

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA  
MONOGRAFIAS  
N.º 11

# CUEVA DE ALTAMIRA

ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS  
DE LA SALA DE POLICROMOS.  
INFLUENCIA DE LA PRESENCIA HUMANA  
Y CRITERIOS DE CONSERVACION



MINISTERIO DE CULTURA

DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS

CENTRO DE INVESTIGACION Y MUSEO DE ALTAMIRA  
MONOGRAFIAS  
N.º 11

# CUEVA DE ALTAMIRA

ESTUDIOS FISICO-QUIMICOS  
DE LA SALA DE POLICROMOS.  
INFLUENCIA DE LA PRESENCIA HUMANA  
Y CRITERIOS DE CONSERVACION

MINISTERIO DE CULTURA

DIRECCION GENERAL DE BELLAS ARTES Y ARCHIVOS  
SUBDIRECCION GENERAL DE ARQUEOLOGIA Y ETNOGRAFIA

1.ª edición: Madrid, 1984.  
Printed in Spain. Impreso en España.  
Edita: Ministerio de Cultura, Dirección General  
de Bellas Artes y Archivos.  
Subdirección General de Arqueología y Etnología.  
Pza. del Rey, 1. 28071 Madrid. Tel.: 429 24 44.  
Distribución: San Mateo, 13. 28004 Madrid. Tel.: 448 07 73.  
I.S.B.N.: 84-7483-397-3.  
Dep. Legal: M-1664-1985.  
Imprime: Colomar, s.c.l. Tel.: 619 79 56.

## INDICE

<b>La humedad natural de la cueva de Altamira.</b> E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, J. R. Solana, J. Soto. ....	7
<b>La ventilación natural de la sala de pinturas de la cueva de Altamira. Contenido de Radon.</b> E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto. ....	21
<b>Estudio del equilibrio gas carbónico-agua-carbonato cálcico, en las aguas que bañan las pinturas de Altamira.</b> E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, J. R. Solana, J. Soto. ....	35
<b>Influencia de la presencia de visitantes sobre las temperaturas de la sala de policromos. Tiempos de recuperación.</b> E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto. ....	65
<b>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.</b> E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto. ....	81
<b>Influencia de la presencia de personas sobre los procesos de deterioro de la pintura de Altamira. Criterios de conservación.</b> E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez, L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto. ....	95

**INFLUENCIA DE LA PRESENCIA DE PERSONAS  
EN LA HUMEDAD Y EN LA CONCENTRACION  
DE ANHIDRIDO CARBONICO DE LA SALA DE PINTURAS  
DE ALTAMIRA. TIEMPOS DE RECUPERACION**

**E. Villar, A. Bonet, B. Díaz-Caneja, P. L. Fernández, I. Gutiérrez,  
L. S. Quindós, J. R. Solana, J. Soto \***

• Departamento de Física Fundamental.  
Facultad de Ciencias.  
Universidad de Santander.

## INTRODUCCION

La Sala de Pinturas de la Cueva de Altamira podría describirse de un modo esquemático y aproximado como un pequeño recinto ( $\sim 326 \text{ m}^3$ ), con una superficie interior de  $\sim 450 \text{ m}^2$ <sup>1</sup>, prácticamente cerrado, a una temperatura casi constante de  $14,5^\circ \text{C}$ <sup>2</sup>, con un cierto contenido de gas carbónico, casi sin ventilación, con una humedad muy próxima a la saturante<sup>3</sup>, comunicado con un estrecho pasillo por una abertura de apenas  $2,8 \text{ m}^2$  y en donde el techo policromado se halla impregnado de agua que permanentemente está goteando.

Estas características hacen que esta Sala sea extraordinariamente sensible a la presencia de personas en su interior. Basta considerar que una sola persona, debido a su metabolismo, emite, durante una hora, entre 71 y 100 Kcal., más unos 50 g. de vapor de agua y alrededor de 17 l. de anhídrido carbónico<sup>4</sup>, por lo que la presencia de un reducido grupo de personas puede modificar el microclima de la Sala, lo que repercute en las condiciones naturales en la que encuentran las pinturas. Este grupo de personas podría, por tanto, contribuir al deterioro de las pinturas, permaneciendo cierto tiempo en el interior de la Sala, a través de la influencia que pueden ejercer sobre determinados procesos físico-químicos, entre los que caben destacar la desecación de las superficies policromadas, la disolución del  $\text{CO}_2$  en las aguas que las bañan y la modificación del índice de saturación, debido a la dilución que origina la condensación del vapor de agua. A todo ello se suma el hecho de que una vez alteradas las condiciones ambientales del ecosistema, la recuperación de los parámetros iniciales es relativamente lenta a causa de la tardanza en renovar la película de agua del techo, con el escaso caudal diario que aflora, y a causa de la débil ventilación de la Sala, que dificulta el que el aire de la misma retorne a las condiciones iniciales.

