \frac{dT}{dt} = - A \cdot \sigma \cdot \epsilon_G (4 + a + b - c) T_p^3 (T - T_p) - \frac{K A}{L^{0'25}} \cdot (T - T_p)^{1'25}$$

de la que despejando dt resulta:

$$dt = \frac{m C_e dT}{A \cdot \sigma \cdot \epsilon_G (4+a+b-c) T_p^3 (T - T_p) + \frac{K \cdot A}{L^{0'25}} (T - T_p)^{1'25}}$$

ecuación diferencial, que una vez integrada, nos dá la expresión que permite calcular el tiempo de recuperación  $\tau_T$  de la variable temperatura:

$$\tau_T = \left( \frac{4 m C_e}{C \cdot T_p^3} \right) \ln(\Delta T_f / \Delta T_v)^{0'25} - \ln \left( \frac{B(\Delta T_f)^{0'25} + C T_p^3}{B(\Delta T_v)^{0'25} + C T_p^3} \right)$$

Los términos que aparecen en esta expresión tienen el significado siguiente:

$$B = \frac{K A}{L^{0'25}}$$

$$C = A \cdot \sigma \cdot \epsilon_G (4 + a + b - c)$$

$\Delta T_v$ , incremento máximo de temperatura, es decir la diferencia entre la temperatura del aire al final de la visita y la temperatura inicial de las paredes, suponiendo que esta última permanece constante a lo largo de la visita, lo que efectivamente ocurre.

$\Delta T_f$ , diferencia entre la temperatura  $T_f$ , que alcanza finalmente el aire, que evidentemente es la inicial, y la de la pared, ahora bien como hemos considerado que la temperatura del aire de la Sala de Polícromos, era al iniciar la visita, igual a la de las paredes  $T_p$ , e imponemos la condición de que la Sala se ha recuperado cuando la temperatura final  $T_f$  sea igual a la inicial, ocurrirá que  $T_f$  será también igual a  $T_p$ , lo cual nos llevaría a un tiempo de recuperación infinito. Sin embargo, hemos tomado el criterio de admitir que teóricamente la temperatura se ha recuperado cuando  $T_f = T_p + 0'1$ , es decir  $\Delta T_f = 0'1^\circ\text{C}$ , pues los dispositivos termométricos que hemos utilizado para medir las temperaturas poseen un error de  $0'1^\circ\text{C}$ . Haciendo uso de la ecuación (2.11) hemos calculado los tiempos de recuperación de la temperatura de la Sala, para distintos índices de ocupación. Los resultados obtenidos son los que aparecen en la tabla 2.3 En dicha tabla, hemos expresado también los tiempos de recuperación obtenidos experimentalmente  $\zeta(\text{exp.})$ . En la Tabla 2.3 puede verse que las predicciones teóricas son satisfactorias, excepto cuando los grupos visitantes son pequeños, en los que el tiempo de recuperación es muy sensible a pequeñas diferencias  $\Delta T_v$ .

TABLA 2.3

Tiempo de recuperación de la temperatura

Número de personas	Tiempo de recuperación teórico $\zeta_T$ (min)	Tiempo de recuperación experimental $\zeta_T$ exp(min)
1 grupo de cinco	7'2	3'5
2 grupos de cinco	8'0	9'3
3 grupos de cinco	10'7	10'0
4 grupos de cinco	12'4	10'0
1 grupo de diez	12'1	9'3
2 grupos de diez	15'7	12'0
1 grupo de quince	15'2	12'6
1 grupo de veinte	18'1	18'0

2.7) - Variación de la temperatura de la Sala de Pinturas con el tiempo, en el transcurso de la visita.

Vamos ahora a reproducir teóricamente la curva total de temperatura, ó dicho de otra forma, la variación de la temperatura del aire de la Sala con el tiempo, en régimen de visitas, es decir, el ascenso de la temperatura durante el transcurso de la visita, y su descenso una vez desalojada la Sala, hasta que se recuperan finalmente los valores iniciales.

Para el cálculo del tramo ascendente utilizamos la ecuación (2.11), que una vez resuelta numéricamente nos da el incremento de temperatura en función del tiempo.

Para calcular el tramo correspondiente al descenso de la temperatura ambiente alcanzada durante la visita, hacemos uso de una ecuación análoga a la (2.12).

$$\zeta = \left( \frac{4 m C_e}{C \cdot T_p^3} \right) \ln \left( \Delta T / \Delta T_{\text{máx}} \right)^{0.25} - \ln \left( \frac{B(\Delta T)^{0.25} + C T_p}{B(\Delta T_{\text{máx}})^{0.25} + C T_p^3} \right)$$

siendo  $\Delta T$ , la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared de la Sala de Polícromos, en el instante t.

Los resultados obtenidos, utilizando la ecuación (2.13) aparecen representados en las gráficas 2.1 - 2.8, en las cuales puede verse que los datos experimentales quedan dentro de los límites de las dos curvas teóricas que hemos obtenido, una representado por trazo continuo que corresponde a la emisión total del cuerpo humano de 71 Kcal/h, y, otra por trazo discontinuo cuando suponemos que la emisión total es de 100 Kcal/h.

Tenemos, por tanto, que nuestro sencillo modelo reproduce, de forma razonable, las variaciones experimentales de temperatu-

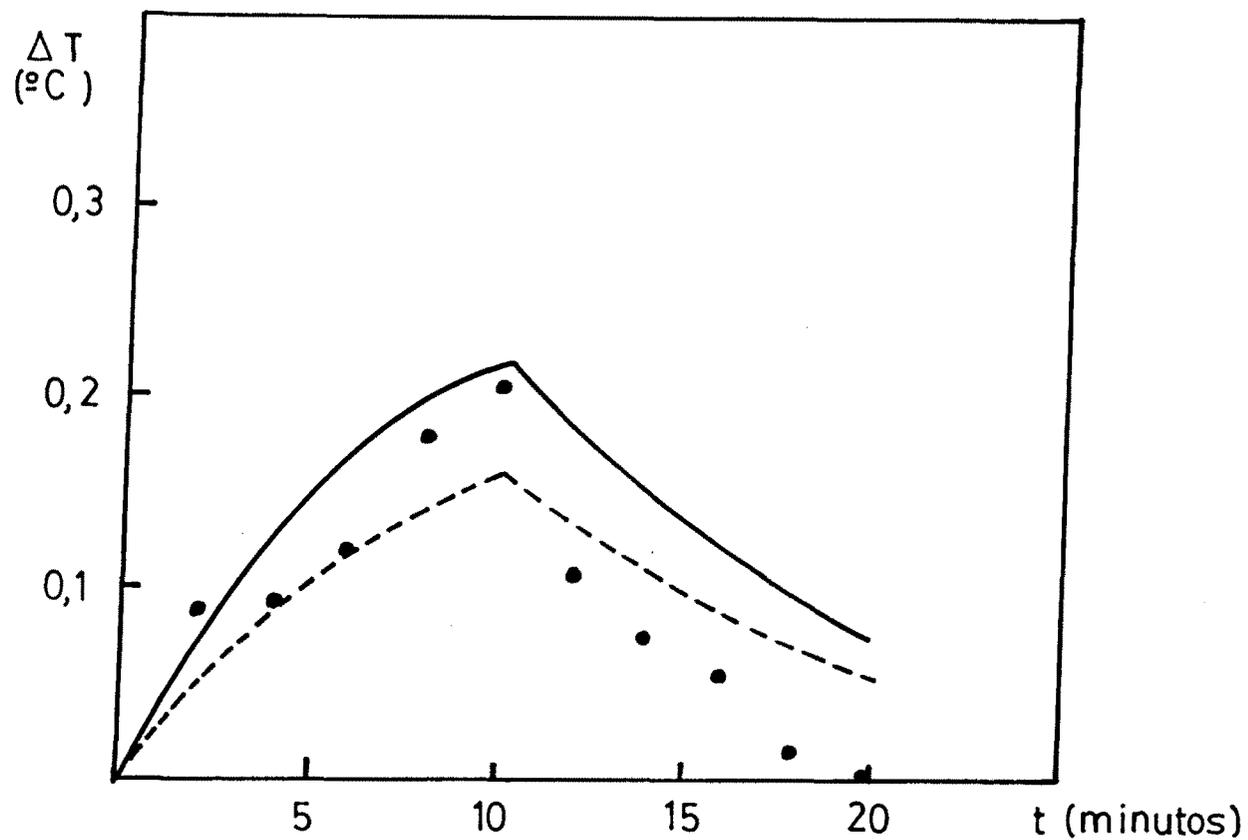


Figura 2.1

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ), en función del tiempo  $t$  (en min.), a lo largo de la visita, para un grupo de 5 visitantes con un guía .  
 Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.  
 Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.  
 Puntos: medidas experimentales.

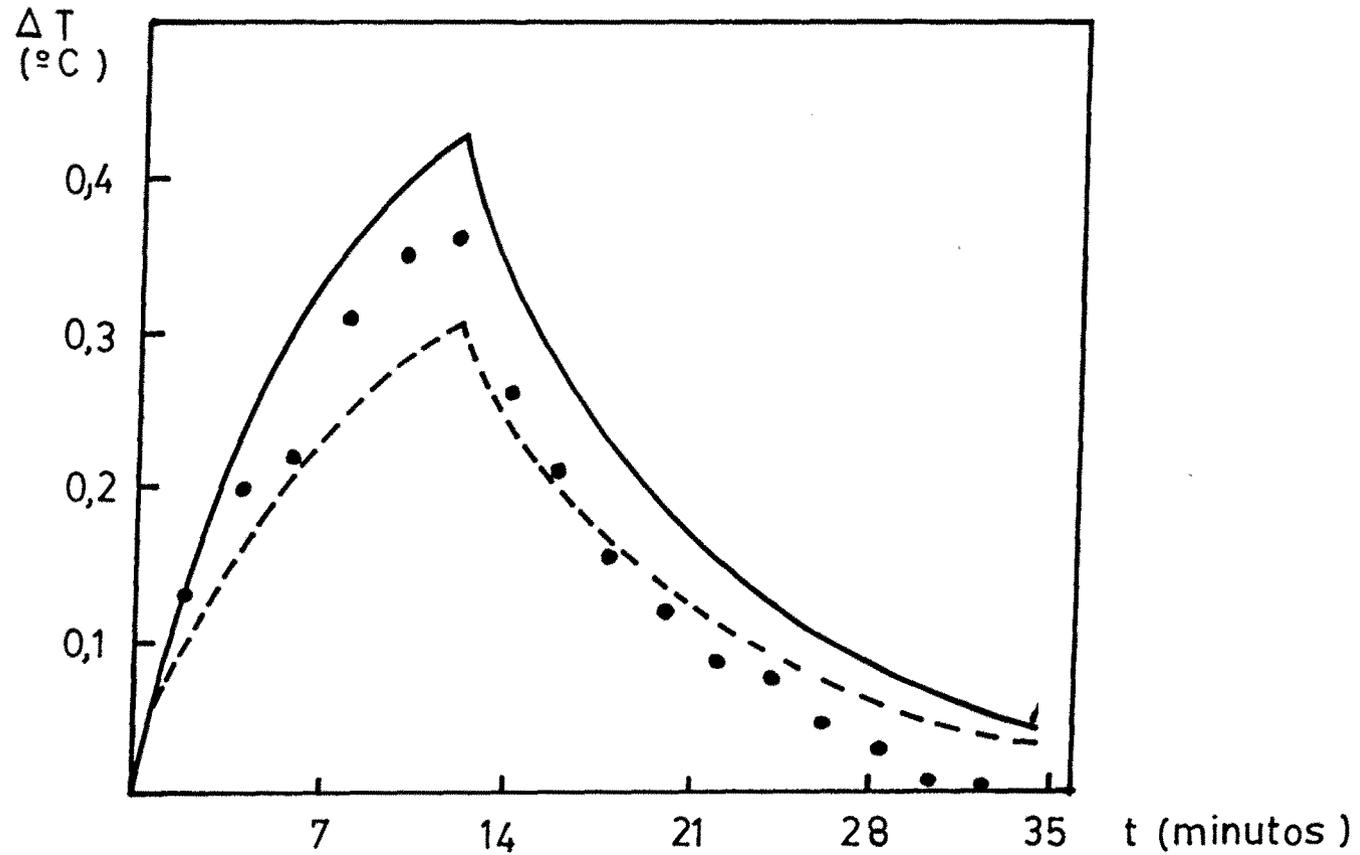


Figura 2.2

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$ (en °C), en función del tiempo  $t$ (en min.), a lo largo de la visita, para un grupo de 10 visitantes con un guía. Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h. Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h. Puntos: medidas experimentales.

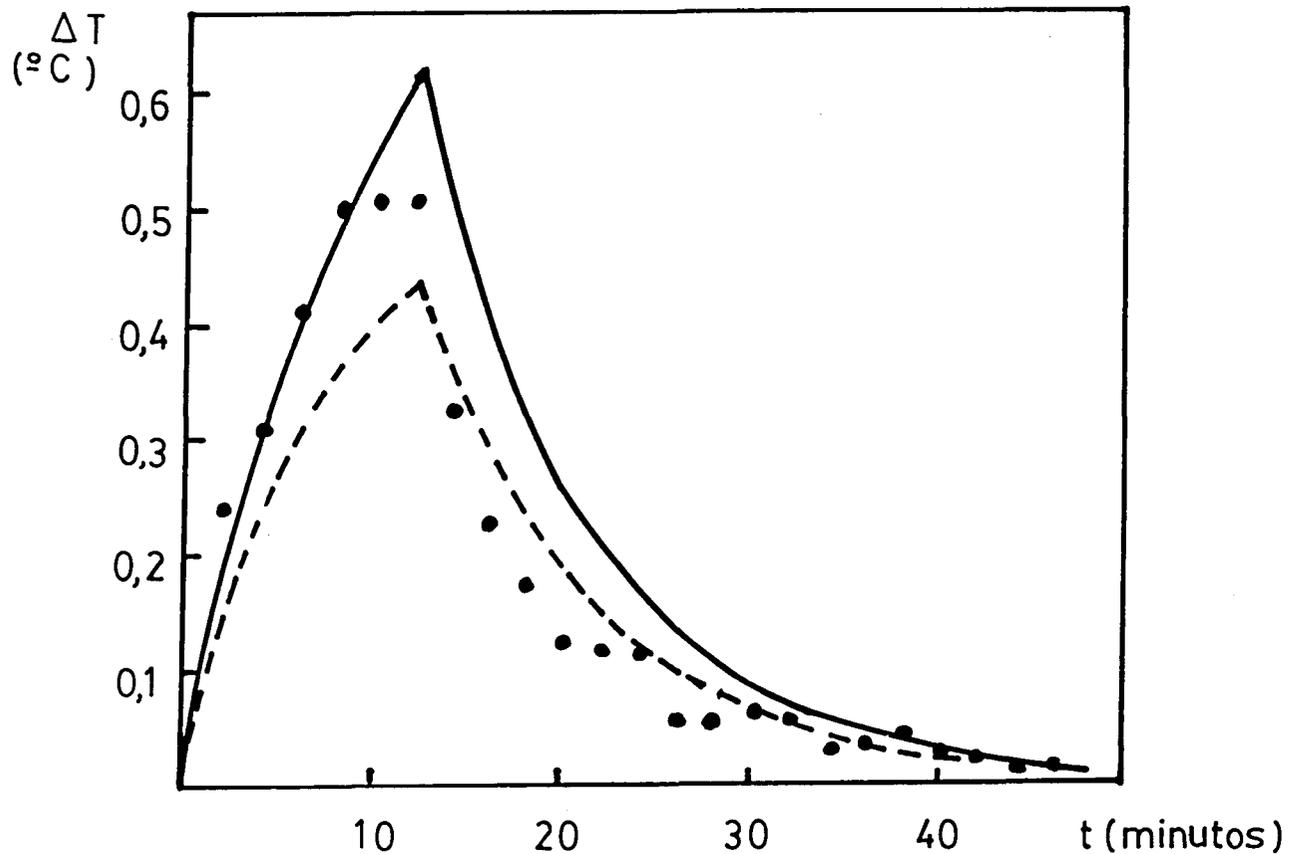


Figura 2.3

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ), en función del tiempo  $t$  (en min.), a lo largo de la visita, para un grupo de 15 visitantes con un guía.  
 Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.  
 Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.  
 Puntos: medidas experimentales.

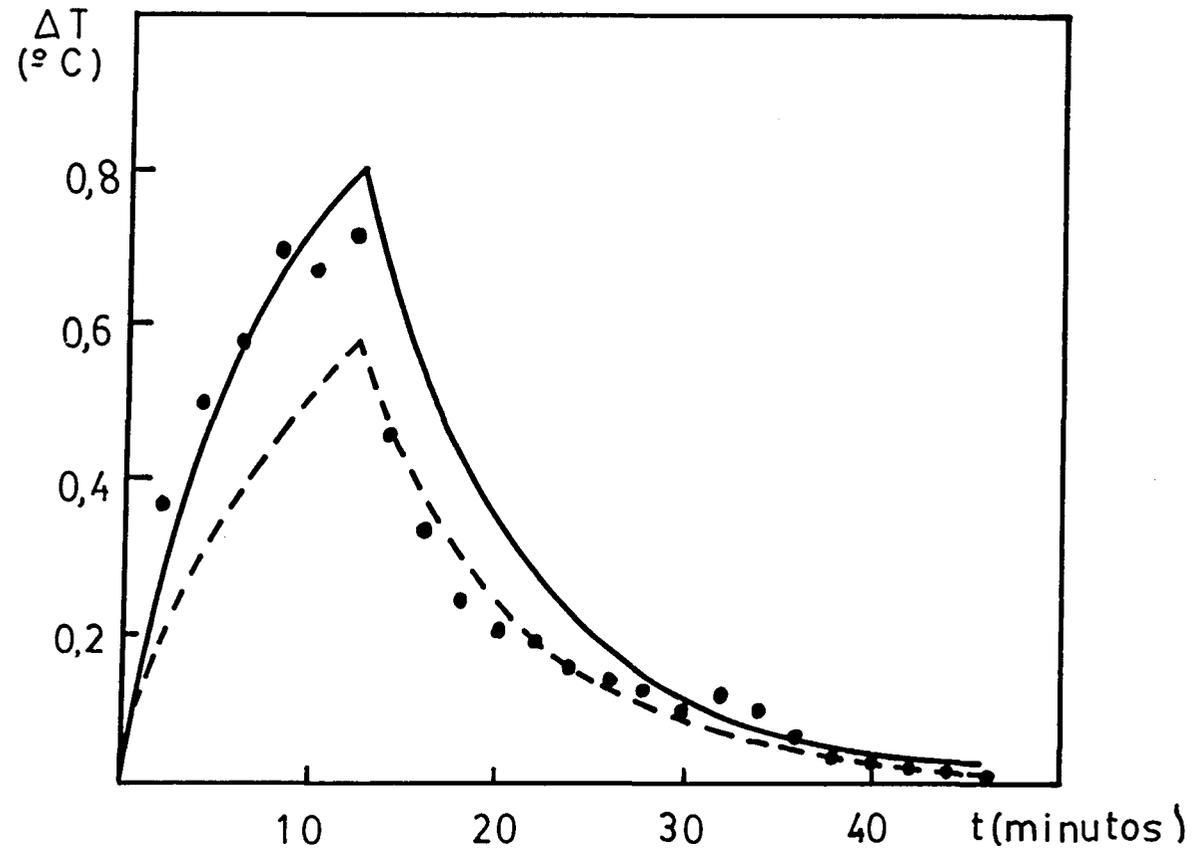


Figura 2.4

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$ (en °C), en función del tiempo  $t$ (en min.), a lo largo de la visita, para un grupo de 20 visitantes con un guía.

Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.

Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.

Puntos: medidas experimentales.

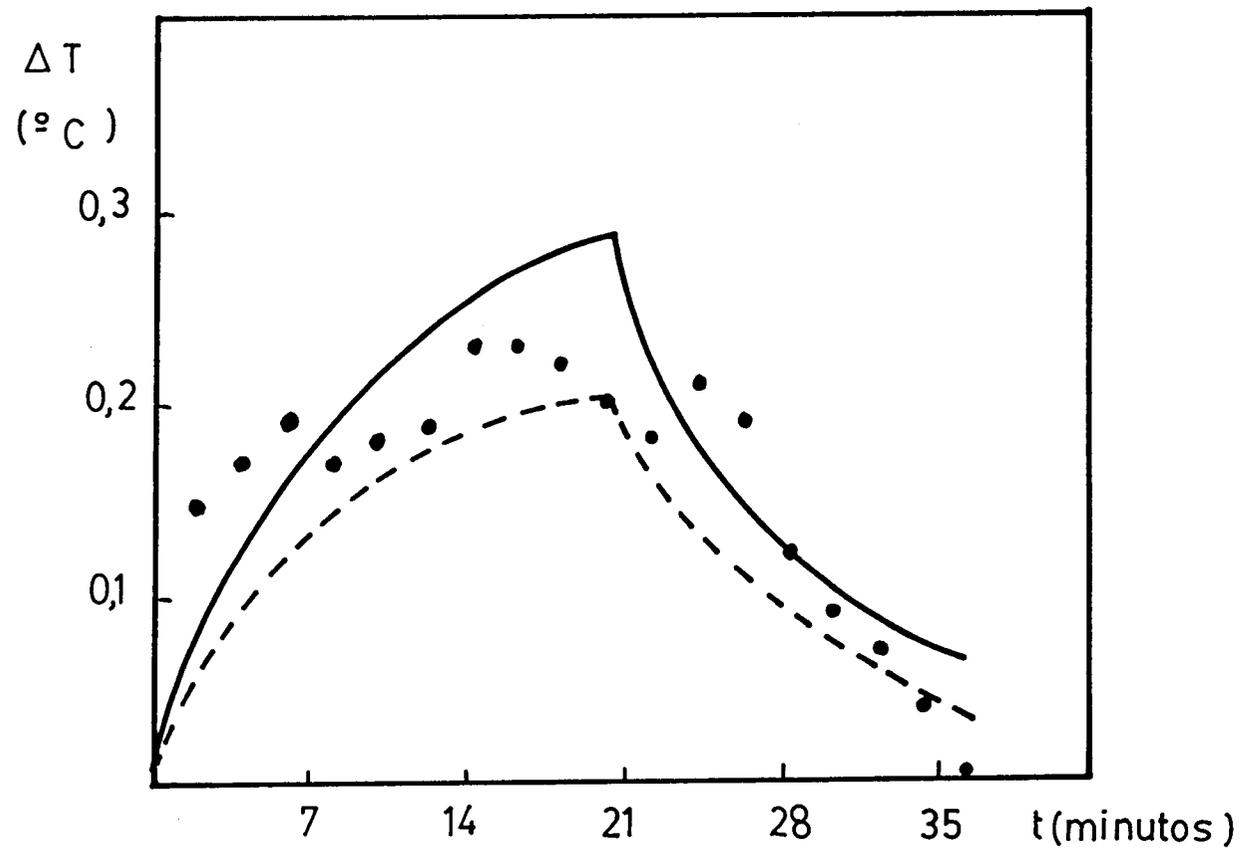


Figura 2.5

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$ (en °C), en función del tiempo  $t$ (en min.), a lo largo de la visita, para dos grupos consecutivos de 5 visitantes con un guía.

Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.

Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.

Puntos: medidas experimentales.

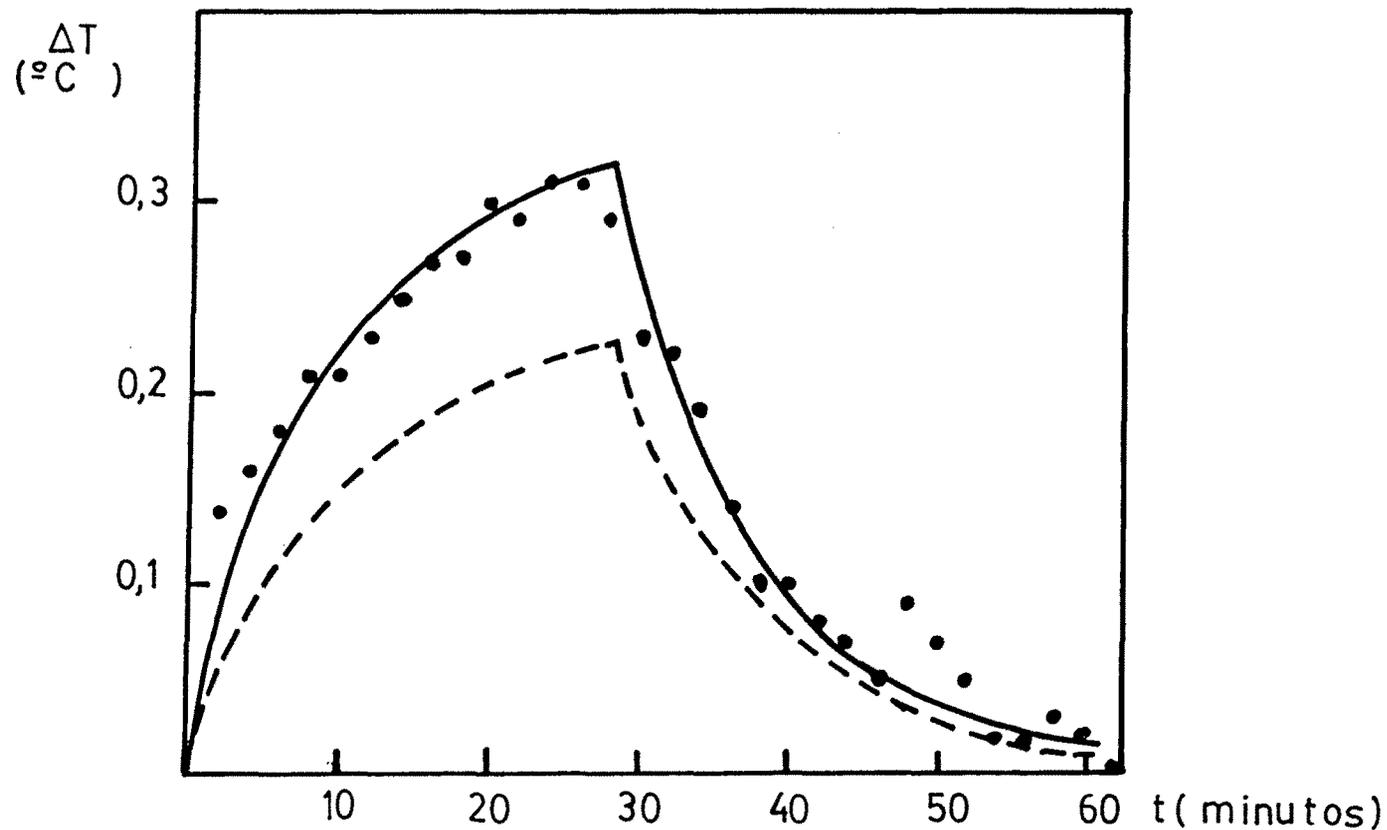


Figura 2.6

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$ (en °C), en función del tiempo  $t$ (en min.), a lo largo de la visita, para tres grupos consecutivos de 5 visitantes con un guía.

Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.

Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.

Puntos: medidas experimentales.

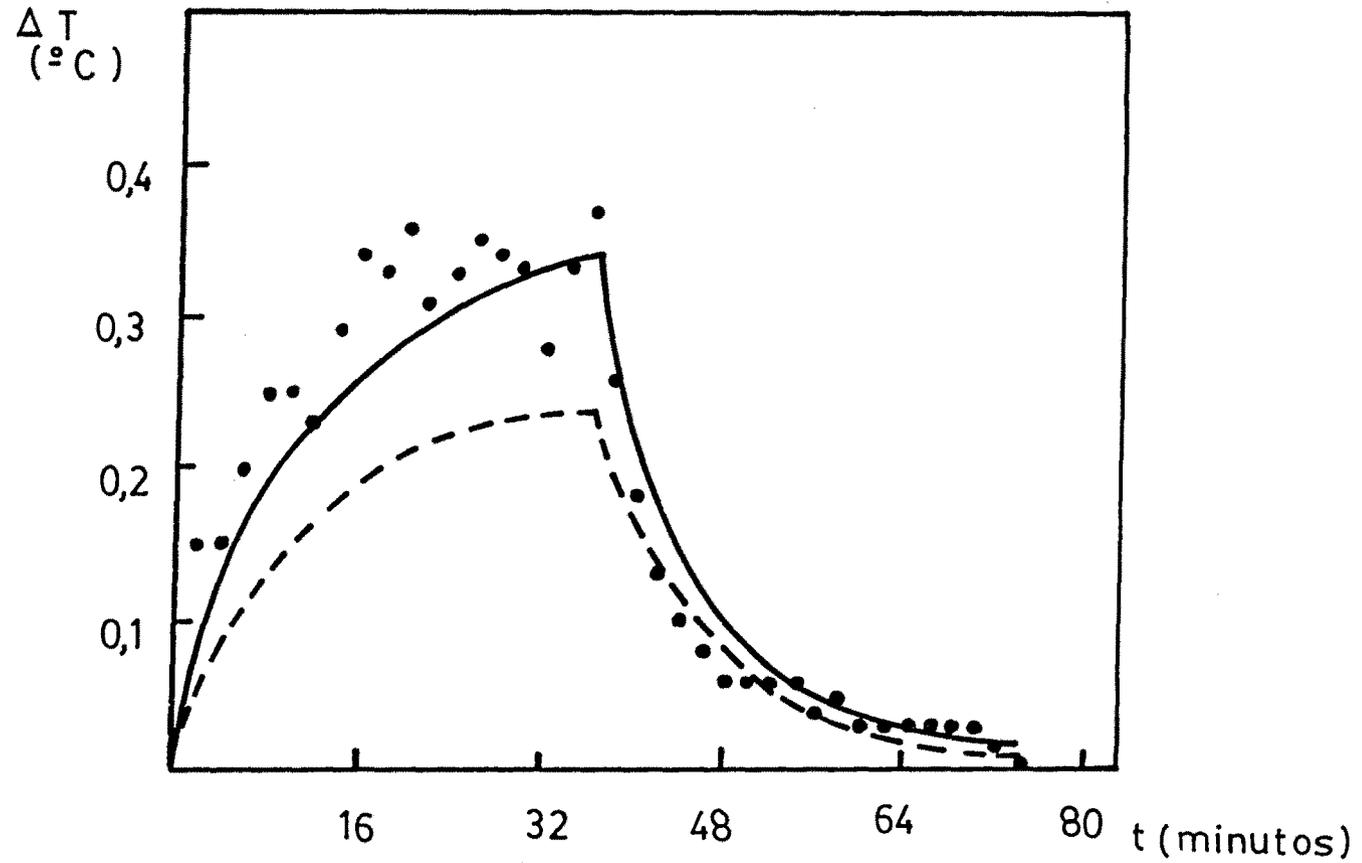


Figura 2.7

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ), en función del tiempo  $t$  (en min.), a lo largo de la visita, para cuatro grupos consecutivos de 5 visitantes con un guía.

Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.

Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.

Puntos: medidas experimentales.

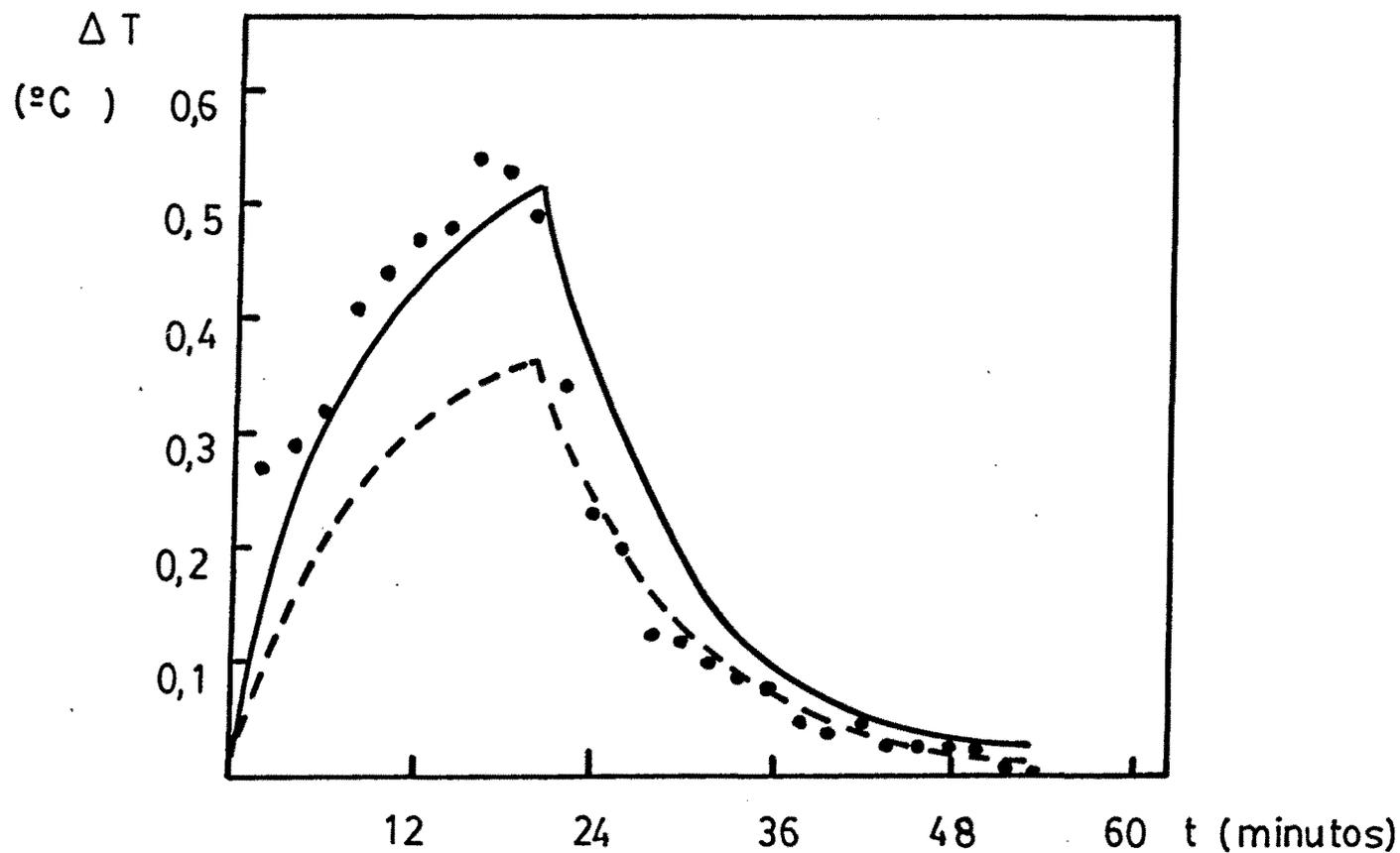


Figura 2.8

Variación de la diferencia de temperaturas entre el aire y la pared  $\Delta T$  (en  $^{\circ}\text{C}$ ), en función del tiempo  $t$  (en min.), a lo largo de la visita, para dos grupos consecutivos de 10 visitantes con un guía.

Trazo continuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 100 Kcal/h.

Trazo discontinuo: curva teórica suponiendo que el cuerpo humano emite 70 Kcal/h.

Puntos: medidas experimentales.

ra de la Sala de Polícromos debidas a la presencia de visitantes.

En las curvas de variación de la temperatura del recinto desde que empieza la visita, hasta que esta se recupera, se observa que para grupos numerosos, entendiendo por tales, los correspondientes a un total de quince ó veinte personas, ó los que permanecen bastante tiempo en el interior de la Sala, como sería el caso de varios grupos de cinco ó diez personas, en el tramo ascendente los incrementos de temperatura obtenidos a partir de nuestro modelo, se encuentran por debajo de los datos experimentales; sin embargo en el tramo descendente ocurre todo lo contrario. Una causa posible de este hecho puede ser que los visitantes suelen permanecer agrupados, durante el transcurso de la visita, en el centro de la Sala, con lo cual la sonda correspondiente a este punto se ve muy afectada por la presencia de las personas en comparación con las restantes, es decir que se produce un punto cálido muy localizado, que evidentemente tiene un peso muy alto, a la hora de calcular la temperatura media, obtenida como valor medio de las temperaturas de las tres sondas.

Hemos dicho que en el descenso, ocurre precisamente todo lo contrario; esto será debido a que esta zona central, que en principio está mucho más caliente que las restantes, perderá energía calorífica por medio de los procesos de radiación y convección con mayor velocidad que el resto, razón por la cual la media total desciende con más rapidez que si la temperatura fuese homogénea en el recinto. Sin embargo cuando se trata de grupos pequeños de personas, o tiempos bajos de permanencia en el interior de la Sala de Polícromos, las variaciones de temperatura son lo suficientemente pequeñas como para que no tengan una influencia demasiado importante en la media, con la cual la concordancia entre la teoría y la experiencia es mucho mejor.

No obstante, hemos de señalar, que los resultados experimentales, quedan siempre comprendidos dentro de las curvas teóricas extremas, si se tiene en cuenta que el error cometido al realizar las medidas es de  $\pm 0'1^{\circ}\text{C}$ .

Cabe destacar, que los tiempos de recuperación calculados por medio de nuestro modelo, para grupos pequeños de visitas discrepan más con respecto a los datos experimentales que los calculados para grupos grandes; esto se explica por el hecho de que para los primeros, el tiempo de recuperación calculado es muy sensible a variaciones pequeñas en el incremento de temperatura, del orden de algunas centésimas de grado, lo cual no es significativo, ya que las medidas experimentales sólo pueden aproximarse hasta la décima de grado.

Tenemos por tanto, que las variaciones de temperatura que tienen lugar en la Sala de Pinturas de la Cueva de Altamira, debidas a la presencia de visitantes, pueden ser descritas utilizando nuestro modelo. Podemos pues concluir que las variaciones térmicas ambientales en la Cueva vienen determinadas fundamentalmente por procesos de convección y radiación; siendo éste último el más importante en términos cuantitativos. Lo más interesante de los resultados obtenidos es que al haber logrado la descripción teórica de la fenomenología correspondiente a las variaciones que experimenta el campo de temperaturas de la Sala con la presencia de personas, se está en condiciones de predecir las variaciones térmicas del aire de la Sala y los tiempos de recuperación, cualquiera que sea el número de personas que se introduzcan en ella y cualquiera que sea su tiempo de permanencia.

CAPITULO 3.-

ESTUDIO DE LA INFLUENCIA DE LOS VISITANTES EN LAS  
CARACTERISTICAS DEL AGUA QUE BAÑA LAS PINTURAS.

- 3.1) - Introducción.
- 3.2) - Métodos de análisis.
  - 3.2.a) - Medida del  $P_H$ .
  - 3.2.b) - Medida del contenido en materia orgánica.
  - 3.2.c) - Medida de la concentración de nitritos.
  - 3.2.d) - Medida de la concentración de amoniaco.
  - 3.2.e) - Medida de la dureza. Concentración de los iones calcio y magnesio.
  - 3.2.f) - Medida de la concentración de sulfatos.
  - 3.2.g) - Medida de la concentración de nitratos.
  - 3.2.h) - Medida de la concentración de cloruros.
  - 3.2.i) - Medida de la concentración de carbonatos y bicarbonatos.
- 3.3) - Tratamiento de datos obtenidos en los análisis químicos. Comparación de estos resultados con los obtenidos en ausencia de visitantes.
  - 3.3.a) - Comparación de la concentración de iones que permanece constante en el tiempo.
  - 3.3.b) - Comparación de los factores que intervienen en el equilibrio  $CO_2 - H_2O - CO_3Ca$ .
- 3.4) - Discusión de los resultados.
- 3.5) - Índice de saturación.

### 3.1) - Introducción

Las pinturas del techo de la Sala de Polícromos están constantemente bañadas por el agua infiltrada a través de sus fisuras, motivo por el que resulta de especial interés conocer su acción sobre las superficies policromadas. Obviamente, estas aguas constituyen uno de los principales factores responsables de los diferentes procesos de alteración superficial que pueden afectar, no sólo a las pinturas, sino también a la superficie rocosa.

Ya hemos visto que los diferentes procesos de alteración superficial vienen determinados por numerosos factores, como son entre otros las oscilaciones de la temperatura del techo, que podrían dar lugar a la condensación del vapor o por el contrario a la evaporación, y en último extremo a desecaciones del techo; las fluctuaciones de humedad, acompañadas de procesos de evaporación y consensación; las variaciones del contenido de gas carbónico en la atmósfera de la Sala de Pinturas; las variaciones que experimenta la intensidad de ventilación, que altera las características del microclima. Pero por otra parte también influyen las posibles variaciones del caudal de agua entrante, que se infiltra en la Sala y continúa su curso hacia zonas más profundas. En general, los flujos de aire y de agua influyen de forma importante en el campo de temperaturas, en la humedad y en la concentración de anhídrido carbónico de la Sala (17).

El contacto permanente entre el agua y las superficies policromadas, hace resaltar la importancia de la disolución de los pigmentos, o del soporte cálcico de las pinturas o de la precipitación de carbonatos y, en general de la acción provocada por los agentes químicos derivados de la misma composición del agua, adquirida a su paso por los estratos que constituyen el techo, por los posibles agentes incorporados por contaminación o por reacciones químicas de origen biológico (39), (40).

Cuando se tiene en cuenta la importancia que tienen las propie-

dades químicas del agua, se comprende que el tratamiento de cualquier problema relacionado con el agua que baña las pinturas es muy complejo por lo que hay que recurrir a simplificaciones razonables.

Como colofón al estudio de la influencia de la presencia de visitantes en el microclima de la Sala de Pinturas, y teniendo en cuenta que disponemos de las medidas de todas las variables que definen el estado del ecosistema en estudio, con y sin visitantes(5) nos ha parecido conveniente conocer las características del agua que bañan las pinturas después de haber transcurrido dos años, sometida la Cueva, a diversos regímenes de visita. Este es el motivo principal que nos ha llevado a realizar análisis químicos del agua en estas nuevas condiciones con el fin de comparar los resultados con los que hicimos en la época en que la Sala no era visitada.

En este capítulo exponemos el resultado de este estudio.

### 3.2)- Métodos de análisis

El agua que gotea del techo policromado, la hemos recogido en probetas graduadas de vidrio con un volumen de 1 litro. Sobre estas probetas hemos colocado embudos con una boca de unos 60 cm<sup>2</sup> aproximadamente. Concretamente hemos escogido nueve puntos de goteo en el techo bañado de agua, que son los mismos que se eligieron durante el estudio realizado sin visitantes y que son los que aparecen en la figura 3.1; designados por los números 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 13 y 14, siguiendo la misma nomenclatura del trabajo citado ( 5 ), (41).

Desde que se reanudaron las visitas a la Sala de Pinturas, las probetas solamente podían ser colocadas durante los días en que la Cueva estaba cerrada al público, que eran los cinco primeros días de cada mes, norma que se estableció por el propio equipo que investigábamos en la Cueva. Las probetas se colocaban debajo de los puntos de goteo en el momento que salía de la Sala el último visitante, y se quitaban momentos antes de que entrase el primer visitante después de los días de cierre.

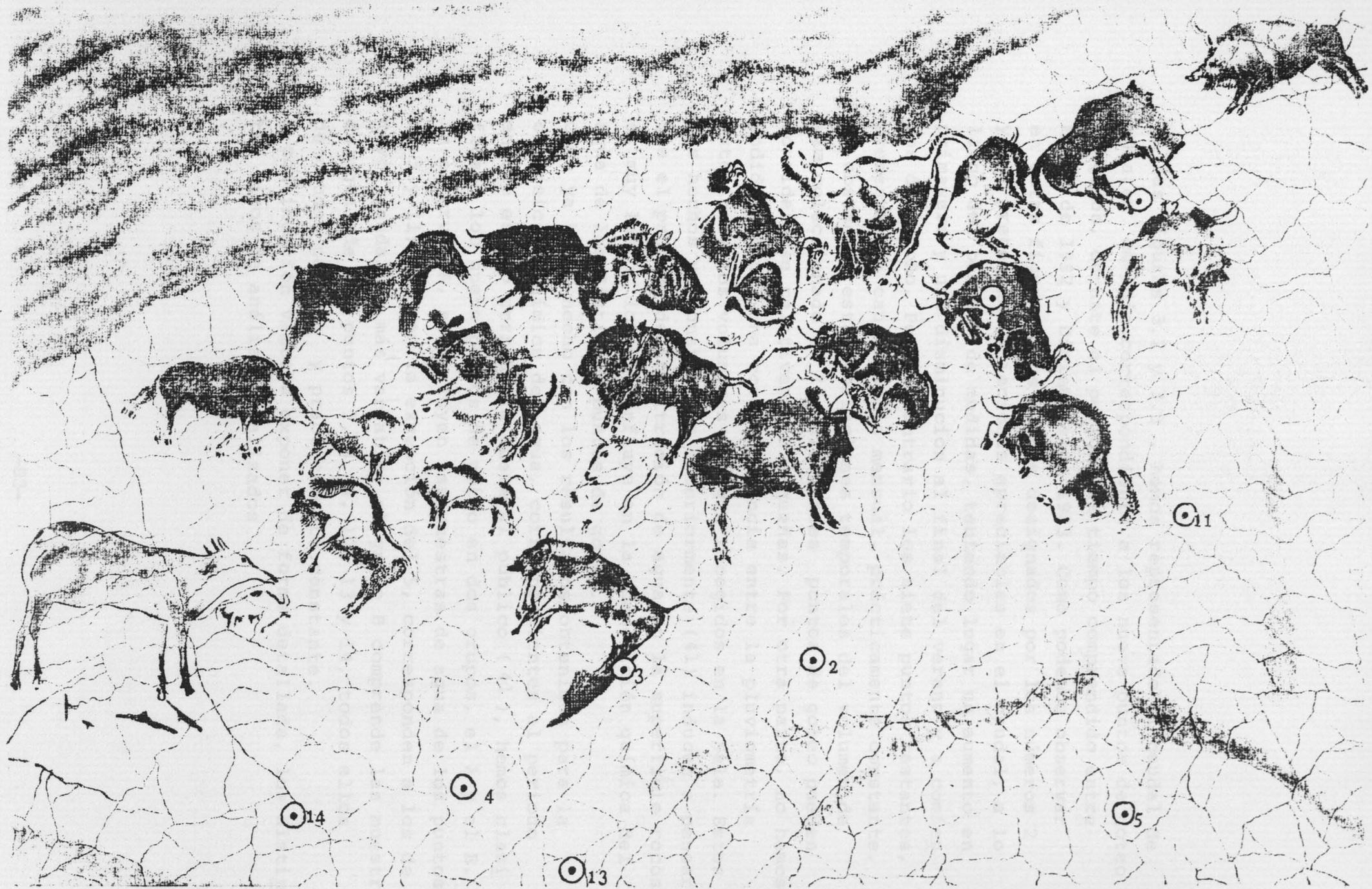


Figura 3.1.-

Puntos de goteo, escogidos en el techo de la Sala de Pinturas, designados por los números 1, 2, 3, 4, 5, 11, 12, 13 y 14.

En las figuras 3.2 y 3.3 , hemos representado el caudal de agua, en  $\text{cm}^3/\text{día}$ , correspondiente a los nueve puntos de goteo elegidos, durante el periodo de tiempo comprendido entre Marzo de 1982 y Diciembre de 1983. Como podemos observar en estas figuras, los puntos designados por los números 2 y 11, presentan variaciones apreciables en el caudal, a lo largo del periodo de medidas, teniendo lugar un aumento en primavera y una disminución al final del verano y a comienzos del otoño. Por el contrario los siete puntos restantes, presentan un caudal medio mensual, prácticamente constante. No obstante, estas variaciones temporales del volumen de agua coleccionado en los diferentes puntos de goteo pueden considerarse relativamente pequeñas. Por otra parte, no hemos podido obtener una correspondencia entre la pluviometría exterior y los volúmenes de agua recogidos en la Sala. Estos dos hechos ya constatados anteriormente (41) inducen a pensar que el proceso de infiltración de agua en la superficie rocosa es muy lento, lo cual influye en la composición química del agua de los distintos puntos de goteo.

Como ya hemos hecho con los resultados obtenidos para la composición química del agua, correspondientes al periodo en que estuvo cerrada la Cueva al público (41), hemos clasificado los nueve puntos de goteo en dos grupos, el A y el B. En el grupo A, se incluyen las muestras de agua de los puntos 2, 5 y 11; que con la excepción del 5, corresponden a los de mayor caudal, y más variable; el grupo B comprende las muestras de agua de los puntos 1, 3, 4, 12, 13 y 14, todos ellos de caudal pequeño y prácticamente constante.

A continuación vamos a exponer de forma detallada, los distintos tipos de análisis realizados.

caudal (cm<sup>3</sup>/d.)

