

# Estudio del microclima de la cueva Pozalagua. Período de medición 2004-2006.

Vladimir Otero Collazo\* [yamisel@infomed.sld.cu](mailto:yamisel@infomed.sld.cu)

Jabier Les Ortiz de Pinedo\* [jabierles@sociedadalfonsoantxia.org](mailto:jabierles@sociedadalfonsoantxia.org)

Rakel Malanda Ruiz\* [rakelcvmate@mixmail.com](mailto:rakelcvmate@mixmail.com)

\* ***Sociedad de Ciencias Espeleológicas Alfonso Antxia***

## Introducción.

Los estudios climáticos realizados a lo largo de dos años en la cueva de Pozalagua, Bizkaia, han permitido conocer el mecanismo de intercambio de masa y energía con el sistema exterior, comparando el comportamiento de las variables hidrometeorológicas con el régimen de visitas a la cavidad.

Durante el primer año se recomendó limitar las visitas a valores inferiores a las 80 personas simultáneas dentro de la cavidad, cumpliéndose durante el segundo año de mediciones, observándose en los resultados una mejora del comportamiento de los parámetros medidos, acercándose éstos al ciclo natural, aunque en fechas de gran afluencia de público como el período de Semana Santa, se redujo el tiempo de estancia a 30 minutos, con el máximo de personas recomendado. Al tomarse muestreos a cada hora, se sumaron dos grupos de visitantes, por lo que la cifra final en los resultados es superior, es decir 160 personas, aunque, de forma simultánea sólo hayan permanecido 80.

La ejecución de una obras realizadas en el exterior de la cueva en el mes de octubre de 2005, sellaron parcial o totalmente, las grietas que comunicaban la atmósfera de la cavidad con el sistema exterior, con su correspondiente efecto sobre los mecanismos de termo transferencia y redistribución de temperaturas en la atmósfera hipogea, por la ruptura de un equilibrio establecido durante los últimos años.

A partir del mes de diciembre de 2005 se incorporó otro dataloguer para la medición de la concentración de Radón, en la estación Órgano, otro parámetro que es esencial para la determinación de la calidad del aire.

La única forma de mantener el atractivo de la cavidad y evitar su deterioro es mediante el cumplimiento de ciertas normas establecidas en el régimen de visitas a la cavidad, las que sólo pueden ser dictadas después de un estudio profundo de las características microclimáticas de la cueva, el conocimiento de los mecanismos de transferencia de masa y energía entre los sistemas gaseosos, sólidos y líquidos y entre el sistema interior y exterior de la cavidad.

## 1. Materiales y Métodos.

Para la toma de datos se colocaron tres estaciones en el interior de la cavidad: en la Entrada, en la sala Versailles y en la sala Órgano y otra en el Exterior, justo en el tejado del edificio de la entrada, compuestas por datalogers Opus 200 y sondas de alta precisión. En todas las estaciones se miden temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y concentración de CO<sub>2</sub>. En la Tabla I se muestran las variables medidas por estaciones.

El número de visitas diarias así como el horario de entrada fue tomado por los guías de la cueva.

Los datos fueron tomados con equipos de registro continuo, con una frecuencia de una hora de forma simultánea en las cuatro estaciones antes mencionadas. Para el procesamiento estadístico se utilizó el paquete informático StatGraphics Plus 5 para Windows, en el mismo se calcularon diferentes índices como el histograma de frecuencia de los valores en cada parámetro, el coeficiente de regresión para determinar la relación existente entre cada variable en las diferentes estaciones y entre las diferentes variables medidas en la cueva y en casos necesarios la regresión entre una o varias variables para determinar la ecuación matemática.

<b>Variable</b>	<b>Exterior</b>	<b>Entrada</b>	<b>Versalles</b>	<b>Órgano</b>
<b>Temperatura del aire</b>	X	x	x	x
<b>Temperatura del agua</b>			x	x
<b>Temperatura de la roca</b>			x	
<b>Humedad relativa</b>	X	x	x	x
<b>Presión atmosférica</b>	X	x	x	x
<b>Concentración de CO<sub>2</sub></b>	X	x	x	x
<b>Conductividad eléctrica del agua</b>			x	x
<b>Concentración de Radón</b>				x

*Tabla I. Variables medidas por estaciones.*

Los cálculos termodinámicos y de transferencia de masa y energía se realizaron a través del algoritmo Clima, desarrollado por Otero (1992), específicamente para trabajos en cuevas. Partiendo de los datos medidos en la cavidad, se introducen, para los cálculos básicos, la temperatura del aire, humedad relativa, presión atmosférica y la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire. En el algoritmo se calculan: temperatura de rocío, temperatura virtual, temperatura potencial, temperatura equivalente, humedad absoluta, volumen húmedo, presión saturante del vapor de agua en el aire, presión de vapor de agua en el aire, presión parcial del CO<sub>2</sub>, densidad del aire, entalpía, entropía, trabajo realizado por la masa de aire, que puede ser calculado para una estación entre diferentes momentos o entre dos estaciones y calor cedido o absorbido, con la misma característica del trabajo.

Como cálculos adicionales se realizaron: transferencia de calor por convección entre dos masas gaseosas, coeficiente de difusión del CO<sub>2</sub> entre dos

estaciones y el intercambio de calor con el exterior por la masa rocosa que cubre la cavidad.

## LA CUEVA DE POZALAGUA (KARRANZA-BIZKAIA)



Fig. 1. Ubicación de las estaciones de medición de las variables hidrometeorológicas en la cueva y las zonas de muestreo de hongos. (Mapa confeccionado por Jabier Les 2005)

### 2.1. Descripción de las variables calculadas.

La temperatura es uno de los parámetros fundamentales en la microclimática de cavidades, ya que su valor condiciona otras variables como la densidad del aire, la presión parcial de vapor de agua, la presión de saturación de vapor, la humedad relativa o el punto de rocío. Además, en relación con estas variables, la temperatura juega un papel fundamental en la circulación convectiva de masas de aire en la cavidad y en los fenómenos de condensación y evaporación del agua. Badino (1995) analiza la contribución de cada medio presente en la cavidad (aire, agua y roca) a la capacidad térmica del sistema termodinámico formado por la atmósfera de la cavidad (cantidad de calor que es necesario cederle para incrementar 1 °C su temperatura) y a la estabilidad de la temperatura, concluyendo que el agua es el medio más influyente en la estabilidad térmica de una cavidad. La capacidad térmica del agua es del orden de 4200 J/kg/ °C mientras que la del aire es de 1000 J/kg/ °C (Cortés 2004).

También es un índice del movimiento de las partículas que conforman la materia a la que se le mide este parámetro, por lo que tiene gran incidencia en multitud de procesos. Interviene de forma importante en el comportamiento de

las reacciones químicas, determinando su velocidad y en muchos casos hasta la posibilidad o no de ocurrencia de una reacción. Es, además, una forma **indirecta** de la medición del calor de un cuerpo.

En este caso se ha tenido en cuenta la influencia de la concentración del vapor de agua y del CO<sub>2</sub>.

La densidad es uno de los parámetros fundamentales a tener en cuenta para determinar el posible movimiento de la masa gaseosa, pues contiene en sí tres parámetros fundamentales que favorecen el movimiento del aire, estos son: la presión, la concentración y el volumen. Este último de forma implícita en el concepto propio de la densidad de un material, que se describe como el inverso del volumen unitario.

Otras variables donde la temperatura ejerce una gran influencia son la entalpía y la entropía, las que describen la dirección de los procesos termodinámicos que tienen lugar en la atmósfera.

Para la determinación de los procesos corrosivos en la roca, además de la concentración de CO<sub>2</sub> es necesaria la presencia de agua sobre la misma. Ella sólo puede llegar por dos vías: la infiltración a través del agrietamiento del macizo o la condensación del vapor de agua.

Para controlar cuando existen mayores probabilidades de que ocurra el proceso de condensación, se calcula la temperatura de rocío (Tr), parámetro que define la temperatura a la que comienza la deposición del agua gaseosa en forma líquida.

El tomar como referencia un sistema saturado como ocurre en la cueva de Pozalagua, es decir, Hr = 100 %, implica que la presión saturante es igual a la presión de vapor de agua. Al disminuir la temperatura, sin la influencia de una masa de aire o cualquier otra acción que contribuya al desecamiento del aire, la presión saturante (Ps) va a disminuir su valor, haciéndose inferior al de la presión de vapor, produciéndose así una sobresaturación del aire. Por concepto la presión saturante es la máxima presión que puede ejercer el vapor de agua a una temperatura dada. Debido a esta situación el vapor sobrante se convierte en agua, ocurriendo el proceso de condensación.

Con la entrada de grandes grupos de personas, la masa corporal de las mismas transfiere al medio una carga de calorías que tienden a favorecer el incremento de la temperatura del medio. Pero, junto a esa carga térmica, la fuente de calor emana además una cierta cantidad de vapor de agua por el proceso de transpiración, ya sea a través de la piel o del aire exhalado en la respiración, que compensa la concentración del vapor en la atmósfera, contribuyendo incluso al proceso de condensación por sobresaturación.

## 2. Clima de la cavidad.

### 2.1. Comportamiento de la temperatura.

A pesar del amplio recorrido de la temperatura en el sistema exterior, en el interior de la cavidad se presenta una gran estabilidad, favorecida por factores morfológicos y termodinámicos, que se mantiene aún con un régimen de visitas inestable como el que tiene lugar en la cavidad, incluso en los picos que se han observado hasta el momento de hasta más de 900 personas en un día (Figura 4).

El período climático analizado abarca todas las estaciones durante dos años, contrastando la gran variabilidad del clima exterior con el régimen estable del interior de la cavidad, siendo la zona más afectada la entrada de la cueva, como indica el coeficiente de variación. En la Figura 2 se observa la ligera influencia de la variación anual de la temperatura sobre la estación de la Entrada, donde es más evidente, aunque con una cierta inercia que desplaza la curva respecto al comportamiento de la curva de la estación Exterior.

	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles
<b>Promedio</b>	13,17	12.09	12.78	12.88
<b>Desv. Std.</b>	7,40	0.70	0.11	0.09
<b>Coef. Var.</b>	56,24	5.78	0.83	0.70
<b>Máximo</b>	40,70	13.75	13.07	13.15
<b>Mínimo</b>	-4,00	10.63	12.59	12.64
<b>Rango</b>	44,70	3.12	0.48	0.51

*Tabla II. Comportamiento estadístico de la temperatura en las diferentes estaciones durante el período 2004-2006. En la misma se representan: el promedio, la desviación estándar (Desv. Std.), el coeficiente de variación (Coef. Var.) que es la relación porcentual entre el promedio y la desviación estándar y los valores máximos y mínimos con el rango o recorrido total.*

En el caso de las estaciones Órgano y Versalles el desplazamiento es mayor, y menor el rango de variación de los valores, lo que se pone de manifiesto en los valores estadísticos representados en la Tabla II, donde se observa la gran diferencia entre los rangos de temperatura entre la estación Exterior y las estaciones subterráneas y entre estas últimas, entre la Entrada y Órgano y Versalles.

El desplazamiento de las curvas en las estaciones de Órgano y Versalles es tal que casi llega a invertir el ciclo térmico del exterior, alcanzando los valores máximos en invierno y los mínimos en verano, a pesar de ser la época de vacaciones donde la cantidad de visitantes mensuales es superior al resto del año.

Al comparar los promedios de ambos períodos, se manifiesta que, a pesar de ser la temperatura promedio exterior 0,5° C superior durante la segunda etapa, los valores medios de la cavidad son inferiores a etapas anteriores de mediciones.

Estación	2004-2005	2005-2006
Exterior	12.60	13,07
Entrada	12.19	11.95
Órgano	12.78	12.76
Versalles	12.88	12.86

Tabla III. Comparación entre los periodos de medición 2004-2005 y 2005-2006. A pesar de ser el promedio de temperatura del exterior más elevado que el del interior de la cavidad, en la misma se nota un ligero descenso de la temperatura.

El rango de temperaturas se redujo de forma significativa durante la segunda etapa, principalmente en la estación de la Entrada, disminuyendo, principalmente, los valores máximos.

Estación Versalles				
Periodo	Temp. Media	Temp. Mín.	Temp. Máx.	Variación
2001 - 2002	<b>12.92</b>	<b>12.79</b>	<b>13.31</b>	<b>0.53</b>
2004 - 2005	<b>12.88</b>	<b>12.64</b>	<b>13.15</b>	<b>0.51</b>
2005 - 2006	<b>12.86</b>	<b>12.66</b>	<b>13.10</b>	<b>0.44</b>

Tabla IV. Comparación de varios parámetros estadísticos entre los diferentes períodos de medición. Se presenta sólo la estación de Versalles por ser el único punto de mediciones en el período 2001-2002.

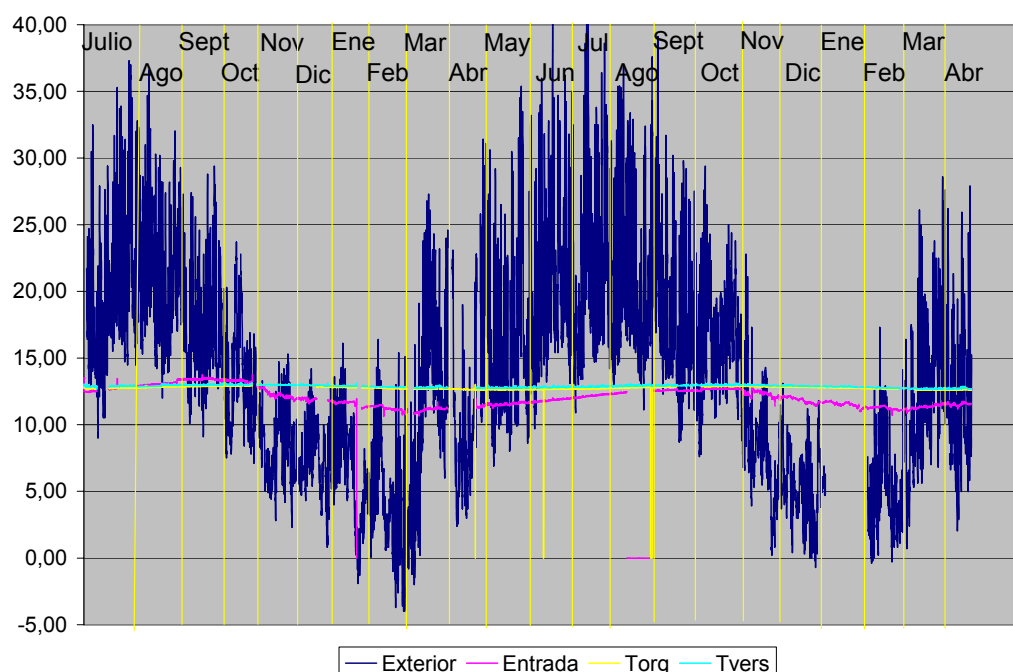
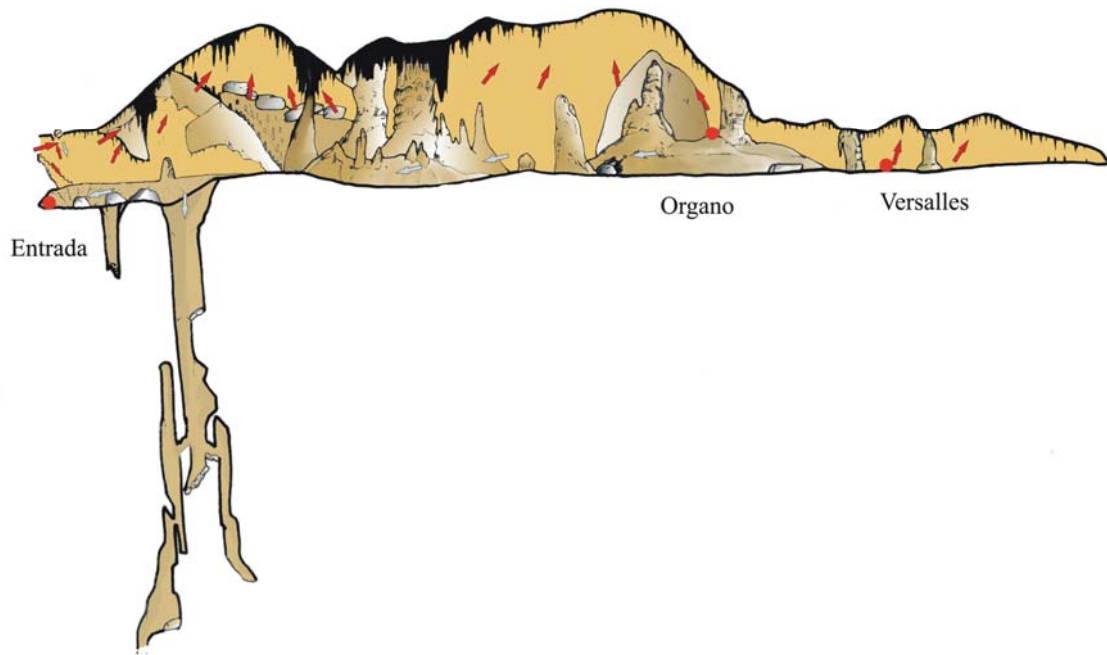


Fig. 2. Comportamiento de la temperatura en las diferentes estaciones en el período entre julio de 2004 y junio de 2006. Se aprecia la diferencia de los recorridos entre la estación del exterior y las ubicadas dentro de la cueva.

Resulta interesante el comportamiento de la estación Entrada, con un promedio muy inferior al resto de la cavidad en ambos periodos de mediciones. Este efecto se manifiesta por influencia de la morfología de la cavidad. En el corte longitudinal representado en la Fig. 3. se pone de manifiesto el desnivel de este

punto respecto al resto de la cueva, lo que favorece la acumulación de un aire más frío.

Este fenómeno se acentúa en fechas posteriores a octubre de 2005, cuando en labores realizadas en los exteriores del macizo donde desarrolla Pozalagua, sellaron las grietas que comunicaban el sistema epigeo (exterior) con el hipogeo (interior). Esta acción modifica la circulación de la masa gaseosa en la cavidad, favoreciendo la concentración de calor en las zonas más elevadas, con una menor transferencia de masa y energía con el exterior.



*Fig. 3. Corte longitudinal de la cueva, donde se aprecia la diferencia de altura entre las estaciones en el interior y la distribución de la masa de aire más caliente (flechas rojas) y la más fría (flechas plateadas), atendiendo a su variación de densidad por cambios térmicos.*

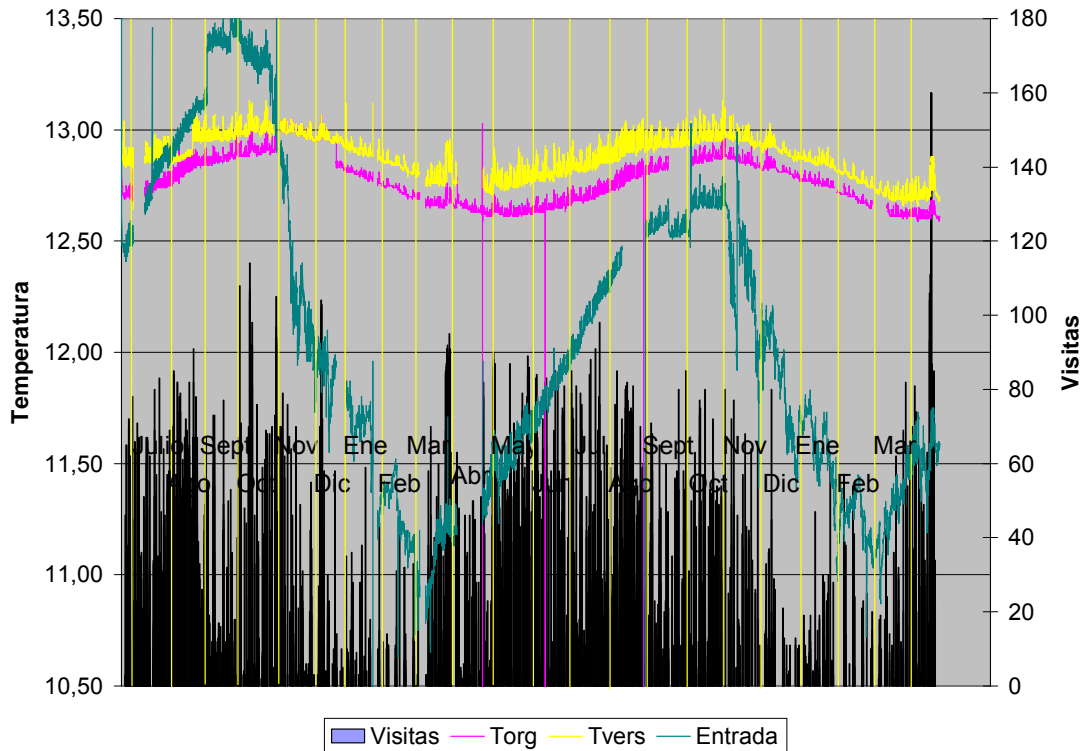


Fig. 4. Comportamiento de la temperatura en el interior de la cavidad en el período entre los meses de julio de 2004 a junio de 2006.

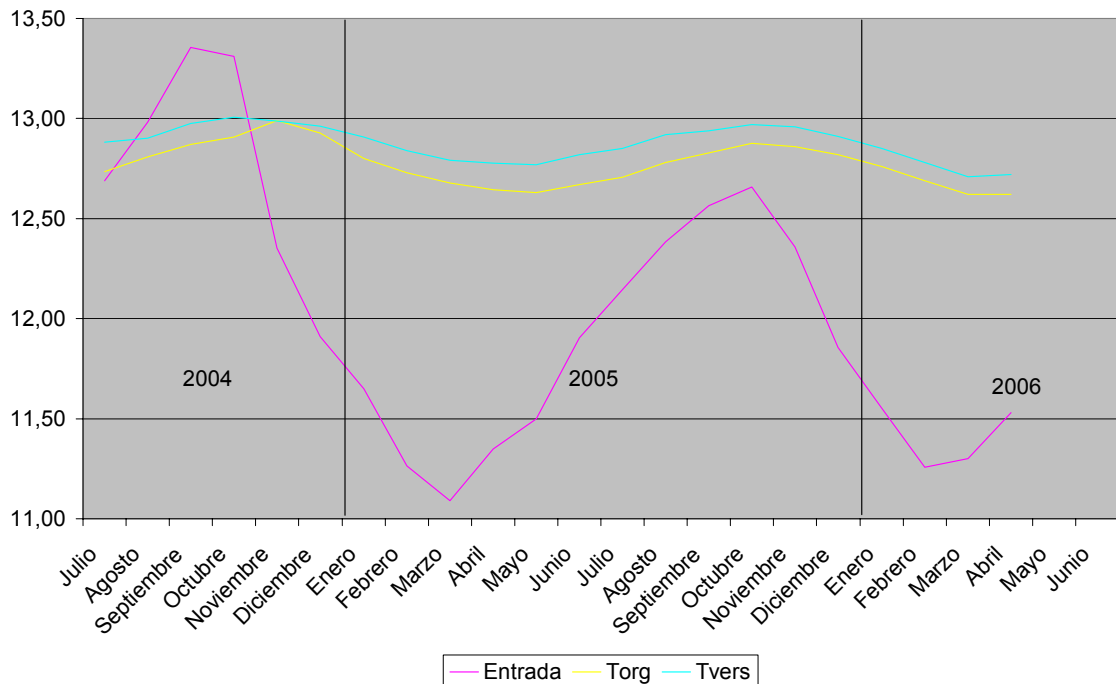


Fig. 5. Comportamiento de los promedios mensuales de la temperatura en el período julio de 2004 a junio del 2006 en las estaciones de interior de la cavidad.