El estudio del efecto que tiene la presencia de visitantes en el campo de temperaturas de la Sala, para distintos índices de ocupación, así como los tiempos de recuperación en cada caso, ha sido motivo de uno de nuestros artículos<sup>5</sup>. Este estudio resulta imprescindible y debe ser previo para poder lograr resultados del efecto que producen las visitas sobre otras características del ecosistema.

En el presente trabajo, se ha abordado el estudio de las modificaciones que experimenta la humedad absoluta y relativa de la Sala y también la concentración del anhídrido carbónico, como consecuencia de la presencia de visitantes, 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 tiempo de permanencia de los mismos y la cuantía de la emisión de H<sub>2</sub>O y de CO<sub>2</sub>, debida al metabolismo del cuerpo humano. También se plantean las ecuaciones que permiten calcular el tiempo que necesita la Sala en volver a las condiciones iniciales, una vez ha salido el último visitante.

Los resultados que se obtienen, desde el punto de vista teórico, se justifican plenamente, desde el punto de vista experimental, a través de las campañas de medidas realizadas durante más de un año, de la mayor parte de las variables del ecosistema, en régimen de visitas, con diferentes índices de ocupación.

Queremos subrayar que los resultados experimentales obtenidos sobre la alteración que experimenta el campo de temperaturas de la Sala de Pinturas, nos ha conducido a realizar el análisis de los efectos producidos por las visitas, tomando un módulo unitario para el régimen de visitas, constituido por un grupo de seis personas, cinco visitantes y un guía, que permanecen diez minutos en el interior de la Sala. Así pues, los diferentes índices de ocupación no son otra cosa que múltiplos de este módulo. Este criterio ha sido adoptado al considerar que tres grupos sucesivos, de seis personas, que en total permanecen treinta minutos en la Sala de Pinturas, sólo alteran la temperatura del aire en 0,3° C, no alteran la temperatura del techo policromado y el campo de temperaturas retorna a las condiciones iniciales en menos de treinta minutos.

## ALTERACION DE LA HUMEDAD DE LA SALA DE PINTURAS POR LA PRESENCIA DE VISITANTES

En un trabajo anterior<sup>6</sup> hemos descrito el comportamiento de la humedad absoluta natural de las diferentes salas de la Cueva, durante más de un año, a través de las medidas realizadas, en ausencia de visitantes lo que no sólo nos ha permitido conocer los valores medios  $H_0$ , correspondientes a cada mes, sino también justificar dichos valores, a través de un supuesto estado estacionario definido por el equilibrio entre la producción de vapor de agua,  $\phi$ , por evaporación, y la disminución de la humedad por ventilación, que se compensan manteniendo  $H_0$  constante en la Sala. Así, pues, cada estado estacionario de la Sala estará caracterizado por una temperatura del aire de la misma  $\theta_0$  y por una temperatura de las superficies rocosas  $\theta_s$ ; por una humedad relativa  $h_0$ ; por una presión parcial del vapor de agua  $P_0$  en la atmósfera de la Sala y por una presión saturante  $P_s$ , a la temperatura de la roca; por un flujo de agua, en  $\text{cm}^3$  diarios; por una ventilación  $Q$ , en  $\text{m}^3$  de aire por hora; y por una bien determinada composición química del agua de goteo. Dada la extensa gama de posibles estados estacionarios del ecosistema se ha abordado el problema reduciendo estos posibles estados mediante la siguiente hipótesis de trabajo: «todos los parámetros del estado estacionario quedan definidos por los valores medios mensuales obtenidos de las medidas realizadas sobre las variables que lo determinan». Se ha adoptado este criterio por el hecho de que las variaciones que experimentan estas variables con el tiempo son relativamente pequeñas. En otras palabras, la aceptación de este criterio supone admitir que las fluctuaciones son de tipo macroscópico, que los efectos diarios caen dentro de las fluctuaciones que experimentan estos valores medios, lo cual está avalado por el hecho de que las correlaciones entre las magnitudes características del ecosistema aparecen sólo en forma de leyes periódicas regidas por las oscilaciones estacionales. Esto es así hasta el punto de que en algunas ocasiones pueden relacionarse los valores medios de un mes determinado con los correspondientes del mismo mes de otro año, sin desviarse mucho de los resultados que se obtendrían utilizando los datos adecuados, dada la periodicidad con que se suceden los máximos y los mínimos, y dadas las pequeñas discrepancias observadas para las mismas épocas en diferentes años.