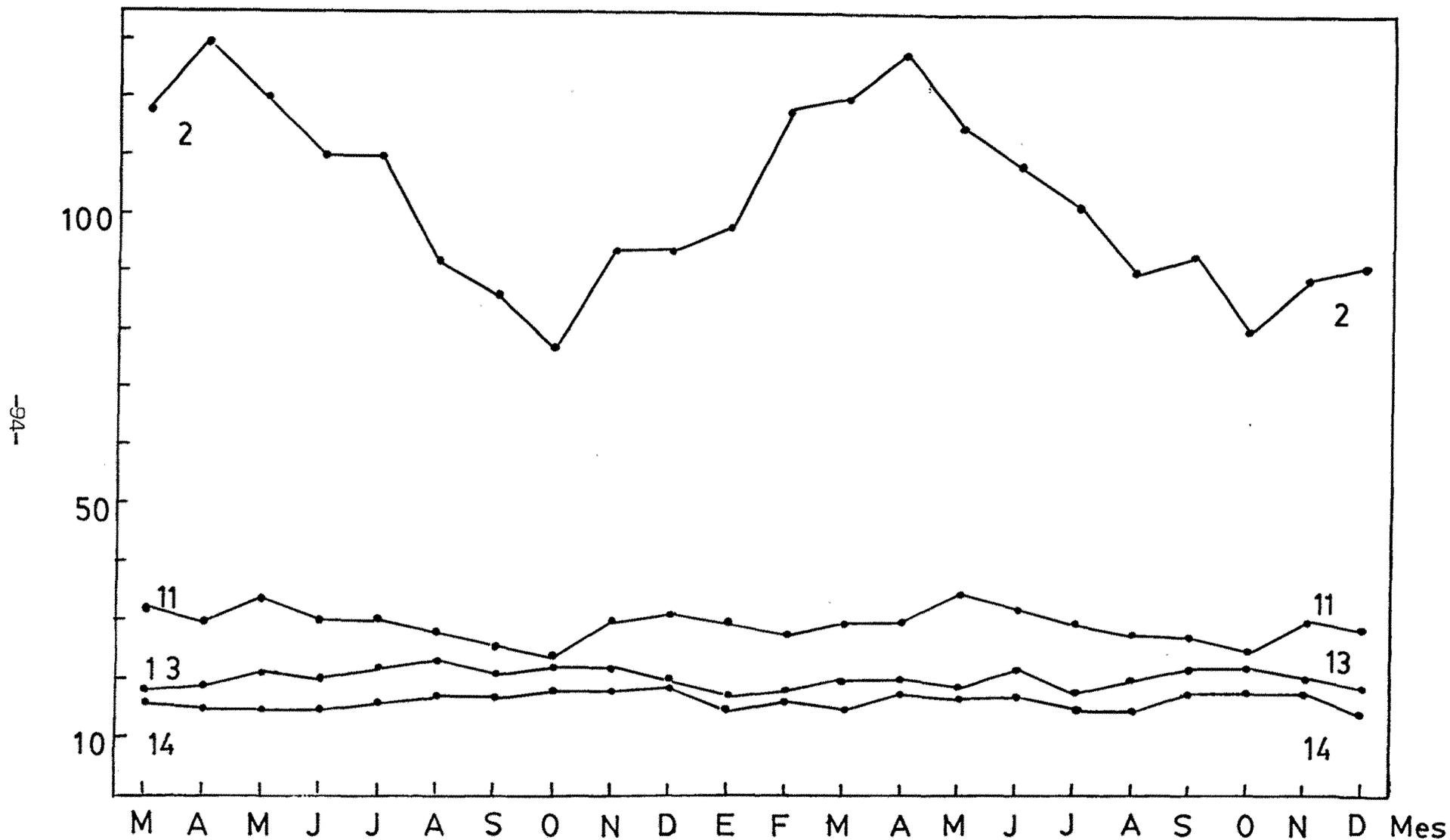


Figura 3.2.-

Caudal de agua en, cm<sup>3</sup>/día, correspondiente a los puntos de goteo designados por los números 2, 11, 13 y 14, durante el periodo de tiempo comprendido entre marzo 1982 y Diciembre de 1983.

caudal  
(cm<sup>3</sup>/d.)

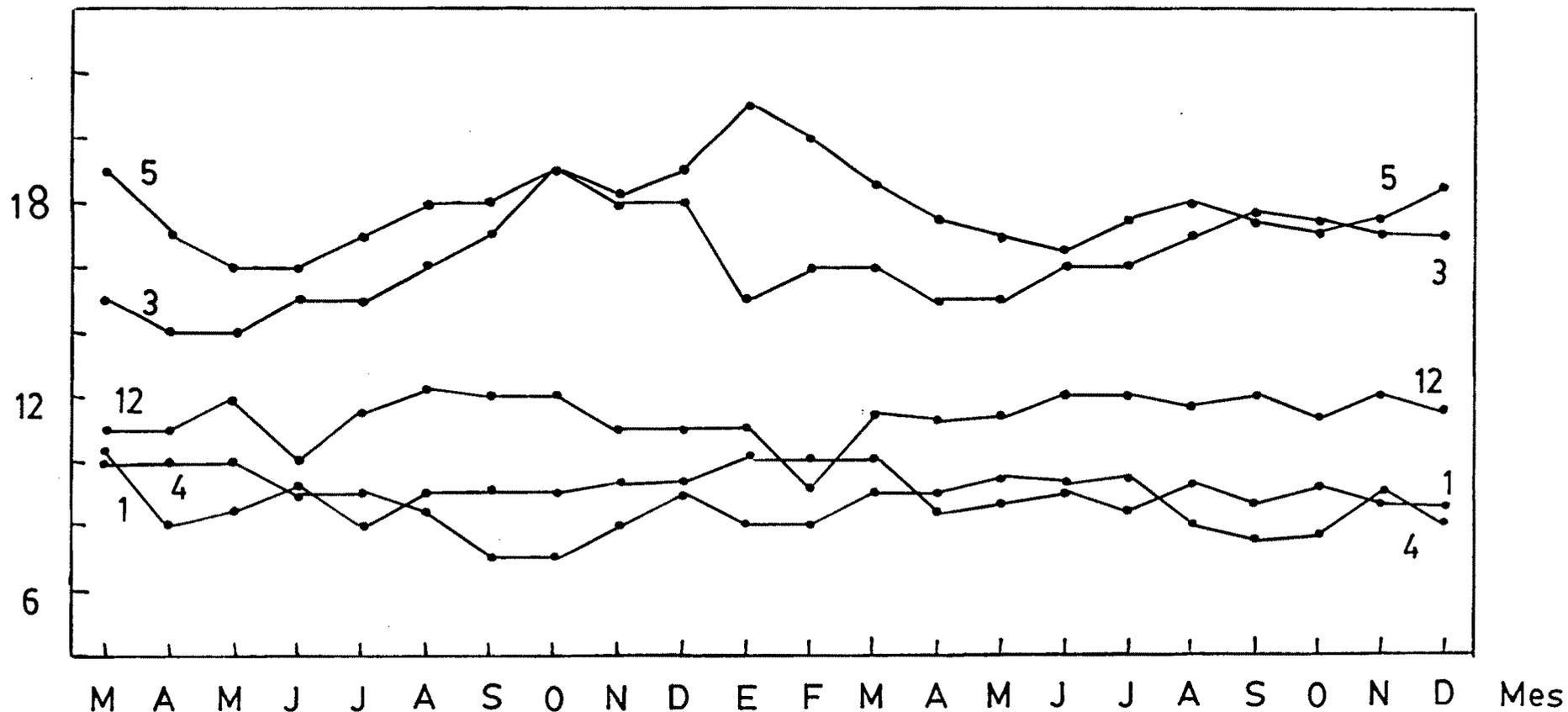


Figura 3.3.-

Caudal de agua en, cm<sup>3</sup>/día, correspondiente a los puntos de goteo designados por los números 1, 3, 4, 5 y 12, durante el periodo de tiempo comprendido entre Marzo 1982 y Diciembre de 1983.

La concentración de los iones nitrato, nitrito, amonio y sulfato, ha sido determinada por espectrofotometría de absorción; para lo cual hemos utilizado un espectrofotómetro Beckman Acta CII, el cual se compone según el esquema de la figura 3.4. Este espectrofotómetro posee dos lámparas, una de deuterio y otra de tungsteno; la primera trabaja en el rango de 190 - 380 nm. y la segunda de 340 - 800 nm.

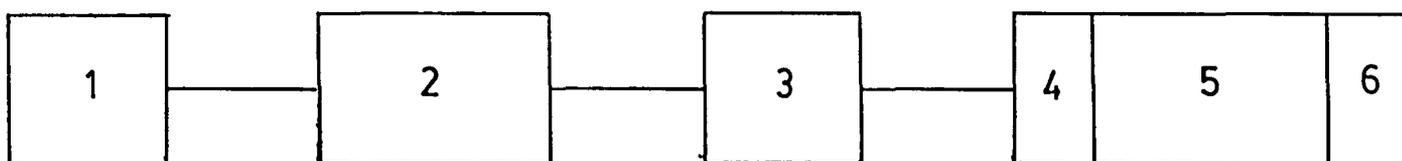
En nuestro caso en concreto, al utilizar el espectrofotómetro, hemos llevado a cabo medidas de la absorbancia de las muestras, parámetro que es función lineal de la concentración de estas. Ahora bien, ocurre que para concentraciones muy altas, esta linealidad desaparece. Concretamente, para concentraciones tales que la absorbancia leída esté entre 0'3 y 1'2, puede considerarse una respuesta lineal.

En la figura 3.5, puede observarse como el error relativo de la lectura aumenta de forma importante para valores altos y bajos de la absorbancia.

### 3.2.a) - Medida del $P_H$ .

La medida del  $P_H$ , de las muestras de agua, la hemos realizado en el mismo Laboratorio de Altamira, evitando así cualquier alteración en el valor, debida al transporte. Para llevar a cabo las medidas, hemos utilizado un pH-metro WTW, modelo DIGI 88, y un electrodo de vidrio tipo E-50, el cual nos proporciona resultados con un error del 1%.

Antes de realizar cada serie de medidas, se ha calibrado el instrumento, para lo cual utilizamos dos soluciones tampón, de pH  $6'90 \pm 0'05$  y  $9'30 \pm 0'05$  respectivamente.



- 1.-Fuente
- 2.-Monocromados
- 3.-Muestra
- 4.-Detector
- 5.-Amplificador
- 6.-Salida de datos

Figura 3.4.-  
Esquema del espectrofotómetro Beckman Acta CII.

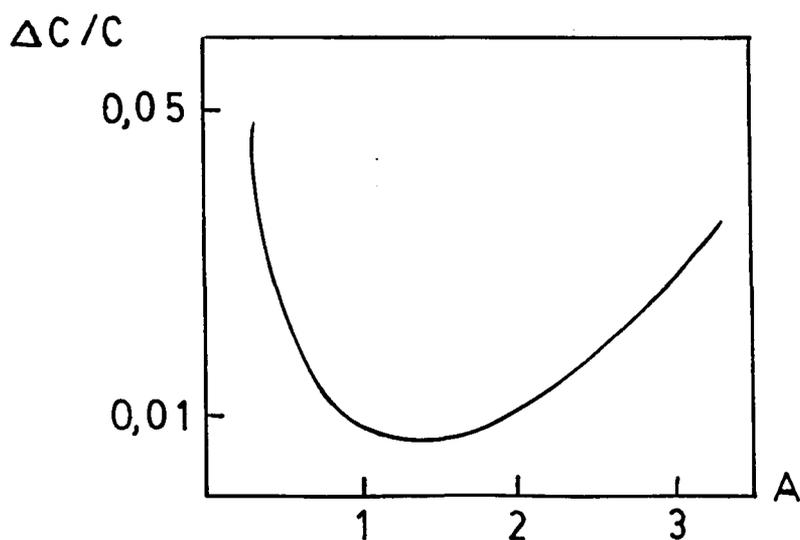


Figura 3.5.-  
Variación del error relativo de la lectura con la absorbancia A.

### 3.2. b)- Medida del contenido en materia orgánica

Hemos realizado análisis del contenido de materia orgánica en los dos grupos de muestras de agua; y además hemos llevado a cabo análisis esporádicos en agua de lluvia.

El método que hemos utilizado (42) para medir la materia orgánica en agua, ha consistido básicamente en medir, en medio ácido, la cantidad de oxígeno consumido para la reducción de permanganato potásico por las materias orgánicas de origen vegetal y animal, contenidas en la muestra; usando como indicador la sal de Mohr ( 5 grs. de sulfato ferroso amónico y 1 cc. de ácido sulfúrico, disueltos en 1 lt. de agua bidestilada).

El cálculo de la concentración de materia orgánica, se ha realizado mediante la ecuación "standard":

$$C = \frac{V_1 - V_0}{2} \text{ mgr./lt} \quad (3.1)$$

siendo:

$V_1$  , volumen gastado en ml de una disolución de permanganato potásico, N/80, para valorar la muestra de agua problema.

$V_0$  , volumen gastado de ésta disolución de permanganato potásico, en ml, para valorar el agua bidestilada, que utilizamos como blanco del sistema de medida.

### 3.2. c)- Medida de la concentración de nitritos.

Hemos utilizado el reactivo Zambelli (43). Para elaborar este reactivo, se diluyen 260 cm<sup>3</sup> de HCl concentrado en 500 cm<sup>3</sup> de H<sub>2</sub>O bidestilada; posteriormente se añaden 5 gr. de ácido sulfanilico y 7'5 gr. de fenol, calentando hasta disolución total; una vez enfriada la disolución se agregan 135 gr. de cloruro

amónico; disolviendo finalmente el conjunto hasta 1 lt. con agua bidestilada. Este reactivo se utiliza con amoniaco con centrado ( $\rho = 0'925 \text{ gr./cm}^3$ ), que en presencia de iones ni trito dan lugar a un complejo de color amarillo, cuya inten sidad es proporcional a la concentración del ión  $\text{NO}_2^-$  presen te, en la muestra. La "intensidad" del color que adquiere la disolución se mide por la absorbancia en un espectrofotó metro, para una longitud de onda de 435 nm, en cubeta de cuar zo de 1 cm, de paso de luz.

La calibración se ha llevado a cabo haciendo uso de concentra ciones bien conocidas de ión nitrito en muestras acuosas. Se han tomado partes alicuotas de una disolución madre de nitrito sódico (0'345 gr de nitrito sódico en 1 lt. de  $\text{H}_2\text{O}$  bidestila da), y hemos medido su absorbancia. Los resultados se ajusta ron a una recta absorbancia- concentración, de ecuación:

$$A = 0'48 C - 0'0099 \quad (3.2)$$

siendo:

A, la absorbancia

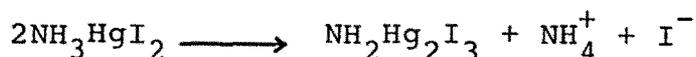
C, la concentración de ión nitrito, en mg/lt.

Previamente a la medida, ajustamos el cero del espectrofotó metro, para lo cual hemos utilizado las dos cubetas que posee el aparato, con agua bidestilada a la que se le somete al pro ceso descrito para la medida de  $\text{NO}_2^-$ . En el momento de medir la muestra acuosa, utilizamos en una de las ventanas la cu beta con la muestra y en la otra la cubeta con agua bidesti lada.

La concentración mínima de ión  $\text{NO}_2^-$  en muestras acuosas, que podemos medir con este método es de 0'05 mg./lt.

### 3.2.d)- Medida de la concentración de amoniaco

Los análisis del contenido del radical amonio,  $\text{NH}_4^+$ , (42) los hemos realizado utilizando el método de Nessler. Este método consiste básicamente en tamponar la muestra acuosa a  $\text{pH} = 7.4$ , para inhibir así la hidrólisis de compuestos orgánicos nitrogenados. Una vez añadida la disolución tampón (14.3 gr. de  $\text{KH}_2\text{PO}_4$  y 68.8 gr. de  $\text{K}_2\text{PO}_4$ , disueltos en un litro de agua bidestilada), se destila con un Kjeldahl sobre una solución de ácido bórico (20 gr. de  $\text{H}_3\text{BO}_3$  en un litro de agua bidestilada). Posteriormente se mide la absorbancia en el espectrofotómetro para una longitud de onda de 425 nm., añadiendo a la muestra el reactivo de Nessler, consistente en 100 gr. de  $\text{HgI}_2$  anhidro, y 70 gr. de  $\text{KI}$  anhidro, sobre los cuales se añade una solución enfriada de 160 gr.  $\text{NaOH}$  en 500 ml. de agua bidestilada, diluyendo todo el conjunto a 1 lt. con agua bidestilada. Las reacciones bien conocidas que tienen lugar al llevar a cabo el proceso son:



Para calibrar el método de medida de la concentración del ión  $\text{NH}_4^+$  en agua, hemos tomado alicuotas de una disolución madre de cloruro amónico, partiendo de 3.819 gr de  $\text{NH}_4\text{Cl}$  en 1 lt. de agua bidestilada, diluyendose después 10 ml. de disolución en 1 lt. de agua bidestilada. Estas alicuotas se someten al proceso químico previamente descrito. De esta forma obtenemos la ecuación:

$$A = 172 C' + 0.001 \quad (3.3)$$

siendo:

A , la absorbancia

C', la concentración de N, en mg./ml.

Finalmente la concentración de la muestra, la calculamos como sigue:

$$C = \frac{C' B}{V} \text{ mg./ml.} \quad (3.4)$$

siendo:

C , la concentración de la muestra en mg/ml.

B , el volumen recogido de destilado en ml.

V , el volumen inicial de la muestra acuosa en ml.

La concentración mínima que podemos medir con este método es de 0'02 mg/lt en N.

### 3.2.e)- Medida de la dureza. Concentración de los iones calcio y magnesio.

Hemos medido la dureza de las aguas recogidas en la Sala de Polícromos, por dos métodos "standard" diferentes, uno directo, y el otro después de determinar las concentraciones de los cationes  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$  ( 42 ).

El primero de ellos es por complexometría. Se tampona la muestra de agua a analizar, que previamente ha sido calentada hasta una temperatura de 60° C. La solución tampón se ha obtenido disolviendo 54 gr. de cloruro amónico y 350 ml. de amoniaco al 25%, en 1 lt. de agua bidestilada. Sobre ella se

añaden unas gotas de indicador negro de eriocromo (solución negro de eriocromo en alcohol etílico al 0'4%). Procedemos en este momento a la valoración con una solución de sal disódica del ácido etilendiamino-tetracético (3'721 gr. de sal disódica del ácido etilendiaminotetracético en 1000 gr. de H<sub>2</sub>O bidestilada), ya que los elementos alcalinotérreos presentes en el agua forman un complejo de tipo quelato con dicha sal. La valoración con la solución de EDTA, se lleva a cabo hasta el viraje del color rojo al azul-verdoso, lo cual indica la desaparición de iones libres de calcio y magnesio. La expresión utilizada para calcular la dureza es:

$$\text{Dureza total} = V \cdot F. \quad (3.5)$$

siendo:

V , el volumen de EDTA utilizado en ml.

El segundo método utilizado está basado en el mismo principio que el anterior, sólo que en este caso se utilizan dos indicadores; una solución de azul de eriocromo ( se disuelven 100 mg. de azul de eriocromo y 0'25 gr. de clorhidrato de hidroxilamina en 100 ml de agua bidestilada), en medio alcalino y después otra de negro de eriocromo (0'5 gr de eriocromo en 100 gr de trietanolmina) en medio ácido.

En primer lugar se valora la muestra con una disolución de EDTA N/50, hasta el viraje al violeta; pudiendo así determinar la concentración del ión Ca<sup>+2</sup> en la muestra de agua:

$$[ \text{Ca}^{+2} ] (\text{mg/lt}) = \frac{V_1 \cdot 0'4008 \cdot 1000}{50} \quad (3.6)$$

siendo:

$V_1$  , el volumen de EDTA gastado en la valoración.

Seguidamente, se continua el proceso, en medio ácido, utilizando la solución de negro de eriocromo. Se tampona la muestra, para lo cual se mezclan 400 ml. de agua bidestilada, 5'5 ml. de ácido clorhídrico concentrado, 310 ml. de 2-aminoetanol y 100 mg. de EDTA magnesio; completando el conjunto hasta 1 lt. con agua bidestilada, y se añade el indicador. Así, se valora con la solución de EDTA, hasta el viraje al azul; determinando de esta forma la concentración del ión  $Mg^{+2}$  en la muestra:

$$[ Mg^{+2} ] \text{ (mg./lt)} = \frac{V_2 \cdot 0'243 \cdot 1000}{50} \quad (3.7)$$

siendo:

$V_2$  , volumen de EDTA gastado en la valoración.

La dureza total, expresada en mg./lt de  $CO_3Ca$ , viene dada por la expresion:

$$[ CO_3Ca ] = \frac{(V_1 + V_2) \cdot 1000}{50} \text{ mg/lt} \quad (3.8)$$

La concentración mínima de  $Ca^{+2}$  que podemos medir es 0'5 mg./lt., y la mínima de  $Mg^{+2}$  es de 0'5 mg./lt.

### 3.2.f)- Medida de la concentración de sulfatos

El método utilizado para llevar a cabo la determinación del contenido de sulfatos en muestras acuosas, es el turbidomé-

trico (43); basado en la precipitación del ión  $\text{SO}_4^{=}$  con el ión  $\text{Ba}^{++}$ , para lo cual hacemos uso de una solución precipitante de bario, consistente en disolver 20 gr. de acetato bórico en una mezcla de 75  $\text{cm}^3$  de ácido acético 10N y, 25  $\text{cm}^3$  de solución de goma arábiga al 5%. La precipitación se realiza en condiciones tales que se formen cristales de tamaño uniforme de sulfato bórico, los cuales se mantienen en suspensión homogénea durante un período de tiempo, que resulta suficientemente largo como para medir la absorbancia que produce la misma, a una longitud de onda de 425 nm. Para calibrar el método de medida de la concentración de iones de  $\text{SO}_4^{=}$  en agua, hemos tomado partes alicuotas de una solución de sulfato potásico, partiendo de una solución de 0'8707 gr. de sulfato potásico en un litro de agua bidestilada, y midiendo posteriormente la absorbancia. De esta forma se ha obtenido, la ecuación:

$$A = 0'0106 C + 0'002 \quad (3.9)$$

que nos permite, medir concentraciones de sulfatos, en mg./lt. El valor mínimo de la concentración de  $\text{SO}_4^{=}$  que podemos medir con éste método es de 0'5 mg/lt.

### 3.2.g) - Medida de la concentración de nitratos

Para medir el contenido en  $\text{NO}_3^-$ , en muestras acuosas, hemos utilizado el llamado método de la brucina (43), ya que se utiliza el reactivo brucina-sulfanílico, constituido por una disolución de 1 gr. de brucina y 0'1 gr. de ácido sulfanílico en 3  $\text{cm}^3$  de ácido clorhídrico concentrado y agua bi-

destilada hasta completar un volumen total de 100 cm<sup>3</sup>. Este reactivo se añade a la muestra y seguidamente una solución de ácido sulfúrico (500 cm<sup>3</sup> de ácido sulfúrico concentrado en 75 cm<sup>3</sup> de agua bidestilada), produciéndose una coloración amarilla, cuya intensidad es proporcional al contenido de ión NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, lo que nos permite una valoración cuantitativa, midiendo la absorbancia para una longitud de onda de 410 nm. La absorción no sigue rigurosamente la ley de Beer, pero la gráfica de la absorbancia en función de la concentración de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> da una curva regular que nos permite obtener la concentración de nitratos.

Para calibrar el método de medida del ión nitrato, hemos utilizado partes alicuotas de una disolución de nitrato potásico, partiendo de 0'1629 gr. de nitrato potásico anhidro en un litro de agua bidestilada. Estas disoluciones patrones las hemos sometido al proceso previamente descrito; obteniendo de esta forma la relación entre la absorbancia A y la concentración de nitratos C:

$$A = 0'00551 C - 0'001$$

La concentración mínima de NO<sub>3</sub><sup>-</sup> que podemos medir con este método es de 1'05 mg./lt.

### 3.2.h) - Medida de la concentración de cloruros.

Para la determinación de cloruros, hemos utilizado un procedimiento clásico (42), consistente en la formación de una sal de plata. Para ello procedemos de la forma siguiente: Se valora la muestra de agua con ácido sulfúrico 0'05N,

hasta el punto de viraje del anaranjado de metilo. Una vez realizada la valoración con el ácido sulfúrico, se añaden unas gotas de una solución de cromato potásico (5 gr. de cromato potásico en 50 ml. de agua bidestilada). Se añade gota a gota nitrato de plata 1 N, hasta formarse un precipitado rojo claro permanente; finalmente se filtra, y diluye hasta 100 ml. con agua bidestilada. En este momento se procede a valorar, con una solución de nitrato de plata 0'005 N (se disuelven 0'8495 gr. de nitrato de plata en 1 lt. de agua bidestilada), hasta aparecer un color rojo permanente, correspondiente a un precipitado de  $\text{CrO}_4\text{Ag}_2$ . El cálculo de la concentración de cloruros en la muestra de agua se hace de la siguiente forma:

$$[\text{Cl}^-] = 0'005 \cdot 1000 \cdot \frac{V - V_1}{V_2} \text{ meq./lt}$$

siendo:

V , el volumen, en mililitros, de nitrato de plata utilizados en la valoración de la solución problema.

$V_1$  , el volumen, en mililitros, de nitrato de plata utilizados en la valoración en blanco.

$V_2$  , el volumen, en mililitros, de muestra problema.

La concentración mínima que podemos medir con este método es de 0'2 mg./lt.

### 3.2.i) - Medida de la concentración de carbonatos y bicarbonatos.

La medida de la concentración de carbonatos y bicarbonatos se ha realizado por el método complexométrico (42),(43), para lo cual se añaden a la muestra unas gotas de indicador de fenolftaleina ( se disuelven 0'5 gr. de fenolftaleina en 50 ml. de etanol al 95% y 50 ml. de agua bidestilada; y sobre esta mezcla, se añade gota a gota una solución de hidróxido sódico 0'05 N, hasta que el color se vuelva debilmente rosado);si se produce color se valora con ácido sulfúrico 0'05 N, hasta que desaparezca el mismo. Seguidamente, añadimos unas gotas del indicador anaranjado de metilo ( al 0'05% de agua), y se continúa la valoración con el ácido sulfúrico, hasta el punto de viraje de éste.

El cálculo de las concentraciones, se realiza como sigue:

Llamamos:

a , el volumen, en mililitros, de la solución problema.

x , el volumen, en mililitros, de ácido sulfúrico 0'05N en el punto de viraje de la fenolftaleina, una vez corregido por ensayo en blanco.

z , el volumen, en mililitros, de ácido sulfúrico 0'05N en el punto de viraje del anaranjado de metilo después de corregir por ensayo en blanco.