En general existe una relación entre las temperaturas medidas a los diferentes elementos en los puntos de muestreo. En la matriz de correlación se describe la poca influencia que ejerce el sistema exterior sobre la atmósfera de la cueva, principalmente en las estaciones de Versailles y Órgano, donde se pone de manifiesto una cierta inversión del ciclo térmico. Sólo en la estación de la

Entrada el coeficiente de correlación describe un comportamiento más parecido al del Exterior a causa de la ubicación de la estación respecto a la puerta, aunque la atmósfera hipogea modifica las características del aire que entra del sistema exterior, como se aprecia en el alto coeficiente de correlación entre la Entrada, Versailles y Órgano.

Este comportamiento es totalmente natural, teniendo en cuenta la magnitud del salón, comparado con el área de la puerta de la cavidad. El volumen de aire que entra en la cavidad es extremadamente pequeño en comparación con la masa gaseosa hipogea, lo que favorece la inercia de respuesta y la atenuación de la respuesta al estímulo térmico que recibe desde el exterior, que puede ser para aportar calorías al medio subterráneo o para extraerlas.

	Entrada	Órgano	Versalles
Exterior	0,43	-0,16	-0,04
Entrada		0,63	0,72
Órgano			0,94

*Tabla IV. Comportamiento del coeficiente de correlación entre las temperaturas medidas en las diferentes estaciones de muestreo en Pozalagua.*

La inversión del signo en la correlación entre el Exterior y las estaciones de Órgano y Versailles, obedece al desplazamiento de la variación estacional, llegando a ser el desplazamiento de los máximos y mínimos de temperatura de hasta 2 meses en la estación Entrada y de 3 a 4 meses en el resto.

Otros factores a tener en cuenta para explicar la baja correlación entre el Exterior y las estaciones interiores son el régimen de visitas y el efecto acumulativo del calor en la cavidad. Aunque en el comportamiento general de la curva se mantiene de forma muy similar a la natural, el promedio de las estaciones más profundas de la cueva es casi un grado centígrado superior al promedio de las estaciones Exterior y Entrada. También actúa, en un grado importante, la interrelación entre la masa gaseosa, la roca y el agua.

Es significativo que, entre todas las estaciones, ninguna presenta similitudes en sus promedios, es decir, cada una de las muestras son totalmente diferentes unas de otras, incluso las dos estaciones más profundas, Órgano y Versailles. Esto implica un mecanismo diferencial entre ambas estaciones para la disipación de la masa y energía adquirida por las diferentes fuentes, tanto humanas como por la circulación natural de la cavidad. En el caso de Versailles, a pesar de ser la estación que se encuentra en el sitio más abierto, es la más estable y caliente, como se puede apreciar en la tabla II y en la Figura 5. Este fenómeno tiene su origen en la morfología misma de esa zona, donde los techos más bajos y la ligera elevación sobre buena parte de la cavidad (Fig. 3) permite al aire más frío circular cerca del suelo, mientras que la masa más cálida se mantiene en las zonas más elevadas.

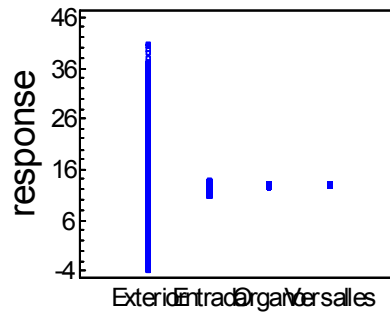
Al incluir en el análisis anterior las temperaturas medidas en la roca y en el agua de los depósitos en las estaciones Versailles y Órgano, se aprecia que el promedio de estos sistemas (sólido y líquido), es inferior al promedio de temperatura de la masa gaseosa en las estaciones más interiores de la

cavidad. Atendiendo a la Segunda Ley de Termodinámica, el medio gaseoso debe cederle energía en forma de calor a la roca y al agua, confirmándose que ambos sistemas son agentes refrigerantes en la cueva, lo que confirma la circulación de un aire más frío cerca del nivel del piso, que va siendo empujado hacia las zonas más bajas de la cavidad.

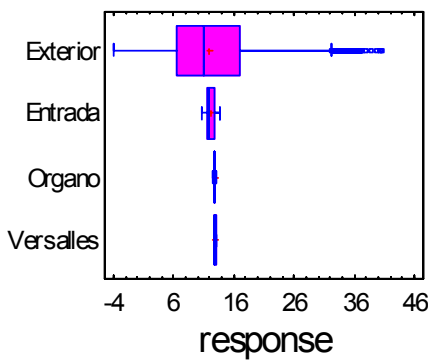
SnapStat: Multiple Sample Comparison

Sample	Count	Mean	Sigma
Exterior	10513	11,976	7,12485
Entrada	13956	12,0728	0,695907
Organo	14299	12,7711	0,10794
Versalles	14551	12,878	0,0924507
	53319	12,4607	3,2093

Scatterplot



Box-and-Whisker Plot



ANOVA Table

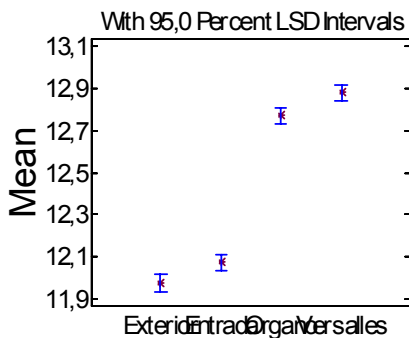
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio
Between	8481,39	3	2827,13	278,78
Within	540675	53315	10,1411	
Total	549156	53318		

P-Value = 0,0000

Variance Check

Cochran's C test: 0,99016  
P-Value = 0,0000

Means Plot



Analysis of Means Plot

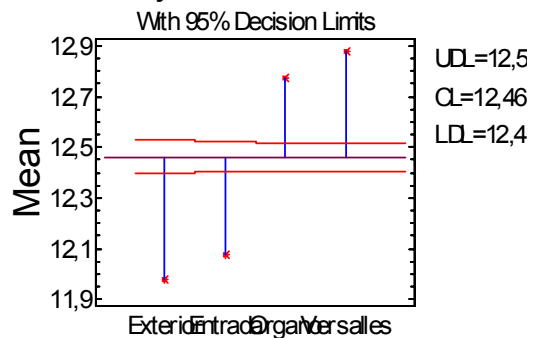
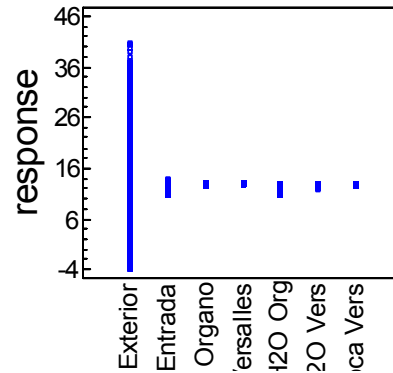


Figura 6a. Comparación de los rangos de variación de la temperatura entre las diferentes estaciones por cinco métodos estadísticos de análisis del promedio.

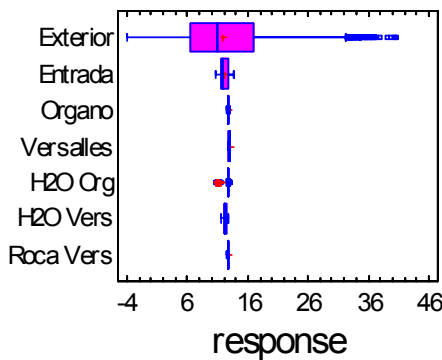
SnapStat: Multiple Sample Comparison

Sample	Count	Mean	Sigma
Exterior	10513	11,98	7,125
Entrada	13956	12,07	0,6959
Organo	14299	12,77	0,1079
Versalles	14551	12,88	0,09245
H2O Org	13662	12,54	0,5043
H2O Vers	12900	12,24	0,2577
Roca Vers	13248	12,67	0,04557
	93129	12,47	2,441

Scatterplot



Box-and-Whisker Plot



ANOVA Table

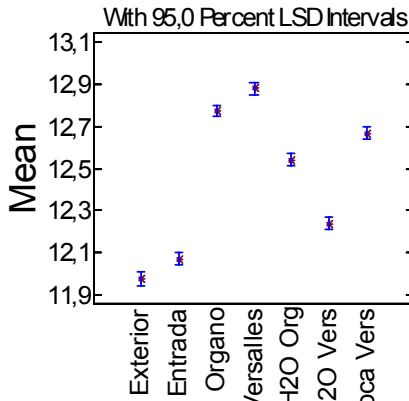
Source	Sum of Squares	Df	Mean Square	F-Ratio
Between	9763	6	1627	278,01
Within	5,45E5	93122	5,853	
Total	5,548E5	93128		

P-Value = 0,0000

Variance Check

Cochran's C test: 0,984  
P-Value = 0,0000

Means Plot



Analysis of Means Plot

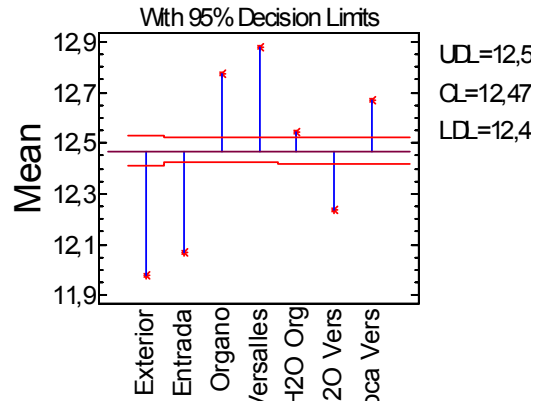


Fig. 6b. Comparación de los rangos de variación de la temperatura entre las diferentes estaciones por cinco métodos estadísticos de análisis del promedio teniendo en consideración la temperatura del agua y la roca en las estaciones Órgano y Versalles.

El sistema más estable, desde el punto de vista térmico, es el sólido, lo que se justifica por el bajo coeficiente de transferencia de la roca caliza, a lo que se agrega una alta fisuración, que favorece el efecto de un termo, por el aire aprisionado en las fisuras, y el espesor de la capa de roca sobre la cavidad.

La saturación de vapor de agua en la masa gaseosa se puede conocer mediante la relación entre la presión de vapor saturante y la presión de vapor real. El concepto de la primera variable es: "Presión máxima de vapor de agua que admite la atmósfera a una temperatura dada". Es decir, para cada temperatura existe una presión de vapor máxima, por tanto, una cantidad de agua máxima en el contenido de la masa gaseosa. Si se sobrepasa esta cantidad, el sistema se sobresatura.

La presión de vapor no es mas que: "La cantidad de presión que ejerce el contenido de agua en forma de gas en la atmósfera". Aunque en este caso la temperatura también ejerce una cierta influencia en la cantidad de presión, quien determina la diferencia es la masa de agua contenida en la masa gaseosa.

La relación entre las dos presiones parciales, la saturante y la real, en forma porcentual es conocida como Humedad Relativa. Por la definición expresada anteriormente de la presión saturante, la presión parcial de vapor máxima que debe existir en la atmósfera, a temperatura y presión normal, debe ser igual a la primera, por lo que la humedad relativa calculada será igual al 100 %. De ocurrir un incremento del contenido de agua por algún aporte externo o un descenso de la temperatura (sin pérdida del contenido de agua de la masa gaseosa) se obtendrá como resultado una humedad relativa superior al 100 %, es decir, una sobresaturación del aire.

La temperatura de rocío (también conocida como punto de rocío) se define como la temperatura en la que tiene lugar la saturación de vapor de agua en la atmósfera, para determinadas condiciones de temperatura y humedad.

Teniendo en cuenta que la temperatura de rocío en una atmósfera saturada es numéricamente igual al valor de la temperatura del aire, como ocurre en Pozalagua, cuando la masa gaseosa se acerca a la roca con una temperatura superior, el intercambio de calor que tiene lugar va a provocar un descenso en este parámetro en el aire más cálido, quedando el gas sobresaturado de vapor de agua, absorbiendo parte de la energía liberada, que favorece la ocurrencia del proceso de condensación.

En la cueva Pozalagua, las condiciones predominantes son:

- La masa gaseosa se mantiene saturada, con una humedad relativa del 100 %.
- Temperatura promedio del aire superior a la temperatura promedio de la roca (en Versailles es de 0.2° C mientras que en Órgano es de 0.1° C).
- Régimen de visitas variable en frecuencia y cantidad de personas diarias.

La primera condición favorece el desarrollo del proceso de condensación, ya que existe una preparación del sistema por la saturación de la masa gaseosa de vapor de agua, con una temperatura de rocío numéricamente igual a la temperatura del aire.

La segunda condición no siempre va a favorecer el proceso de condensación, pues la diferencia de temperatura puede disiparse en la capa de aire superficial sobre la roca, absorbiendo esta la energía que se necesitaría para el efecto tuviera lugar.

En cambio la tercera condicionante es un factor de gran importancia. El régimen de visitas provoca dos efectos directos sobre la atmósfera hipogea: un incremento de la temperatura y un aporte de vapor de agua, que además tiene una temperatura (al momento de salir del cuerpo humano) de aproximadamente 37° C, es decir, algo más del doble de la temperatura del ambiente cavernario.

## 2.2. Comparación del comportamiento de la temperatura durante los periodos de mediciones.

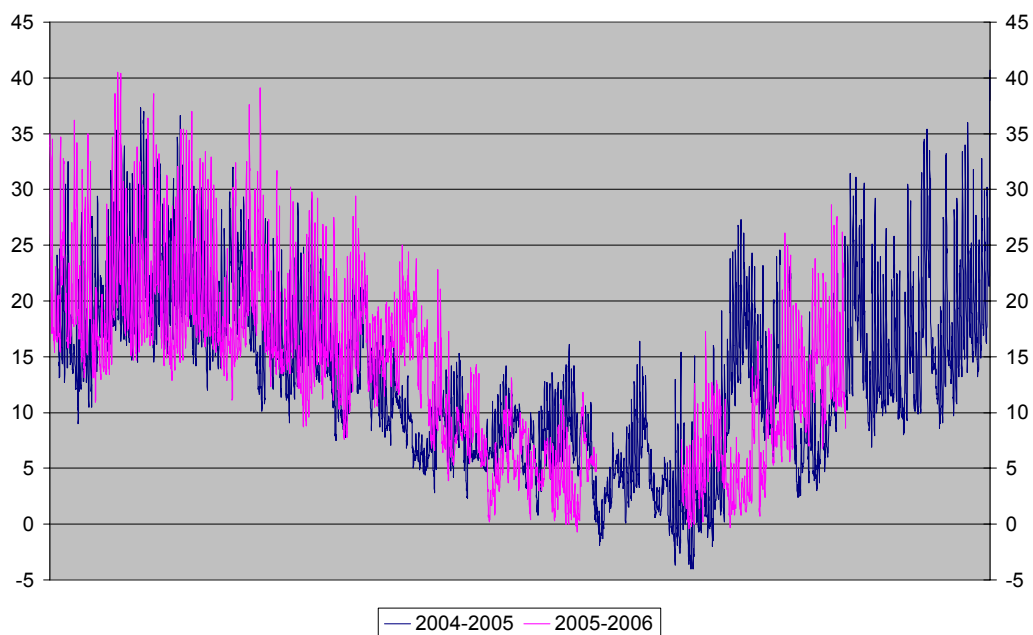


Fig. 7. Comportamiento de la temperatura en la estación Exterior durante los períodos 2004-2005 y 2005-2006.

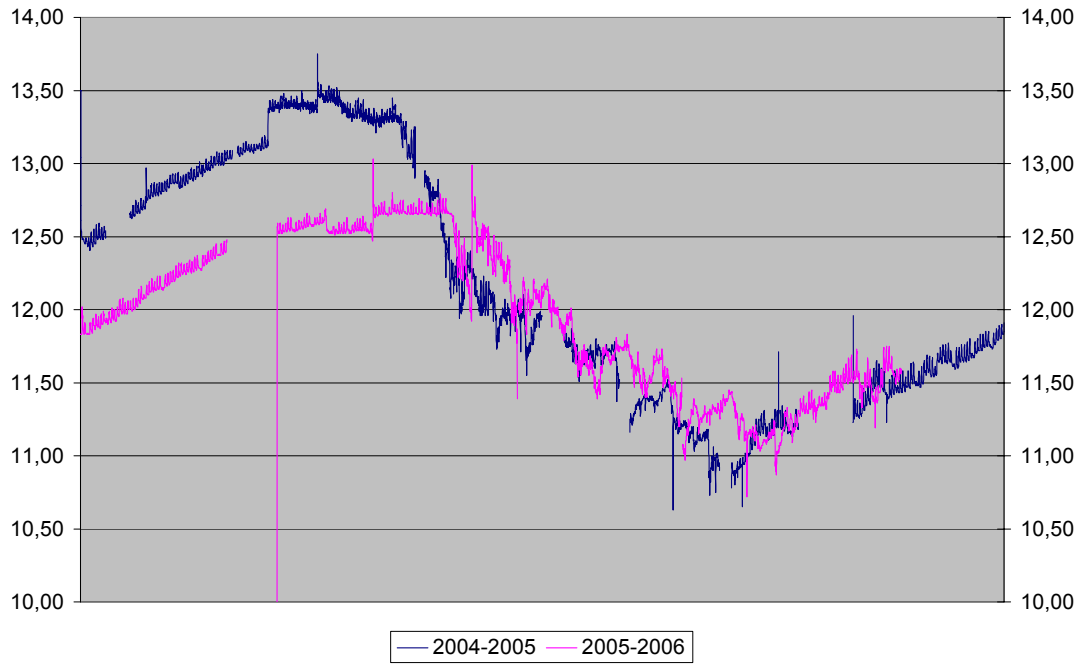


Fig. 8. Comportamiento de la temperatura en la estación Entrada durante los períodos 2004-2005 y 2005-2006.

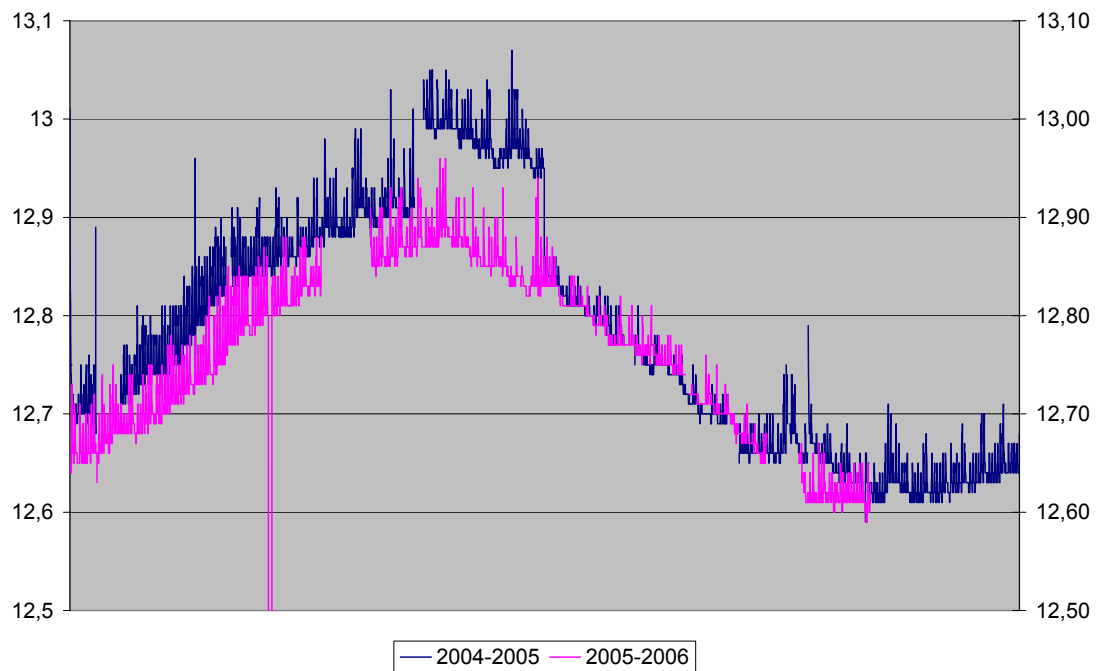


Fig. 9. Comportamiento de la temperatura en la estación Órgano durante los períodos 2004-2005 y 2005-2006.

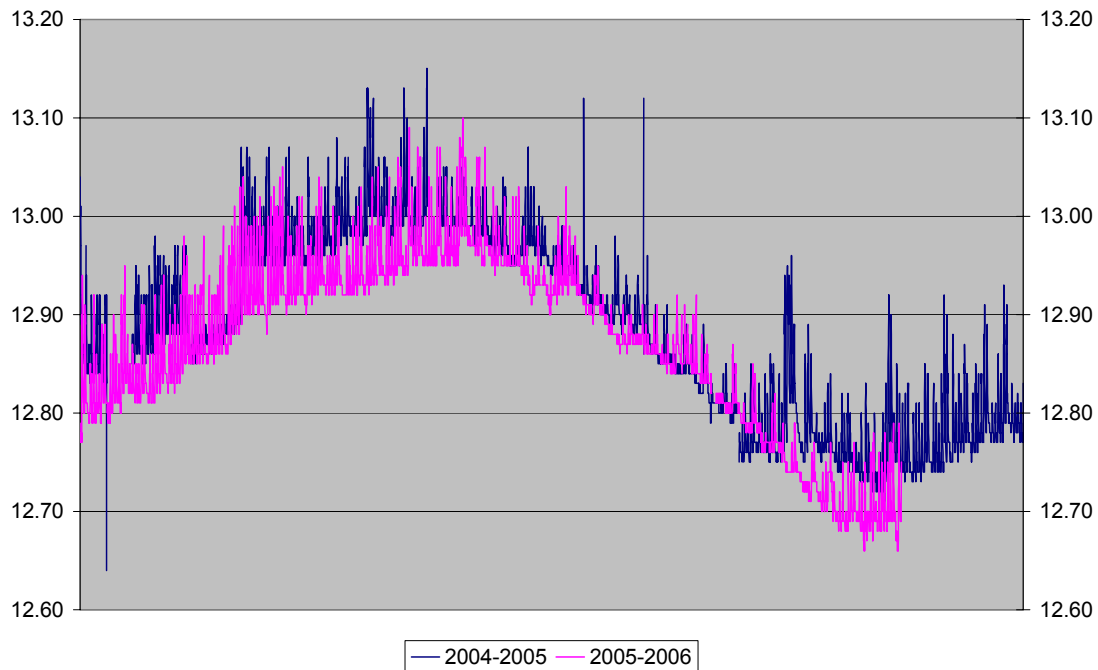


Fig. 10. Comportamiento de la temperatura en la estación Versailles durante los períodos 2004-2005 y 2005-2006.