En la tabla I se muestran los valores medios mensuales de las magnitudes que más interesan a la hora de estudiar cómo varía la humedad de la Sala con el número de visitantes y con el tiempo de permanencia y también qué tiempos de recuperación de la Sala podemos esperar. Los diferentes valores medios de la humedad absoluta, a lo largo de todo un año, indican claramente que el efecto que puede producir un mismo grupo de personas en la humedad de la Sala, será distinto en cada época del año, ya que también lo son las condiciones iniciales de humedad. Precisamente la variación temporal que experimenta el déficit de humedad respecto a la saturante, dado por los valores medios mensuales de  $P_s - P_0$ , resulta fundamental para este estudio.

La inexistencia de variaciones significativas de la temperatura  $\theta_s$  del techo de la Sala, ante la presencia de un pequeño número de visitantes, obtenida experimentalmente, simplifica el tratamiento del problema planteado, aunque podría realizarse también si existieran. Este resultado se ha obtenido midiendo, con el termómetro de radiación la temperatura del techo policromado un instante antes de entrar las personas y un instante después de salir el último visitante. Por otra parte, la temperatura del aire de la Sala  $\theta_0$  aumenta de manera bien conocida en función del número  $N$  de visitantes que entran y del tiempo de permanencia,  $t$ , de los mismos. Eligiendo el producto  $N \cdot t$  de tal modo que no se altere la temperatura del techo, resulta que este aumento de temperatura del aire da lugar a un aumento de la presión de vapor saturante  $P_0^s$ , en el aire, y, por tanto, a una mayor diferencia entre ésta y la presión de vapor existente  $P_0$ , lo que provocaría, en principio, una mayor producción de vapor de agua,  $\phi$ , por evaporación y, por tanto, un aumento de la humedad absoluta del aire. Sin embargo, experimentalmente se ha encontrado que todo aumento



**TABLA I**

**Datos más significativos para el estudio de la influencia de los visitantes en la humedad de la Sala**

Mes	VALORES MEDIOS MENSUALES			
	H <sub>0</sub> (%)	H <sub>S</sub> - H <sub>0</sub> (g m <sup>-3</sup> )	Q (m <sup>3</sup> h <sup>-1</sup> )	φ máx (gh <sup>-1</sup> )
Enero .....	97,4	0,56	9,3	11,625
Febrero .....	96,9	0,62	10,3	12,051
Marzo .....	97,8	0,42	9,2	9,936
Abril .....	97,7	0,46	6,9	3,933
Mayo .....	98,2	0,26	1,05	0,378
Junio .....	98,6	0,14	13,4	3,752
Julio .....	98,9	0,05	20,3	0,0
Agosto .....	99,2	-0,09	16,9	0,0
Sept. ....	98,6	0,01	17,9	0,0
Octubre .....	98,8	0,20	16,4	6,560
Nov. ....	98,1	0,36	5,1	3,672
Dic. ....	97,1	0,53	5,7	3,591

de la temperatura del aire, provocado por la entrada de visitantes en la Sala, va acompañado de una disminución de la humedad relativa, que se corresponde con un incremento de temperatura sin variación de la humedad absoluta. En la tabla II se exponen los valores de la humedad relativa encontrados experimentalmente, utilizando un psicrómetro portátil, con el que se han realizado medidas momentos antes de entrar el grupo de visitantes y un instante después de haber salido el último visitante, en distintas situaciones.