N , la normalidad del ácido.

Podemos tener tres casos:

$$x < \frac{1}{2} z : [\text{CO}_3^{\equiv}] = 2 x N \frac{1000}{a} \text{ meq./lt.}$$

$$[\text{CO}_3\text{H}^-] = (z - 2x) N \frac{1000}{a} \text{ meq./lt}$$

$$x \frac{1}{2} z : \text{CO}_3^{\equiv} = (2z - 2x) N \frac{1000}{a} \text{ meq./lt.}$$

$$\text{CO}_3\text{H}^- = \text{despreciable}$$

$$x = \frac{1}{2} z : \text{CO}_3\text{H}^- = \text{despreciable}$$

$$\text{CO}_3^{\equiv} = 2 x N \frac{1000}{a} \text{ meq./lt.}$$

La concentración mínima de ión bicarbonato que podemos medir con este método es 1 mg./lt.

### 3.3) - Tratamiento de datos obtenidos en los análisis químicos. Comparación de estos resultados con los obtenidos en ausencia de visitantes.

Los resultados de los análisis químicos que hemos realizado según los métodos descritos en el apartado anterior nos han permitido comparar las características del agua que gotea del techo de la Sala de Polícromos en régimen de visitas con las del agua en ausencia de visitantes. Para llevar a cabo esta comparación hemos dividido los datos en dos grupos; de acuerdo con los resultados obtenidos en ausencia de visitas (5)(41), por una parte los correspondientes a los iones cuya concentración resulta ser constante y por otra analizamos los factores que intervienen en el equilibrio  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_3\text{Ca}$ .

#### 3.3.a) - Comparación de la concentración de iones que permanece constante en el tiempo.

Hemos realizado análisis del contenido en materia orgánica en las aguas correspondientes a los grupos A y B; así como en

muestras de agua de lluvia. El resultado de todos los ensayos hechos, ha sido que en ninguno de los casos las muestras presentan indicios de materia orgánica; resultado que coincide con el obtenido para las muestras analizadas en el periodo que estuvo cerrada la Cueva ( 5 ) , (41).

No hemos encontrado indicios de nitritos en las muestras de agua recogidas en la Sala de Polícromos, ni en el agua de lluvia del Altamira. Esto coincide con lo observado en el periodo de cierre de la Cueva ( 5 ) , (41).

En las muestras de agua correspondientes a los grupos A y B, recogidas en la Sala de Polícromos, no hemos detectado nunca la presencia del ión amonio. Sin embargo, en análisis esporádicos realizados en agua de lluvia, si que hemos observado la existencia de  $\text{NH}_4^+$ , en cantidades variables; concretamente hemos medido valores del orden de  $0'27 \pm 0'03$  mg./lt. en N. Estos resultados coinciden con los correspondientes al periodo de cierre de la Cueva ( 5 ) , (41).

La concentración de magnesio en las muestras de agua de la Sala, es practicamente constante en el tiempo, obteniendo para el grupo A un valor medio de  $51'4 \pm 1'5$  mg./lt, para el grupo B de  $55'2 \pm 1'7$  mg./lt.

En las Tablas 3.1 y 3.2 se muestran los valores de la concentraa

Tabla 3.1

Medida de la concentración del ión magnesio,  $Mg^{+2}$ , en las muestras del agua correspondientes al grupo A, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $Mg^{+2}$ (mg/lt) año 1981	Concentración $Mg^{+2}$ (mg/lt) año 1982	Concentración $Mg^{+2}$ (mg/lt) año 1983
Enero	-	52 ± 4	50'1 ± 1'5
Febrero	-	51 ± 4	51'1 ± 1'5
Marzo	-	51'1 ± 1'5	50'0 ± 1'5
Abril	-	50'2 ± 1'5	53'0 ± 1'6
Mayo	-	52'0 ± 1'6	51'2 ± 1'5
Junio	-	51'0 ± 1'5	54'0 ± 1'6
Julio	-	50'0 ± 1'5	52'1 ± 1'6
Agosto	-	52'1 ± 1'6	50'0 ± 1'5
Septiembre	51 ± 4	50'0 ± 1'5	50'2 ± 1'5
Octubre	52 ± 4	51'1 ± 1'5	53'1 ± 1'6
Noviembre	51 ± 4	51'9 ± 1'6	54'0 ± 1'6
Diciembre	51 ± 4	50'5 ± 1'5	51'2 ± 1'5

Tabla 3.2

Medida de la concentración del ión magnesio,  $Mg^{+2}$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo B, recogidas en la Sala de pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $Mg^{+2}$ (mg/lt) año 1981	Concentración $Mg^{+2}$ (mg/lt) año 1982	Concentración $Mg^{+2}$ (mg/lt) año 1983
Enero	-	55 ± 4	52'8 ± 1'6
Febrero	-	55 ± 5	56'2 ± 1'7
Marzo	-	56'1 ± 1'7	57'0 ± 1'7
Abril	-	55'2 ± 1'7	53'0 ± 1'6
Mayo	-	55'0 ± 1'7	54'0 ± 1'6
Junio	-	54'0 ± 1'6	56'1 ± 1'7
Julio	-	55'1 ± 1'7	56'2 ± 1'7
Agosto	-	54'3 ± 1'6	57'0 ± 1'7
Septiembre	56 ± 4	54'0 ± 1'6	53'2 ± 1'6
Octubre	56 ± 5	55'1 ± 1'7	54'0 ± 1'6
Noviembre	56 ± 4	55'7 ± 1'7	57'2 ± 1'7
Diciembre	56 ± 4	55'0 ± 1'7	58'0 ± 1'7

ción del ión magnesio para los grupos A y B respectivamente, durante los periodos correspondientes al cierre de la Cueva ( 41 ), de Septiembre de 1981 a Febrero de 1982, y durante el periodo de visitas, de Marzo de 1982 a Diciembre de 1983.

Cabe destacar, que no tenemos un ciclo de un año de medidas del ión magnesio perteneciente a la etapa en que estuvo cerrada la Cueva; pero aún así con los datos que poseemos, observamos en las Tablas 3.1 y 3.2, que los valores correspondientes a la etapa de visitas son similares a los obtenidos durante el cierre de la Cueva.

En las medidas realizadas en el agua de lluvia no hemos encontrado cantidades apreciables de magnesio.

En las Tablas 3.3 y 3.4 hemos representado los valores de la concentración del ión sulfato en las muestras de agua de los grupos A y B respectivamente, para la etapa, de Enero de 1981 a Febrero de 1982, en que estuvo cerrada la Cueva al público ( 41 ), y la etapa de visitas, de Marzo de 1982 a Diciembre de 1983.

Como puede observarse, la concentración de  $\text{SO}_4^{=}$  en las muestras de agua recogidas en la Sala de Polícromos es practicamente constante, obteniendo para el grupo A un valor medio de  $34'5 \pm 1'6$  mg./lt, y para el grupo B de  $49 \pm 3$  mg./lt.

En el agua de lluvia recogida en Altamira, hemos obtenido para la concentración de sulfatos un valor de  $13'3 \pm 1'2$  mg./lt; más bajo que el medido en el interior de la Cueva.

En las Tablas 3.3 y 3.4, podemos también observar que el resultado obtenido para la época con visitantes coincide con el correspondiente al cierre.

Tabla 3.3

Medida de la concentración del ión sulfato,  $\text{SO}_4^{=}$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo A, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{SO}_4^{=}$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{SO}_4^{=}$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{SO}_4^{=}$ (mg/lt) año 1983
Enero	34'3 ± 1'6	34'5 ± 1'6	34'7 ± 1'6
Febrero	34'6 ± 1'6	34'3 ± 1'6	34'0 ± 1'6
Marzo	34'0 ± 1'6	33'8 ± 1'5	33'7 ± 1'5
Abril	34'3 ± 1'6	33'9 ± 1'6	35'2 ± 1'6
Mayo	33'8 ± 1'5	33'9 ± 1'6	34'3 ± 1'6
Junio	35'3 ± 1'6	34'3 ± 1'6	35'0 ± 1'6
Julio	34'7 ± 1'6	34'6 ± 1'6	35'2 ± 1'6
Agosto	35'7 ± 1'6	35'1 ± 1'6	35'6 ± 1'6
Septiembre	36'1 ± 1'6	35'0 ± 1'6	35'6 ± 1'6
Octubre	34'7 ± 1'6	34'0 ± 1'6	34'9 ± 1'6
Noviembre	34'2 ± 1'6	34'6 ± 1'6	34'8 ± 1'6
Diciembre	34'3 ± 1'6	33'8 ± 1'5	33'9 ± 1'6

Tabla 3.4

Medida de la concentración del ión sulfato,  $\text{SO}_4^{=}$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo B, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{SO}_4^{=}$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{SO}_4^{=}$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{SO}_4^{=}$ (mg/lt) año 1983
Enero	48 ± 3	50 ± 3	48'0 ± 2'4
Febrero	49 ± 3	48'0 ± 3	49 ± 3
Marzo	50 ± 3	50 ± 3	52 ± 3
Abril	48 ± 3	49 ± 3	48'0 ± 2'4
Mayo	49 ± 3	48'0 ± 2'4	51 ± 3
Junio	50 ± 3	48'2 ± 2'4	53 ± 3
Julio	49 ± 3	49 ± 3	46'5 ± 2'3
Agosto	48 ± 3	49 ± 3	47'0 ± 2'4
Septiembre	50 ± 3	48'0 ± 2'4	52 ± 3
Octubre	49 ± 3	50 ± 3	51 ± 3
Noviembre	49 ± 3	50 ± 3	47'1 ± 2'4
Diciembre	48 ± 3	49 ± 3	48'1 ± 2'4

Al igual que en los casos anteriores, la concentración de nitratos en el agua recogida en la Sala de Pinturas, es prácticamente constante en el tiempo.

En las Tablas 3.5 y 3.6, se expresan los valores medios de la concentración mensual de nitratos para las muestras de los grupos A y B respectivamente, tanto para la época de cierre de la Cueva, (41) como para la de visitantes.

A la vista de estas Tablas podemos afirmar, que no se ha modificado la concentración de nitratos en agua.

Por otra parte, cabe señalar que la concentración de nitratos para el grupo A es del orden de un cuarto de la correspondiente al grupo B. Concretamente para el primero se tiene un valor medio de  $10'5 \pm 0'6$  mg./lt y para el segundo de  $40 \pm 3$  mg./lt. En el agua de lluvia de Altamira hemos obtenido un valor medio de  $10'0 \pm 1'5$  mg./lt.

En las Tablas 3.7 y 3.8 se muestra la variación que experimentan los valores medios mensuales de la concentración de cloruros de las muestras de agua de los grupos A y B respectivamente. Concretamente para el grupo A encontramos un valor medio anual de  $13'6 \pm 0'8$  mg./lt, y para el B de  $14'9 \pm 0'8$  mg./lt, valores que coinciden con los obtenidos en el periodo en que la Cueva estuvo cerrada al público (41), como podemos observar en dichas Tablas.

En el agua de lluvia recogida en Altamira, hemos medido una concentración media del orden de  $5'2 \pm 0'3$  mg./lt, muy inferior a la hallada en el interior de la Sala de Polícromos.

Tabla 3.5

Medida de la concentración del ión nitrato,  $\text{NO}_3^-$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo A, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{NO}_3^-$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{NO}_3^-$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{NO}_3^-$ (mg/lt) año 1983
Enero	9'8 ± 1'4	10'7 ± 1'4	11'1 ± 0'7
Febrero	9'4 ± 1'4	10'5 ± 1'4	10'6 ± 0'6
Marzo	9'6 ± 1'4	10'3 ± 0'6	10'3 ± 0'6
Abril	9'5 ± 1'4	10'3 ± 0'6	10'7 ± 0'6
Mayo	9'5 ± 1'4	10'5 ± 0'6	9'2 ± 0'5
Junio	10'2 ± 1'4	10'2 ± 0'5	10'2 ± 0'5
Julio	10'2 ± 1'4	10'5 ± 0'6	10'3 ± 0'6
Agosto	10'4 ± 1'4	10'1 ± 0'5	10'1 ± 0'5
Septiembre	10'6 ± 1'4	10'4 ± 0'6	10'2 ± 0'5
Octubre	10'4 ± 1'4	10'7 ± 0'6	10'9 ± 0'6
Noviembre	10'7 ± 1'4	11'3 ± 0'7	11'1 ± 0'7
Diciembre	10'5 ± 1'4	11'7 ± 0'7	10'8 ± 0'6

Tabla 3.6

Medida de la concentración del ión nitrato,  $\text{NO}_3^-$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo B, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{NO}_3^-$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{NO}_3^-$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{NO}_3^-$ (mg/lt) año 1983
Enero	39 ± 5	40 ± 5	36'0 ± 2'2
Febrero	40 ± 5	40 ± 6	38'0 ± 2'3
Marzo	41 ± 6	41 ± 3	39'3 ± 2'3
Abril	38 ± 5	39'0 ± 2'3	40 ± 3
Mayo	38 ± 5	39'2 ± 2'3	42 ± 3
Junio	41 ± 5	40 ± 3	39'1 ± 2'3
Julio	40 ± 5	38'0 ± 2'3	43 ± 3
Agosto	41 ± 5	39'1 ± 2'3	43 ± 3
Septiembre	40 ± 6	41 ± 3	43 ± 3
Octubre	41 ± 5	40 ± 3	42 ± 3
Noviembre	40 ± 5	44 ± 3	39'1 ± 2'3
Diciembre	41 ± 6	42 ± 3	40 ± 3

Tabla 3.7

Medida de la concentración del ión cloruro,  $\text{Cl}^-$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo A, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{Cl}^-$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{Cl}^-$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{Cl}^-$ (mg/lt) año 1983
Enero	13'5 ± 0'8	13'2 ± 0'8	14'2 ± 0'8
Febrero	13'7 ± 0'8	13'4 ± 0'8	13'7 ± 0'8
Marzo	13'1 ± 0'8	13'6 ± 0'8	13'0 ± 0'8
Abril	13'5 ± 0'8	13'4 ± 0'8	14'0 ± 0'8
Mayo	12'9 ± 0'8	13'0 ± 0'8	12'7 ± 0'6
Junio	13'5 ± 0'8	13'2 ± 0'8	13'7 ± 0'8
Julio	13'9 ± 0'8	13'1 ± 0'8	13'6 ± 0'8
Agosto	14'2 ± 0'8	13'7 ± 0'8	14'3 ± 0'8
Septiembre	13'6 ± 0'8	12'7 ± 0'6	13'3 ± 0'8
Octubre	13'8 ± 0'8	13'9 ± 0'8	14'1 ± 0'8
Noviembre	13'4 ± 0'8	14'0 ± 0'8	13'7 ± 0'8
Diciembre	13'4 ± 0'8	13'8 ± 0'8	13'6 ± 0'8

Tabla 3.8

Medida de la concentración del ión cloruro,  $\text{Cl}^-$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo B, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{Cl}^-$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{Cl}^-$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{Cl}^-$ (mg/lt) año 1983
Enero	15'2 ± 0'8	14'6 ± 0'8	15'6 ± 0'8
Febrero	15'7 ± 0'8	14'7 ± 0'8	15'0 ± 0'8
Marzo	15'8 ± 0'8	15'0 ± 0'8	15'9 ± 0'8
Abril	15'8 ± 0'8	15'0 ± 0'8	16'1 ± 0'8
Mayo	15'1 ± 0'8	14'8 ± 0'8	15'3 ± 0'8
Junio	14'8 ± 0'8	14'9 ± 0'8	14'6 ± 0'8
Julio	14'9 ± 0'8	14'8 ± 0'8	14'3 ± 0'8
Agosto	15'2 ± 0'8	15'0 ± 0'8	15'4 ± 0'8
Septiembre	14'8 ± 0'8	14'2 ± 0'8	14'6 ± 0'8
Octubre	14'8 ± 0'8	14'9 ± 0'8	14'5 ± 0'8
Noviembre	14'8 ± 0'8	14'6 ± 0'8	14'3 ± 0'8
Diciembre	14'6 ± 0'8	15'0 ± 0'8	14'5 ± 0'8

3.3.b.- Comparación de los factores que intervienen en el equilibrio  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_3\text{Ca}$ .

Cabe señalar que durante el periodo que estuvo cerrada la Cueva al público, se realizaron estudios exhaustivos (5),(41) de la variación del pH y la concentración de bicarbonatos, así como de la concentración del calcio disuelto y el contenido de gas carbónico tanto en el agua como en el aire de la Sala de Polícromos. Nuestro objetivo, ahora, no ha sido volver a analizar nuevamente el proceso  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_3\text{Ca}$ , sino estudiar las magnitudes que en él intervienen durante el periodo de visitas comprendido entre Marzo de 1982 a Diciembre de 1983, para comprobar si se han provocado alteraciones importantes en este equilibrio.

En las Figuras 3.6 y 3.7 hemos representado la variación del pH, para los grupos A y B respectivamente; tanto, para el período con visitas como para el de cierre. Como podemos observar en dichas figuras, el agua de la Sala de Polícromos presenta un comportamiento constantemente alcalino. Este resultado coincide, como vemos, con el obtenido en el período en que la Cueva estuvo cerrada al público ( 41 ).

Por otra parte, se tiene que tanto para el grupo A como para el B, el pH presenta un valor mínimo en el mes de Mayo, y un valor máximo en el mes de Septiembre.

Aún cuando no poseemos una estadística elevada de medidas de pH en el agua de lluvia recogida en Altamira podemos señalar que ésta, al contrario de lo que ocurre en la Sala, posee un carácter más ácido.

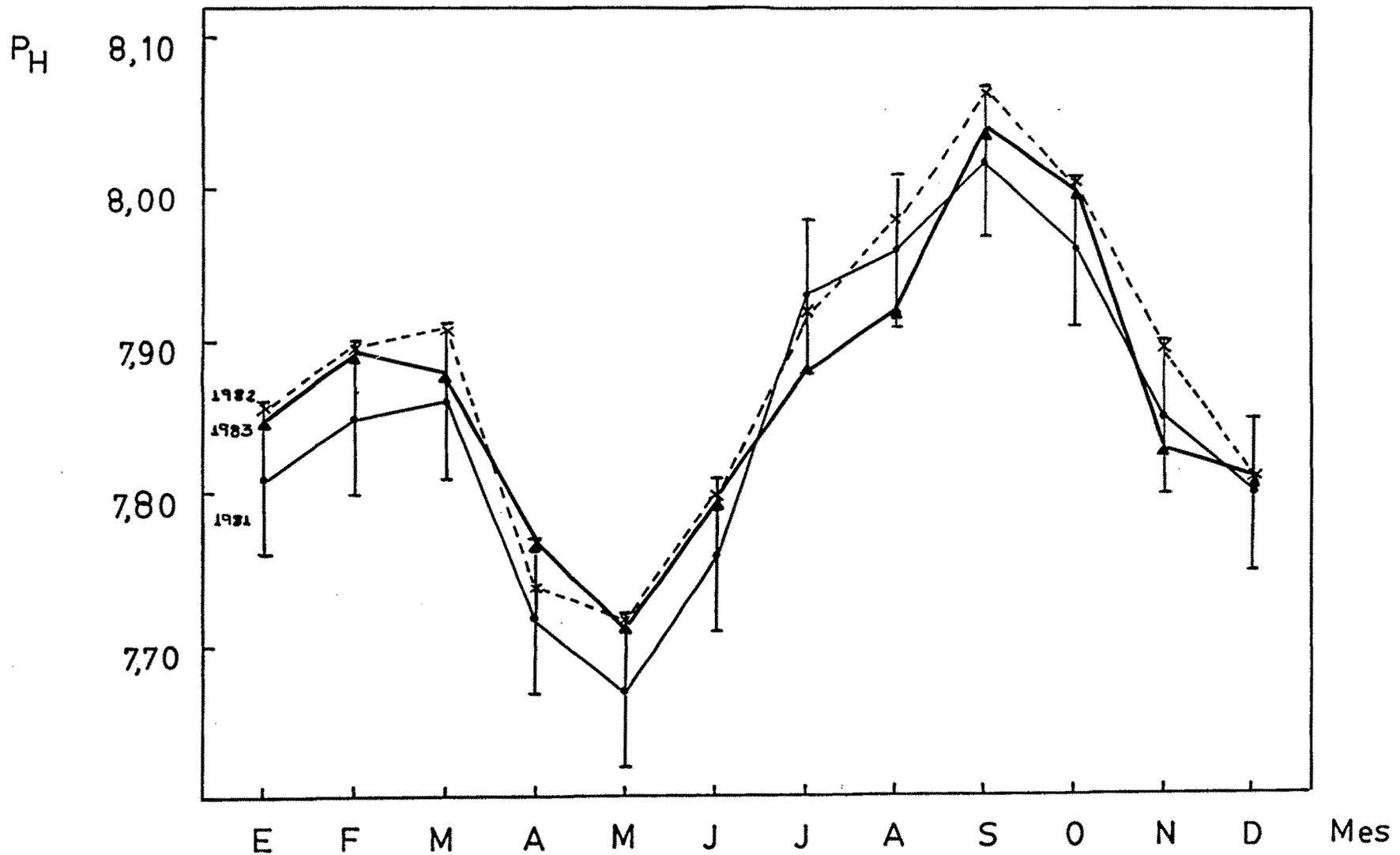


Figura 3.6.-

Variación del  $P_H$  del agua correspondiente al grupo A, recogida en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

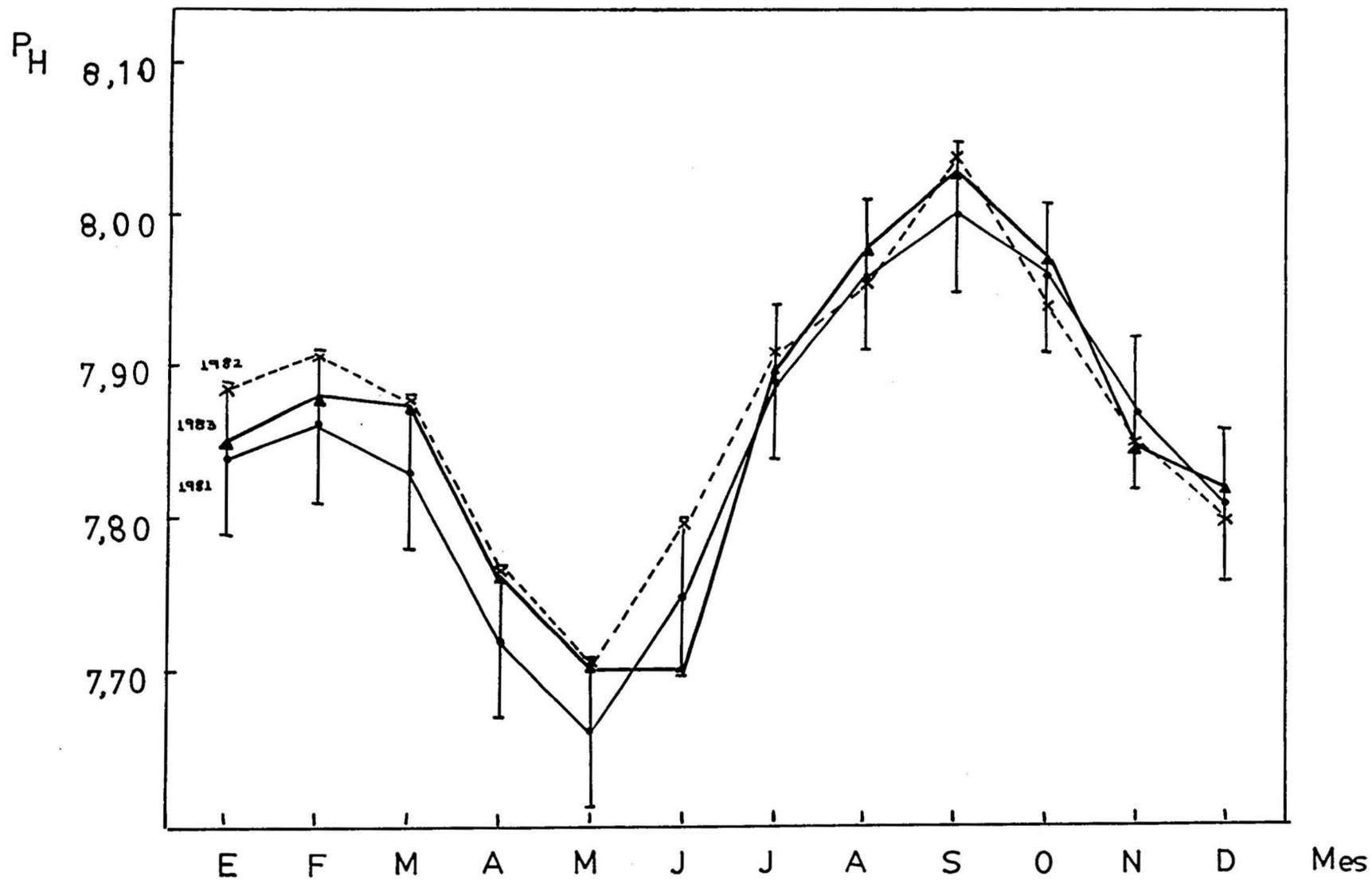


Figura 3.7.-

Variación del  $P_H$  del agua correspondiente al grupo B, recogida en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas.