El recorrido de la temperatura durante los dos periodos estudiados, mantiene un comportamiento muy similar, sólo pequeñas diferencias en las estaciones interiores, donde el rango de variación es mínimo, llegando a ser en Órgano y Versailles de unos  $0.4^{\circ}\text{C}$ . La estación de la Entrada es la que manifiesta una mayor diferencia, estando este comportamiento asociado al cierre de las grietas que comunicaban con el exterior, aunque una gran incidencia fue la limitación a un máximo de 80 personas simultaneas dentro de la cueva. Referido a esto último, resulta interesante la observación que en el periodo 2005 – 2006 el rango de variación disminuyó casi a la mitad en esta estación, es decir, de un rango de casi  $4^{\circ}\text{C}$  se redujo a cerca de  $1.5^{\circ}\text{C}$ .

En todas las estaciones interiores hubo una leve disminución de los valores máximos, lo que redundo en beneficio del comportamiento climático de la cavidad, ya que se acercan los valores medidos a los naturales, aunque el rango actual está afectado por el régimen de visitas y el efecto acumulativo del calor en la atmósfera.

En el período de un día, la temperatura, por efecto de un grupo numeroso de visitantes (Ejemplo: en Semana Santa, Fig. 11 a la 16), puede incrementarse hasta en  $0.15^{\circ}\text{C}$ , sin embargo, por acumulación del calor en el sistema, el incremento de la temperatura puede llegar a ser hasta  $0.2^{\circ}\text{C}$  en una semana.

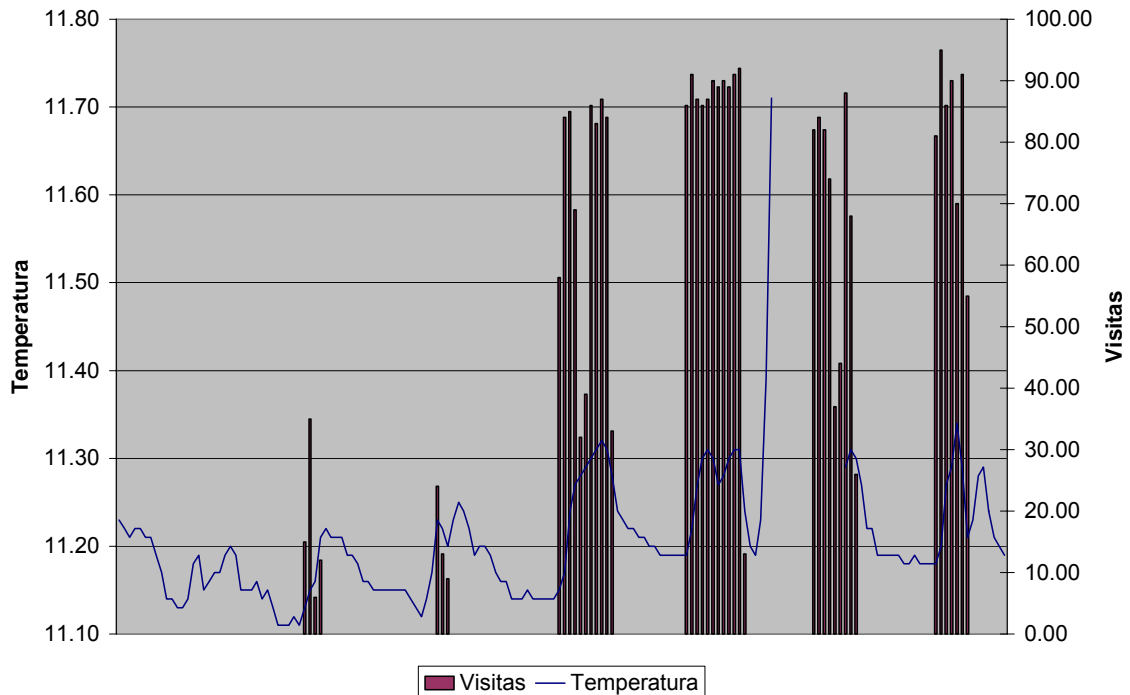


Fig. 11. Entrada 2005 Semana Santa.

Aunque el régimen de visitas se redujo en sólo 10 – 20 personas simultáneas dentro de la cavidad, del total que entraba en los momentos de valores máximos de visitas, la variación de la temperatura, pocas horas después, disminuyó en todas las estaciones, aunque en rangos diferentes, dependiendo de las características morfológicas de la zona donde se encuentran ubicadas.

Es significativa la capacidad de retención del calor en la atmósfera hipogea, lo que se refleja en el incremento de la temperatura en los momentos de mayor cantidad de visitantes a la cavidad, como en las vacaciones o Semana Santa, favorecido por la inercia que le concede al aire el contenido de vapor de agua. En este último período la variación suele ser mayor en un pequeño lapso de tiempo, llegando a incrementos de hasta  $0.07^{\circ}$  C en las estaciones más interiores, mientras que en la entrada pueden llegar hasta algo más de  $0.2^{\circ}$  C.

Teóricamente en la estación de la Entrada no debiera existir el incremento de temperatura registrado, ya que la estación se encuentra ubicada a unos metros por debajo de la pasarela. El calor que llega hasta ella es por el proceso de convección que tiene lugar cuando se abre la puerta de la cueva y entra el aire saturado y recalentado desde el edificio, que se reparte por la sala por el efecto pistón.

La mayor parte de este aire caliente y saturado de vapor se moverá hacia los sectores más elevados de la cavidad cercanos a la entrada, es decir, hacia el sector de la cueva por donde no hay pasarela, coincidiendo con las zonas donde se presenta con mayor potencia el proceso de decalcificación.

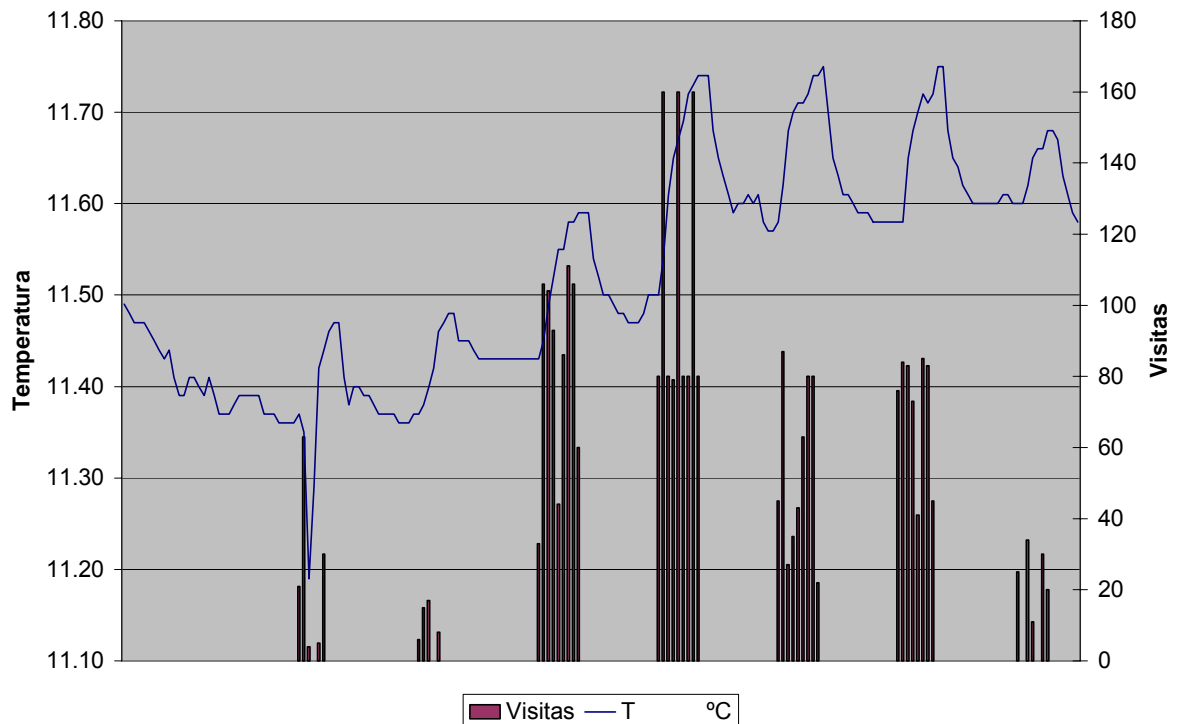


Fig. 12. Entrada 2006 Semana Santa.

Como ejemplo de cálculo de la cantidad de calor cedida por las 304 personas que visitaron la cueva el 28 de agosto de 2004. Al realizar los cálculos, se determinó que la cantidad de calor total, cedida por la masa humana durante el tiempo de permanencia a la cavidad, fue de 89,33 J, cantidad suficiente para incrementar el promedio de temperatura del aire en casi  $0.1^{\circ}\text{C}$ , pues el calor absorbido por la masa gaseosa equivale a 4,79 J. La diferencia entre el calor cedido por la masa humana y el equivalente absorbido por la masa gaseosa radica precisamente en la diferencia de masa, es decir, por la dispersión del calor por toda la cavidad. Este incremento se produce en uno de los meses más cálidos de la atmósfera hipogea.

Al realizar el mismo cálculo en Semana Santa, tomando el día 14 de abril de 2006, cuando entraron 959 personas a la cueva, se obtiene que la masa humana cede un total de 281,81 J, mientras que la cavidad sólo absorbió 11,28 J, válidos para el incremento promedio de la temperatura de  $0.17^{\circ}\text{C}$ . Es significativo el comportamiento en la estación Órgano, donde sólo incrementó la temperatura en  $0.08^{\circ}\text{C}$ , lo que puede deberse a dos factores:

- La morfología del sector ayuda a una rápida difusión del calor hacia el resto de la cueva.
- El paso de los visitantes fue muy rápido por esa zona.

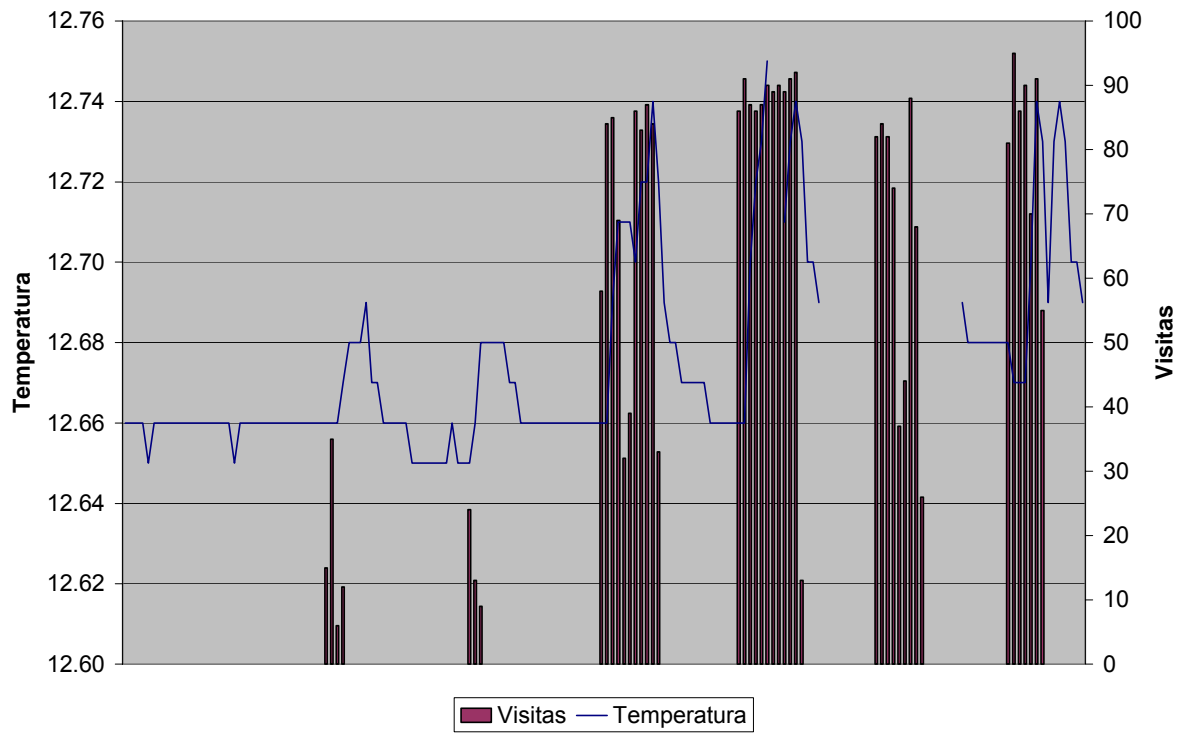


Fig. 13. Órgano 2005 Semana Santa

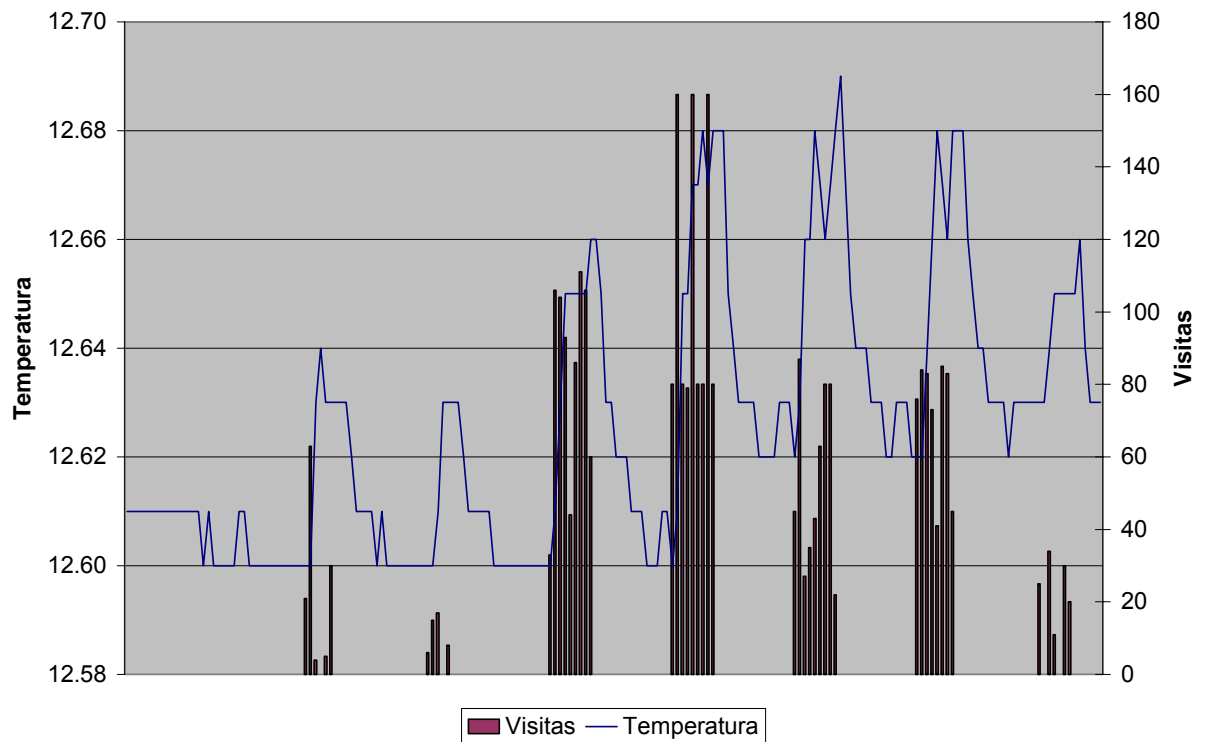


Fig. 14. Órgano 2006 Semana Santa

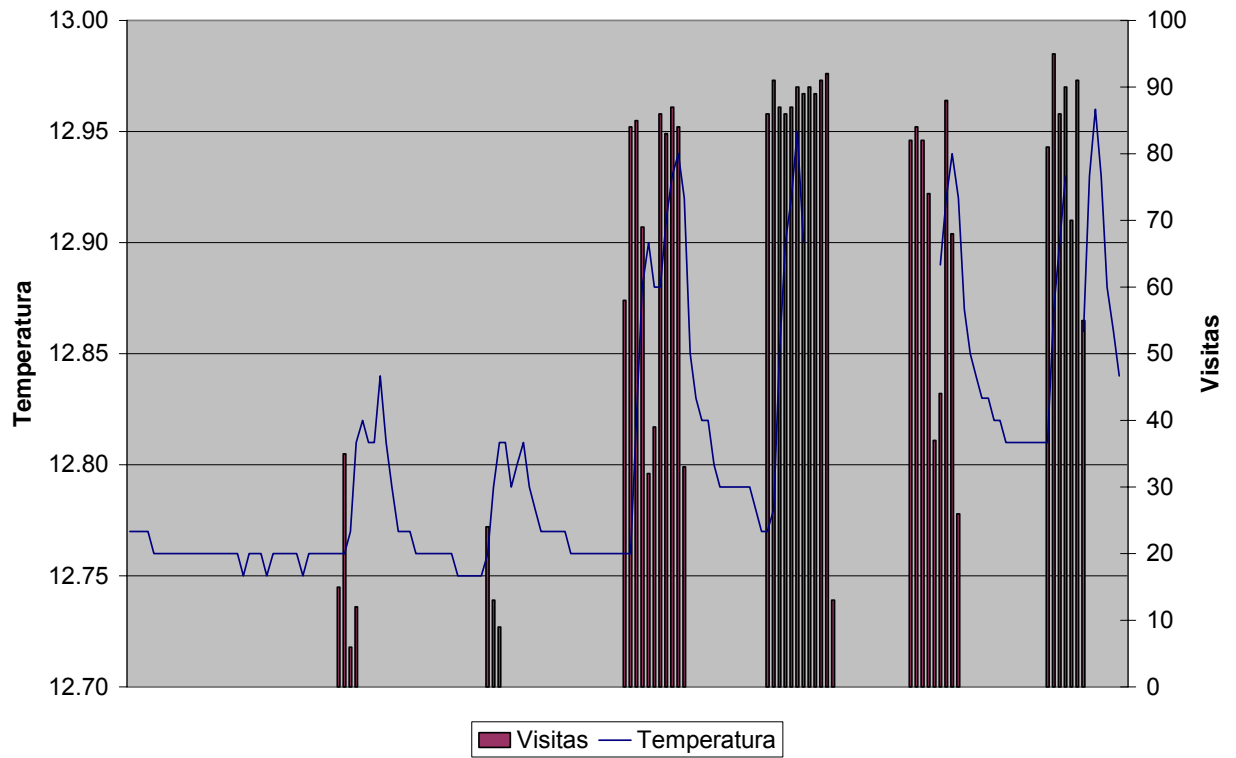


Fig. 15. Versailles. 2005. Semana Santa.

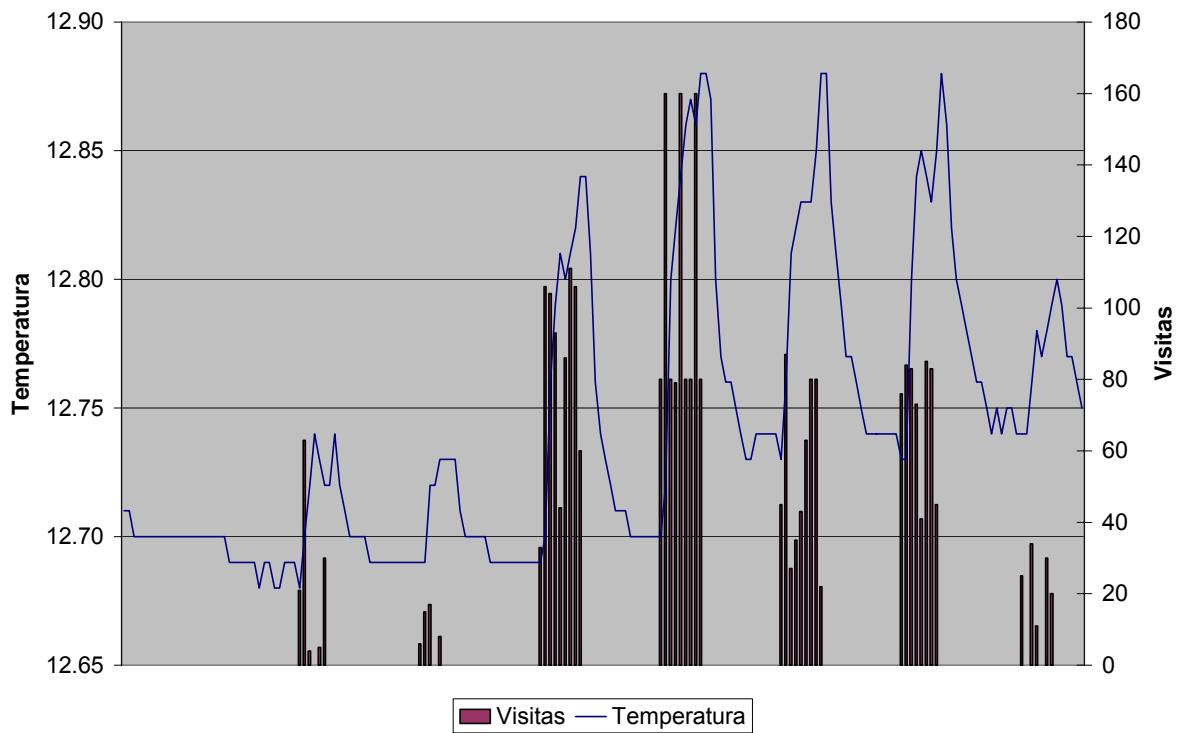


Fig. 16. Versailles. 2006. Semana Santa.