**TABLA II**

Personas por grupo	Permanencia Grupo grupo (minutos)	Antes de la visita				Después de la visita				Variación de la humedad relativa (%)
		Temperat. del aire (mm. Hg)	Presión de vapor P <sub>0</sub> (%)	Presión saturante P <sub>S</sub> (°C)	Humedad relativa (mm. Hg)	Temperat. del aire (mm. Hg)	Presión de vapor P <sub>0</sub> (%)	Presión saturante	Humedad relativa	Δ h (‰)
5	30	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

Esta tabla demuestra lo dicho anteriormente, lo cual equivale a admitir que la producción de vapor de agua no aumenta con la suficiente rapidez, en los cortos intervalos de tiempo considerados, como para compensar el déficit de humedad relativa originado por el aumento de temperatura. Podemos considerar, por tanto, que la producción de vapor de agua, φ, se mantiene constantemente igual al valor inicial.

Esta constancia, en la producción de vapor de agua para elevaciones no excesivamente grandes de la temperatura del aire de la Sala, tiene una gran importancia desde el punto de vista del deterioro de las pinturas, ya que de otro modo, un aumento de la eva-

poración podría dar 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<sup>7</sup>. Un aumento progresivo de esta evaporación podría dar lugar a una disminución de la humedad del techo lo suficientemente intensa como para conseguir un cambio de sus propiedades elásticas, con posibilidad de agrietamiento y posterior desescamación por desecación.

Una persona elimina vapor de agua a razón de  $\sim 0,07$  por 100 de su peso corporal por hora, aproximadamente un tercio a través de la piel y dos tercios en la respiración. Para nuestros cálculos tomaremos como dato la emisión de  $50 \text{ g. h}^{-1}$  de vapor de agua por persona, como valor medio<sup>4</sup>.

Aunque la presencia de visitantes disminuya, la humedad relativa, admitiendo que la evaporación puede desprejarse, sin embargo, la humedad absoluta  $H$ , en  $\text{g. m}^{-3}$  de vapor de agua, va aumentando con la permanencia de los visitantes en la Sala, aumento al que sólo puede oponerse la evacuación que sufre este aire húmedo debido a la ventilación, siempre y cuando el aire, que le sustituye y que supondremos que proviene del Hall, sea menos húmedo. Admitiendo que la temperatura de la roca,  $\theta_r$ , no se modifica podemos realizar el cálculo, para cada uno de los meses, del tiempo  $t_0$  que necesitan  $N$  personas para lograr que la humedad absoluta de la Sala,  $H_0$ , llegue hasta la saturación  $H_s$ , a la temperatura de la roca  $\theta_r$ . Por tanto, siendo el volumen de la Sala  $V = 326 \text{ m}^3$ , si el déficit de humedad saturante es  $(H_s - H_0) \text{ g. m}^{-3}$ , se requiere que las  $N$  personas exhalen  $326 (H_s - H_0) \text{ g.}$  de vapor de agua, luego el tiempo en horas que pueden permanecer este grupo en la Sala para que su atmósfera alcance la humedad saturante será:

$$t_0 = \frac{6,52 (H_s - H_0)}{N} \text{ horas} \quad (1)$$

En este proceso de saturación no interviene la ventilación  $Q$  a la hora de calcular  $t_0$ , ya que el valor de la humedad reinante  $H_0$  se debe precisamente al equilibrio entre la evaporación del agua y la ventilación.

Ahora bien, una vez que la atmósfera de la Sala está saturada de vapor de agua, la permanencia de esas  $N$  personas en la misma, iría provocando irreversiblemente la condensación de todo el vapor que fuesen exhalando, y es entonces cuando realmente aparece el peligro para las pinturas, puesto que se va originando una dilución iónica en la disolución acuosa que baña las pinturas, alterando sus propiedades. En particular, el índice de saturación va disminuyendo,

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

de modo que si llega a ser  $IS = 0$ , a partir de ese momento, si continúa el proceso de condensación, al ser  $[Ca^{+2}] < [Ca^{+2}]_{eq}$ , comienza la disolución de la calcita del techo policromado, que constituye uno de los procesos de deterioro.

El primer paso, por tanto, es conocer el tiempo  $t_0$ , durante el cual las  $N$  personas presentes en la Sala provocan la saturación del vapor de agua. Entonces, utilizando la expresión (1), y tomando el módulo  $N = 6$  y los valores de la tabla I, hemos elaborado la tabla III, en la que, suponiendo que la visita de cada grupo dura diez minutos, se ha indicado también el número de grupos de seis personas que podrían entrar para alcanzar la saturación. Este dato permite conocer la elevación de temperatura del aire de la Sala y de ahí deducir la humedad relativa final  $h_r$ , considerando siempre que los grupos entran sucesivamente, sin solución de continuidad.