En las Tablas 3.9 y 3.10 se muestran los valores medios mensuales de la concentración del ión calcio en las muestras de agua recogidas en la Sala de Polícromos correspondientes a los grupos A y B.

Como puede observarse la concentración del ión  $\text{Ca}^{+2}$  en ambos grupos es prácticamente constante, obteniéndose para el grupo A un valor medio de  $35'9 \pm 1'1$  mg./lt, y para el B de  $27'5 \pm 0'8$  mg./lt; resultado que coincide con el obtenido en la época en que estuvo cerrada la Cueva ( 5 ),(41).

Por el contrario, en medidas realizadas en agua de lluvia recogida en Altamira, no hemos encontrado valores apreciables de esta magnitud.

Como corresponde al pH de estas aguas no se observa en ellas, presencia del ión carbonato; encontrando sí cantidades importantes de ión bicarbonato.

En las Figuras 3.8 y 3.9 hemos representado los valores medios de la concentración de  $\text{CO}_3\text{H}^-$ , para el período de cierre de la Cueva ( 41 ), es decir de Enero de 1981 a Febrero de 1982, y para la etapa con visitantes correspondiente al período de Marzo de 1982 a Diciembre de 1983, para los grupos A y B de agua recogida en la Sala de Polícromos.

Tanto en el caso del grupo A como del B, observamos un máximo en el mes de Mayo, y un mínimo en Septiembre; en lógica contra posición con lo que ocurre con el pH.

Los valores medidos del ión bicarbonato, son prácticamente iguales, a los obtenidos en el año 1981, con la Cueva en régimen natural.

Tabla 3.9

Medida de la concentración del ión calcio,  $\text{Ca}^{+2}$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo A, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{Ca}^{+2}$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{Ca}^{+2}$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{Ca}^{+2}$ (mg/lt) año 1983
Enero	-	36'0 ± 2'0	35'9 ± 1'1
Febrero	-	35'8 ± 2'1	35'1 ± 1'1
Marzo	-	36'0 ± 1'1	35'8 ± 1'1
Abril	-	36'4 ± 1'1	37'2 ± 1'1
Mayo	-	36'3 ± 1'1	37'3 ± 1'1
Junio	-	35'6 ± 1'1	35'9 ± 1'1
Julio	-	36'0 ± 1'1	35'0 ± 1'1
Agosto	-	35'8 ± 1'1	35'3 ± 1'1
Septiembre	35'7 ± 2'0	35'9 ± 1'1	35'4 ± 1'1
Octubre	35'9 ± 2'1	35'6 ± 1'1	36'2 ± 1'1
Noviembre	36'2 ± 2'1	36'7 ± 1'1	36'1 ± 1'1
Diciembre	35'7 ± 2'1	34'9 ± 1'0	36'0 ± 1'1

Tabla 3.10

Medida de la concentración del ión,  $\text{Ca}^{+2}$ , en las muestras de agua correspondientes al grupo B, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Mes	Concentración $\text{Ca}^{+2}$ (mg/lt) año 1981	Concentración $\text{Ca}^{+2}$ (mg/lt) año 1982	Concentración $\text{Ca}^{+2}$ (mg/lt) año 1983
Enero	-	27'1 ± 1'4	27'3 ± 0'8
Febrero	-	27'1 ± 1'6	28'0 ± 0'8
Marzo	-	27'4 ± 0'8	28'4 ± 0'9
Abril	-	27'5 ± 0'8	28'3 ± 0'9
Mayo	-	27'4 ± 0'8	28'5 ± 0'9
Junio	-	27'1 ± 0'8	27'7 ± 0'8
Julio	-	27'0 ± 0'8	27'6 ± 0'8
Agosto	-	27'4 ± 0'8	27'7 ± 0'8
Septiembre	27'1 ± 1'3	26'8 ± 0'8	27'0 ± 0'8
Octubre	27'3 ± 1'5	27'0 ± 0'8	27'8 ± 0'8
Noviembre	27'1 ± 1'6	27'5 ± 0'8	26'9 ± 0'8
Diciembre	27'3 ± 1'5	27'5 ± 0'8	27'0 ± 0'8

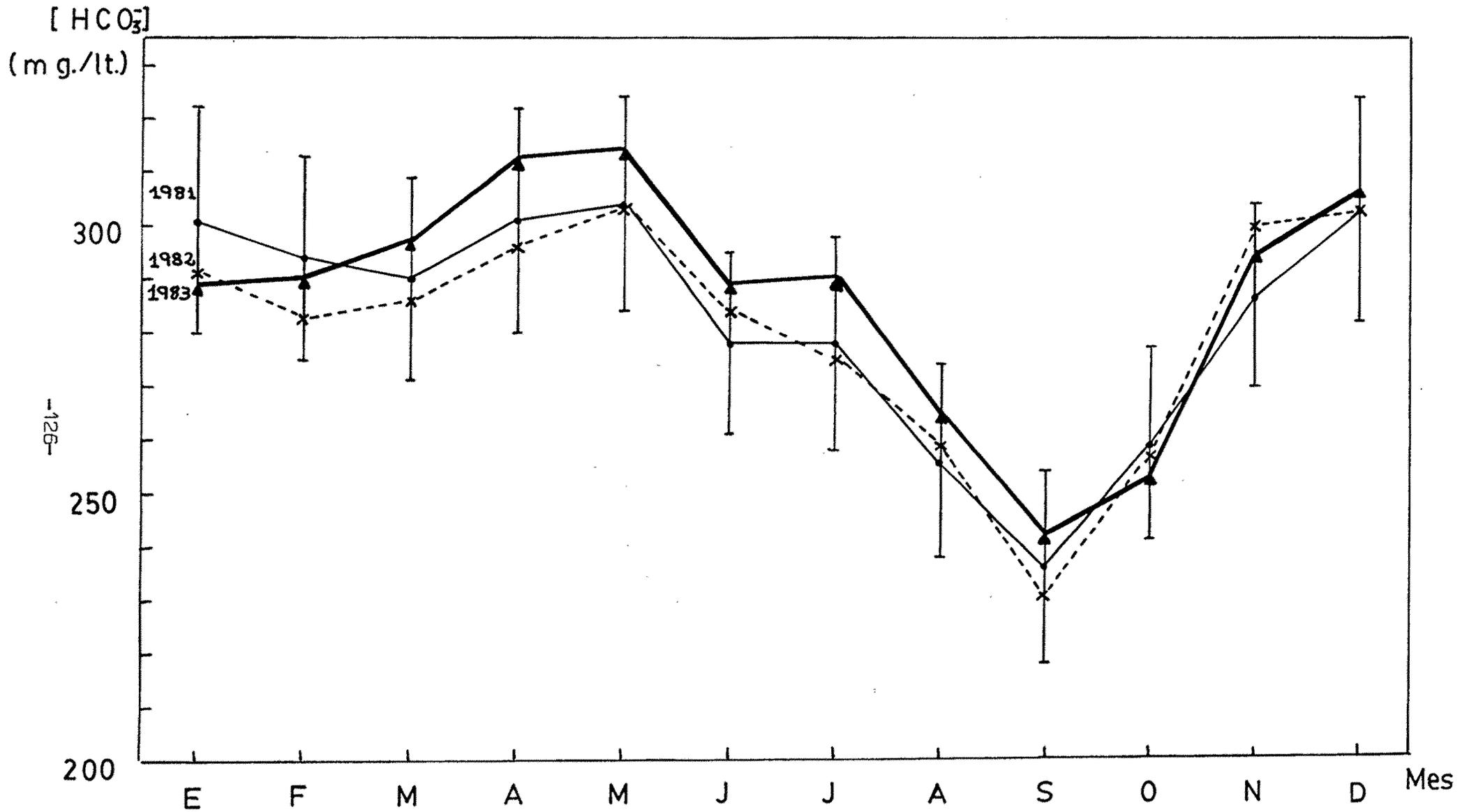


Figura 3.8.-

Variación de la concentración de bicarbonatos en el agua correspondiente al grupo A, recogida en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

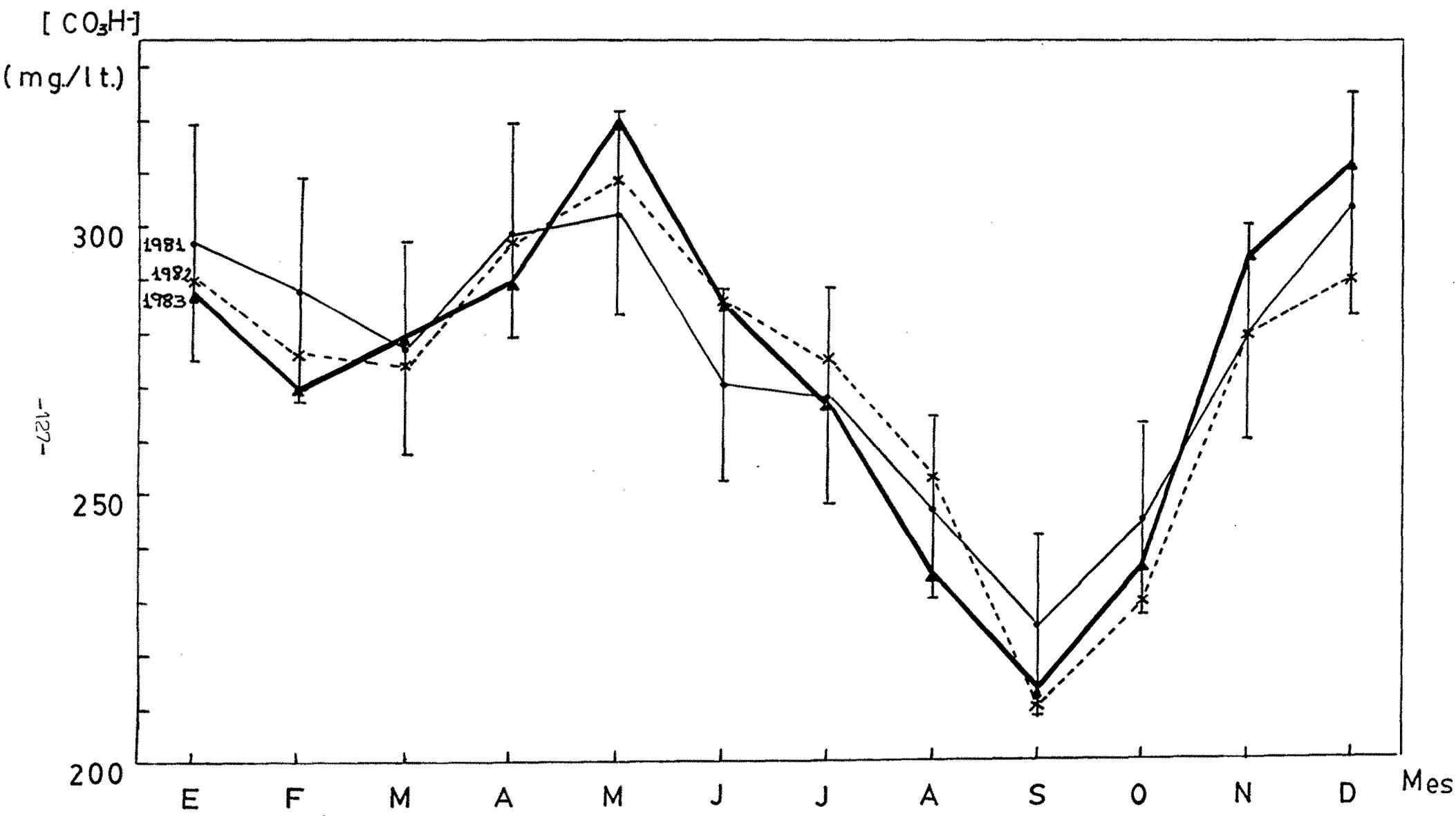


Figura 3.9

Variación de la concentración de bicarbonatos en el agua correspondiente al grupo B, recogida en la Sala de Polícromos en régimen natural (Enero 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

En el agua de lluvia de Altamira, hemos encontrado valores del orden de  $10^6 \pm 0^8$  mg./lt, para los bicarbonatos, siendo despreciable la concentración de carbonatos.

#### 3.4) - Discusión de los resultados

Por una parte analizaremos los resultados obtenidos para los iones cuya concentración es constante en el tiempo, y por otra abordaremos aquellos factores que intervienen en el equilibrio  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} - \text{CO}_3\text{Ca}$ .

En primer lugar vamos a analizar los iones cuya concentración permanece constante en el tiempo.

Con el fin de ver si realmente el régimen de visitas impuesto a la Sala ha influido en la composición de las aguas que bañan las pinturas, hemos comparado el primer periodo de medidas sin visitas con el último periodo idéntico en que hemos realizado análisis, con un intervalo de tiempo tal que se pueda reflejar la influencia de los visitantes en las características del agua que baña el techo de la Sala.

Concretamente, hemos escogido periodos de medida idénticos, con la finalidad de utilizar magnitudes comparables; siendo estos el segundo semestre del año 1981, correspondiente al cierre de la Cueva, y el segundo semestre del año 1983, correspondiente a la etapa de visitas.

En el caso de los iones  $\text{Ca}^{+2}$  y  $\text{Mg}^{+2}$ , el análisis lo hemos hecho, tomando el tercer cuatrimestre del año 1981, y el mismo periodo para el año 1983; ya que no poseemos datos de la concentración de estos en el agua, hasta Septiembre de 1981.

En la tabla 3.11. , se muestran los valores medios de los iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , para las dos etapas escogidas.

Tabla 3.11

Comparación de las concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$  en el agua que baña las pinturas, en régimen natural y en régimen de visitas.

Ión analizado	Concentración en mg/lt grupo A, en régimen natural.	Concentración en mg/lt grupo B, en régimen natural.	Concentración en mg/lt grupo A, en régimen de visitas.	Concentración mg/1 grupo B, en régimen de visitas.
$\text{Ca}^{+2}$	35'9 ± 1'1	27'2 ± 0'8	35'7 ± 1'1	27'2 ± 0'8
$\text{Mg}^{+2}$	51'3 ± 1'5	56'0 ± 1'7	51'8 ± 1'6	55'9 ± 1'7
$\text{SO}_4^{=}$	35'0 ± 1'6	48'8 ± 2'5	35'0 ± 1'6	48'6 ± 2'5
$\text{NO}_3^-$	10'5 ± 0'6	40 ± 3	10'6 ± 0'6	42 ± 3
$\text{Cl}^-$	13'7 ± 0'8	14'9 ± 0'8	13'8 ± 0'8	14'6 ± 0'8

Los resultados obtenidos en la tabla 3.11.-, demuestran:

1º) La constancia en el tiempo de las concentraciones de los iones  $\text{Ca}^{+2}$ ,  $\text{Mg}^{+2}$ ,  $\text{SO}_4^{=}$ ,  $\text{NO}_3^-$  y  $\text{Cl}^-$ , y por lo tanto de la fuerza iónica del agua, factor de gran importancia a la hora de evaluar el índice de saturación.

2º) Todo hace pensar que las condiciones hidrológicas a lo largo de dos años no se han modificado en absoluto, ya que el aporte de los iones citados sigue siendo el mismo.

3º) Por último, la constancia de estas concentraciones demuestra que el régimen de visitas impuesto no influye en los procesos de evaporación y condensación de la Sala de Polícromos.

Como ya hemos comentado previamente, el  $\text{P}_\text{H}$  y la concentración del ión  $\text{CO}_3\text{H}^-$  presenta un comportamiento periódico. Por esta razón, para comparar los datos obtenidos con visitantes, con los correspondientes al régimen natural, hemos calculado para los meses de Julio a Diciembre de los años 1981 y 1983, la dispersión de los valores medidos, es decir:

$$M = \frac{X_s - X_v}{X_v} \cdot 100$$

siendo:

$X_s$ , la concentración de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  (ó el  $\text{P}_\text{H}$ ) para un determinado mes, y para la etapa sin visitantes.

$X_V$  la concentración de  $\text{CO}_3\text{H}^-$  (ó el  $P_H$ ) para el mismo mes, y para la época con visitantes.

Este cálculo lo hemos realizado para cada mes, para las muestras de agua de los grupos A y B, y los resultados obtenidos los comparamos con el error de medida correspondiente al período en régimen natural, que designamos por la letra "N". De esta forma se tienen los valores que aparecen en las tablas 3.12, y 3.13, en ningún caso resulta mayor la dispersión de los valores medidos, que el error de medida; razón que nos permite pensar que el  $P_H$  y la concentración del ión  $\text{CO}_3\text{H}^-$  en el agua que baña las pinturas no se han modificado a consecuencia del régimen de visitas impuesto.

### 3.5) - Índice de saturación.

En las aguas que bañan las pinturas de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira, el grado de saturación del ión calcio (44):

$$\text{I.S.} = \log \frac{[\text{Ca}^{+2}]}{[\text{Ca}^{+2}_{\text{eq.}}]}$$

es uno de los factores que más influyen en los procesos de alteración superficial, siendo  $[\text{Ca}^{+2}_{\text{eq.}}]$  la concentración del ión  $\text{Ca}^{+2}$  que le correspondería tener en el equilibrio, y que podemos obtener mediante la ecuación siguiente (45):

$$\log [\text{Ca}^{+2}_{\text{eq.}}] = \log \left( \frac{K_c}{K_2 \cdot \gamma_{\text{Ca}^{+2}} \cdot \gamma_{\text{CO}_3\text{H}^-}} \right) - [\log [\text{CO}_3\text{H}^-] - P_H]$$

Tabla 3.12

Comparación del  $P_H$  del agua que baña las pinturas, en régimen natural y en régimen de visitas.

Mes	M(A) (%)	N(A) (%)	M(B) (%)	N(B) (%)
Julio	0'63	0'63	0'13	0'63
Agosto	0'51	0'63	0'25	0'63
Septiembre	0'25	0'62	0'37	0'63
Octubre	0'5	0'63	0'13	0'63
Noviembre	0'26	0'64	0'25	0'64
Diciembre	0'13	0'64	0'13	0'64

Tabla 3.13

Comparación de la concentración del ión  $\text{CO}_3\text{H}^-$  en el agua que baña las pinturas, en régimen natural y en régimen de visitas.

Mes	M(A) (%)	N(A) (%)	M(B) (%)	N(B) (%)
Julio	4'14	7'20	0'37	7'46
Agosto	3'39	7'03	5'11	6'88
Septiembre	2'48	7'63	6'13	7'56
Octubre	2'37	6'95	3'38	7'35
Noviembre	2'71	5'92	5'08	7'14
Diciembre	1'30	6'93	2'56	6'91

siendo (45):

$$K_c = \gamma_{CO_3^{-2}} \cdot \gamma_{Ca^{+2}} \cdot [CO_3^{-2}] \cdot [Ca^{+2}]$$

$$K_2 = \gamma_{H^+} \cdot \gamma_{CO_3^{-2}} \cdot \gamma_{CO_3H^-}^{-1} [H^+] [CO_3^{-2}] [CO_3H^-]^{-1}$$

Para las muestras de agua recogidas durante la época de visitas, se encuentra que el cociente  $[Ca^{+2}]/[Ca^{+2}_{eq}]$  es mayor que uno, y por lo tanto podemos afirmar que las aguas que bañan las pinturas son incrustantes, al igual que ocurría en el periodo sin visitas ( 5 ), (41).

En las figuras 3.10 y 3.11 hemos representado la variación del índice de saturación del agua, para los grupos A y B respectivamente, durante el periodo de Septiembre 1981 a Diciembre 1983. Como podemos observar en estas figuras encontramos, para ambos grupos, un máximo en el mes de Septiembre y un mínimo en Mayo.

El hecho de que el agua que baña el techo de la Sala siga siendo incrustante significa que existe una tendencia a la eliminación del  $CO_2$  disuelto, y por lo tanto a que se precipite el carbonato cálcico.

Los resultados obtenidos para el periodo con visitantes, que en ningún caso sobrepasaron las 42 personas en grupos de 6 personas permaneciendo 10 minutos en la Sala, coinciden con los correspondientes a la época de cierre de la Cueva ( 5 ), (41). Para ambos grupos de muestras de agua, observamos que en las épocas en que aumenta el  $P_H$ , disminuye la concentración de bicarbonatos, y aumenta el índice de saturación, lo cual se explica ya que al disminuir la concentración del ión  $CO_3H^-$ , disminuye el gas carbónico disuelto y por lo tanto la solubilidad de la calcita, pero la concentración de calcio permanece constante, por lo cual debe disminuir el índice de saturación.



Figura 3.10

Variación del índice de saturación, para las muestras de agua del grupo A recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Septiembre 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

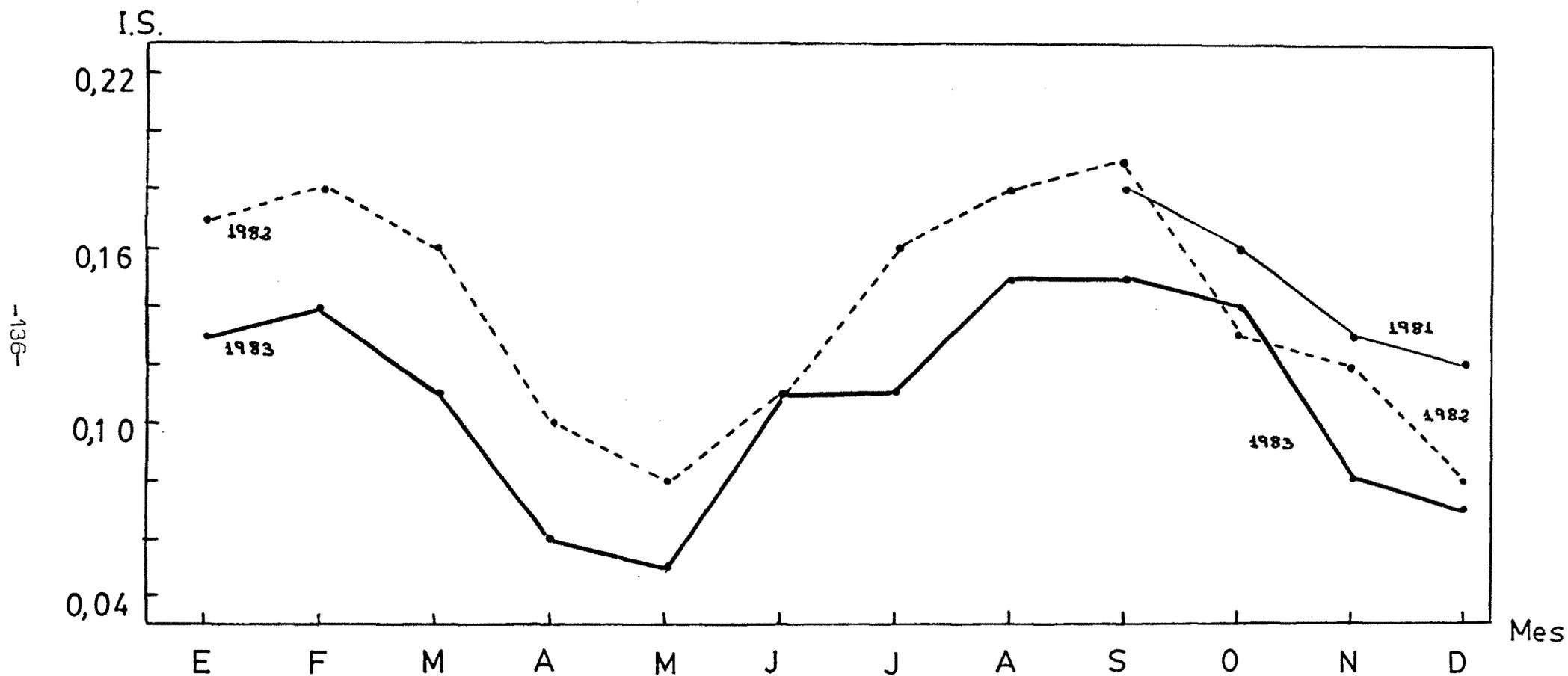


Figura 3.11

Variación del índice de saturación, para las muestras de agua del grupo B, recogidas en la Sala de Pinturas, en régimen natural (Septiembre 1981 - Febrero 1982) y en régimen de visitas (Marzo 1982 - Diciembre 1983).

Por el contrario, cuando la concentración de bicarbonatos aumenta y el  $P_H$  disminuye, aumenta el  $CO_2$  disuelto, y como la concentración de  $Ca^{+2}$  permanece constante, debe aumentar el índice de saturación.

CAPITULO 4.-

INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE PERSONAS EN LA HUME  
DAD DE LA SALA DE POLICROMOS DE LA CUEVA DE ALTA-  
MIRA.

- 4.1) - Introducción.
- 4.2) - Variación de la humedad de la Sala de Policromos por la presencia de visitantes.
- 4.3) - Tiempo para alcanzar la humedad saturante.
- 4.4) - Tiempos de recuperación de la humedad inicial.

#### 4.1) - Introducción

Como iremos viendo a lo largo de este trabajo, la Sala de Polícromos, debido a sus propias características, es extraordinariamente sensible a la presencia de personas.