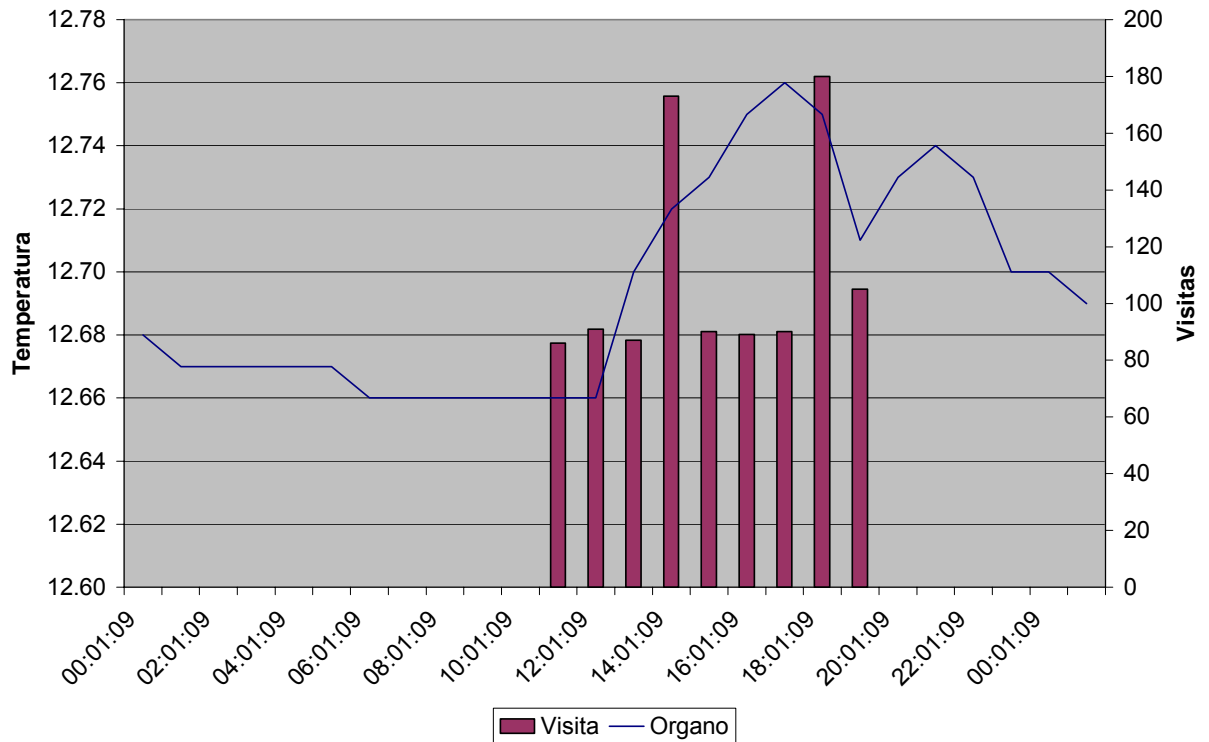


Fig. 17. Comportamiento de la temperatura del aire en relación con el régimen de visitas en la estación Órgano el día 25 de marzo de 2005, en el que el total de personas fue de 991.

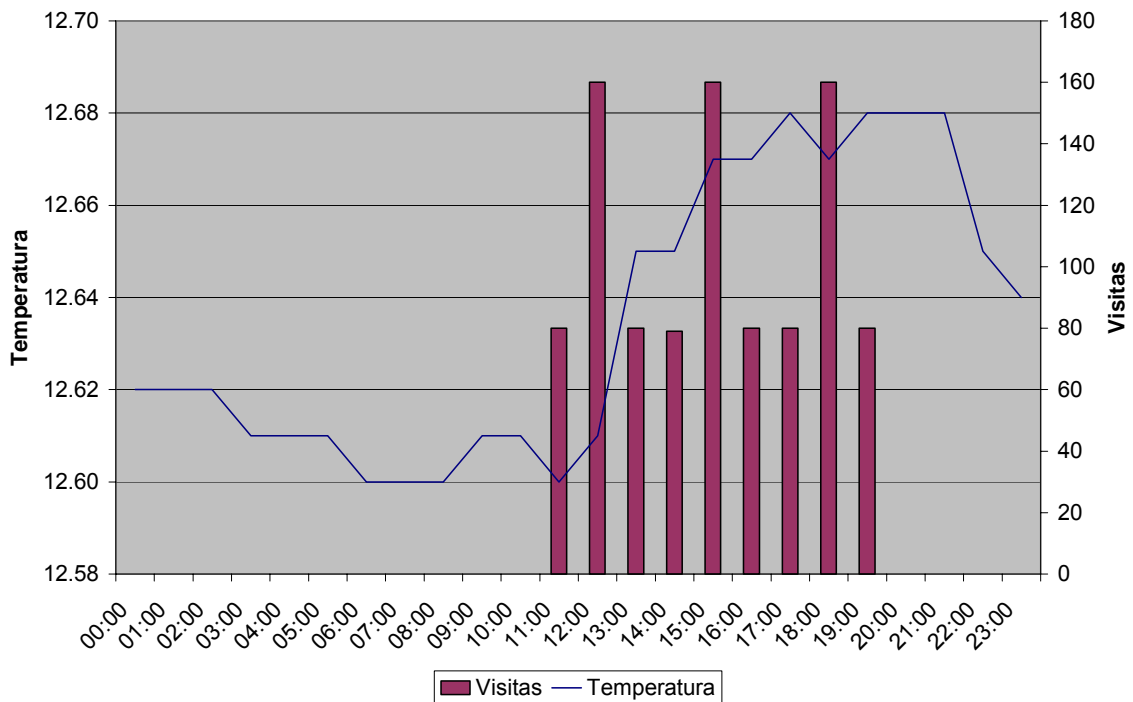


Fig. 18. Comportamiento de la temperatura del aire en relación con el régimen de visitas en la estación Órgano el día 14 de abril de 2006, en el que el total de personas fue de 958.

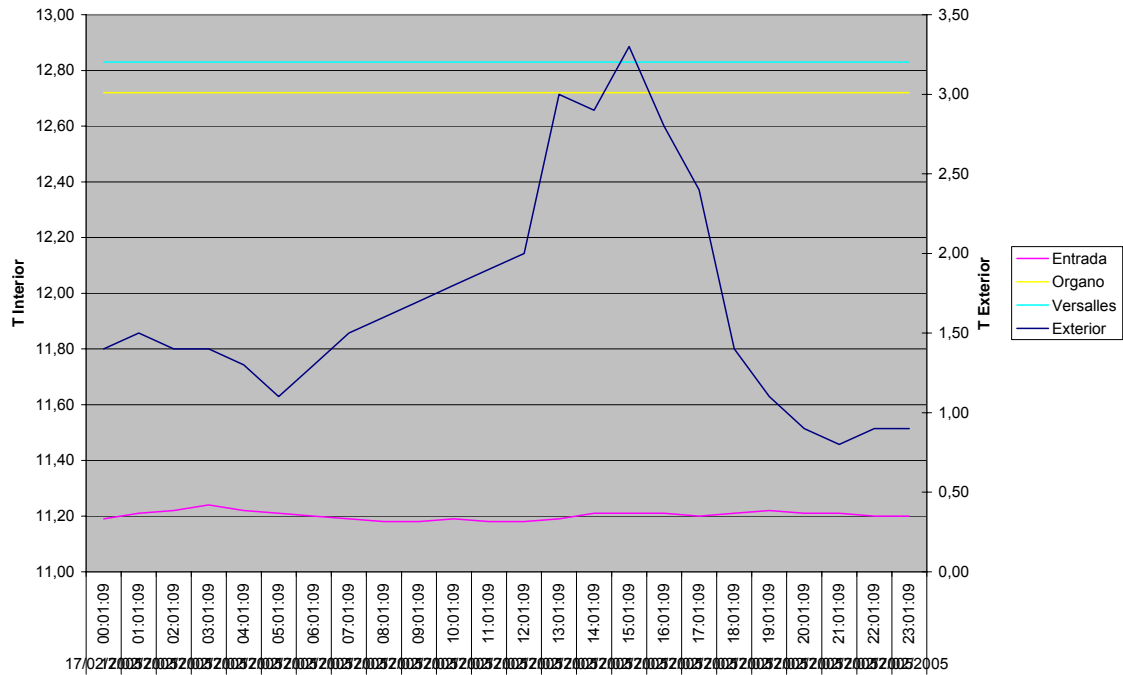


Fig. 19. Comportamiento de la temperatura el 17 de febrero de 2005 en el interior y exterior de la cueva. En los días anteriores no hubo visitas.

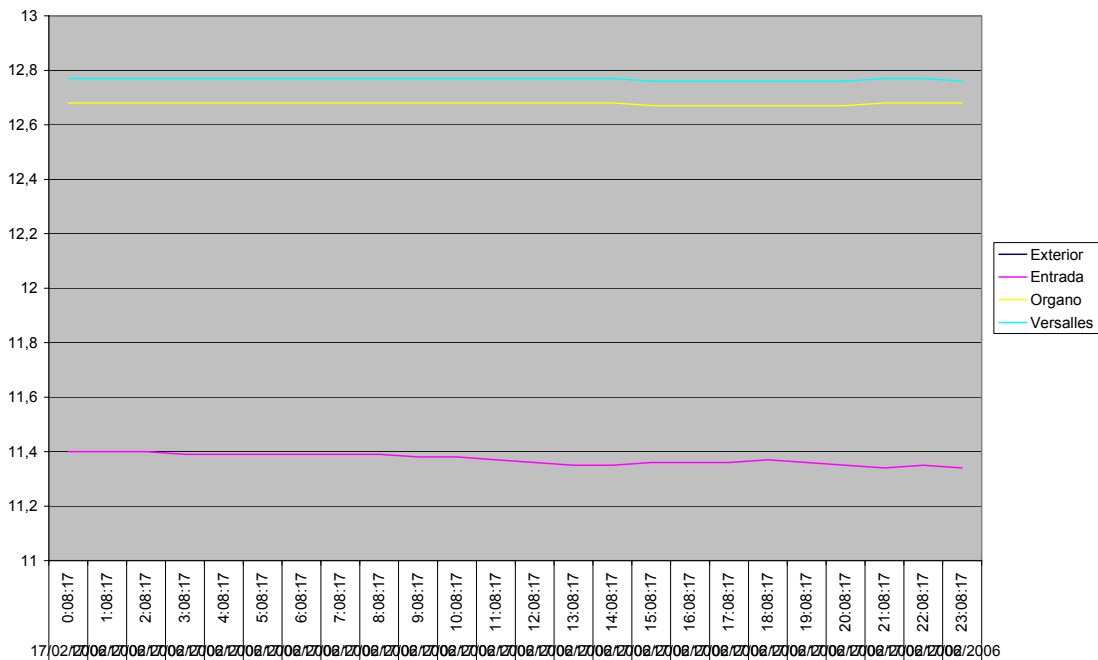


Fig. 20. Comportamiento de la temperatura en el interior de la cueva el 17 de febrero de 2006. En el exterior no se pudo medir por dificultades con el equipo. En los días anteriores no hubo visitas.

En el mes de febrero el recorrido de la temperatura se comportó de forma muy similar en ambos periodos de medición, aunque durante el 2006 se acercaron los valores de las diferentes estaciones, es decir, en los sectores más internos de la cueva se registró un leve descenso, mientras que en la estación Entrada hubo un incremento de casi dos décimas.

Como se mencionó anteriormente, este efecto se debe a una redistribución del campo de temperaturas en el salón por el cierre de las grietas en el exterior.

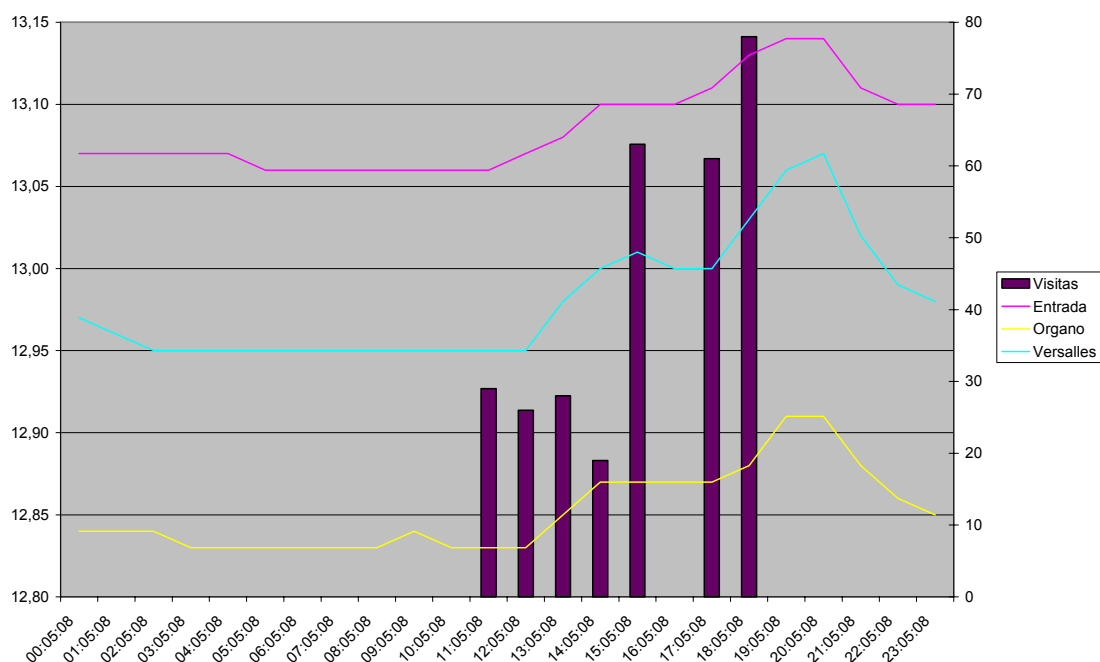


Fig. 21. Comportamiento de la temperatura el día 28 de agosto de 2004 relacionado con las visitas. El total de personas fue de 304.

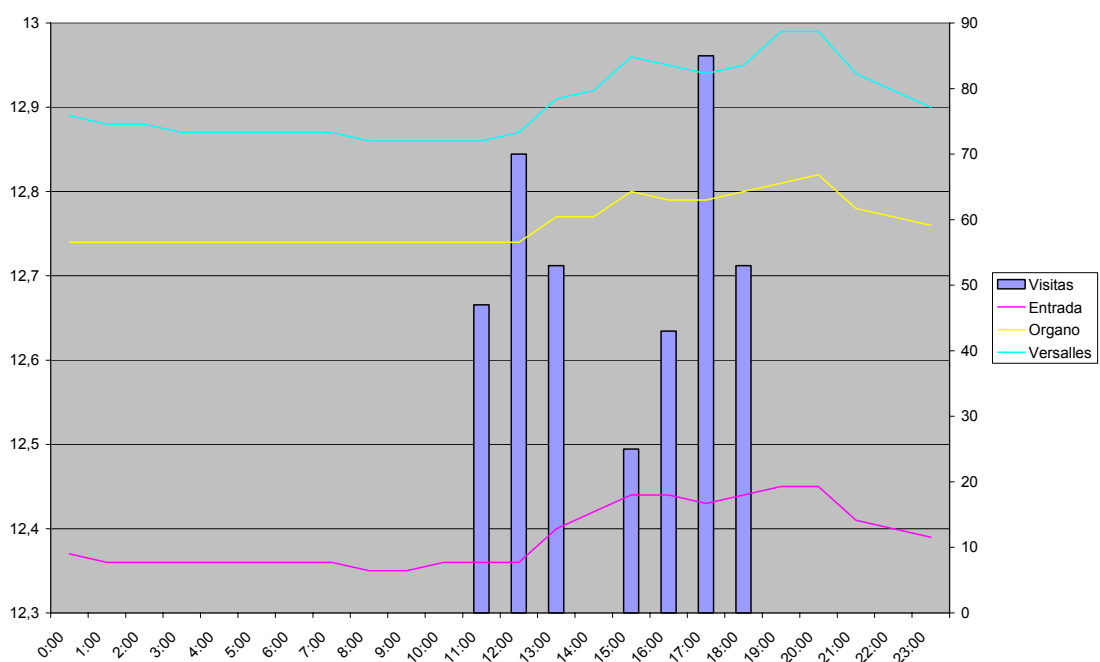


Fig.22. Comportamiento de las temperaturas el 7 de agosto de 2005 relacionado con las visitas. El total de personas en el día fue de 376.

En el mes de agosto también se manifiesta la redistribución del campo de temperaturas en la cueva, a pesar que la cantidad de visitantes del 7 de agosto de 2005 fue superior en 72 personas, las temperaturas en todas las estaciones

fueron inferiores. La mayor diferencia registrada tuvo lugar en la estación Entrada, con una diferencia de casi un grado.

### 2.3. Transferencia de calor del aire a la roca y el agua

La transferencia de calor entre dos cuerpos diferentes tiene lugar desde un cuerpo más frío a uno más caliente, como enuncia la Segunda Ley de la Termodinámica, por lo que en el caso de Pozalagua, la transferencia tendrá lugar desde la masa gaseosa hacia la roca y el agua.

Estaciones	Exterior	Entrada	Órgano	Versalles	H <sub>2</sub> O Org	H <sub>2</sub> O Vers	Roca
Promedio	11.98	12.07	12.77	12.88	12.54	12.24	12.67

*Tabla V. Promedios de la temperatura en las diferentes estaciones, el agua y la roca.*

El agua, elemento que varía su volumen dentro de la cavidad en estado líquido, entra en la cavidad por 2 vías: el goteo, que se aprecia desde las formaciones secundarias, que puede variar desde muy lento a convertirse en un chorro continuo, y la circulación normal del agua subterránea por las grietas y los espacios inter estratos.

En ambos casos la permanencia del agua en la matriz rocosa va a depender de varios factores, entre los que predominan el diámetro de los conductos y la presión hidrostática.

Es precisamente el tiempo que permanece el agua en la roca, quien le confiere características particulares de temperatura, composición química, presión parcial de CO<sub>2</sub>, entre otras. A mayor velocidad de circulación, menor tiempo de permanencia y todo se traduce en menor intercambio de masa y energía.

En el caso de la roca, no tiene movimientos perceptibles que resulten de interés para el intercambio energético, por lo que va a relacionarse de forma permanente y constante con la masa gaseosa de la cueva. Entre sus características más sobresalientes, desde un punto de vista termodinámico, se aprecia su bajo coeficiente de conductividad del calor, lo que permite que la cueva pueda ser tratada como un sistema termodinámico aislado.

El nivel de agrietamiento que presenta la matriz rocosa favorece la transferencia, a pequeña escala, del calor. El volumen de roca en el macizo siempre es muy superior al de la cavidad contenida en el.

La transmisión de calor en la roca sólo podrá tener lugar por conducción, ya que la difusión en los sólidos es muy limitada, sólo tiene lugar a través de algunos gases que penetran en sus poros, pero a una velocidad extremadamente baja, que no tiene significado práctico desde el punto de vista energético.

Debido precisamente a estas características, la roca va a presentar una estratificación térmica en las capas más superficiales, incluyendo la que se encuentra en contacto directo con el aire, como se muestra en la Figura 23.

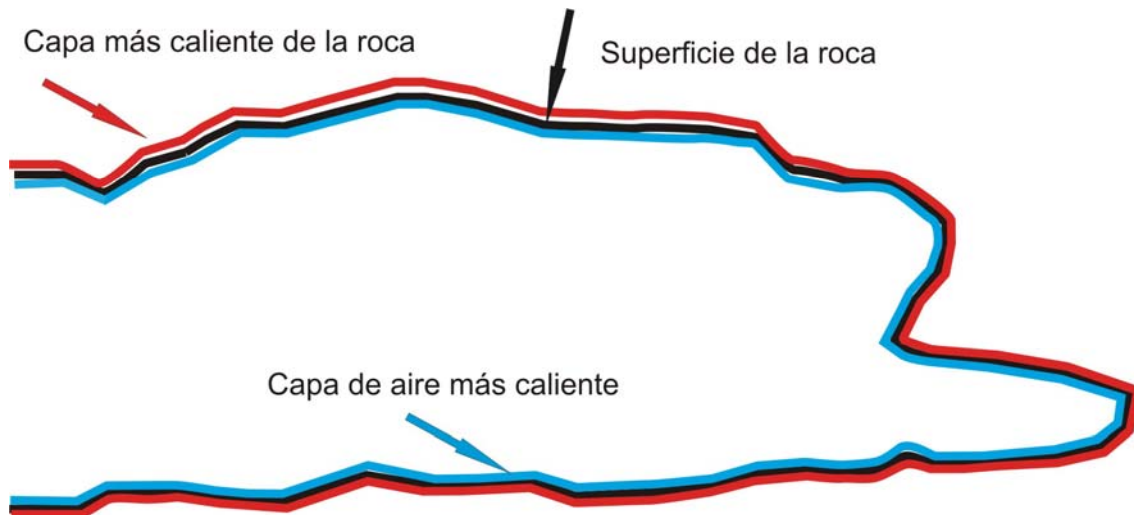


Fig. 23. Distribución térmica en las capas más superficiales de la roca y el aire.

Atendiendo a ésta distribución de las capas, la masa gaseosa estará intercambiando energía constantemente con la roca, siempre que ésta última tenga la capacidad suficiente de difundir el calor hacia las profundidades. El intercambio cesa cuando se establece un equilibrio entre la capa de aire circundante, que por lo general es muy fina, y la capa superficial de la roca.

El mecanismo de transferencia es el siguiente: la masa gaseosa, al entrar en contacto con la capa límite de aire que la separa de la roca, le transmite parte del calor que tiene. Al incrementar la temperatura de la capa, rompe el equilibrio térmico que tenía con la roca, incrementando su temperatura hasta el punto de transmitirle calor a la roca. La capa más exterior de la matriz rocosa se calienta y forma un gradiente térmico hasta cierta profundidad, donde se establece la isoterma de la zona en que se encuentra.

A partir de este momento la roca trata de mantener su equilibrio térmico, difundiendo el calor proveniente de la cueva, aunque a una velocidad muy lenta, hasta que llega a un equilibrio con la masa gaseosa.

En el caso de la cueva Pozalagua, la cantidad de energía que intercambia la masa gaseosa con la matriz rocosa va a depender del régimen de visitas, el que a su vez, está influenciado por la época del año.

Al ser la variación total de la temperatura en las estaciones interiores inferior a un grado centígrado, se decidió realizar los cálculos a partir de los promedios obtenidos en los dos años de mediciones. Este cálculo sólo se realiza en las estaciones Órgano y Versalles por la influencia que puede tener sobre la temperatura de la roca el poco espesor de la misma.