Eventualmente, el vapor de agua expelido por los visitantes puede no difundirse por la atmósfera de la Sala, llegando a condensarse 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 puede ocurrir debido a que el vapor de agua eliminado sale del cuerpo humano a la temperatura de éste y, en un ambiente a  $\sim 15^\circ \text{C}$ , tenderá a ascender hacia el techo,

comportándose éste como una superficie fría de condensación. Este proceso provocaría condensaciones locales que escaparían a toda medida. En el tratamiento que estamos realizando, basado siempre en valores promedios, no caben estas situaciones, ya que el modelo exige, en todo momento, homogeneidad en el aire de la Sala.

**TABLA III**

**Tiempo de permanencia,  $t_0$ , de seis personas para lograr que se inicie la condensación; aumento  $\Delta\theta_a$  que experimenta la temperatura del aire de la Sala, y humedad relativa final  $h_f$ .**

Mes	$t_0$ (minutos)	Núm. de grupos (10 <sup>min</sup> de visita)	$\Delta\theta_a$ (°C)	$h_f$ (%)
Enero .....	36,5	3	0,3	100,0
Febrero .....	40,4	4	0,4	99,7
Marzo .....	27,4	2	0,2	99,6
Abril .....	30,0	3	0,3	99,1
Mayo .....	17,0	2	0,2	99,3
Junio .....	9,1	1	0,2	98,5
Julio .....	3,3	0	0,0	98,9
Agosto .....	0,0	0	0,0	99,2
Septiembre .....	0,7	0	0,0	98,6
Octubre .....	13,0	1	0,2	99,3
Noviembre .....	23,5	2	0,2	99,7
Diciembre .....	34,6	3	0,3	100,0

### TIEMPO DE RECUPERACION DE LA HUMEDAD DE LA SALA

Independientemente del número de personas  $N$  que se han introducido en la Sala de Pinturas y del tiempo  $t$  de permanencia de las mismas y prescindiendo, en principio, de los procesos físico-químicos que se hayan originado sobre las pinturas por efecto de la condensación de vapor de agua, la Sala, después de salir el último visitante se encuentra en las siguientes condiciones:

- a) Posee una humedad absoluta  $H$  que como máximo es igual a la humedad saturante  $H_s$  a la temperatura del techo.
- b) La temperatura del techo continúa siendo la inicial, puesto que así lo hemos exigido a  $N$  y a  $t$ .
- c) La película de agua que baña el techo, a pesar de la condensación, 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, aunque sí lo haya hecho la composición química del agua como consecuencia de la dilución.
- d) La producción  $\phi_m$  ( $gh^{-1}$ ) de vapor de agua, por evaporación, continúa siendo la misma que inicialmente.
- e) La temperatura del aire ha aumentado en  $\Delta\theta_m$ .
- f) La humedad relativa  $h$  ha alcanzado el valor final  $h_f$ .
- g) La ventilación de la Sala sigue siendo la misma, 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  $H_H$ .

Con estas premisas, intentaremos calcular el tiempo de relajación del ecosistema respecto a la humedad o tiempo de recuperación de la humedad,  $\tau_H$ , que definiremos como el tiempo necesario para que la humedad absoluta  $H_t$ , que ha adquirido la Sala como consecuencia del régimen de visitas, recupere el valor inicial  $H_i$ , una vez haya salido el último visitante.

La ecuación de evolución de la concentración  $H$  de vapor de agua de la Sala,  $\text{g} \cdot \text{m}^{-3}$ , la escribiremos considerando que la variación que experimenta con el tiempo la cantidad total de vapor  $V\dot{H}$  ( $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ) depende de la producción  $\varphi$  ( $\text{g} \cdot \text{h}^{-1}$ ) y de la variación de la humedad con el tiempo, debida a la ventilación  $Q(H - H_H)$  que se establece entre el Hall y la Sala, por tanto:

$$V \dot{H} = \varphi - Q (H - H_H) \quad (1)$$

en donde

$$\varphi = K A (H_S - H) \quad (2)$$

Ahora bien, antes de la visita considerábamos un estado estacionario de humedad absoluta  $H_o$ , por lo que  $\dot{H} = 0$  y, por tanto:

$$K A (H_S - H_o) = Q (H_o - H_H) \quad (3)$$

de donde:

$$K A = Q \frac{H_o - H_H}{H_S - H_o} \quad (4)$$

que, sustituido en (2) y en (1), nos da:

$$V \dot{H} = Q \frac{H_o - H_H}{H_S - H_o} (H_S - H) - Q (H - H_H) \quad (5)$$

luego:

$$V \frac{dH}{dt} = -Q \frac{H_S - H_H}{H_S - H_o} \cdot (H - H_o) \quad (6)$$

de donde:

$$dt = - \frac{V}{Q} \frac{H_S - H_o}{H_S - H_H} \cdot \frac{dH}{(H - H_o)} \quad (7)$$

que proporciona el tiempo de recuperación para la humedad cuando se integra entre el tiempo  $t_R$ , en el que la Sala ha vuelto de nuevo a la humedad inicial, antes de las visitas,  $H = H_o$ , y el tiempo  $t_f$ , al final de la visita, para el que  $H = H_f$ :

$$\tau_H = t_R - t_f = \frac{V}{Q} \frac{H_S - H_o}{H_S - H_H} \ln \frac{H_f - H_o}{H_o - H_o} \quad (8)$$

Ahora bien, esta expresión está basada en la ventilación «directa» de la sala por el aire del Hall, y ya hicimos observar que realmente el aire del Hall no penetra en la sala con la humedad  $H_H$ , de modo que la (3) no es aplicable directamente, ya que el primer término de esta ecuación nunca es negativo (excepto en agosto, pero con valores del mismo orden que el error de medida), mientras que el segundo lo es para seis meses al año, por lo que debemos sustituir  $H_S - H_H$  por un término en el que intervengan los valores precisos de  $H_S$  y  $H_o$ , y los valores estimados de  $\varphi$  que se obtuvieron en un trabajo anterior<sup>7</sup>. En efecto, de la expresión (3) se deduce fácilmente que:

$$Q (H_S - H_H) = Q (H_S - H_o) + \varphi \quad (9)$$

por lo que la (8) puede escribirse así:

$$\tau_H = \frac{V (H_S - H_o)}{Q (H_S - H_o) + \varphi} \ln \frac{H_f - H_o}{H_o - H_o} \quad (10)$$

A la hora de aplicar esta ecuación consideraremos que la visita ha saturado la atmósfera de humedad, por lo que  $H_f = H_S$ . Por otra parte, debería ser  $H_o$  la humedad inicial

antes de visitas, lo que impediría la aplicación de (10); sin embargo, consideremos que se ha llegado a recuperar la Sala cuando  $H_t = (H_o + 0,1) \text{ g. m}^{-3}$ , ya que el error absoluto en la medida de  $H$  es del orden de  $0,1 \text{ g. m}^{-3}$ . Así pues, la expresión práctica para evaluar el tiempo de recuperación, una vez alcanzada la humedad saturante, viene dada por:

$$\tau_H = \frac{326 (H_s - H_o)}{Q (H_s - H_o) + \phi} \ln [10 (H_s - H_o)] \text{ horas} \quad (11)$$

Con esta expresión se han determinado los tiempos de recuperación de la humedad  $H_o$  para cada mes, una vez se ha alcanzado la saturante,  $H_t = H_s$ , haciendo uso de los valores de la tabla I. En la tabla IV se dan los resultados obtenidos, en donde se observa que durante ocho meses al año se alcanza el valor inicial,  $H_t = H_o$ , en 24 horas.

#### ALTERACION DEL CONTENIDO DE GAS CARBONICO DE LA SALA POR EFECTO DE LAS VISITAS. TIEMPO DE RECUPERACION

Evidentemente, debido a que cada persona exhala 17 litros de anhídrido carbónico por hora, la presión parcial del  $\text{CO}_2$  en el aire de la Sala va aumentando progresivamente con el tiempo de permanencia  $t$  de un grupo de  $N$  personas en el interior de la misma. Si tomamos  $N = 6$ , como módulo del grupo, resulta que el aumento de la presión parcial del gas carbónico, en % en volumen, vendrá dado por:

$$\Delta P_{\text{CO}_2} = \frac{6 \cdot 17 \cdot t}{326.000} \cdot 100 = 0,0313 \cdot t \quad \% \quad (12)$$

cuando  $t$  se expresa en horas.