Si tenemos en cuenta que una persona además de constituir una fuente de calor emite en una hora alrededor de 50 gramos de vapor de agua (7), (34), (35) puede comprenderse la importancia que supone la presencia de un pequeño grupo de personas en el interior de una Sala de tan reducidas dimensiones, pudiendo llegar a la humedad saturante, y a procesos de condensación, provocando la dilución de las aguas cálcicas que bañan las pinturas, ó por el contrario que a pesar de la emisión de vapor de agua por el cuerpo humano, la temperatura alcanzada por el aire provocase una disminución de la humedad relativa que pudiese producir la desecación de las mismas.

Además hay que tener en cuenta el hecho que una vez variadas las condiciones ambientales del ecosistema, la recuperación de los parámetros iniciales puede ser bastante lenta, pues la película de agua en el techo tarda mucho tiempo en renovarse, debido al escaso caudal diario que aflora (4), y por otra parte la débil ventilación de la Sala, dificulta que el aire de la misma retorne a las condiciones iniciales.

En este capítulo abordamos el estudio de las variaciones que experimenta la humedad, como consecuencia de la presencia de visitas, mediante un tratamiento en el que se consideran, tanto las condiciones de la Sala en el instante que comienza la visita y el número de visitantes, como el tiem

po de permanencia de los mismos y la cuantía de la emisión de agua, debida al metabolismo del cuerpo humano. También planteamos las ecuaciones que permiten calcular el tiempo que necesita la Sala de Polícromos para volver a las condiciones iniciales de humedad una vez que ha salido el último visitante .

#### 4.2) - Variación de la humedad de la Sala de Polícromos pr la presencia de visitantes.

En trabajos anteriores (5) (22) ha sido descrito ampliamente el comportamiento de la humedad, de las diferentes salas que componen la Cueva de Altamira, durante más de un año, utilizando las medidas realizadas con un psicrómetro de aspiración con errores del 1%, en ausencia de visitantes. En este estudio, las variaciones de la humedad a lo largo del año se obtuvieron de los valores medios mensuales, admitiendo estados supuestamente estacionarios, definidos por el equilibrio entre la producción de vapor de agua,  $\psi$ , por evaporación, y la disminución de la humedad por ventilación.

Estos estados estacionarios que permiten sacar medias mensuales de humedad, temperatura, concentración de  $\text{CO}_2$  etc., pueden admitirse porque experimentalmente se observa que las variaciones naturales de estas magnitudes son tan lentas, que se las puede considerar constantes durante un gran número de días.

Veamos con algo más de detalle el comportamiento de la humedad del aire de la Sala de Pinturas, sin personas en su interior.

Designaremos la humedad absoluta, en  $\text{g/m}^3$  de vapor de agua, por  $H_o$ .

En la Sala de Polícromos, en estado natural, sin visitantes, existe en cualquier instante un campo de temperaturas (18), definido por la temperatura del aire de la Sala,  $\theta_o$ , y por la temperatura,  $\theta_r$ , de las paredes rocosas que lo rodean.

Por otra parte, el flujo de agua entrante por el techo de la Sala mantiene la humedad relativa  $h_o$ , la cual podría llegar a ser saturante a la temperatura de la roca, si no fuese por la ventilación natural de la Sala,  $Q$ , la cual conocemos de forma cuantitativa por medio de las medidas de la concentración del gas radon en la Sala y en el Hall, como hemos visto en el capítulo 1.- de esta Memoria.

La humedad relativa,  $h_o$ , correspondiente a una presión parcial,  $P_o$ , del vapor de agua, vendrá determinada por el equilibrio dinámico originado como consecuencia de la evaporación del agua de la Sala, que va teniendo lugar mientras no se alcance la presión de vapor saturante,  $P_s$ , a la temperatura de la roca, y la ventilación del recinto que va renovando el aire del mismo.

Si tenemos en cuenta todos estos parámetros, tendríamos una extensa gama de estados estacionarios de nuestro ecosistema, motivo por el cual como ya hemos dicho, hemos abordado nuestro problema reduciendo todos los posibles estados mediante la hipótesis siguiente: "todos los parámetros del estado estacionario quedan definidos por los valores medios mensuales obtenidos de las medidas realizadas sobre las variables que lo determinan".

Por otra parte, como se expresó en el capítulo 2.-, hemos obtenido experimentalmente las variaciones de la tempe-

ratura del techo de la Sala de Pinturas (31) en presencia de un pequeño grupo de visitas, encontrando que estas no son significativas, lo cual simplifica nuestros planteamientos.

Consideraremos en primer lugar la producción de vapor de agua  $\varphi$ . Esta producción vendrá dada por la ecuación:

$$\varphi = \dot{H} \cdot V \quad (4.1)$$

siendo:

$V$ , el volumen de la Sala y

$\dot{H}$ , la variación que experimenta la humedad absoluta de la Sala en la unidad de tiempo.

La ecuación (4.1), representa entonces, el aumento que experimenta el vapor de agua contenido en la atmósfera de la Sala por unidad de tiempo, y evidentemente, al considerar estados estacionarios, ha de ser igual a la pérdida de masa de vapor, también por unidad de tiempo debida la ventilación natural de la Sala.

De acuerdo con los supuestos planteados en el estudio que hemos realizado sobre la ventilación, (capítulo 1.-) , el aire entrante, que renueva al de la Sala, procede del Hall (3), el cual posee una humedad absoluta,  $H_H$ , que para el modelo de intercambio de masas de aire considerado, supondremos que podemos identificar con el valor medio mensual correspondiente.

La producción de humedad,  $\varphi$ , por evaporación, es proporcional a la superficie interior  $A$  de la Sala, y a la diferencia entre la humedad saturante,  $H_S$ , a la temperatura de la roca, y a la humedad absoluta existente,  $H$ ; o sea:

$$\varphi = K_E \cdot A (H_S - H) \quad (4.2)$$

donde  $K_E$ , dependerá a su vez de la intensidad de la ventilación  $Q$ .

La ventilación de la Sala hace que el aire de la misma se va ya mezclando con el procedente del Hall, a razón de  $Q$  metros cúbicos de aire por hora, por lo que la variación  $\dot{H} \cdot V$  que experimenta en dicho tiempo la humedad absoluta de la Sala por este hecho, vendrá dado por :

$$V \cdot \dot{H} = Q (H_H - H) \quad (4.3)$$

En condiciones estacionarias el término de producción de humedad  $\Psi$ , debe ser igual al término de ventilación  $\dot{H} \cdot V$ , pero de signo opuesto, es decir:

$$\Psi = - \dot{H} \cdot V$$

De este modo, podríamos calcular la producción,  $\Psi$  para cada mes del año, en condiciones naturales, ó sea sin presencia de visitantes, a partir de los valores de la ventilación obtenidos en el capítulo 1.- de este trabajo.

Con este modelo, teniendo en cuenta la ecuación (4.3), puede calcularse la cantidad de agua que debe evaporarse por unidad de tiempo, para que se mantenga la humedad,  $H = H_0$ , del estado estacionario de la Sala de Polícromos.

Cuando se tiene en cuenta la expresión (4.2), como dentro del error de medida, siempre es  $H_s$  mayor ó igual que  $H_0$ , como se observa en la tabla 4.1, que transcribimos (5), (22), resulta la producción,  $\Psi$ , es siempre mayor ó igual que cero, es decir, se produciría principalmente evaporación cuando  $\Psi$  tenga un valor positivo, y pueden suponerse procesos de condensación cuando  $\Psi$  se anule. Sin embargo, este planteamiento

TABLA 4.1

Datos significativos para el cálculo del tiempo de recuperación de la humedad del aire de las Sala de Polícromos.

Mes	$H_S - H_O$ (g./m <sup>3</sup> )	$H_H - H_O$ (g./m <sup>3</sup> )	Q (m <sup>3</sup> /h)
Enero	0'56	-1'25	9 ± 4
Febrero	0'62	-1'17	10'3 ± 1'8
Marzo	0'42	-1'08	9 ± 3
Abril	0'46	-0'57	6'9 ± 2'4
Mayo	0'26	-0'36	1'1 ± 0'4
Junio	0'14	0'59	13 ± 3
Julio	0'05	0'58	20 ± 4
Agosto	-0'09	1'13	17 ± 4
Septiembre	0'01	1'52	18 ± 4
Octubre	0'20	1'19	16 ± 4
Noviembre	0'36	0'31	5'1 ± 1'3
Diciembre	0'53	-0'36	5'7 ± 2'4

to no resulta tan sencillo cuando hacemos uso de la ecuación (4.3), ya que  $\psi$  llega a tener valores negativos durante seis meses al año (veáse tabla 4.1) lo cual es incompatible con lo anterior. Esta incoherencia aparente se justifica si tenemos en cuenta que hemos supuesto un intercambio de aire directo entre el Hall y la Sala, cuando lo que ocurre es que la humedad del aire del Hall,  $H_H$ , se va modificando en el lento trayecto desde el Hall a la Sala de Pinturas. Ahora bién, a las diferencias  $H_S - H$ , medidas en la Sala de pue-  
de asignarseles un error de  $0'1 \text{ g/m}^3$ , resultando que en aque-  
llas épocas en las que  $H_S - H_O \leq 0'1$ , podrían tener lugar procesos de condensación. En los meses de verano, podemos su-  
poner que  $\psi = 0$ .

Por otra parte, si bién no podemos asignar valores precisos a la evaporación, si pueden establecerse valores límites, que vienen dados por el producto  $Q(H_O - H_H)$  para los meses de in-  
vierno.

Finalmente, tenemos que haciendo uso de los valores de  $\psi_{\text{máx}}$  en las situaciones bien conocidas, y, teniendo en cuenta que el término  $K_E$  que aparece en la ecuación (4.2) depende fuertemente de la ventilación  $Q$ , podemos estimar también los valores máximos de la evaporación para los meses restantes. En la tabla (4.2), aparecen los valores de  $\psi_{\text{máx}}$  estimados para todos los meses del año.

De esta forma obtenemos que la máxima evaporación tendría lugar en Febrero, con  $8'7 \text{ l/mes}$ .

En todos los cálculos hemos supuesto constante la temperatura del techo y de hecho esto es así, como hemos visto en el capítulo 2.- . La medida de la temperatura se ha realizado unos momentos antes de entrar las visitas en el recinto, e inmedia-  
tamente después de salir el último visitante .

TABLA 4.2

Producción de vapor de agua por evaporación en la Sala de Polícromos.

---

Mes	$\psi$ máx g./h
Enero	11'625
Febrero	12'051
Marzo	9'936
Abril	3'933
Mayo	0'378
Junio	3'752
Julio	0'0
Agosto	0'0
Septiembre	0'0
Octubre	6'560
Noviembre	3'672
Diciembre	3'591

---

Por otra parte, la temperatura del aire de la Sala, aumenta con el número de visitantes y el tiempo de permanencia de estos, de acuerdo con lo expuesto en el capítulo 2.-

Si elegimos el producto  $N.t$ , siendo  $N$  el número de visitantes, y  $t$  el tiempo que éstos permanecen en la Sala, suficientemente pequeño como para que no tenga lugar variación alguna de la temperatura del techo, resulta que el aumento de la temperatura del aire dará lugar a un aumento de la presión de vapor saturante,  $P_s$ , y por tanto a una mayor diferencia entre ésta y la presión de vapor existente,  $P$ ; lo cual en principio provocaría una mayor producción de vapor de agua,  $\varphi$ , y por tanto un aumento de la humedad absoluta del aire (46). Pues bien experimentalmente hemos encontrado que un aumento de la temperatura del aire, provocada por la entrada de visitantes a la Sala de Polícromos, va acompañado de una disminución de la humedad relativa,  $h$ , lo que quiere decir que evidentemente  $P_s$  ha aumentado, pero también que no por eso ha aumentado  $\varphi$ .

En la tabla 4.3, se exponen los valores de la humedad relativa encontrados experimentalmente, medidos como siempre con un psicrómetro de aspiración, sensibilidad del 1%.

Si observamos los datos de esta tabla, vemos que se demuestra lo dicho previamente, lo que equivale a admitir que la producción de vapor de agua no aumenta con la rapidez suficiente, en los cortos intervalos de tiempo considerados, como para compensar el déficit de humedad relativa originado por el aumento de temperatura. A partir de estos resultados, podemos considerar que la producción de vapor de agua,  $\varphi$ , se mantiene constantemente igual al valor inicial.

TABLA 4.3

Número de Personas	Tiempo de Permanencia (minutos)	Antes de la visita				Después de la visita				$\Delta$ h (%)
		$\theta_o$ (°C)	$P_o$ (mm Hg)	$P_s$ (mm Hg)	h (%)	$\theta_o$ (°C)	$P_o$ (mm Hg)	$P_s$ (mm Hg)	h (%)	
5	10	13'3	11'34	11'46	98'9	13'6	11'44	11'69	97'9	-1'0
		13'4	11'41	11'53	98'9	13'6	11'44	11'69	97'9	-1'0
10	10	13'4	11'29	11'53	97'9	13'6	11'33	11'64	97'3	-0'6
		13'3	11'34	11'46	98'9	13'7	11'41	11'72	97'4	-1'5
15	10	13'4	11'29	11'53	97'9	13'8	11'47	11'84	96'9	-1'0
20	10	13'3	11'34	11'46	98'9	13'6	11'60	11'91	97'4	-1'5
		13'4	11'29	11'53	97'9	13'5	11'46	11'84	96'8	-1'1

Desde el punto de vista del deterioro de las pinturas es muy importante que la velocidad de evaporación del agua que baña las pinturas, se mantenga constante, ya que si esto no fuese así podría ocurrir que un aumento de la velocidad de evaporación diese lugar a una precipitación sobre la roca, mayor que la natural, de sustancias disueltas en el agua, al aumentar su concentración como consecuencia de la disminución de la cantidad de disolvente (47). Por otra parte, se tiene que la presencia de un gran número de personas en la Sala podría provocar un aumento progresivo y prolongado de la evaporación, dando lugar a una disminución de la humedad del techo lo suficientemente intensa como para llegar a conseguir un cambio de sus propiedades elásticas, existiendo la posibilidad de agrietamiento y posterior desescamación por desecación.

#### 4.3) - Tiempo para alcanzar la humedad saturante.

Nuestro objetivo es ahora, calcular el tiempo que ha de transcurrir para que un grupo de N personas presentes en la Sala de Polícromos, aumenten la humedad absoluta inicial de la Sala, hasta alcanzarse la humedad saturante a la temperatura de la roca.

Una persona elimina vapor de agua a razón de 0'07% de su peso corporal por hora, en una proporción de aproximadamente un tercio a través de la piel y dos tercios por la respiración.-

A efectos de cálculo nosotros tomamos como dato la emisión de  $50 \text{ gr.h}^{-1}$  de vapor de agua por persona, como valor medio (7), (34).

Ya hemos visto que la presencia de visitantes en la Sala como consecuencia de la elevación de temperatura disminuye la humedad relativa, pero, aún si admitimos que la evaporación,  $\varphi$ , es constante, la humedad absoluta va aumentando evidentemente

con la permanencia de los visitantes en el recinto. A este aumento sólo podría oponerse la evacuación que sufre el aire húmedo debido a la ventilación, siempre y cuando el aire que lo sustituye y que vendría en principio del Hall, tenga menor humedad absoluta.

Si admitimos, como ya hemos comentado previamente, que la temperatura de la roca no varía con la presencia de personas, podemos calcular, para todos los meses, el tiempo  $t_o$  que ha de transcurrir para que  $N$  personas aumenten la humedad absoluta de la Sala,  $H_o$ , hasta llegar a la saturación  $H_s$ , a la temperatura de la roca  $\theta_r$ . Por tanto, dado que el déficit de humedad viene dado por la diferencia  $(H_s - H_o)$ gr./m<sup>3</sup>, y ya que el volumen de la Sala es de 326 m<sup>3</sup>, se requerirá que las  $N$  personas exhaleen 326  $(H_s - H_o)$  gramos de vapor de agua. De esta forma el tiempo en horas que deberá permanecer este grupo en la Sala, para que su atmósfera alcance la humedad saturante a la temperatura de la roca, vendrá dado por la expresión:

$$t_o = \frac{326(H_s - H_o)}{50.N} \text{ horas} \quad (4.4)$$

A la hora de calcular el tiempo  $t_o$ , que se tardaría en alcanzar la saturación, no hemos tenido en cuenta para nada la ventilación, pues la humedad absoluta  $H_o$  de la Sala de Pinturas es debida precisamente al equilibrio entre la evaporación del agua y la ventilación.

Una vez que la atmósfera de la Sala se encontrase saturada de vapor de agua, la permanencia de los visitantes en el recinto daría lugar a la condensación de todo el vapor que fuese

exhalando. Es precisamente en este momento cuando aparece el peligro para las pinturas, pues se podría originar una dilución iónica en la disolución acuosa que baña las pinturas, alterando de esta forma sus propiedades. En particular disminuiría el índice de saturación (41).

El primer paso que hemos realizado, ha sido el evaluar el orden de magnitud del tiempo,  $t_0$ , necesario para que las N personas presentes en la Sala provoquen la saturación de la humedad del aire. Hemos elegido para ello un grupo de veinte personas en la Sala durante los meses de Febrero y Septiembre, que corresponden precisamente a valores extremos de la diferencia de humedades ( $H_S - H_0$ ), dadas en la Tabla 4.1. Resulta así, que para el mes de Febrero la saturación de la humedad ambiente se alcanzaría en 12'13 minutos, mientras que en Septiembre la saturación tendría lugar al cabo de 11'7 segundos, solamente.

Estos resultados nos indican, que la humedad de saturación en la Sala, se alcanza en cortos intervalos de tiempo, debido a la presencia humana.

Como hemos visto en el capítulo 3.- en las aguas de la Cueva de Altamira se ha observado en todos los casos que:  $[Ca^{+2}] > [Ca^{+2}_{eq}]$  (41). por lo que  $I.S > 0$ , por lo que se trata de un equilibrio metaestable.

La condensación producida por el vapor que van exhalando los visitantes, podría dar lugar en un determinado momento a que si el índice de saturación  $I.S = 0$ ; a partir de ese momento, si continúa el proceso de condensación, al ser  $[Ca^{+2}] < [Ca^{+2}_{eq}]$

podría comenzar la disolución del contenido cálcico del techo policromado, lo cual constituye uno de los posibles procesos de deterioro de las pinturas.

Podría ocurrir que el vapor de agua expelido por los visitantes se difunda por la atmósfera de la Sala, condensándose directamente sobre el techo sin que toda la masa de aire del recinto haya alcanzado la humedad saturante a la temperatura de la roca. Esto podría suceder debido a que el vapor de agua eliminado por el cuerpo humano sale a la temperatura de este y, por lo tanto como el aire de la Sala de Polícromos se encuentra a una temperatura de unos  $14^{\circ}\text{C}$ , (18) tenderá a ascender hacia el techo, comportándose éste como pared fría, lo que daría lugar a condensaciones locales que no hemos considerado, ya que el modelo exige, en todo momento, homogeneidad en el aire de la Sala.

#### 4.4) - Tiempos de recuperación de la humedad inicial.

Independientemente del número de personas  $N$ , que estén en la Sala de Polícromos y del tiempo  $t$  que estos permanezcan en el interior de la Sala, una vez que ha salido el último visitante y de acuerdo con las condiciones impuestas por nuestro modelo, la Sala presentará las características siguientes:

a.-) poseerá una humedad absoluta,  $H_o$ , que como máximo será igual a la humedad saturante,  $H_s$ , a la temperatura de la roca.

b.-) La temperatura del techo permanecerá constante.

c.-) La película de agua que baña el techo, no modifica su espesor medio, que depende del caudal entrante y de la

gravedad, que son constantes, y de factores tales como la cohesión, adherencia, etc. que apenas se habrán modificado.

d.-) La producción,  $\varphi$ , (gr./h) de vapor de agua, por evaporación en la superficie de la roca, se mantiene constante.

e.-) La temperatura del aire habrá aumentado.

f.-) La humedad relativa del aire  $h_o$ , habrá disminuido alcanzando un valor final  $h_f$ .

g.-) La ventilación,  $Q$ , de la Sala, evidentemente, permanecerá constante, tanto antes como después de las visitas, y mientras duran éstas.

h.-) El aire de la Sala se va renovando constantemente con el del Hall, el cual tiene una humedad absoluta  $H_H$ .

Admitiendo que estos son los datos que caracterizan el estado de nuestro ecosistema, calcularemos el tiempo de recuperación de la humedad,  $\tau_H$ , definido como el tiempo necesario para que la humedad absoluta, que ha adquirido la Sala como consecuencia de la presencia de visitas, recupere el valor inicial, una vez haya salido el último visitante suponiendo que dicha recuperación es debida al intercambio de masas de aire con el Hall.

La ecuación de evolución de la concentración,  $H$ , de vapor de agua de la Sala, la obtendremos considerando que la variación que experimenta en el tiempo la cantidad total de vapor  $V \cdot \dot{H}$ , depende de la producción  $\varphi$  y de la variación de la humedad debida a la ventilación  $Q(H - H_H)$  que se establece entre el Hall y la Sala, en la forma:

$$V \cdot \dot{H} = \varphi - Q(H - H_H) \quad (4.5)$$

en donde  $\varphi$  viene definido por (4.2).

Antes de la visita, hemos considerado un estado estacionario de, humedad absoluta  $H_o$ , por lo que  $\dot{H} = 0$ , y por tanto:

$$K.A(H_s - H_o) = Q(H_o - H_H) \quad (4.6)$$

despejando K.A, se obtiene:

$$K.A = Q \frac{(H_o - H_H)}{(H_s - H_o)} \quad (4.7)$$

que sustituimos en la ecuación (4.5) resultando:

$$V \cdot \dot{H} = Q \frac{(H_o - H_H)}{(H_s - H_o)} (H_s - H) - Q(H - H_H) \quad (4.8)$$

de donde:

$$dt = - \frac{V}{Q} \frac{(H_s - H_o)}{(H_s - H_H)} \cdot \frac{dH}{(H - H_o)} \quad (4.9)$$

ecuación que nos proporciona el tiempo de recuperación, si la integramos entre el tiempo  $t_R$ , que es el tiempo que tarda la Sala en volver a tener su humedad inicial  $H = H_i$ ; y el tiempo  $t_F$ , correspondiente al final de la visita, para el que se verifica que  $H = H_f$ . De esta forma obtenemos:

$$\tau_H = t_R - t_f = - \frac{V}{Q} \frac{(H_s - H_o)}{(H_s - H_H)} \ln \frac{(H_f - H_o)}{(H_i - H_o)} \quad (4.10)$$

Ahora bién, esta expresión la hemos obtenido basandonos en la ventilación "directa" de la Sala por el aire del Hall, y hemos comentado al comienzo de este capítulo que la ecuación (4.6) no es aplicable directamente, pues si bién el primer término de esta expresión nunca es negativo (excepto en Agosto, pero con valores del mismo orden que el error de medida); sin embargo el segundo resulta menor que cero para seis meses del año por este motivo debemos sustituir la diferencia  $H_S - H_H$  por un término en el que intervengan los valores  $H_S$  y  $H_O$ , y los valores de  $\varphi$  que obtuvimos previamente.

En efecto, de la ecuación (4.3) podemos deducir fácilmente que:

$$Q(H_S - H_H) = Q(H_S - H_O) + \varphi \quad (4.11)$$

por lo cual la expresión (4.10) podemos escribirla:

$$\tau_H = \frac{V(H_S - H_O)}{Q(H_S - H_O) + \varphi} \ln \frac{(H_f - H_O)}{(H_i - H_O)} \quad (4.12)$$

En nuestro planteamiento hemos supuesto que la visita ha saturado la atmósfera, por lo que  $H_f = H_S$ . Por otra parte, la humedad inicial  $H_i$  debe ser igual a  $H_O$ , evidentemente, lo que nos impide utilizar la expresión (4.12) ya que el tiempo se haría infinito; sin embargo consideraremos que se ha llegado a recuperar la Sala cuando se verifique:  $H_i = H_O + 0.1$  ya que el error absoluto en la medida de la humedad, es de  $0.1 \text{ g/m}^3$ . Así pues, la expresión práctica que utilizamos para evaluar el tiempo de recuperación, una vez se ha alcanzado la humedad saturante, vendrá dada de la forma siguiente:

$$\tau_H = \frac{326(H_S - H_O)}{Q(H_S - H_O) + \varphi} \ln 10(H_S - H_O) \text{ horas} \quad (4.13)$$

Utilizando esta expresión, hemos calculado los tiempos de recuperación de la humedad  $H_o$ , para cada mes, suponiendo que la humedad final es igual a la humedad saturante a la temperatura de la roca,  $H_f = H_s$ , y haciendo uso de los valores de las Tablas, 4.1 y 4.2.

En la Tabla 4.4, aparecen los resultados obtenidos, en donde podemos observar que durante ocho meses al año la humedad se recupera en un tiempo inferior a un día, sin embargo existen cuatro meses en los cuales el tiempo de recuperación es más largo.

#### 4.5) - Variación del índice de saturación, como consecuencia de la condensación del vapor de agua por la presencia humana en la Sala.