Al realizar los cálculos de transferencia de calor por convección, a partir de una lámina mirando hacia arriba, debido a que la dirección de la entrega es de la masa gaseosa a la roca, ubicándose ésta última encima de la primera, el aire cede un total de 0.008 J/h en el sector de la estación de Versalles como promedio en los dos años de mediciones.

Si se compara este resultado con los datos reportados anteriormente de ganancia de calor por la masa gaseosa, resulta una cantidad insignificante, pero se debe tener en cuenta que, los cálculos anteriores están basados en la variación de la temperatura en fechas específicas, mientras que la cantidad de calor mencionada aquí se refiere a transferencia a la roca como promedio durante los dos años de mediciones. En ese período de tiempo la temperatura ha ascendido y descendido en la masa gaseosa, existiendo periodos de mayor cesión de calor del aire a la roca y otros de menor transferencia.

Además, se debe tener en cuenta que la transferencia de calor calculada anteriormente es a partir de una masa de personas que visitó la cavidad por un tiempo limitado, mientras la transferencia con la roca tiene lugar constantemente.

Atendiendo a esto último, el calor total promedio que ha transferido por convección, desde la masa gaseosa a la matriz rocosa, durante todo el período de mediciones es de 73.84 J, sólo en el sector de la estación de Versailles, que se asumió como el cuadrante más cercano al equipo de medición.

El agua es el otro agente de enfriamiento que se encuentra en la cavidad, aunque su volumen es variable, dependiendo del periodo climático reinante y las precipitaciones en el exterior.

Para tener una idea, y poder comparar la transferencia de energía entre la masa gaseosa y la líquida se calculó este parámetro para un metro cuadrado, aunque en la realidad, la cantidad total de calor transferido entre ambos sistemas depende del área que ocupa el espejo de agua.

En la estación Órgano la cantidad de calor que el aire le cede al agua es de  $0.0000007 \text{ J/m}^2$ , mientras que en Versailles es superior, con un valor de  $0.000002 \text{ J/m}^2$ . Si lo comparamos con la transferencia que tiene lugar en la roca, teniendo en cuenta sólo el área unitaria y no como fue calculado el valor anteriormente para todo el sector, en la estación Versailles el aire le cedió  $0.008 \text{ J/m}^2$  a la roca.

	Roca		Agua	
	Órgano $\text{J/m}^2$	Versalles $\text{J/m}^2$	Órgano $\text{J/m}^2$	Versalles $\text{J/m}^2$
2004 - 2005	$1,87 \cdot 10^{-06}$	$4,02 \cdot 10^{-06}$	$1,45 \cdot 10^{-06}$	$1,39 \cdot 10^{-06}$
2005 - 2006	$1,22 \cdot 10^{-06}$	$3,33 \cdot 10^{-06}$	$9,22 \cdot 10^{-08}$	$3,27 \cdot 10^{-06}$

Tabla VI. Comportamiento promedio de la transferencia de calor desde el aire hacia los sistemas de roca y agua en Órgano y Versailles.

En la tabla VI se aprecia la disminución de la transferencia de calor desde el periodo 2004 – 2005 al 2005 – 2006, tanto desde la atmósfera hacia el sistema líquido como hacia la roca. Teniendo en cuenta que la temperatura promedio de la roca se mantiene prácticamente invariable en ambos periodos, significa que la diferencia de transporte de calor es generada por la variación de la

energía interna del aire. Es importante aclarar que el agua absorbió menos calor en ambos periodos que la roca, todo esto referido a una unidad de área ( $m^2$ ). Si se tiene en cuenta el área total para ambos sistemas, la roca absorbe una cantidad muy superior por el área de intercambio.

#### 2.4. Comportamiento del $CO_2$ .

El  $CO_2$  es una de las variables más importantes a la hora de valorar la influencia que ejercen los visitantes en la cavidad sobre los procesos destructivos que puedan tener lugar en la misma, producto de la decalcificación de las formaciones secundarias, que en el caso de Pozalagua, es el recurso natural a proteger más abundante.



*Fig. 24. Formaciones secundarias totalmente decalcificadas en Pozalagua. A pesar que a simple vista se ven naturales, cuando se les tocan se desmoronan totalmente.*

De forma natural, el  $CO_2$  tiene varias formas de acceder al interior de la cueva:

- Por la circulación natural a través de las entradas, ya sean naturales o artificiales.
- Por el agua de infiltración que cede al aire el excedente de este gas recogido del sustrato vegetal.
- Por reacciones químicas, donde se cede  $CO_2$  a la masa gaseosa.
- Por la respiración de la biota, incluida la presencia del hombre.

En el periodo 2004 – 2005 se corroboró que el contenido de  $CO_2$  en la atmósfera cavernaria varía en dependencia del número de visitantes, mientras que el tiempo de recuperación dependerá de la frecuencia de los números de visitantes superiores a las 40 personas simultáneas en la cavidad. Esto fue confirmado en el periodo 2005 – 2006.

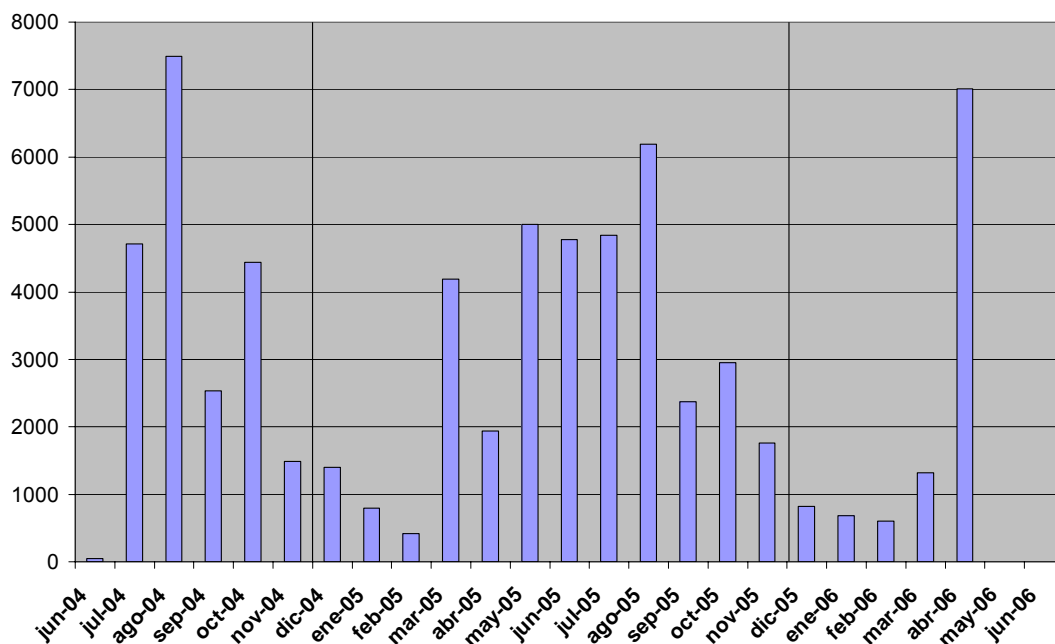


Fig. 25. Comportamiento del total mensual de las visitas durante los dos periodos de mediciones.

Años	Meses											
	E	F	M	A	M	J	J	A	S	O	N	D
2004						52	4708	7496	2535	4442	1491	1402
2005	798	421	4192	1941	4998	4775	4842	6188	1597	3173	1761	817
2006	686	600	1321	3971								

Tabla VII. Comportamiento de las visitas mensuales en Pozalagua por años.

	Total
2004	22126
2005	32330
2006	6578

1

	Total
2004 - 2005	34476
2005 - 2006	26558

2

Tabla VIII. Comportamiento del total de visitas en Pozalagua. En la tabla 1 se presentan los totales anuales, en la tabla 2 durante los periodos de medición.

El comportamiento de las visitas se puede dividir en dos estaciones: una de baja afluencia de público a la cavidad y otra de alta afluencia, perteneciendo los meses de mayo a octubre al primer grupo, mientras que el resto de los meses quedarían en el segundo. Se aprecia que, el mes de marzo o abril, según se desarrolle el período de Semana Santa, el total de visitantes se incrementa a un total cercano a 4000. Más de 75 % de las visitas se producen precisamente durante esa semana, llegando a presentar más de 900 visitas en un día.

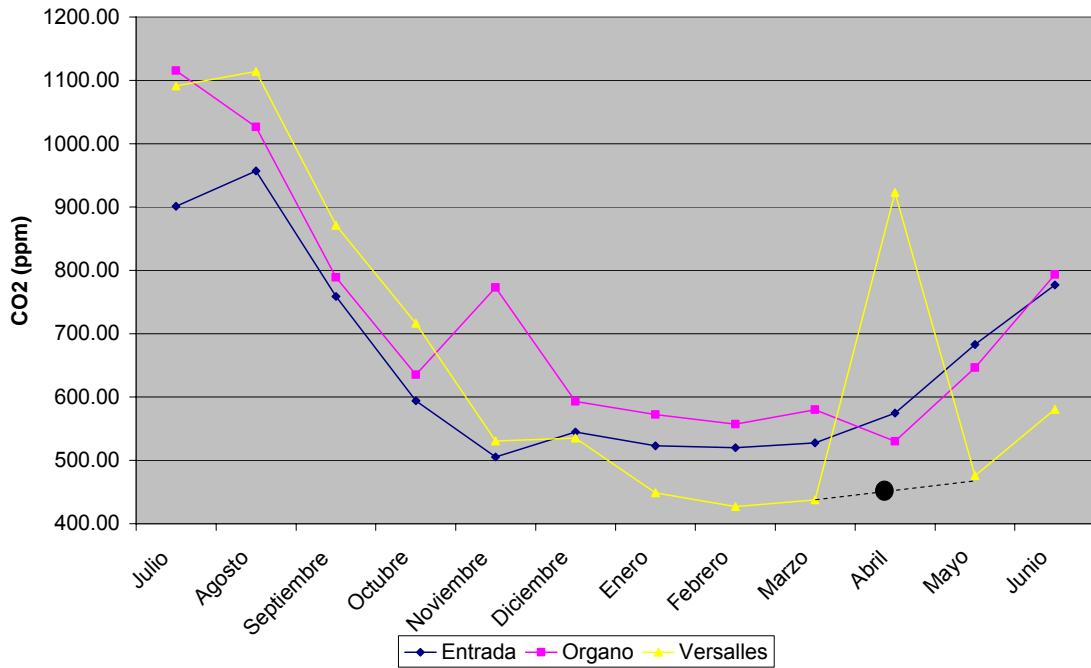


Fig. 26. Comportamiento del promedio de CO<sub>2</sub> por meses en cada estación en el período 2004-2005. En el mes de abril se simuló, con líneas discontinuas, el comportamiento que debiera haber tenido este gas.

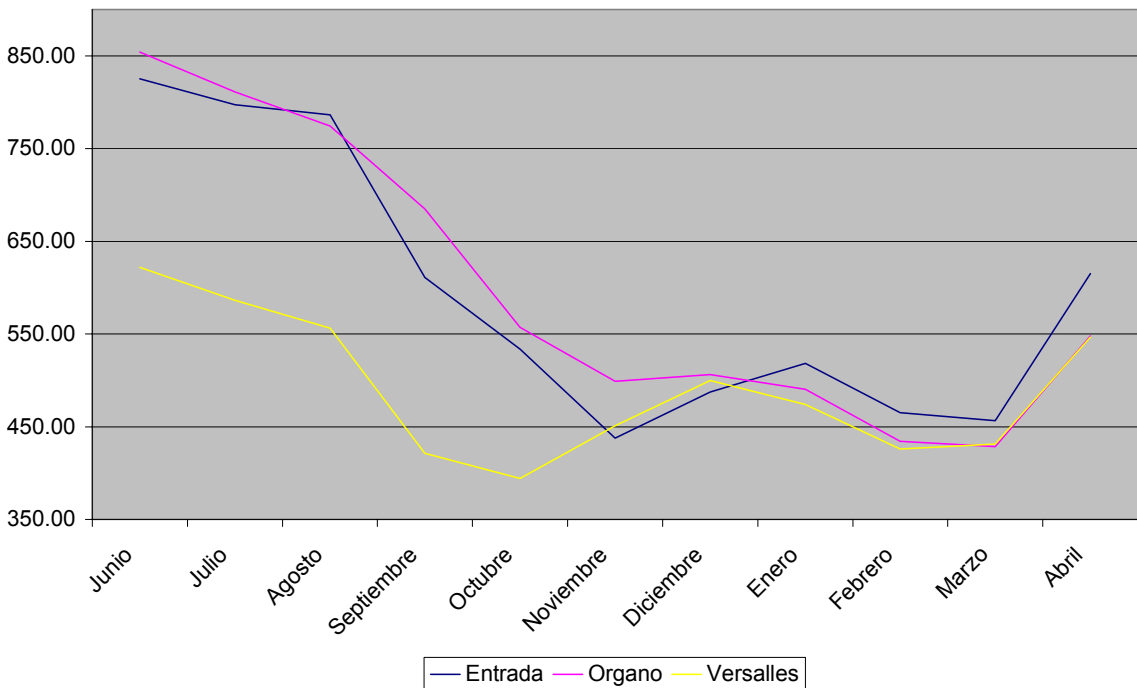


Figura. 27. Promedio mensual del CO<sub>2</sub> durante el período 2005-2006.

En las figuras 26 y 27 se aprecia el comportamiento del promedio mensual del CO<sub>2</sub> en los dos periodos de mediciones.

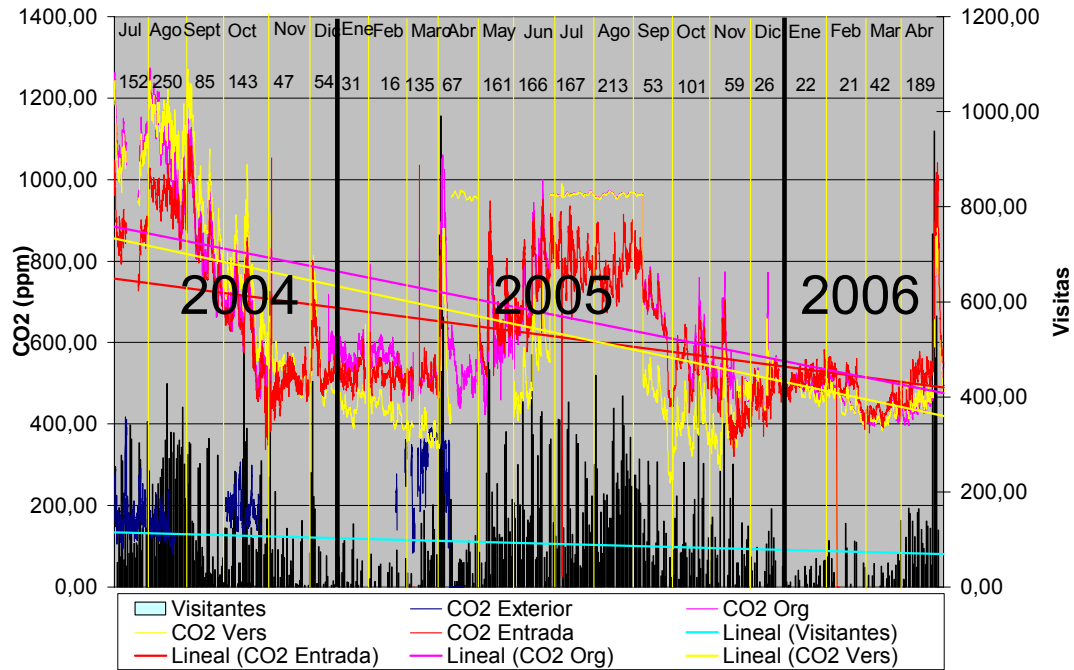


Fig. 28. Comportamiento de la concentración de CO<sub>2</sub> en la masa gaseosa de la cavidad entre los meses de junio de 2004 y mayo de 2006, representación de la tendencia lineal y su relación con el número de visitantes. Bajo el nombre de cada mes se presenta el promedio diario de visitantes.

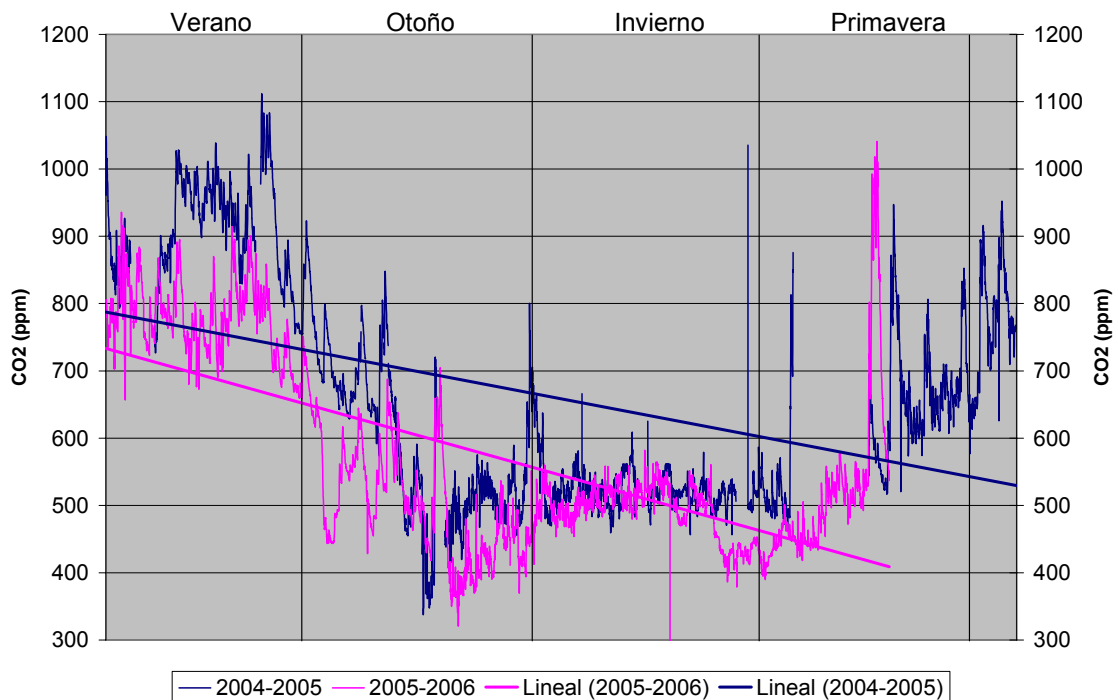


Fig. 29. Comparación del comportamiento del CO<sub>2</sub> en la estación Entrada durante los dos períodos de mediciones.

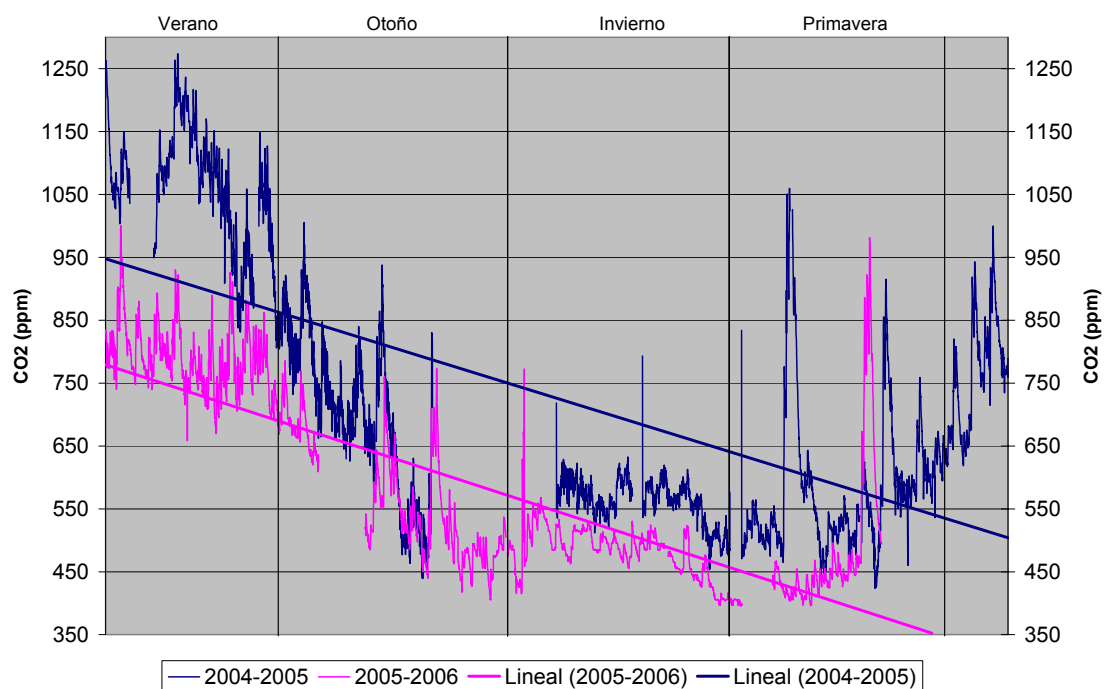


Fig. 30. Comparación del comportamiento del CO<sub>2</sub> en la estación Órgano durante los dos períodos de mediciones.

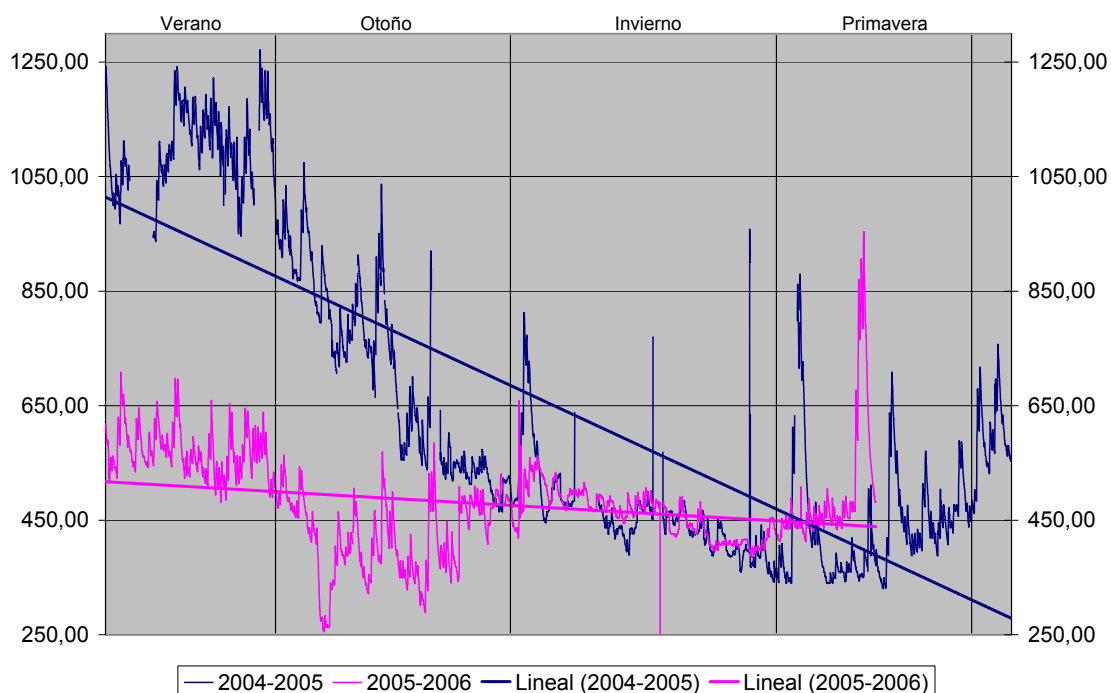


Fig. 31. Comparación del comportamiento del CO<sub>2</sub> en la estación Versailles durante los dos períodos de mediciones.