TABLA IV

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

Mes	$\tau_H$ (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
Sept. ....	0,00
Octubre .....	4,59
Nov. ....	27,29
Dic. ....	43,58

Una vez alcanzada una determinada concentración,  $C$ , de  $\text{CO}_2$  en la atmósfera de la Sala, al término de la visita, la ventilación  $Q$  del recinto origina una continua disminución de la presión parcial del carbónico,  $P_{\text{CO}_2}$ , hasta que se alcanza de nuevo la concentración inicial  $C_i$ , recuperándose así las condiciones iniciales. Realizando un planteamiento similar al utilizado en el caso de la humedad, escribiremos:

$$V \frac{dC}{dt} = \phi_c - Q (C - C_i) \quad (13)$$

en donde  $C'$  sería la concentración del anhídrido carbónico en el recinto con el que se intercambia el aire de la Sala, que puede ser el Hall o el exterior. En este caso hemos elegido el aire exterior a la Cueva por no disponer de datos suficientes de la concentración de  $\text{CO}_2$  en el Hall, opción igualmente inútil puesto que, en definitiva, el Hall lo intercambia con el exterior. Entonces  $C' = C_{\text{ext}}$ . El término  $\phi_C$  corresponde a la producción de anhídrido carbónico en la Sala sin visitantes, que podremos expresar por:

$$\phi_C = \alpha (C^{\text{máx}} - C) \quad (14)$$

es decir, proporcional a la diferencia entre la máxima concentración observada  $C^{\text{máx}}$  y la concentración de  $\text{CO}_2$  existente. La constante  $\alpha$  puede determinarse, teniendo en cuenta que en los estados estacionarios, en los que  $C = C_o$ , es:  $\frac{dC}{dt} = 0$ , luego

$$\alpha (C^{\text{máx}} - C_o) - Q (C_o - C_{\text{ext}}) \quad (15)$$

por lo que la (13) puede expresarse por:

$$V \frac{dC}{dt} = Q \cdot \frac{(C_o - C_{\text{ext}})}{(C^{\text{máx}} - C_o)} (C^{\text{máx}} - C) - Q (C - C_{\text{ext}}) \quad (16)$$

de la que se obtiene:

$$dt = - \frac{V}{Q} \frac{C^{\text{máx}} - C_o}{C^{\text{máx}} - C_{\text{ext}}} \frac{dC}{(C - C_o)} \quad (17)$$

**TABLA V**

**Tiempos máximos de permanencia de un grupo de seis personas para que la Sala recupere, en veinticuatro horas, el valor inicial de la concentración de  $\text{CO}_2$**

Mes	$0,85 - C_o$ (%)	$Q$ ( $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ )	$t$ (min)	Núm de grupos (*)
Enero .....	0,52	9,3	56	5
Febrero .....	0,57	10,3	57	5
Marzo .....	0,58	9,2	50	5
Abril .....	0,43	6,9	50	5
Mayo .....	0,28	1,05	24	2
Junio .....	0,37	13,4	171	17
Julio .....	0,50	20,3	222	22
Agosto .....	0,64	16,9	94	9
Septiembre .....	0,69	17,9	92	9
Octubre .....	0,64	16,4	90	9
Noviembre .....	0,38	5,1	43	4
Diciembre .....	0,29	5,7	63	6

(\*) Se supone que cada grupo realiza una visita de diez minutos.

que podemos integrar entre el tiempo  $t_R$  transcurrido para que la concentración del  $\text{CO}_2$  vuelva a su valor inicial  $C = C_o$ , y el tiempo  $t_f$ , en el que la concentración del gas carbónico en la Sala ha alcanzado el valor  $C = C_f$  al final de la visita. Resulta así para el tiempo de recuperación del anhídrido carbónico, la expresión:

$$\tau_C = t_R - t_f = \frac{V}{Q} \frac{C^{\text{máx}} - C_o}{C^{\text{máx}} - C_{\text{ext}}} \ln \frac{C_f - C_o}{C_i - C_o} \quad (18)$$

Consideraremos que se ha alcanzado la concentración inicial cuando  $C_t - C_o = 0,01$  por 100; por otra parte, la concentración del anhídrido carbónico en el exterior es de  $C_{ext} = 0,03$  por 100<sup>9</sup> y, por último, la concentración máxima observada ha sido de  $C^{máx} = 0,85$  por 100, por todo lo cual, la (18) puede utilizarse en la forma:

$$\tau_c = \frac{397,56}{Q} (0,85 - C_o) \ln [100 (C_t - C_o)] \quad (19)$$

en la que admitiremos que  $C_t - C_o$  presenta como valor mínimo el error de medida 0,01 por 100.