En el apartado 4.3 de este capítulo hemos obtenido una expresión que nos permite calcular el tiempo que debe permanecer un grupo de N personas en la Sala, para que se alcance la humedad saturante a la temperatura de la roca. A partir de ese momento, la permanencia de los visitantes en la Sala, daría lugar a la condensación del vapor de agua que vayan exhalando, con la consiguiente variación del índice saturación del agua que baña el techo policromado.

Evidentemente si existe condensación, el volumen del agua adherido al techo de la Sala aumentará, lo que provocará una disminución de la concentración de los iones calcio disueltos  $[Ca^{+2}]$ .

Nuestro objetivo es estudiar, la máxima variación que puede experimentar la concentración de  $Ca^{+2}$ , para que el índice de saturación no se anule. Para ello introducimos la hipótesis siguiente; como el agua tiene carácter incrustante, se veri-

TABLA 4.4

Tiempos medios de recuperación,  $\tau_H$ , de la humedad de la Sala de Polícromos para los diferentes meses del año

---

Mes	Tiempo de Recuperación (horas)
Enero	18'68
Febrero	20'00
Marzo	14'24
Abril	32'20
Mayo	124'41
Junio	2'73
Julio	0'00
Agosto	0'00
Septiembre	0'00
Octubre	4'59
Noviembre	27'29
Diciembre	43'58

---

fica que la concentración de los iones calcio disueltos,  $[Ca^{+2}]$ , es mayor que la correspondiente a la del equilibrio, por lo que no es posible que se disuelva más carbonato cálcico, con lo cual atendiendo al equilibrio  $CO_2 - H_2O - CO_3Ca$  existente (41), la concentración de iones bicarbonato permanecerá constante, por tanto  $pH = cte$ , y  $[Ca^{+2}_{eq}] = cte$ .

Resulta entonces que la variación del índice de saturación se deberá exclusivamente a la variación que sufra la concentración de los iones calcio disueltos.

Teniendo en cuenta esta hipótesis, analizaremos la variación máxima que puede experimentar el cociente:

$$y = \frac{[Ca^{+2}]}{[Ca^{+2}_{eq}]} \quad (4.14)$$

La concentración de  $Ca^{+2}$  puede expresarse:

$$[Ca^{+2}] = \frac{n}{V} \quad (4.15)$$

siendo,  $n$  el número de equivalentes-gramo de  $Ca^{+2}$ , y  $V$  el volumen en que están disueltos.

Haciendo uso de las expresiones (4.14) y (4.15), resulta:

$$\begin{aligned} \frac{dy}{dV} &= \frac{1}{[Ca^{+2}_{eq}]} \cdot \frac{d[Ca^{+2}]}{dV} = \frac{-n}{[Ca^{+2}_{eq}] V^2} = \\ &= - \frac{[Ca^{+2}]}{[Ca^{+2}_{eq}]} \frac{1}{V} \end{aligned} \quad (4.16)$$

por tanto:

$$\frac{dy}{y} = - \frac{dV}{V} \quad (4.17)$$

integrando se tiene:

$$\ln \left| \frac{y}{y_0} \right| = - \ln \left| \frac{V_0 + 50.N.t.10^{-3}}{V_0} \right| \quad (4.18)$$

donde los límites de integración, tienen el significado siguiente:

$y_0$  , es el valor inicial del cociente  $[Ca^{+2}]/[Ca^{+2}_{eq}]$

$y$  , es el valor del cociente  $[Ca^{+2}]/[Ca^{+2}_{eq}]$ , al cabo de un tiempo  $t$ , en horas, de permanencia de un grupo de  $N$  personas en la Sala.

$V_0$  , volumen inicial de la película de agua que baña el techo de la Sala, en lts.

$\frac{50.N.t}{1000}$ , volumen de la película de agua que baña el techo policromado, en lts. , al cabo de un tiempo  $t$ , en horas, de permanencia de los visitantes en la Sala.

Sin más que sustituir los límites de integración en (4.18), se tiene:

$$\frac{y}{y_0} = \frac{V_0}{V_0 + 50.N.t. 10^{-3}} \quad (4.19)$$

La ecuación (4.19), nos permite conocer la variación del cociente  $y = [\text{Ca}^{+2}]/[\text{Ca}^{+2}_{\text{eq}}]$ , con el tiempo de permanencia de un grupo de N personas en la Sala, suponiendo que su presencia sólo dá lugar a la condensación del vapor de agua que exhalen.

A medida que el tiempo de permanencia de los visitantes, t, aumente, "y", cada vez se hará más pequeño, hasta que llegue un momento en que  $y = 1$ , en cuyo caso resultaría que  $[\text{Ca}^{+2}] = [\text{Ca}^{+2}_{\text{eq}}]$  y por tanto el índice de saturación se anularía, con lo cual las aguas que bañan el techo de la Sala de Pinturas se convertirían en agresivas.

Llamamos,  $\tau$ , al tiempo necesario para que un grupo de N personas en la Sala, den lugar a que,  $y=1$ .

A partir de la ecuación (4.19) obtenemos:

$$\tau = \frac{1000 V_0 (y_0 - 1)}{50.N} \quad (4.20)$$

Calculamos  $\tau$ , para el caso de un grupo de veinte personas presentes en la Sala, en los meses de Mayo y Septiembre que poseen índices de saturación muy distintos.

No conocemos el espesor de la película de agua que baña el techo de la Sala, por lo cual vamos a suponer que este es de  $50 \mu$ , para poder realizar un cálculo estimativo de  $\tau$ .

Entonces,  $V_0 = 50 \cdot 10^{-6} \cdot 430 = 0.0215 \text{ m}^3 = 21.5 \text{ lts}$ .

Haciendo uso de los valores medios calculados del índice de saturación en el capítulo 3.- y del valor de  $V_0$ , resulta que en Mayo  $\tau = 12.19$  horas para las muestras de aguas del grupo A y  $\tau = 3.47$  horas para las muestras de agua correspondientes

al grupo B; y en Septiembre se tiene que  $\bar{z} = 24'47$  horas si consideramos las aguas del grupo A, y  $\bar{z} = 10'3$  horas para las del B.

Evidentemente en el caso estudiado se ha considerado una situación extrema, ya que si se tiene en cuenta la ventilación, la evaporación y el espesor límite de la capa de agua de las rocas, estos tiempos resultarían mayores.

CAPITULO 5.-

INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE PERSONAS EN LA CON-  
CENTRACION DE ANHIDRIDO CARBONICO DE LA SALA DE  
POLICROMOS DE LA CUEVA DE ALTAMIRA.

- 5.1) - Introducción.
- 5.2) - Variación del contenido de gas carbónico en la Sala de Pinturas por efecto de la presencia de seres humanos. Tiempos de recuperación del CO<sub>2</sub>.
- 5.3) - Influencia de la variación de la concentración de anhídrido carbónico, por la presencia de visitantes en la Sala de Pinturas, en el índice de saturación del agua.
- 5.4) - Influencia simultánea en el índice de saturación de los procesos de condensación de vapor de agua, y aumento de la presión parcial del gas carbónico, por la presencia de personas.

### 5.1) - Introducción

Admitiendo, como ya hemos citado, estados estacionarios de la Sala de Polícromos diremos que el aire de la Sala se caracteriza por poseer una concentración media constante de anhídrido carbónico, diferente para cada mes del año, encontrándose un valor máximo en Mayo, y un mínimo en Septiembre (3), (5), (17).

Ahora bien, sabemos que una persona por término medio exhala aproximadamente 17 litros de anhídrido carbónico a la hora (7), (34), este hecho dará evidentemente lugar a que la presión parcial del  $\text{CO}_2$  en el aire de la Sala vaya aumentando progresivamente con el tiempo de permanencia de un grupo de personas en el interior de la misma.

Este aumento del contenido de gas carbónico en la atmósfera de la Sala, en virtud de la ley de Henry, incrementaría la concentración de este gas en las aguas incrustantes que bañan las pinturas, pudiendo llegar a convertirlas en agresivas, es decir, capaces de atacar el soporte cálcico de los pigmentos. De aquí se deduce la nociva influencia que puede tener un constante y excesivo aumento de la presión parcial del  $\text{CO}_2$  del aire de la Sala de Pinturas, provocado por una afluencia masiva de visitantes, máxime cuando, como hemos visto, la renovación del aire de la Sala se desarrolla muy lentamente.

Teniendo en cuenta el dato correspondiente a la exhalación de  $\text{CO}_2$  para la respiración humana tendremos que para un grupo de  $N$  personas que permaneciesen en la Sala un tiempo de  $t$  horas, resultaría que, si no consideramos la ventilación, el aumento de la concentración de gas carbónico ,

expresado en tanto por ciento en volumen vendría dado por la ecuación:

$$[ \text{CO}_2 ] = \frac{17 \cdot N \cdot t}{V} \cdot 100 \% \quad (5.1)$$

en donde V, es el volumen del recinto.

En el estudio que se realizó del microclima de la Sala en ausencia de visitantes (3), (5), (17), se obtuvo un valor medio de  $\text{CO}_2$  de 0'57% en volumen, en el mes de Mayo. Si suponemos por ejemplo un grupo de veinte personas presentes en la Sala durante una hora, estas darán lugar a un aumento de la concentración del anhídrido carbónico que alcanzará finalmente un valor de 0'67%. Resultado que no se modificaría apenas al considerar que simultáneamente la Sala se está ventilando ya que para este mes la renovación del aire resulta ser de  $Q = 1'05 \text{ m}^3/\text{h.}$ , lo que quiere decir además que esta concentración persistiría mucho tiempo ya que se necesitarían aproximadamente 13 días para sustituir por completo el aire de la Sala. Por lo tanto, el contenido de  $\text{CO}_2$  que alcanza la Sala por la presencia de personas, no sólo depende de su número y tiempo de permanencia, sino también del contenido inicial de este gas en la Sala y de la intensidad de la ventilación, que son diferentes según la época del año que se considere.

En este capítulo exponemos en primer lugar el estudio realizado sobre la influencia que tiene la ventilación en el contenido de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de la Sala de Polícro

mos tanto mientras estan las personas en su interior, como cuando ya han salido, y el aire se va renovando hasta que adquiere la concentración que existía antes de la entrada de los visitantes, es decir, hemos determinado los tiempos de recuperación.

Por otro lado abordamos la influencia de la variación del contenido de gas carbónico, en el índice de saturación, ya que un aumento de  $\text{CO}_2$  en la Sala puede provocar que este índice se anule, e incluso se haga negativo, es decir que las aguas que bañan las pinturas pasen de poseer un carácter incrustante, a ser agresivas.

Finalmente analizamos la variación del índice de saturación, como consecuencia de la doble influencia que tiene la presencia humana, en la humedad y en el contenido de  $\text{CO}_2$  de la Sala.

#### 5.2) - Variación del contenido de gas carbónico en la Sala de Pinturas por efecto de la presencia de seres humanos. Tiempos de recuperación del $\text{CO}_2$ .

Como ya hemos comentado en la introducción de este capítulo, la presencia de un grupo de personas en la Sala dará lugar a un aumento de la concentración de anhídrido carbónico en el aire de esta, alcanzándose al finalizar la visita una determinada concentración  $C_f$ . Evidentemente la ventilación,  $Q$ , del recinto disminuirá la presión parcial  $P_{\text{CO}_2}$  del carbónico hasta alcanzar nuevamente la concentración inicial  $C_i$ , recuperándose así las condiciones de partida.

Teniendo en cuenta la emisión de  $\text{CO}_2$  por la respiración

humana, hemos representado en la figura 5.1, la variación que experimentaría la concentración del  $\text{CO}_2$  de la Sala de Pinturas con el tiempo de permanencia de un grupo de veinte personas, para los dos meses en que la concentración de este gas presenta valores iniciales extremos y no se tiene en cuenta la ventilación. Concretamente en el mes de Mayo, que corresponde a una concentración máxima de  $\text{CO}_2$ , se tiene un valor inicial del 0'57% en volumen, y en Septiembre, que por el contrario tenemos un valor mínimo, la concentración inicial del  $\text{CO}_2$  resulta ser de 0'16% (3), (5), (17).

Si observamos dicha figura, encontramos que al cabo de dos horas, por ejemplo, la atmósfera de la Sala alcanza una concentración de  $\text{CO}_2$  del 0'78% en Mayo y del 0'37 en Septiembre, valores evidentemente altos, y si además se tiene en cuenta que la ventilación natural de la Sala es débil, resulta que se tardará mucho tiempo en recuperar las condiciones iniciales.

Nuestro objetivo es ahora establecer una expresión matemática que nos permita calcular el tiempo de recuperación del gas carbónico, que lo definimos, al igual que como hemos hecho con la humedad y la temperatura, como el tiempo necesario para que la concentración de anhídrido carbónico en el aire de la Sala, adquirida como consecuencia de la permanencia en ella de un grupo de N personas, alcance su valor inicial.

Para llevar a cabo nuestro estudio, hemos realizado con el anhídrido carbónico, un planteamiento análogo al hecho con la humedad, en el capítulo 4.- .

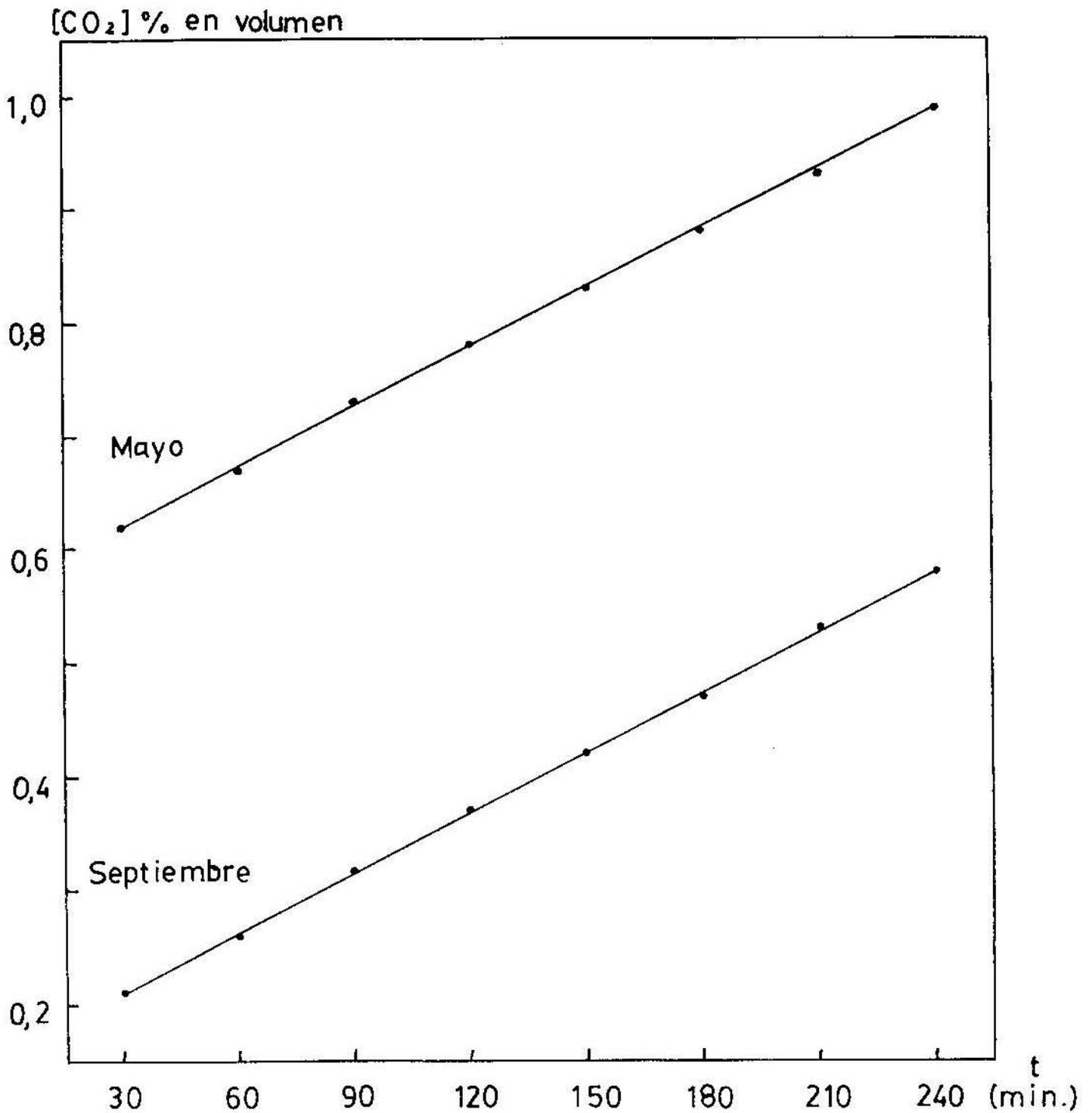


Figura 5.1

Variación de la concentración de anhídrido carbónico,  $[CO_2]$ , (%en volumen) en la Sala de Polícromos, con el tiempo de permanencia,  $t$ , (minutos), de un grupo de 20 personas, para los meses de Mayo y Septiembre, sin tener en cuenta la ventilación.

La variación total de  $\text{CO}_2$  en la Sala será igual al aumento que experimenta el anhídrido carbónico por el aporte de agua más el debido a la presencia humana, menos el que se pierde por ventilación, ó sea:

$$v \frac{dc}{dt} = \varphi_H \cdot 100 + \varphi_C - Q(c - c') \quad (5.2)$$

en donde:

$$c = \frac{v_{\text{CO}_2}}{v_{\text{sala}}} \cdot 100, \text{ es la concentración en \% en volumen de } \text{CO}_2.$$

$$\varphi_H = N \cdot 17(\text{lbs./h.}), \text{ es la producción humana de gas carbónico.}$$

$c'$ , es la concentración de anhídrido carbónico en el recinto con el que se intercambia el aire de la Sala, que como ya hemos indicado a lo largo de este trabajo puede ser el Hall ó el exterior. En nuestro caso particular hemos considerado que el intercambio de masas de aire tiene lugar con el exterior a la Cueva, pues no disponemos de datos suficientes sobre la concentración de gas carbónico en la atmósfera del Hall. Ahora bien, esto no presenta un gran inconveniente, pues el Hall intercambia aire con el exterior, por lo tanto los resultados que obtenemos de esta forma pueden considerarse válidos, aunque sean una aproximación.

$\varphi_C$ , es el aporte de  $\text{CO}_2$  por el agua, que podemos expresar lo de la forma siguiente:

$$\varphi_C = \alpha (c^{\text{máx}} - c)$$

es decir, que es proporcional en cada instante, a la diferencia entre la concentración máxima de carbónico observada, y la concentración del gas existente en dicho instante. Como no conocemos la constante  $\alpha$ , haremos la siguiente consideración: si no hay personas presentes en la Sala, la ecuación (5.2) resulta:

$$v \frac{dC}{dt} = \varphi_C - Q(C - C^{\text{ext}}) \quad (5.3)$$

en estado estacionario, se verifica en cada instante que la concentración de carbónico será la inicial,  $C = C_0$ , y  $\frac{dC}{dt} = 0$ , con lo cual:

$$\alpha (C^{\text{máx}} - C_0) = Q(C_0 - C^{\text{ext}})$$

de donde:

$$\alpha = Q \frac{(C_0 - C^{\text{ext}})}{(C^{\text{máx}} - C_0)}$$

luego:

$$\varphi_C = Q \left( \frac{C_0 - C^{\text{ext}}}{C^{\text{máx}} - C_0} \right) (C^{\text{máx}} - C) \quad (5.4)$$

Sustituyendo ahora (5.4) en (5.2), se tiene:

$$v \frac{dC}{dt} = \varphi_H \cdot 100 + \frac{Q(C_0 - C^{\text{ext}})}{(C^{\text{máx}} - C_0)} (C^{\text{máx}} - C) - Q(C - C^{\text{ext}}) \quad (5.5)$$

ecuación que podemos expresar de la forma:

$$\frac{dC}{dt} = a C + b \quad (5.6)$$

donde:

$$\left\{ \begin{array}{l} a = \frac{Q (C^{\text{ext}} - C^{\text{máx}})}{V (C^{\text{máx}} - C_0)} \\ b = \frac{100 \varphi_H}{V} + \frac{QC_0}{V} \frac{(C^{\text{máx}} - C^{\text{ext}})}{(C^{\text{máx}} - C_0)} \end{array} \right.$$

integrando, obtenemos:

$$C = (C_0 + \frac{b_0}{a}) e^{at} - \frac{b}{a} \quad (5.7)$$

el término  $b_0$ , tiene la expresión siguiente:

$$b_0 = \frac{QC_0}{V} \frac{(C^{\text{máx}} - C^{\text{ext}})}{(C^{\text{máx}} - C_0)}$$

Para la utilización de la ecuación (5.7), hemos de tener en cuenta, que la concentración de  $\text{CO}_2$  en el exterior a la Cueva es del orden del 0'03% (19) y que la concentración máxima observada de gas carbónico en la Sala de Polícromos es del 0'85% (46).

En la figura 5.2, hemos representado la variación de la concentración de  $\text{CO}_2$  en el aire de la Sala debida a la presencia de un grupo de 20 personas, teniendo en cuenta la ventilación natural de la misma, para los dos meses en que la concentración de gas carbónico toma valores extremos, Mayo y Septiembre. Si comparamos estos resultados con los obtenidos a partir de la ecuación (5.1) vemos que en el Mes de Mayo son prácticamente iguales, sin embargo en Septiembre son inferiores, esto se debe a que la ventilación,  $Q$ , en estos dos meses es muy diferente, siendo en el segundo caso 18 veces mayor que en el primero.

Nuestro siguiente paso, es determinar el tiempo de recuperación del  $\text{CO}_2$ . Evidentemente, al abandonar las visitas la Sala de Pinturas, la producción humana  $\varphi_H$  es cero, con lo cual los términos  $a$  y  $b$ , que aparecen en la ecuación (5.7) toman la forma siguiente:

$$a = \frac{Q (c^{\text{ext}} - c^{\text{máx}})}{V (c^{\text{máx}} - c_o)}$$

$$b = \frac{Q c_o (c^{\text{máx}} - c^{\text{ext}})}{V (c^{\text{máx}} - c_o)}$$

que llevados a la ecuación (5.6):

$$\frac{dc}{dt} = \frac{Q}{V} \frac{(c^{\text{ext}} - c^{\text{máx}})}{(c^{\text{máx}} - c_o)} c + \frac{Q}{V} c_o \frac{(c^{\text{máx}} - c^{\text{ext}})}{(c^{\text{máx}} - c_o)} \quad (5.8)$$

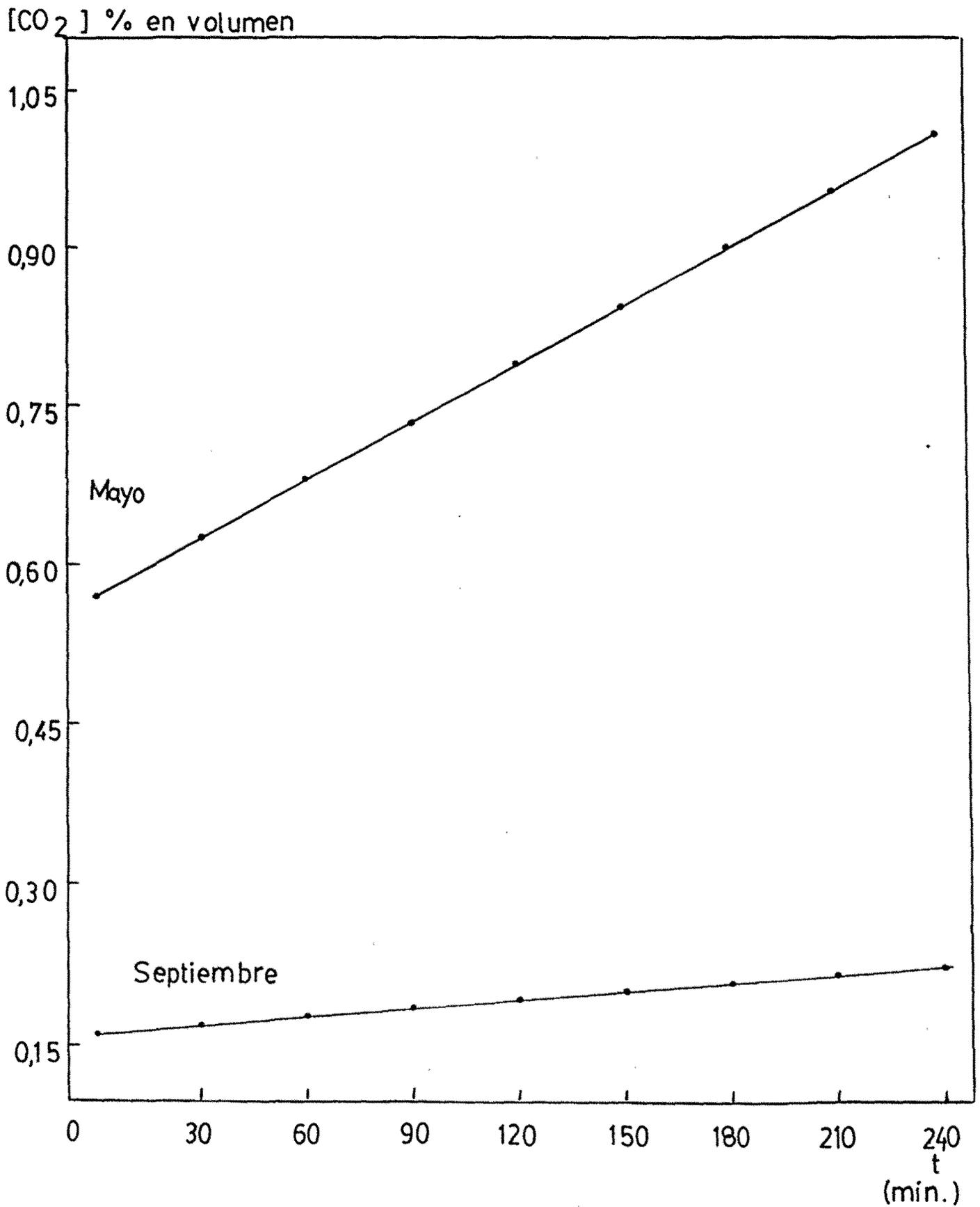


Figura 5.2

Variación de la concentración de anhídrido carbónico, [CO<sub>2</sub>], (% en volumen) en la Sala de Policromos, con el tiempo de permanencia, t, (minutos), de un grupo de 20 personas, para los meses de Mayo y Septiembre, teniendo en cuenta la ventilación natural de la Sala.

de donde:

$$dt = - \frac{V (C^{\text{máx}} - C_o)}{Q (C^{\text{máx}} - C^{\text{ext}})} \frac{dC}{(C - C_o)} \quad (5.9)$$

La ecuación (5.9) la integramos entre el tiempo  $t_R$  transcurrido para que la concentración del anhídrido carbónico vuelva a su valor inicial  $C = C_i$ , y el tiempo  $t_f$ , en el que la concentración de  $\text{CO}_2$  en la Sala ha alcanzado el valor  $C = C_f$ , al finalizar la visita. De esta forma tenemos para el tiempo de recuperación del anhídrido carbónico, la ecuación siguiente:

$$\tau_C = - \frac{V (V^{\text{máx}} - C_o)}{Q (C^{\text{máx}} - C^{\text{ext}})} \ln \frac{C_f - C_o}{C_i - C_o} \quad (5.10)$$

Para la utilización de la ecuación (5.10), consideramos que la Sala ha recuperado su concentración inicial de gas carbónico cuando se verifique que:  $C_i - C_o = 0'03\%$ , que corresponde precisamente al error con que se ha medido la concentración de  $\text{CO}_2$ . De esta forma, obtenemos finalmente para  $\tau_C$ :

$$\tau_C = \frac{397'56}{Q} (0'85 - C_o) \ln 33'3 (C_f - C_o) \quad (5.11)$$

Siguiendo con nuestro ejemplo, calculamos el tiempo de recuperación,  $\tau_C$ , del  $\text{CO}_2$ , para el caso de un grupo de veinte personas que permanecen un tiempo,  $t = 2$  horas,

en la Sala, en los meses de Mayo y Septiembre. En estas condiciones, teniendo en cuenta las ecuaciones (5.10) y (5.11), y los datos de ventilación obtenidos en el capítulo 1.-, resulta que el tiempo de recuperación del gas carbónico en Mayo es de 202'087 horas y en Septiembre de 59'04 minutos.