Al comparar los periodos estudiados, se aprecia una disminución de la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera durante el 2005 – 2006, directamente relacionado con la reducción de visitantes en igual espacio de tiempo, quedando evidenciado por la pendiente de las líneas de tendencia en cada uno de los gráficos presentados.

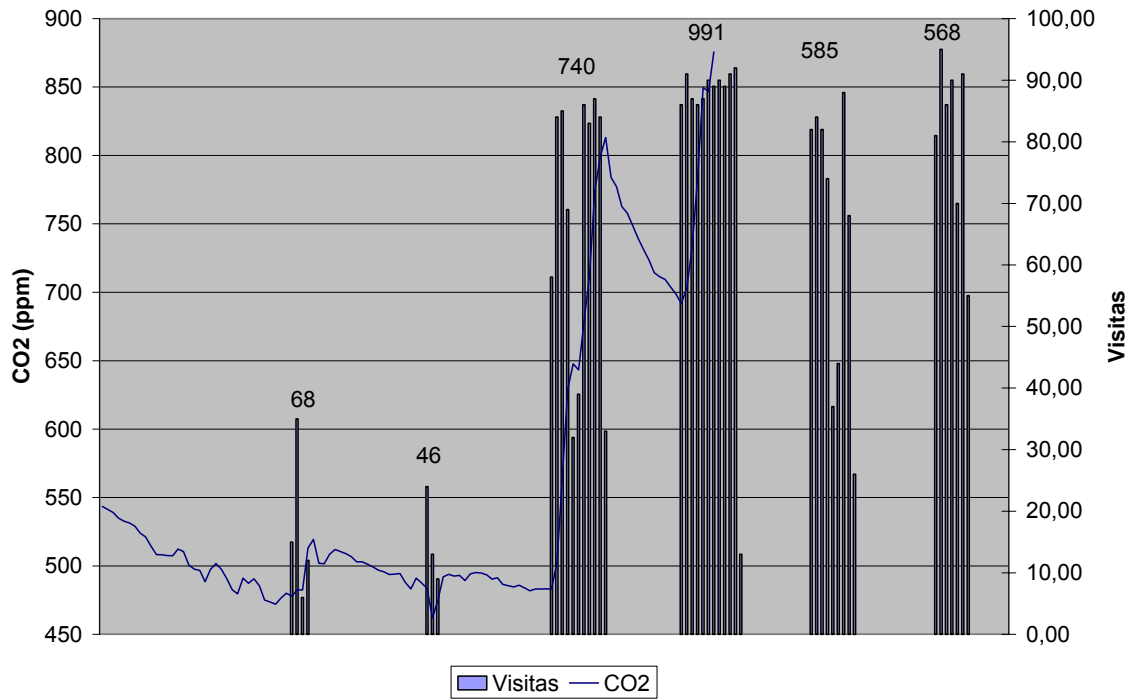


Fig. 32. Entrada 2005. Comportamiento del CO<sub>2</sub>. Semana Santa

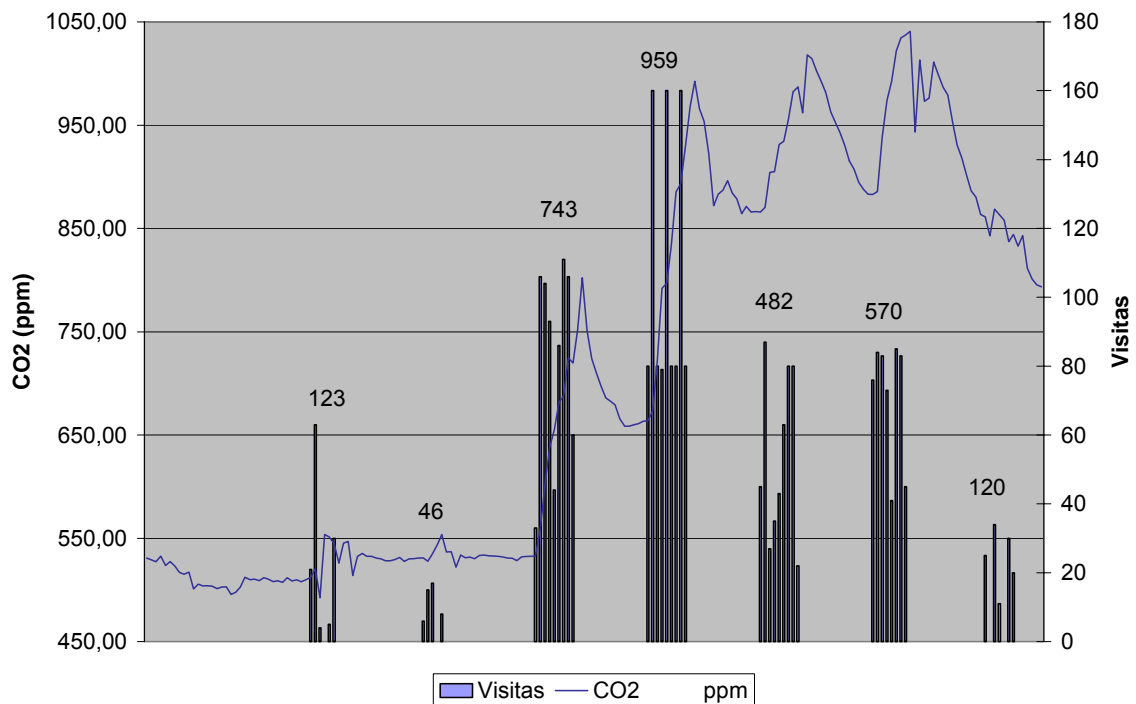


Fig. 33. Entrada 2006. Comportamiento del CO<sub>2</sub>. Semana Santa.

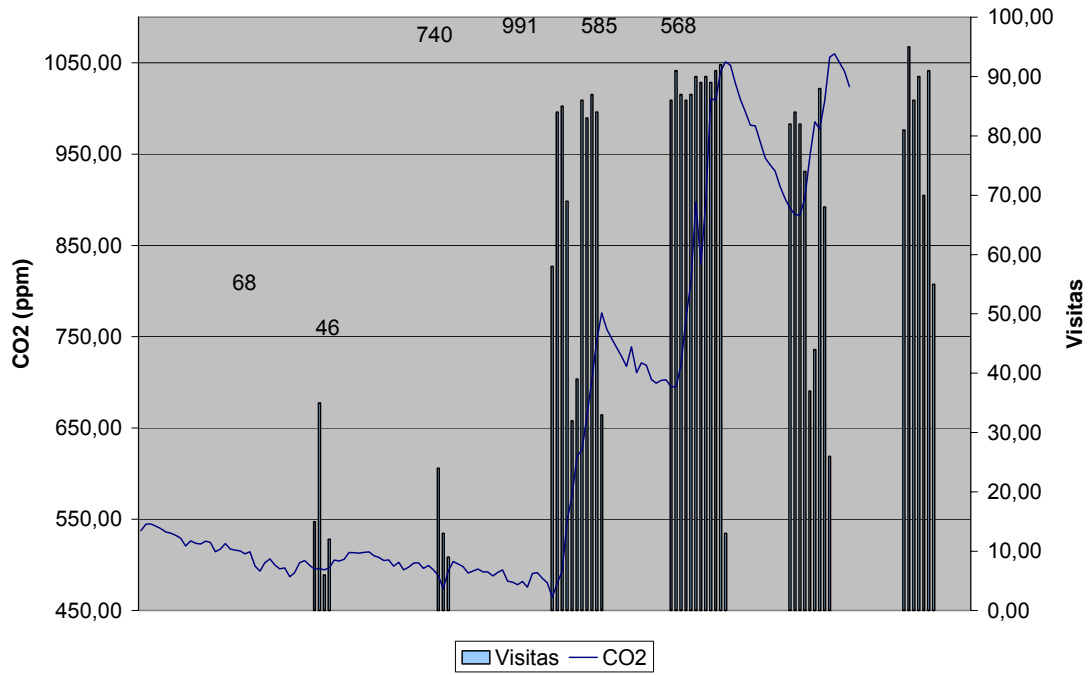


Fig. 34. Órgano 2005. Comportamiento del CO<sub>2</sub>. Semana Santa.

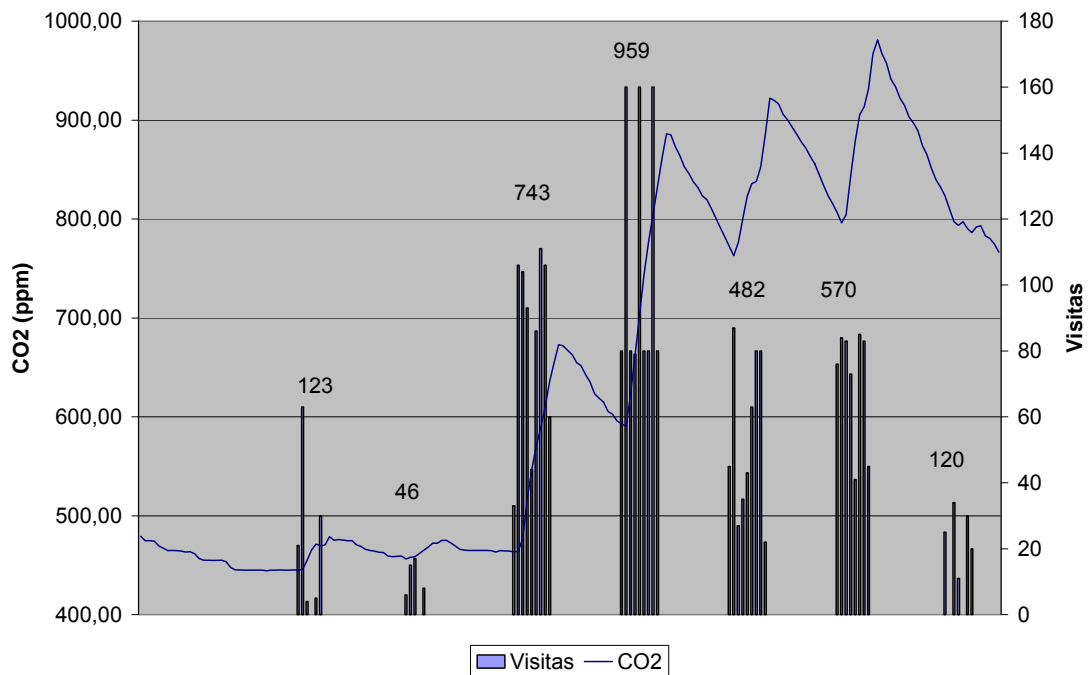


Fig. 35. Órgano 2006. Comportamiento del CO<sub>2</sub>. Semana Santa.

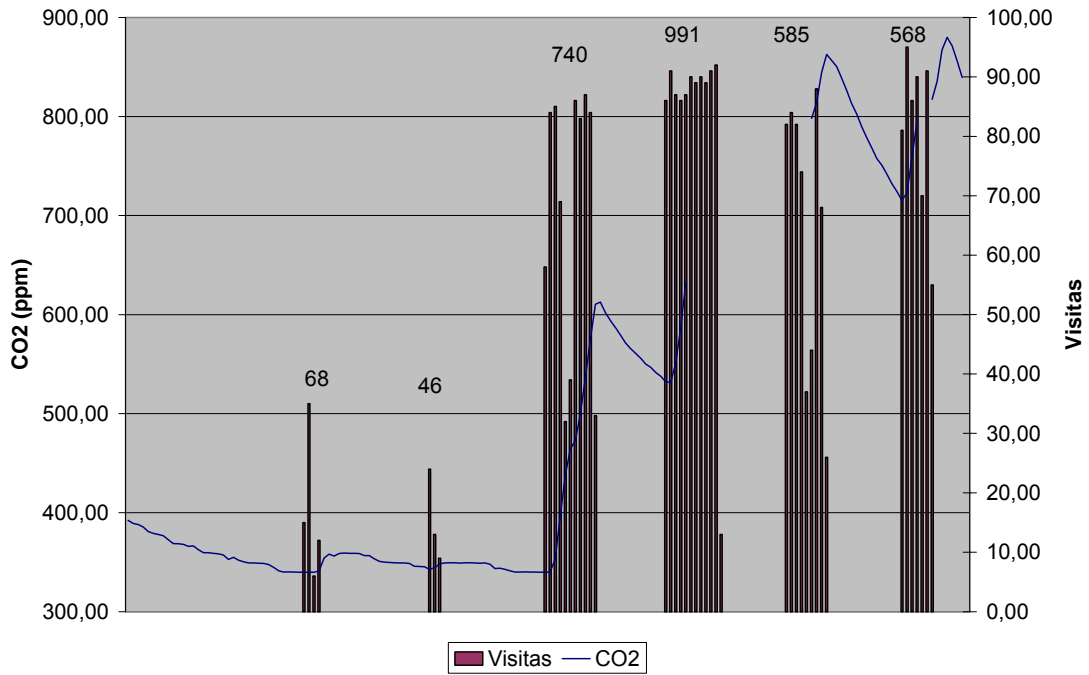


Fig. 36. Versailles 2005. Comportamiento del CO<sub>2</sub>. Semana Santa.

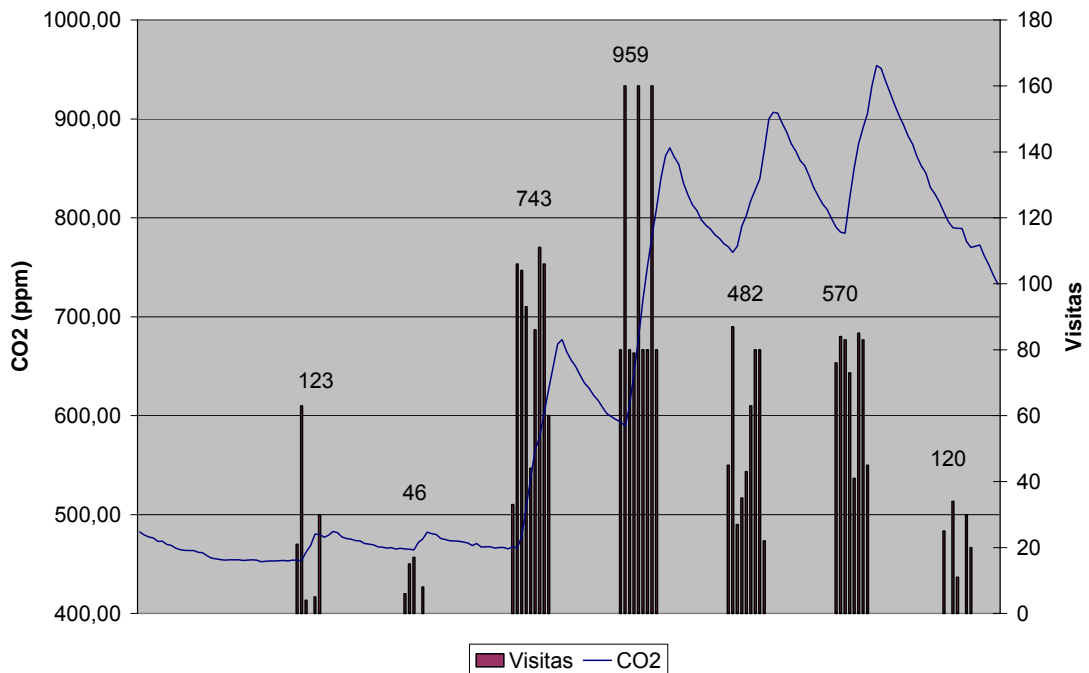


Fig. 37. Versailles 2006. Comportamiento del CO<sub>2</sub>. Semana Santa.

En el periodo de Semana Santa, cuando tienen lugar los valores extremos de visitas, llegando hasta más de 900 personas en un día en la cavidad, tiene lugar también el mayor incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en un corto intervalo de tiempo. En este espacio de tiempo también se puede notar un descenso en la cantidad de visitas a la cueva, siendo de 3043 durante el 2005 – 2006 contra 3225 durante el 2004 – 2005.

En todos los casos se aprecia un retardo de al menos dos horas para el incremento de la concentración del CO<sub>2</sub>, aunque la pendiente es bastante elevada, llegando a ser de hasta 270 y más ppm. Cuando los picos de la curva son máximos, la recuperación resulta bastante rápida en un inicio, llegando a disminuir la concentración en una cantidad a veces similar a la que incrementó durante el día. La recuperación final llega a tardar desde tres días a una semana, en dependencia del régimen de visitas, en cantidad de personas que entran a la cueva y su frecuencia.

En la primera etapa del estudio, la circulación del CO<sub>2</sub>, teniendo en cuenta un movimiento a nivel molecular por diferencia de presiones parciales (movimiento Bowniano) se determinó como se aprecia en la siguiente figura.



*Fig. 38. Flujo del CO<sub>2</sub> en la cueva desde las estaciones climáticas hacia el exterior durante el periodo 2004 – 2005.*

En aquel entonces existían una serie de grietas que comunicaban con el exterior, permitiendo la circulación por ellas del CO<sub>2</sub> hacia el sistema epigeo. Las obras realizadas en el mes de octubre de 2005 contemplaron sellar esas grietas, con lo que se redujo el volumen que circulaba por las mismas. En la actualidad el CO<sub>2</sub> se distribuye más hacia el sector sur, intercambiando con el exterior a una velocidad mucho menor que en el periodo anterior.



Fig. 39. Distribución del CO<sub>2</sub> en la cavidad con la entrada de grupos numerosos de personas durante el periodo 2005 – 2006. Aunque se distribuye más por toda la cavidad mantiene la tendencia de migrar hacia la zona sur de la cavidad, donde fueron selladas las grietas desde el exterior.

Aunque las grietas de mayor volumen fueron selladas en el sector sur de la cavidad, aun se mantiene en esa zona un sistema de fisuras de menor diámetro, que mantienen el intercambio entre ambos sistemas, exterior e interior, por lo que el movimiento de la masa de CO<sub>2</sub> predomina hacia ese sector.

La concentración del gas de referencia se mantiene elevada en el transcurso de una parte importante del año, lo que favorece la disolución del CO<sub>2</sub> en el agua de condensación que se deposita en la roca. Ésta agua acidulada, por la disolución del CO<sub>2</sub> que se transforma en ácido carbónico, es la que ataca la roca, provocando los efectos de intemperismo observados en la cavidad, predominando el proceso de decalcificación.

	Órgano	Versalles	Visitas	Visitas 2	Visitas 3	Visitas 4
Entrada	0,33	0,50	0,22	0,37	0,34	0,24
Órgano		0,41	0,14	0,33	0,30	0,17
Versalles			0,30	0,62	0,63	0,43

Tabla IX. Correlación entre la variación de la concentración de CO<sub>2</sub> de las estaciones en el interior de la cueva y la cantidad de visitantes. Leyenda: *Visitas*. Es la correlación en la hora de la entrada de los visitantes. *Visitas2*. Es la correlación 2 horas después de la entrada de cada grupo de visitantes. *Visitas3*. Es la correlación 3 horas después de la entrada de cada grupo de visitantes.

En la tabla IX se aprecia que la máxima concentración medida por los equipos tiene lugar tres horas después que pasan los visitantes por la estación Versalles. El análisis se realizó tomando como data original la variación de la

concentración de CO<sub>2</sub> en cada hora, contrastándolo con el número de personas.

Como se aprecia en la tabla, referenciada en el párrafo anterior, la estación que presenta mejor correlación es precisamente Versailles, con un coeficiente de 0,63 y  $r^2 = 0,4$ , lo que significa que, la expresión lineal dada a continuación, explica un 40 % de las variaciones de la concentración de CO<sub>2</sub> que tienen lugar en la cueva. Este bajo por ciento se justifica por:

- La morfología de la cueva. Al ser un salón de forma similar a un rectángulo, visto en planta, además de su forma irregular en el corte longitudinal, el CO<sub>2</sub> que expulsan los visitantes se difunde hacia el resto de la cavidad, dependiendo la concentración del tiempo de permanencia en cada sector.
- Geometría de la pasarela. La pasarela es predominantemente estrecha, lo que no permite la aglomeración de personas. La reunión de los visitantes tiene lugar en la zona de la sala de Versailles y en el balcón.
- Variación natural de la concentración del CO<sub>2</sub>. La concentración de este gas presenta variaciones diarias y estacionales, reguladas por la vegetación del lugar.

A partir de los datos obtenidos de los dos periodos de mediciones, se obtuvo, por el análisis de regresión efectuado, una expresión que, partiendo del número de visitantes, calcula la cantidad de CO<sub>2</sub>, en ppm., que incrementaría la concentración de dicho gas en la atmósfera cavernaria. Ésta relación es válida por el momento sólo para la cueva Pozalagua.

$$\Delta\text{CO}_2 = -1,11068 + 0,2205 * \text{Número de Visitas}$$

Donde:

$\Delta\text{CO}_2$ : Variación de la concentración de CO<sub>2</sub>.

Número de Visitas: Cantidad de visitantes dentro de la cueva de forma simultánea.

El error estándar de estimación puede llegar hasta 19 ppm.