Haciendo uso de las expresiones (12) y (19), así como de los valores medios mensuales de la concentración  $C_o$  de CO<sub>2</sub> en la Sala de Polícromos hemos elaborado la tabla V, en la que se expresan los tiempos máximos de permanencia  $t_m$  de un grupo de seis personas para que la concentración de CO<sub>2</sub> alcanzada se reduzca a los valores iniciales en el período de 24 horas.

## DISCUSION Y CONCLUSIONES

Se observa que los efectos que produce un determinado grupo de personas en la humedad y en la concentración de CO<sub>2</sub> de la Sala no sólo dependen del número de personas que constituye el grupo y del tiempo que dure la visita, sino que los niveles que se alcanzan de humedad  $H$  y de gas carbónico,  $P_{CO_2}$ , dependen de las condiciones iniciales de la Sala, diferentes para cada mes. Así para que la Sala alcance la humedad saturante a la temperatura del techo y, por tanto, para que se inicie la condensación del vapor de agua sobre el mismo, en el mes de febrero, sería preciso que 6 personas permanecieran en el interior de la Sala durante cuarenta minutos y, en cambio, una sola persona provocaría la condensación del vapor que exhala con sólo entrar en la Sala durante el mes de agosto.

Las características de humedad y de contenido de carbónico de la Sala, en cada época del año, influyen enormemente en los tiempos de recuperación. Así se observa que en el mes de julio podrían entrar 132 personas diarias y la Sala en el transcurso de veinticuatro horas alcanzaría la concentración de gas carbónico que tenía antes de la visita. En cambio, en el mes de mayo, para que la ventilación renueve el aire de la Sala de modo que ésta recupere la concentración iniciada de CO<sub>2</sub> en veinticuatro horas, sería necesario que sólo entrasen 12 personas al día.

Del estudio realizado se concluye también que, en general, para el mismo número de personas y de tiempo de permanencia, los tiempos de recuperación de la Sala para la humedad son superiores a los que se necesitan para el gas carbónico.

Los resultados obtenidos en el estudio realizado sobre la influencia de visitantes en el campo de temperaturas de la Sala de Polícromos de la Cueva de Altamira, unidos a los que resultan del presente trabajo, permiten afirmar que esta Sala es extraordinariamente sensible a la presencia de personas en su interior, en cuanto que las alteraciones que producen en su microclima un reducido número de personas, durante un corto espacio de tiempo, necesitan intervalos de tiempo relativamente grandes para que desaparezcan. Los tiempos de recuperación son menores para las variaciones de temperatura, que para los de el contenido de gas carbónico, correspondiendo a las alteraciones de humedad los mayores tiempos de recuperación. La recuperación de la temperatura está favorecida por la alta capacidad calorífica de la roca y la rapidez con que se realizan los intercambios térmicos por radiación. En cambio, tanto la recuperación de la humedad, como del contenido de carbónico, dependen de la ventilación natural de la Sala, que es verdaderamente insignificante.

## BIBLIOGRAFIA

1. *Planos de Altamira* FOESTRA, Patronato de las Cuevas Prehistóricas de la provincia de Santander (1975).
2. VILLAR, E., et al., *El campo de temperaturas en la Cueva de Altamira*. Monografías del CIM de Altamira, Ministerio de Cultura (1983).
3. VILLAR, E., et al., *Flujos de materia en la Cueva de Altamira*. Monografía del CIM de Altamira, Ministerio de Cultura (1983).
4. MARION, J. B., *General Physics with Bioscience Essays*, ed. J. Wiley & Sons (1979).
5. VILLAR, E., et al., *Influencia de la presencia de visitantes sobre las temperaturas de la Sala de Polícromos. Tiempos de Recuperación*. Monografía del CIM de Altamira, Ministerio de Cultura (1983), pendiente de publicación.
6. VILLAR, E., et al., *La humedad natural de la Cueva de Altamira*. Monografía del CIM de Altamira, Ministerio de Cultura (1983), pendiente de publicación.
7. CUSTODIO, E., y LLAMAS, M. R., *Hidrología Subterránea*, ed. Omega, S. A., Madrid (1976).
8. DONN, W. L., *Meteorología*, ed. Reverté, S. A., Barcelona (1978).