En resumen, hemos obtenido en nuestro estudio una ecuación que nos permite calcular el efecto que produce la presencia de personas en la concentración de anhídrido carbónico en la atmósfera de la Sala. Hemos observado como evidentemente cabía esperar, que los efectos que produce un determinado grupo de personas en la concentración de  $\text{CO}_2$  de la Sala de Pinturas no sólo depende del número de personas que constituyen el grupo y del tiempo que dura la visita, sino de los niveles que alcanza el gas carbónico dadas las condiciones iniciales de la Sala, diferentes para cada mes del año.

### 5.3) - Influencia de la variación de la concentración de anhídrido carbónico, por la presencia de visitantes en la Sala de Pinturas, en el índice de saturación del agua.

Nuestro objetivo ahora es conocer como influye, el aumento de la concentración de  $\text{CO}_2$  por la presencia humana, en el índice de saturación del agua que baña las pinturas. Evidentemente un aumento de la presión parcial del  $\text{CO}_2$  en el aire de la Sala, provocará a su vez un aumento del  $\text{CO}_2$  molecular en el agua que baña el techo del recinto, lo cual dará lugar a una variación del índice de saturación. Como hemos visto en el capítulo 3.-, de esta Memoria, las

aguas recogidas en los diferentes puntos de goteo del techo policromado tienen carácter incrustante, es decir que  $[Ca^{+2}] > [Ca^{+2}_{eq}]$ . El problema que analizamos ahora es ver si la permanencia de un grupo de  $N$  personas, puede dar lugar a que este hecho no siga verificándose, y el agua se convierta en agresiva, con el consiguiente daño a las pinturas.

Al igual que como hicimos cuando estudiamos la variación del índice de saturación con la humedad en presencia de seres humanos, tomamos como hipótesis de partida que el índice de saturación nunca se anule.

Si las aguas son incrustantes se verificará  $[CO_2^{mol}] < [CO_2^{mol}_{eq}]$ , y el pH permanece constante. (39).

Si sólo suponemos que existe una variación de la presión parcial del  $CO_2$ , evidentemente no existirá variación alguna del volumen de la película de agua que baña el techo de la Sala,  $\Delta V = 0$

Por otra parte, como la concentración del ión calcio permanece constante, se verificará que  $[CO_2] = cte.$

Como consecuencia de la presencia de personas en la Sala se disolverá más  $CO_2$  en el agua, con lo cual tendrá lugar un aumento de la concentración de iones bicarbonato. Ahora bien, como  $pH = cte.$ , los hidrogeniones generados reaccionan con el ión carbonato presente, con lo cual hay un aumento de  $CO_3H^-$  y para mantener el equilibrio, se verificará evidentemente que  $[Ca^{+2}_{eq}]$  variará, (39), por tanto la variación del índice de saturación será de bida exclusivamente a una variación de la concentración de los iones calcio en el equilibrio. De esta forma se tiene:

$$\left| \frac{\Delta [Ca^{+2}]_{eq}}{[Ca^{+2}]_{eq}} \right| \left| \frac{\Delta [CO_3H^-]}{[CO_3H^-]} \right| = \left| \frac{\Delta [CO_3^{-2}]}{[CO_3^{-2}]} \right| = \left| \frac{\Delta P_{CO_2}}{P_{CO_2}} \right| \quad (5.12)$$

El siguiente paso, es determinar cual ha de ser la variación máxima de la presión parcial del gas carbónico en la atmósfera de la Sala, para que dé lugar a una variación de la concentración del ión calcio en el equilibrio, tal que el índice de saturación pase de poseer un valor inicial:

$$I.S = \log \frac{[Ca^{+2}]}{[Ca^{+2}]_{eq}} = \log y_0$$

a tomar el valor 0.

Por tanto, la variación máxima que podría admitirse para  $y = [Ca^{+2}]/[Ca^{+2}]_{eq}$  que llegue a valer la unidad, es decir:

$$\left| \frac{\Delta [Ca^{+2}]_{eq}}{[Ca^{+2}]_{eq}} \right| = \frac{\frac{1}{y} - 1}{\frac{1}{y}} = \epsilon_C \quad (5.13)$$

por lo que, en virtud de (5.12):

$$\left| \epsilon_C \cdot P_{CO_2} \right| = \left| \Delta P_{CO_2} \right| \quad (5.14)$$

Teniendo en cuenta las expresiones (5.13) y (5.14), así como el valor de los índices de saturación del agua calculados en el capítulo 3.-, podemos conocer la concentración máxima que puede alcanzar el  $\text{CO}_2$ , como consecuencia de la presencia humana en la Sala.

Si suponemos un grupo de veinte personas en la Sala de Pinturas en los meses de Mayo y Septiembre, resulta que la variación de  $[\text{CO}_2]$  en el aire de la Sala tal que el índice de saturación del agua se hace nulo, es de 0'32% si se consideran las aguas del grupo A y de 0'09% si se tienen en cuenta las correspondientes al grupo B, en el mes de Mayo; y en Septiembre resulta que la variación de la concentración de anhídrido carbónico es de 0'18% para las aguas del grupo A y de 0'077% para las del B.

Llevando estos valores a la ecuación (5.7), se tiene que el tiempo de permanencia en la Sala de un grupo de veinte personas, tal que dé lugar a que el índice de saturación de las aguas que bañan el techo policromado se anule, es de 2'9 horas para el agua del grupo A y de 48'9 minutos para las del B, en el mes de Mayo. En Septiembre obtenemos que este tiempo es de 11'3 horas, si se consideran las aguas del grupo A y de 4'8 horas si se tienen en cuenta las del grupo B.

Hemos ensayado un sencillo modelo aproximado de tipo aditivo, que tiene en cuenta la acción simultánea del aumento de la concentración del  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de la Sala y la condensación del vapor de agua sobre las superficies de la misma, durante la permanencia de un grupo de personas en su interior. Un análisis, bajo

las condiciones más desfavorables, suponiendo que durante la visita no se modifica la ventilación, que el equilibrio entre el  $\text{CO}_2$  disuelto en el agua y la presión parcial del  $\text{CO}_2$  en el aire se establece de forma inmediata, que no hay evaporación, que no aumenta el goteo al aumentar el espesor de la película de agua y que tiene lugar una mezcla uniforme del gas carbónico en el aire de la Sala, nos indica que un grupo de 20 personas podría reducir a cero el índice de saturación del agua en pocas horas, en algunas ocasiones en 30 minutos, y que la variación de la concentración de  $\text{CO}_2$  tiene una influencia predominante.

C O N C L U S I O N E S

## Conclusiones

En esta Memoria se presentan los estudios que hemos realizado, para determinar la influencia de la presencia de personas en las características microclimáticas y procesos físico-químicos de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira. De ellos pueden obtenerse una serie de conclusiones, unas que atañen concretamente a los métodos de trabajo utilizados y resultados obtenidos y otras descriptivas, de carácter general.

A continuación pasamos a exponer estas conclusiones:

- 1º) Se ha puesto a punto una técnica de medidas de la concentración de Rn-222 en el aire del interior de la Cueva, que no perturba al ecosistema, que es perfectamente reproducibile y que da valores con un error inferior al 15%.
- 2º) Con este dispositivo para la medida de la concentración de Rn-222, se han determinado los niveles de exposición radiactiva a que se hallan sometidas las personas según su tiempo de permanencia en la Cueva, comparándolos con los que legalmente son admisibles.

En general se han encontrado muy altos niveles de Rn-222 en la Sala de Polícromos, que no se deben a altos contendidos de uranio y radio en las rocas que constituyen las paredes, el techo y el suelo, sino al gran espesor de los mismos y a la escasa ventilación de la Sala.

En determinadas épocas del año la permanencia de varias horas en el interior de la Sala, caso de guías y arqueólogos, podría superar la dosis permisible por la legislación.

3º) En base a la utilización de esta técnica de medida de radon se ha elaborado un método que permite evaluar la ventilación de la Sala de Pinturas, en  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , determinando la concentración de gas Rn-222 en el Hall de la Cueva y en la Sala, entre los que se supone un intercambio convectivo de aire.

En general la renovación del aire de la Sala de Pinturas es muy lenta, presentandose una situación de aire prácticamente estanco en el mes de Mayo, cuando se precisan 300 horas en renovar todo el aire. La ventilación resulta ser máxima en el mes de Julio, que llega a alcanzar los 20  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ .

4º) Los resultados obtenidos del cálculo de la ventilación de la Sala de Pinturas han quedado confirmados plenamente después de una sistemática campaña de medidas de otros índices cualitativos como son las variaciones periódicas que experimenta en el tiempo la diferencia de temperaturas entre las superficies rocosas y el aire de la Sala, así como con los cambios anuales que sufren la humedad y la concentración del anhídrido carbónico en el interior de la misma.

5º) Se ha desarrollado un modelo termodinámico para interpretar las modificaciones que experimenta el campo de temperaturas de la Sala de Polícromos a consecuencia de la presencia de personas en su interior. Por otra parte, a través de regímenes de visitas controladas, con distintos índices de ocupación, se determinaron experimentalmente las alteraciones que sufría el campo de temperaturas, y los resultados se compararon con las predicciones de nuestro modelo.

En general, la evolución temporal del campo de temperaturas predicha por el modelo desde que entra el grupo de personas hasta que, una vez desocupada la Sala, se recupera la situación inicial, coincide bastante bien con los datos experimentales, siendo estos algo superiores a los teóricos en el tramo ascendente de la curva e inferiores en el tramo descendente, excepto en el caso de grupos con pocas personas, lo que se explica al considerar la velocidad de homogeneización térmica del aire de la Sala . En cualquier caso las discrepancias están dentro de los errores de medida.

Las comprobaciones experimentales realizadas permiten afirmar que el modelo interpreta la evolución temporal del campo de temperaturas logrando describir el comportamiento térmico del recinto cualquiera que sea el número de visitantes.

- 6º) Durante 21 meses en los que la Cueva era diariamente visitada, hemos analizado una muestra mensual de agua de cada uno de los nueve puntos de goteo del techo de la Sala de Polícromos, y hemos comparado los resultados obtenidos con los que se obtuvieron cuando la Cueva no era visitada, utilizando los mismos métodos de análisis.

La comparación de los análisis de las aguas de goteo, con y sin visitas, demuestra que la presencia de personas no influye en las concentraciones de sulfatos, nitratos, cloruros, ión calcio e ión magnesio, que también son constantes y del mismo orden que las obtenidas cuando la Cueva no era visitada.

- 7º) las aguas de goteo, siempre alcalinas, presentan las mismas variaciones periódicas del pH, con el sistema de visitas utilizado que sin visitas, alcanzando valores máximos en Septiembre y en Mayo y lo mismo ocurre para la concentración de bicarbonatos.
- El índice de saturación en calcita de las aguas que bañan el techo ha resultado ser el mismo, con estos regimenes de visitas que sin la presencia de personas, experimentando el carácter incrustante de las aguas las mismas variaciones temporales.
- 8º) Del estudio que presentamos se deduce que el microclima de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira es extraordinariamente sensible a la presencia de personas en su interior.
- 9º) Después de experimentar durante 2 años seguidos diferentes regimenes de visita a la Cueva, puede afirmarse que los índices de ocupación que se han venido ensayando no influyen en los procesos de deposición de carbonatos, ni en el de disolución de la roca soporte de las pinturas, verificandose en todos los casos que al comenzar las visitas de cada día, la Sala ha recuperado el campo de temperaturas, la humedad y la concentración de anhídrido carbónico que tendría si no fuese visitada.
- 10º) Se ha realizado un estudio especial de las variaciones que experimenta la humedad natural de la Sala de Pinturas a lo largo de un año, en ausencia de personas, sobre la hipótesis de un determinado flujo de agua entrante por las fisuras del techo de la Sala y suponiendo un equilibrio dinámico entre la evaporación del agua y la ventilación del recinto.
- Con este modelo se ha evaluado la variación anual que

experimentan tanto el flujo máximo de agua en la Sala, como la evaporación así como las épocas en las que, existe condensación.

- 11<sup>o</sup>) Admitiendo estados estacionarios en el ecosistema, caracterizados por un campo de temperaturas definido, una determinada humedad relativa, una presión parcial del vapor de agua, una presión saturante a la temperatura de las paredes y una evaporación y ventilación dadas, se ha determinado el tiempo de permanencia en la Sala de cualquier grupo de personas para que el recinto alcance la humedad saturante, habida cuenta de la eliminación metabólica del vapor de agua por el cuerpo humano.
- 12<sup>o</sup>) En base al tratamiento citado en el apartado anterior, se ha evaluado la variación temporal que experimentaría el índice de saturación del agua que baña las pinturas en función del tiempo de permanencia en la Sala de cualquier número de personas, y en que momento estas aguas pasarían a ser agresivas, suponiendo un determinado flujo de agua entrante y para espesores determinados de la película de agua que se desliza por el techo.
- 13<sup>o</sup>) Se ha elaborado un modelo que permite calcular el tiempo necesario para que la Sala recupere la humedad inicial, una vez alterada esta por la presencia humana.
- 14<sup>o</sup>) Teniendo en cuenta la exhalación de anhídrido carbónico que se produce en la respiración humana y los valores medios mensuales de la concentración del  $\text{CO}_2$  en la Sala de Polícromos, se ha determinado la variación que experimenta la presión parcial de este gas con el tiempo para cualquier número de personas.

Realizando un planteamiento similar al utilizado en el caso de la humedad se ha obtenido una ecuación que permite el cálculo del tiempo de recuperación de la concentración inicial del anhídrido carbónico de la Sala.

B I B L I O G R A F I A

## Bibliografía

- (1) BREUIL, H.; OBERMAIER, P.  
The cave of Altamira at Santillana del Mar.  
Ministerio de Cultura, Madrid (1935).
  
- (2) JORDA, F.  
El gran techo de Altamira y sus santuarios superpuestos.  
Actas del Symposium Internacional sobre Arte Prehistórico.  
(Altamira Symposium), pp. 277-289. Publ. Ministerio de  
Cultura, Madrid (1981).
  
- (3) VILLAR, E.; et al.  
Microclima de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira.  
Real Academia de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales  
de Madrid. Tomo LXXVI, cuaderno 3º, pp 686 (1982).
  
- (4) VILLAR, E.  
Proyecto científico-técnico elaborado para la conservación  
de las pinturas de la Cueva de Altamira.  
C.I.M. de Altamira. Monografía nº 5 (1981).
  
- (5) FERNANDEZ, P. L.  
Estudio de las características microclimáticas y cromáticas  
de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira, como  
ecosistema natural.  
Tesis Doctoral. Facultad de Ciencias. Universidad de Santander (1983).

- (6) VILLAR,E.; et al.  
Informe-Resumen sobre la situación de los estudios que se realizan para la conservación de las pinturas de Altamira.  
Informe presentado al Ministerio de Cultura. Santander (1983).
- (7) MARION,J.B.  
General Physics with Bioscience Essays.  
Ed. John Wiley & Sons (1979).
- (8) JHON A.S. ADAMS; WAYNE M. LOWDER.  
The natural Radiation Environment  
Published William Marsh Rice University by The University of Chicago Press, Chicago, Illionois, U.S.A (1964).
- (9) BERNAD L. COHEN  
Radon: characteristics, natural ocurrence, technological enhancement, and health effects.  
Progress in Nuclear Energy, Vol.4, pp. 1-24 (1979).
- (10) PEARSON,J.E.  
Soil concentrations of emanating Ra - 226 and the emanation of Rn-222 from soils and plants.  
Tellus XVIII, 653 (1966).
- (11) CRONTHAMEL  
Gamma-ray spectrometry of rocks.  
Elsevier Publishir Company. Amsterdam (1970).

- (12) FERNANDEZ, P.; et al.  
Medida del contenido de radio en tierras.  
Anales de Física. En prensa (1983).
- (13) CHRISTIAN E. JUNGE.  
Air Chemistry and Radioactivity.  
Academic Press (1963).
- (14) C.MICHAEL LEDERER; JACK M. HOLLANDER; ISADORE PERLMAN.  
Table of isotopes.  
General Manager of the U.S. Atomic Energy Commission. (1967).
- (15) WIKENING, M.H.; WATKINS, D.E.  
Air exchange and Rn-222 concentrations in the Carlsbad  
Caverns.  
Health Physics 31, 139 (1976).
- (16) WILDINING, M.H.  
Radon levels and ventilation effects in underground enclosu  
res.  
Radon Workshop, Health and Safety laboratory, U.S. Energy  
Research, New York (1977).
- (17) VILLAR, E.; et al.  
Flujos de materia en la Cueva de Altamira.  
Monografía nº 9 del C.I.M. de Altamira. Ministerio de Cul-  
tura. Madrid (1983).
- (18) VILLAR, E.; et al.  
El campo de temperaturas de la Cueva de Altamira.  
Monografía nº 9 del C.I.M. de Altamira. Ministerio de Cultura.  
Madrid (1983).

- (19) DONN, W.L.; et al.  
Meteorología.  
Ed. Reverté S.A. Barcelona (1978).
- (20) RENAULT, Ph.  
La teneur en anhydrique carbonique des atmospheres des grottes.  
Bulletin A.G.F., nº 8, pp. 379-390 (1971).
- (21) BRUNET, J.; et al.  
Lascaux, OÙ en sont les travaux de conservation.  
Archeologia 149, pp. 36-50 (1980).
- (22) VILLAR, E; et al.  
La humedad natural de la Cueva de Altamira.  
Monografía del C.I.M. de Altamira. Ministerio de Cultura.  
Madrid (1984).
- (23) KAROL, I.L.  
Radioisotopes and global transport in the atmosphere.  
Jerusalem: Israel Program of Scientific Translations, pp.44-  
-217 (1974).
- (24) HSU; S.A.; LARSEN, R.E.; BRESSAN, D.J.  
Diurnal variations of radon and mixing heights along a  
coast: a case study.

- (25) GUEDALIA, D; NTSILA, A.; DRUILHET, A.; FONTAN, J.  
Monitoring of the atmospheric stability above and urban  
and suburban site using sodar and radon measurements.  
J.Applied Meteorol. 19, 839 (1980).
- (26) ABU-JARAD, F; FREMLIN, J.H.; BULL, R.  
A study of radon emitted from building materials using  
plastic track detectors.  
Phys. Med. Biol. 25, 683 (1980).
- (27) ROBERTS, L.  
Emission and control of radon at active uranium mines and  
mills.  
Trans. Am. Nucl. Soc. Vol. 3, pp. 154 (1979).
- (28) FERNANDEZ, P.L.; et al.  
Radiation Exposure levels in Altamire Cave.  
Health Physics, Vol 46, nº 2, 445-447 (1984).
- (29) VILLAR, E; et al.  
Influencia de la presencia de personas sobre los procesos  
de deterioro de las pinturas de Altamira. Criterios de  
conservación.  
Monografía nº 11 del C.I.M. de Altamira, Ministerio de  
Cultura. Madrid (1984).
- (30) RONAHI, L.  
Karszt - es - Barlangutatas, Vol. 7, pp127 (1972).

- (31) VILLAR, E.; et al.  
Temperature of rocks surfaces in Altamire Cave (Spain)  
Trans-Brit. Cave Res. Ass. Vol. 10, nº 3, pp. 165-170  
(1983).
- (32) VILLAR, E.; et al.  
Air temperatures and air interchanges at Altamire Cave  
(Spain).  
Trans. Brit. Cave Res. Assoc. (Cave Science), Vol. 11,  
nº 2, pp. 92-98 (1984).
- (33) HOYOS, M.; et al.  
Características geológico-cársticas de la Cueva de Altam  
ira (Santillana del Mar).  
Instituto de Geología C.S.I.C. Madrid (1981).
- (34) MARION, J.B.  
General Physics with Bioscience Essays.  
Ed. John Wiley & sons. (1979).
- (35) BARTLETT, A.; BRAUN, T.  
Death in a hot tube: the physics of heat stroke.  
Am. J. Phys. Vol. 51, pp. 127 (1983).
- (36) RAZNJEVIC, K.  
Tables et diagrames thermodynamiques.  
Ed. Eyrolles (1970).
- (37) Mc. ADAMS, W.H.  
Transmission de la chaleur.  
Ed. Dunod (1964)

- (38) VILLAR, E.; et al  
Ambient temperature variations in the Hall of paintings  
of Altamire Cave due to the presence of visitors.  
Cave Science, Vol. 51, nº 2, pp. 99-104 (1984).
- (39) HARDISON, C.; et al.  
Contaminación microbiana de la Cueva de Altamira (Santander)  
Informe presentado al Ministerio de Cultura (1982).
- (40) URUBURA, F.; et al.  
Contaminación microbiana de la Cueva de Altamira (Santander)  
Informe presentado al Ministerio de Cultura (1981).
- (41) VILLAR, E.; et al.  
Estudio del equilibrio gas carbónico-agua-carbonato cálcico,  
en las aguas que bañan las pinturas de Altamira.  
Monografía nº 11 del C.I.M. de Altamira. Ministerio de Cultura.  
Madrid (1984).
- (42) RADIER, J.  
L'analyse de l'eau: eaux naturelles, eaux residuaires,  
eaux de mer.  
Dunod, París (1978).
- (43) Standard Methods for the examiantion of water and wastewater  
(13th. edition).  
American Public Health Association, New York (1971).
- (44) PICH NETT, R.G.; BRAY, L.G.; STENNER, R.D.  
The chemistry of cave waters.  
The Science of Speleology, Academic Press Inc.London (1976).

- (45) STCHOUZKOY-MUXARY, T.  
Contribution a l'etude des courbes de solubilité de la calcite dans l'eau en présence d'oxyde carbonique.  
Ann. de Spéléol. 27, pp. 465-478 (1972).
- (46) VILLAR, E.; et al.  
Influencia de la presencia de personas en la humedad y en la concentración de anhídrido carbónico en la Sala de Pinturas de Altamira. Tiempos de recuperación.  
Monografía nº 11 de C.I.M. de Altamira. Ministerio de Cultura. Madrid (1984).
- (47) CUSTODIO, E.; LLAMAS, M.R.  
Hidrología subterránea.  
Ed. Omega, Madrid (1976).