Gráfica del modelo

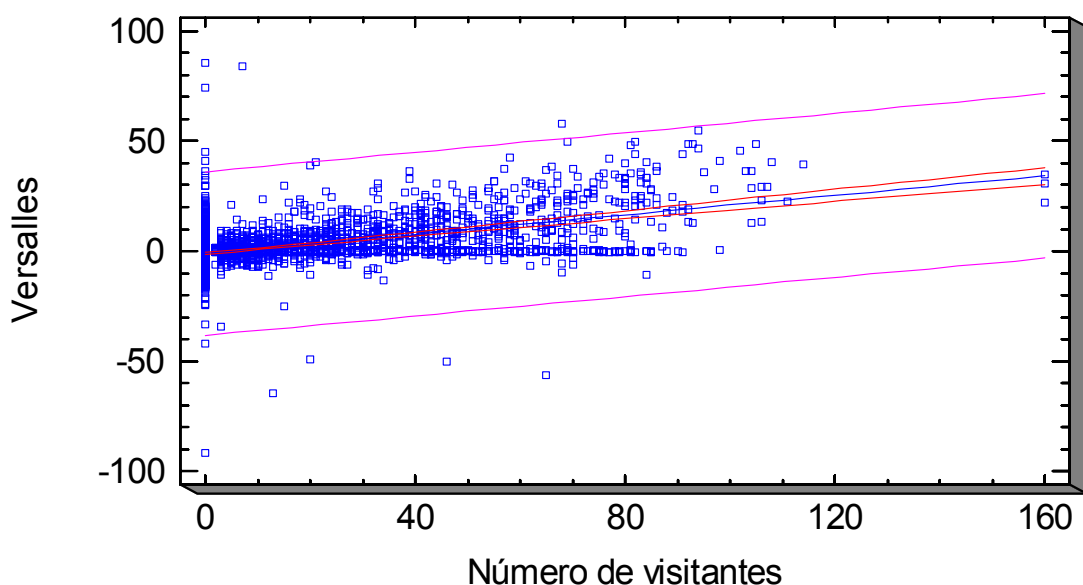


Fig. 40. Resultado gráfico del análisis de regresión realizado. Aquí se aprecia que la línea central, resulta el valor calculado de variación del CO<sub>2</sub>, con el límite de confianza.

Para calcular el incremento en un día de la concentración del CO<sub>2</sub>, se pueden usar dos métodos:

- Calcular directamente la concentración tomando el número total de visitantes en un día.
- Calcular la concentración del CO<sub>2</sub> a partir de los grupos de forma individual y luego sumarlas.

El primer método da un valor más cercano, pues en el segundo método se arrastra el error de cada cálculo individual, llegando a ser el error total directamente proporcional al número de visitantes total y la cantidad de grupos calculados.

Para ejemplificar lo anteriormente expuesto, se realizaron los cálculos a tres días de Semana Santa, donde se representan valores de visitas bajas, medios superiores y máximos.

Visitas	CO <sub>2</sub> Calculado	Visitas	CO <sub>2</sub> Calculado	Visitas	CO <sub>2</sub> Calculado
21	3,52	33	6,17	80	16,53
63	12,78	106	22,27	160	34,17
4	-0,22	104	21,83	80	16,53
	-1,11	93	19,40	79	16,31
5	0,00	44	8,60	160	34,17
30	5,51	86	17,86	80	16,53
		111	23,37	80	16,53
		106	22,27	160	34,17
		60	12,12	80	16,53

Suma Total	123	20,48	743	153,87	959	201,50
------------	-----	-------	-----	--------	-----	--------

Tabla X. Incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> de tres días de Semana Santa por el método del cálculo de grupos individuales y suma de los resultados.

Visitas	CO <sub>2</sub> Calculado	CO <sub>2</sub> Real	CO <sub>2</sub> Cal - CO <sub>2</sub> Real	Error %
123	26,01	28	1,99	7,09
743	162,72	209	46,28	22,14
959	210,35	281	70,65	25,14

Tabla XI. Cálculo del incremento de CO<sub>2</sub> de tres días de Semana Santa por el método del total de visitas en el día.

Como se aprecia en las tablas X y XI, el método del cálculo del incremento de la concentración de CO<sub>2</sub> en el aire es más efectivo que el método de la suma por grupos individuales, aunque el primero presenta un error que aumenta con el número de visitantes de forma proporcional. Esto se explica por la poca cantidad de datos existentes para cifras elevadas de visitantes, las que sólo tienen lugar dos días en el año, precisamente en Semana Santa. Al parecer, la concentración de CO<sub>2</sub> a partir de cierto número de visitantes cambia su relación de lineal a exponencial, aunque esto aun no puede confirmarse por el limitado número de mediciones.

Para explicar el cambio de exponente en la ecuación, obtenida a partir del análisis de regresión lineal, en la relación visitas – concentración de CO<sub>2</sub> se debe a que la cueva, al llegar a un nivel de concentración de CO<sub>2</sub>, se sobresatura del gas, pues la velocidad de difusión del mismo se hace menor que la de aporte por parte de los visitantes, es decir, la cueva no puede evacuar y equilibrar todo el volumen de CO<sub>2</sub> que aportan los visitantes, por lo que la velocidad de incremento de la concentración del gas aumenta, modificando la pendiente de la ecuación de ajuste en la medida que sea mayor la cantidad de personas, o lo que es igual, el valor del CO<sub>2</sub> en el aire.

El mes de agosto es el más concurrido, por lo que tienen lugar las mayores concentraciones de CO<sub>2</sub> en la cueva. En la primera etapa de mediciones, las concentraciones de CO<sub>2</sub> sobrepasaron, la mayor parte del tiempo, los 900 ppm. Como un reflejo de la reducción de visitantes en ese mes, durante la segunda etapa la concentración de CO<sub>2</sub> se redujo a menos de 900 ppm. como se aprecia en las figuras 41 y 42.

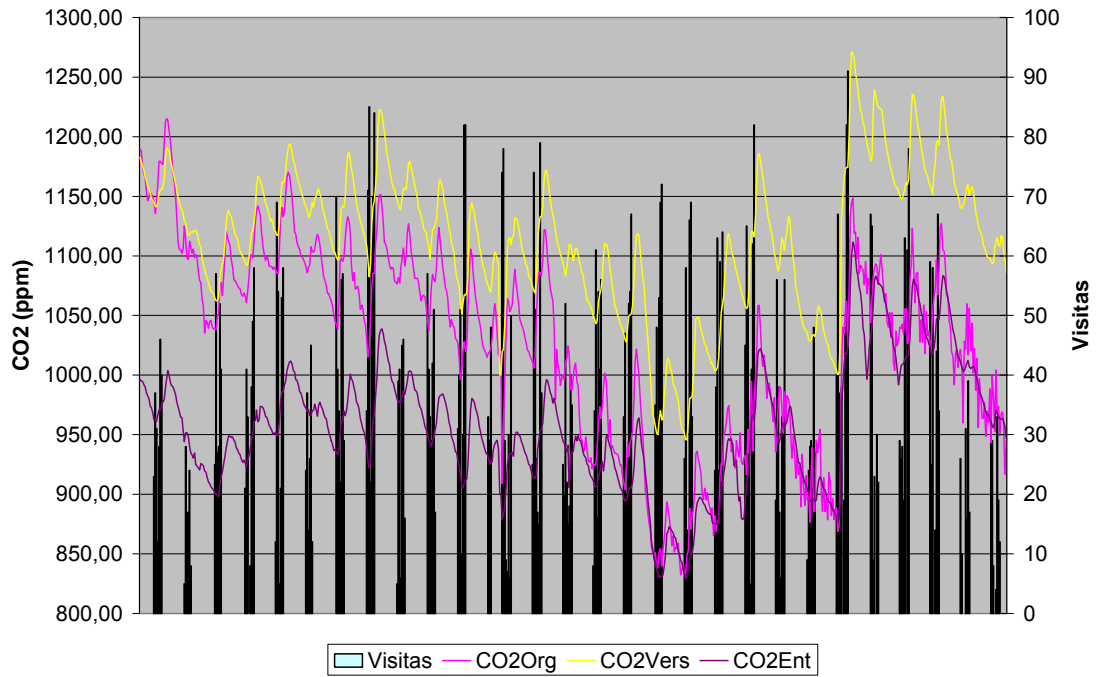


Fig. 41. Comportamiento del CO<sub>2</sub> durante el mes de agosto de 2004, como representación del mes de mayor cantidad de visitantes.

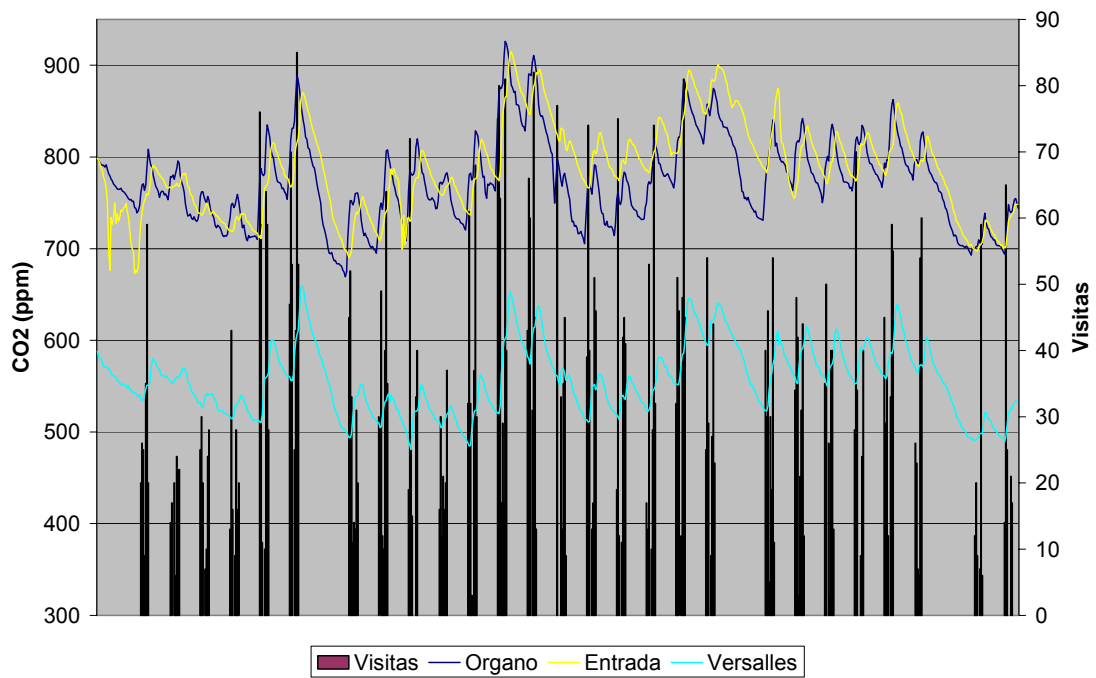
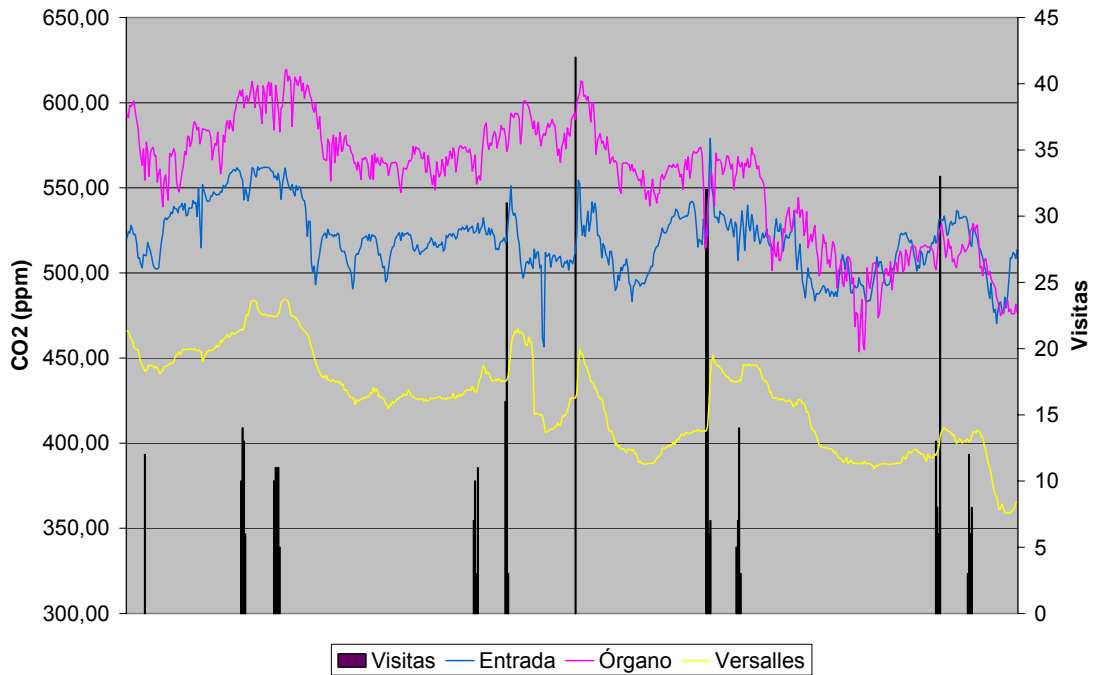


Fig. 42. Comportamiento del CO<sub>2</sub> durante el mes de agosto de 2005, como representación del mes de mayor cantidad de visitantes.



*Fig. 43. Comportamiento del CO<sub>2</sub> durante el mes de febrero de 2005, como representación del mes de menor cantidad de visitantes. Por esa característica se asume como un comportamiento natural del gas sin la influencia humana.*

El mes de febrero es el periodo de menor afluencia de visitantes a la cavidad. En este periodo la cueva alcanza los mínimos valores de concentración de CO<sub>2</sub> de todo el año, llegando a tener un comportamiento prácticamente natural, siendo únicamente interrumpido durante 9 días del mes, de los cuales en tan sólo tres, hubo una alteración significativa en la cueva, correspondiendo con un número superior a 30 personas simultáneas en la cavidad.

Este comportamiento se mantiene durante el 2005 hasta el mes de marzo, cuando se celebra la Semana Santa, periodo en el que la afluencia de público hacia la cueva se incrementa abruptamente, sobrepasando la cifra de 3000 personas en la cavidad en una semana.

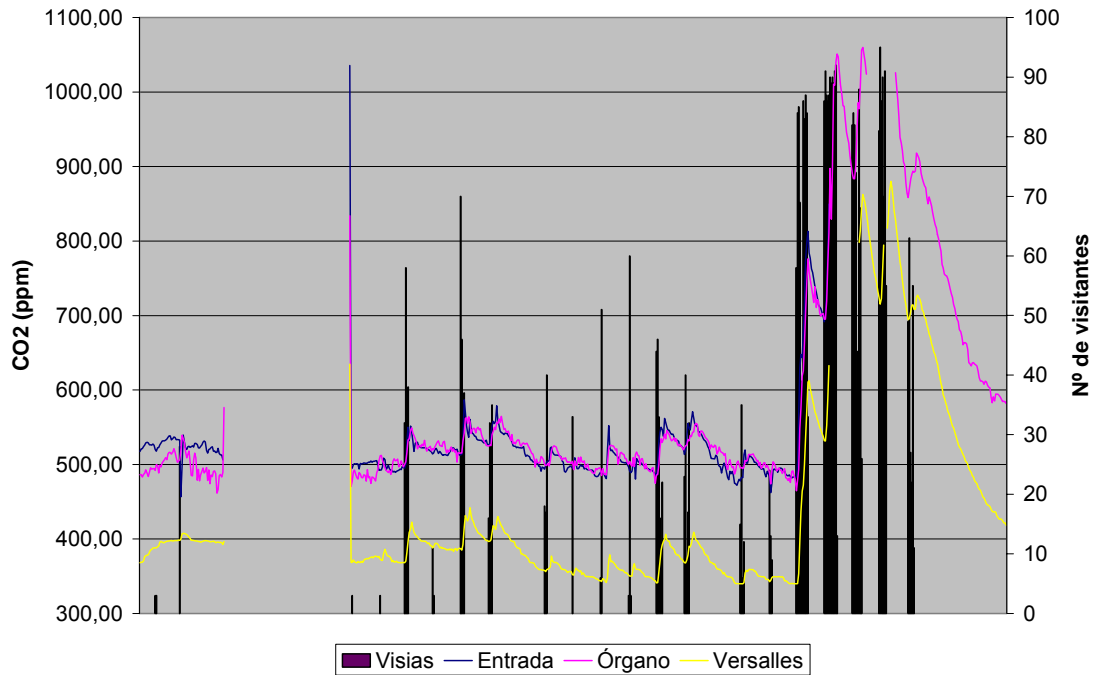


Fig. 44. Comportamiento del CO<sub>2</sub> durante el mes de marzo de 2005, como representación del mes de una baja cantidad de visitantes con una afluencia de público de forma muy rápida y numerosa en un corto periodo de tiempo.

Durante los meses de diciembre de 2004, enero, febrero y los primeros 20 días de marzo de 2005, el sistema se mantuvo con una concentración de CO<sub>2</sub> muy cercana a la que tendría actuando en un régimen natural, es decir, sin visitas. Esto favoreció la insaturación del medio, por la descarga de este gas hacia el exterior sin ser afectado por concentraciones de más de 60 personas simultáneas en la cueva por día.

Cuando la cueva se mantiene bajo carga de CO<sub>2</sub>, por las altas concentraciones de este gas, el mismo desplaza al resto del aire en los sistemas de grietas y poros de la roca, en todos los intersticios posibles, almacenándose bajo presión. En los periodos de alta frecuencia de visitantes, la carga de la cueva se eleva al máximo, por lo que el tiempo de recuperación es elevado y el efecto acumulativo del CO<sub>2</sub> es notable.

En los días posteriores a la Semana Santa tiene lugar una descarga de CO<sub>2</sub>, alcanzando los valores normales en sólo 4 días. Este fenómeno ocurrió por la insaturación del medio de este gas, por el periodo que se mantuvo el sistema descargado, favoreciendo una rápida migración hacia el exterior y hacia las galerías inferiores del sistema.

De lo anteriormente referenciado, se puede concluir que, la concentración natural de CO<sub>2</sub> en Pozalagua, debe oscilar entre los 400 y 600 ppm. Se debe tener en cuenta que en el exterior la concentración de este gas en la atmósfera oscila entre 350 y 450 ppm.

### 2.4.1 Efectos de la concentración de CO<sub>2</sub> sobre las formaciones secundarias.

Como se aprecia en la figura 24, en la cavidad se observa un proceso de descalcificación de las formaciones secundarias muy avanzado, al punto de desmoronarse cuando son tocadas con la mano.

Este efecto solo puede tener dos causas:

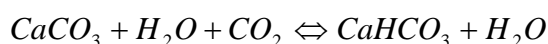
- Proceso de redisolución de las formaciones secundarias. Este se origina cuando por cambios en la vegetación, lluvias ácidas, vertimientos, y otros, cambia el pH del agua de infiltración, desplazando el equilibrio de la ecuación del karst hacia la derecha, por lo que, el agua al entrar en contacto con la atmósfera cavernaria, en vez de depositar el carbonato, lo disuelve, ampliando el conducto por donde circula por el interior del espeleotema, hasta hacerlo desaparecer completamente. En este caso no se observaría la película pulverulenta que se forma en la superficie de los mismos.
- Proceso de intemperismo. La deposición de agua producto de la condensación sobre las formaciones secundarias, generalmente va acompañada de un ataque químico por parte de éstas sobre los cristales de calcita, transformando el carbonato de calcio en bicarbonato, quedando éste depositado sobre la superficie del espeleotema, formando así la película pulverulenta observada.

En Pozalagua es el segundo caso el que tiene lugar, precisamente por la condensación que tiene lugar en la cavidad, lo que prueba que el límite de concentración de CO<sub>2</sub> prefijado de 2400 ppm (Dragovich y Grose (1990) en Cortés (2004)) para el comienzo del proceso de decalcificación, no se cumple, al menos para esta cueva, cuyas máximas concentraciones de gas no han sobrepasado, hasta el momento, los 1300 ppm, es decir, la mitad de la cifra señalada por estos autores.

En ese sentido se concluye que no es tan importante la concentración de CO<sub>2</sub> en la atmósfera, como la cantidad de agua que pueda condensarse sobre la roca para el comienzo del proceso de decalcificación. Es decir, se puede encontrar una cavidad con alta concentración de este gas, pero con una humedad relativa baja, con una probabilidad de condensación mínima, el efecto de la corrosión por el agua condensada es despreciable.

En cambio, se puede encontrar una cavidad donde las concentraciones de CO<sub>2</sub> son relativamente normales, es decir del orden de 500 – 600 ppm, con una elevada condensación, el efecto va a ser una alta probabilidad de corrosión, no sólo en las formaciones secundarias, también en la roca primaria.

En este último caso la concentración de CO<sub>2</sub> actúa como un acelerante de la reacción, recordando que:



A medida que el agua gana en  $\text{CO}_2$  se forma una mayor cantidad de ácido carbónico, favoreciendo el poder de disolución del líquido, acelerando la reacción y corriendo el equilibrio hacia la derecha, es decir, formando bicarbonato de calcio, que se aprecia en la roca o en las formaciones como un polvo blanco, a veces formando una pasta por el agua sobrante de la reacción antes mencionada.

En Pozalagua existen depósitos de agua que también son afectados por el régimen de concentración del  $\text{CO}_2$  en el aire. En los ensayos realizados a diferentes muestras tomadas en la cavidad, se concluyó que, sólo en una fecha el agua estaba disolviendo la roca, en el resto de las muestras el resultado arrojó que el agua estaba depositando calcita y dolomita (Irazabal *et. al.* 2006).

La explicación de este fenómeno es que el agua depositada en los gours (lugar donde se tomaron las muestras) está en equilibrio con la atmósfera. La tendencia del  $\text{CO}_2$  a disminuir su concentración en el aire, por efecto directo de la reducción de las visitas, rompe el equilibrio, cediendo el agua este gas al aire, desplazándose el equilibrio de la ecuación antes mencionada hacia la izquierda, es decir, hacia la formación del carbonato de calcio (calcita).

### **3. Cantidad de agua en la atmósfera de Pozalagua.**

Uno de los factores fundamentales en el desarrollo del proceso de corrosión de las paredes y formaciones secundarias en Pozalagua, es precisamente el agua que se condensa sobre estos elementos.

Para que pueda condensarse la cantidad suficiente de este elemento y que tenga lugar el proceso de decalcificación, debe existir una cierta cantidad tal de agua en la atmósfera de la cueva, que la sobresature y favorezca la transformación de vapor en líquido.

Para que ésta transformación se lleve a efecto, deben tener lugar algunos sucesos, que pueden ser:

- Entrada de un aire desde el exterior con una mayor temperatura y alto contenido de vapor de agua.
- Descenso significativo de la temperatura dentro de la cueva.
- Aporte de vapor de agua en una masa de aire con una temperatura superior a la del ambiente de la cueva.

El tercer suceso tiene lugar con la entrada de grupos de visitantes en la cueva, aunque el volumen que aportan no es tan significativo al compararlo con el volumen de la sala que conforma la cavidad. Sólo en el sector cercano a la estación Entrada tiene posibilidades de afectar sensiblemente.

Esto último puede ser explicado por el siguiente razonamiento: en el edificio que sirve de entrada a la cueva, permanecen un grupo de personas que esperan por su acceso a la cavidad. El tiempo que ellos esperan están aportando vapor de agua y calor al ambiente. Al abrirse las puertas de acceso, junto a los visitantes entra la masa de gas desde el edificio hacia la cueva.

El rápido enfriamiento de la masa gaseosa que entra en la cueva, desde una temperatura de más de 20° C a 13° C que presenta la atmósfera hipogea, permite la condensación de un volumen de agua suficiente para el desarrollo del proceso de decalcificación.

Según Dublyansky y Dublyansky (1998) el proceso de condensación depende de la relación entre la humedad absoluta del sistema epigeo y el hipogeo.

Cuando en el sistema epigeo (exterior) la humedad absoluta es superior que la del sistema hipogeo (interior de la cueva), tiene lugar la condensación, con la condición de que el aire del exterior entre en la cavidad. Teniendo en cuenta que la humedad absoluta depende directamente de la temperatura y que va a ser directamente proporcional a esta, se obtiene que, en el sistema exterior, aun con una humedad relativa muy inferior al de la masa gaseosa de la cueva, mantiene un contenido de agua superior en los meses de verano.

Se debe recordar que la humedad absoluta se calcula:

$$H_{abs} = \frac{0,622 * P_v}{P - P_v}$$

Donde:

Habs: Humedad absoluta expresada en kg/kg

Pv: Presión de vapor expresada en hPa.

P: Presión atmosférica expresada en hPa.

Y la humedad relativa se expresa:

$$H_r = \frac{P_v}{P_s} * 100$$

Donde :

Hr: Humedad relativa expresada en %.

Ps: Presión saturante expresada en hPa.

En resumen, la humedad absoluta describe la masa de agua en la atmósfera por unidad de masa de aire, mientras que la humedad relativa describe el grado de saturación de la masa gaseosa respecto al agua. Es por esto que no es contradictorio el hecho que en el exterior la humedad absoluta sea muy superior que en el interior de la cueva, mientras que la humedad relativa sea muy inferior.

En la figura 46 se aprecia la cantidad de agua que adquiere o cede la masa gaseosa de la cueva. Los valores positivos de la curva son los que representan, según los autores antes mencionados, un mayor potencial para la ocurrencia de la condensación. Al calcular la suma de los valores se obtiene que en los meses desde julio hasta septiembre el potencial de condensación es

muy superior a los meses desde diciembre hasta febrero, coincidiendo con las estaciones de verano e invierno, es decir, con los periodos de mayor y menor temperaturas.

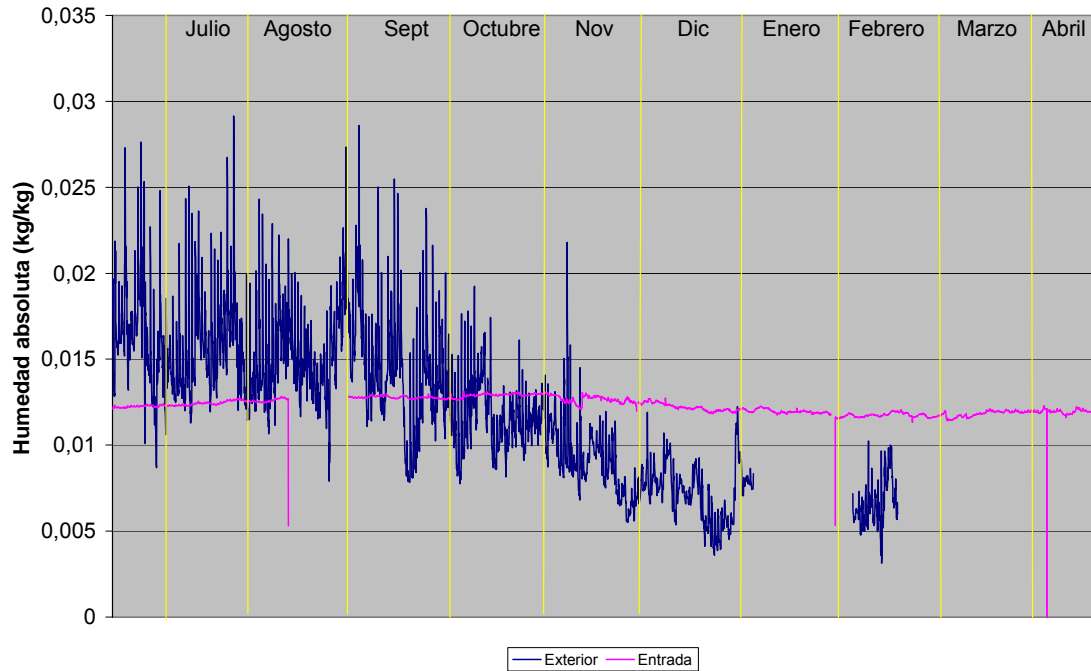


Fig. 45. Comparación de la humedad absoluta entre las estaciones Exterior y Entrada en el periodo 2005 - 2006.

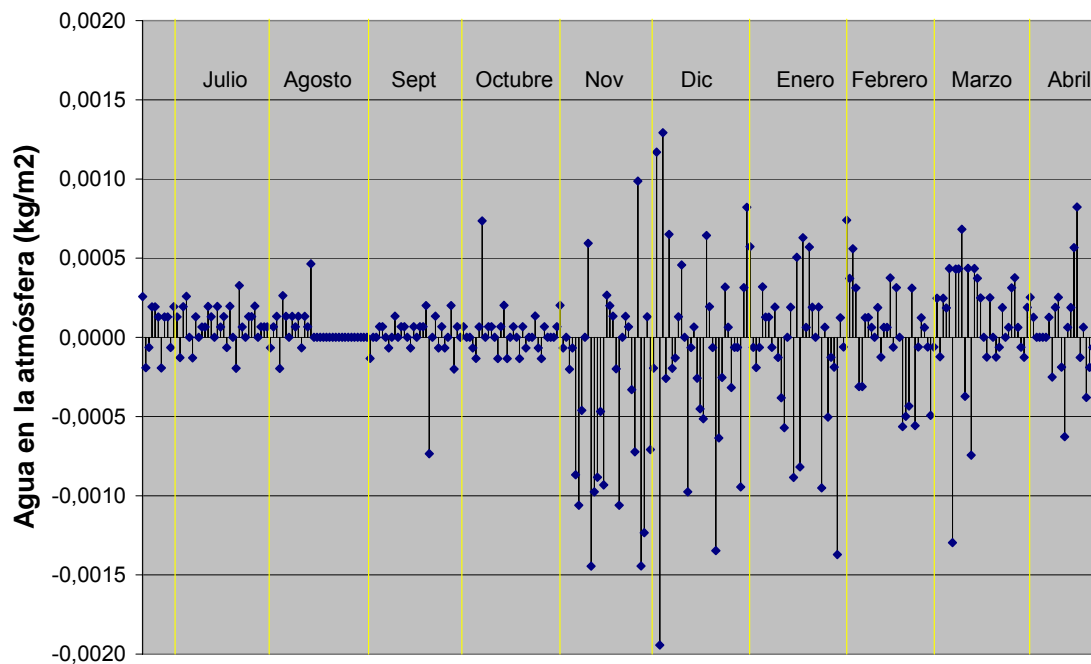


Fig. 46. Contenido de agua que adquiere la cueva por día en la estación Entrada durante el periodo 2005 - 2006.

En la cueva Pozalagua el proceso de condensación se manifiesta con mayor fuerza en los meses de invierno, cuando se depositan grandes cantidades de agua por ese concepto. Otro periodo en que se manifiesta con gran intensidad es durante Semana Santa. Ambos aparecen representados en la figura 46 con elevados valores.

Teniendo en cuenta lo anterior, se puede afirmar que el proceso de condensación, se manifiesta en la cueva Pozalagua entre los meses de noviembre hasta abril. Durante el resto de año puede manifestarse, pero en mucha menor cuantía.

Es decir, en la cavidad el proceso de condensación se manifiesta justo en el periodo contrario al propuesto por los autores antes mencionados. El mecanismo de intercambio de masa y energía con el exterior de Pozalagua es quien explica esta supuesta anomalía.

Durante el mes de agosto, la masa gaseosa del interior de la cavidad tiende a desplazarse hacia el sistema exterior, siendo este comportamiento típico durante el verano, mientras que en el invierno el ciclo se invierte, es decir, el aire del exterior entra a la cueva (Les *et. al.* 2005).

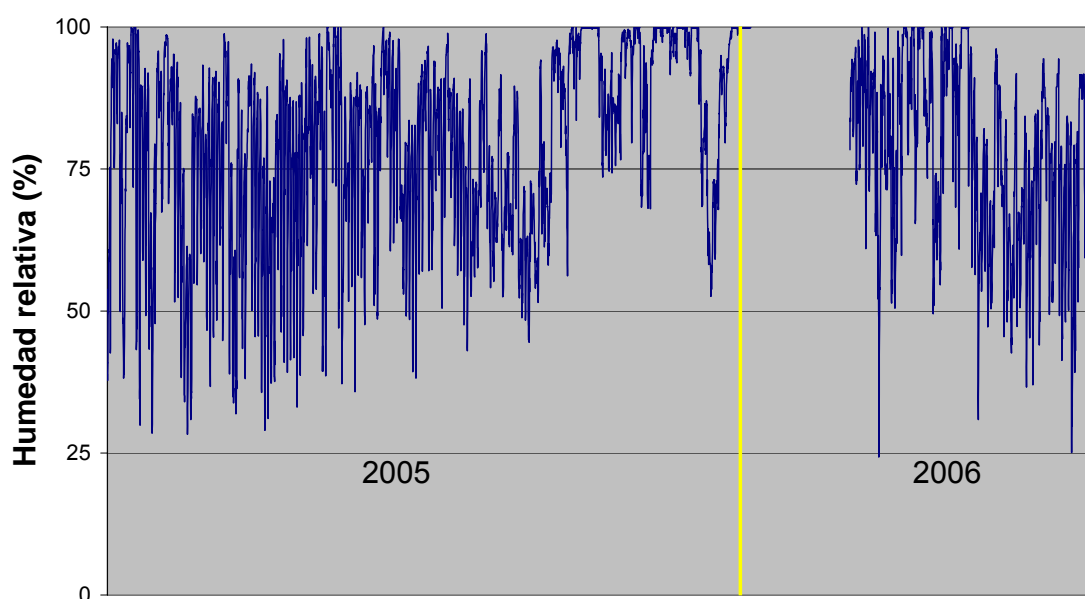


Fig. 47. Comportamiento de la humedad relativa durante el periodo 2005 – 2006.

Durante los meses de invierno (entre noviembre y marzo) la humedad relativa en el exterior es superior al 75 %, prácticamente durante toda la temporada, lo que favorece la entrada a la cueva de un aire, que aunque frío, ya se encuentra en un estado cercano a la saturación de agua. Al entrar en la cueva este aire más frío y húmedo e intercambiar con la masa gaseosa hipogea, algo más caliente, pero saturada, se mezclan ambas masas, reduciendo la temperatura del aire del interior de la cavidad, favoreciendo la condensación.

#### 4. Comportamiento del Radón.

La medición del gas radón en cuevas se ha convertido en una necesidad para la protección, tanto de los trabajadores como de los visitantes. Además puede ser utilizado como trazador, tanto en estudios hidrogeológicos como climáticos, colocando la cantidad adecuada de captadores.

En el caso de Pozalagua se colocó un dataloger para la medición de radón muy cerca de la estación Órgano.

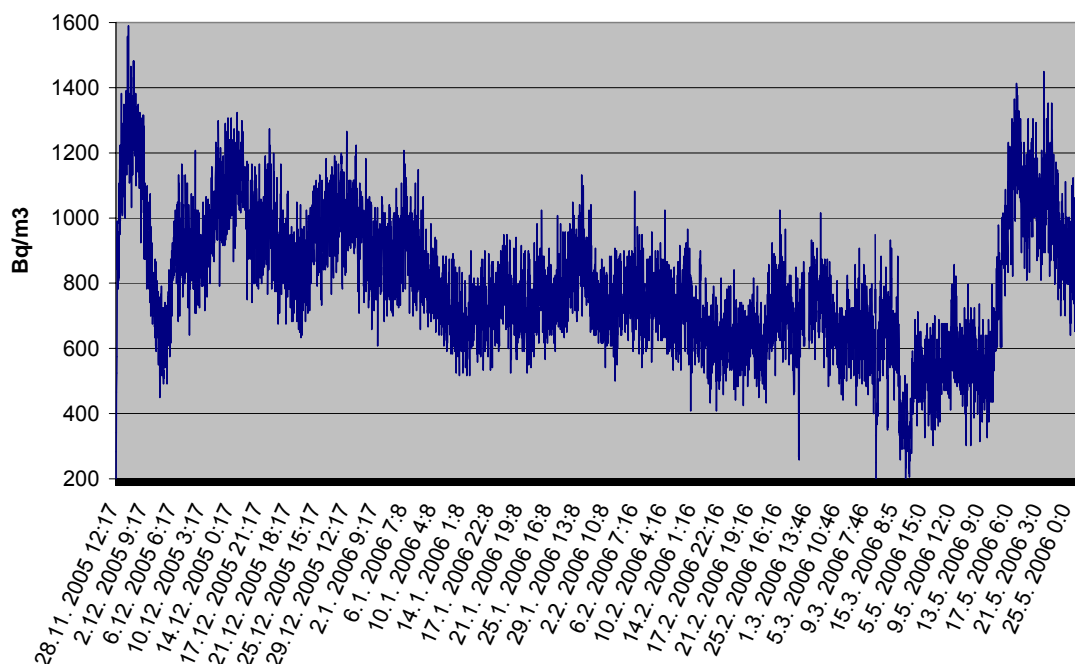


Fig. 48. Comportamiento de la concentración de radón en Pozalagua.

Cigna (2005) menciona la estacionalidad de la concentración de radón en las cuevas donde se han realizado mediciones, apreciándose máximos del gas en el verano y valores mínimos en invierno. Esto parece cumplirse también para Pozalagua, aunque todavía no hay datos suficientes para afirmarlo, pues se

necesita un recorrido anual completo para determinar si existe estacionalidad o no.

Al compararse el comportamiento de la concentración de radón con el comportamiento de la temperatura, en la estación Órgano, por ser éste el punto de medición más cercano, se establece que, hasta el momento no existe prácticamente ninguna relación entre ambos parámetros, como se aprecia en la tabla XII y la figura 49, donde se muestran los resultados de la matriz de correlación y el recorrido de ambas variables en igual periodo de tiempo.

	Radón
Exterior	-0.14
Entrada	0.03
Órgano	-0.03
Versalles	-0.01

Tabla. XII. Correlación entre el radón y la temperatura en las diferentes estaciones.

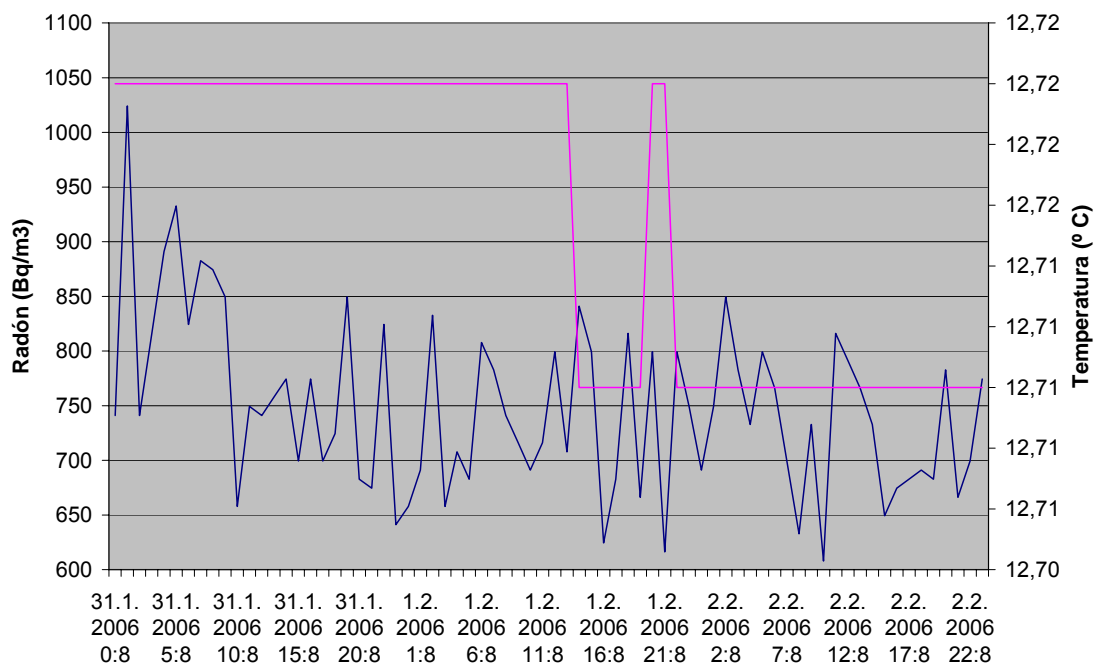


Fig. 49. Comportamiento del radón y su relación con la temperatura, entre el 31 de enero y el 2 de febrero de 2005, periodo sin visitas a la cueva.

Otro parámetro que menciona Cigna (2005) que ejerce una cierta influencia en el comportamiento de la concentración de radón, es la presión atmosférica. En la figura 50 se muestra la relación entre ambos parámetros, entre los días 31 de enero y 2 de febrero de 2006. Este periodo fue seleccionado por no reportarse visitas durante el mismo.

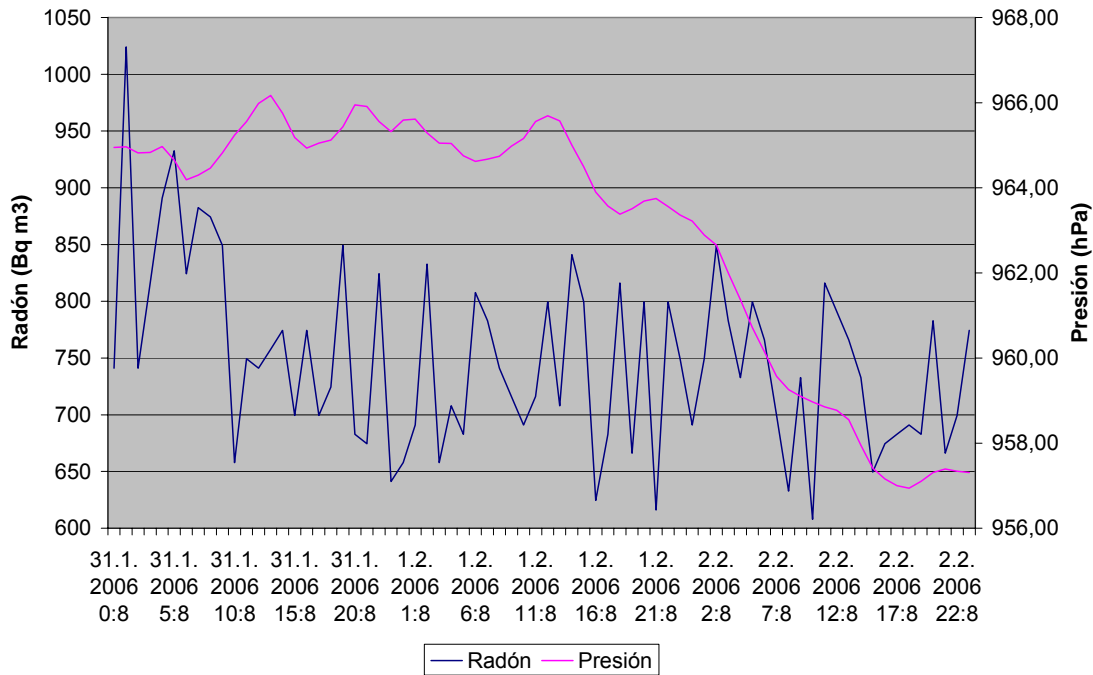


Fig. 50. Relación entre la presión atmosférica en la estación Órgano y la concentración de radón.

Las variaciones de más de  $100 \text{ Bq/m}^3$  en la cavidad durante el día, da una idea de la oscilación de la concentración del radón en la atmósfera, sin tener una explicación precisa al fenómeno. Se analizaron los factores principales que afectan el comportamiento de este parámetro según la bibliografía consultada (Cigna 2005) y ninguna de las variables mencionadas (temperatura, presión atmosférica y visitas) presenta, hasta el momento, una relación con el comportamiento del gas.

Una de las variables mencionadas en la bibliografía, que no se ha correlacionado con la concentración de radón, es el comportamiento de las ondas sísmicas provocadas por la explotación de la cantera vecina.

Cada carga de explosivo que denota en la cantera se comporta como un microterremoto, el que puede acelerar o retardar la difusión del gas radón en las grietas y poros de la matriz rocosa.

## 5. Circulación general de la atmósfera en la cueva.

La circulación del aire en la cavidad se mantuvo de forma muy similar al periodo 2004 – 2005, por lo que no se hace énfasis en este acápite. La confirmación de esa afirmación la brinda precisamente el comportamiento del proceso de condensación. En la temporada de invierno, con temperaturas entre  $0$  y  $6^\circ \text{C}$  y una humedad relativa superior al  $75\%$ , al entrar el aire del exterior en la cueva, intercambia calor con la masa gaseosa hipogea, reduciéndole la

temperatura a ésta última, favoreciendo la deposición de agua por sobresaturación.

## 6. Conclusiones.

1. La temperatura de la cueva Pozalagua presenta un ligero descenso durante el periodo 2005 – 2006 respecto al 2004 – 2005, a pesar que la temperatura media exterior sufrió un incremento de 0.5° C, en la estación Entrada descendió 0.24° C, mientras que en Órgano y Versailles la reducción fue de 0.02° C.
2. Se confirmó y calculó que los sistemas sólidos y líquidos, representados por la roca y el agua, son agentes refrigerantes de la atmósfera, al presentar un promedio de temperatura inferior al de las estaciones más interiores de la cueva (Versalles y Órgano).
3. El calor cedido desde la masa de visitantes hacia la atmósfera es muy superior al calor absorbido por la masa gaseosa. Esto se manifiesta en el incremento de temperatura del aire. La diferencia entre ambos calores es absorbida por las masas líquidas y sólidas de la cueva, el proceso de condensación y por convección hacia los sectores superiores (zonas más altas del techo) y el exterior.
4. La concentración de CO<sub>2</sub> presenta una fuerte tendencia al descenso guante ambos periodos de mediciones. Durante el 2005 – 2006, sólo en Semana Santa sobrepasó los 1000 ppm en la estación Entrada. Este descenso está fuertemente relacionado con el ligero descenso de las visitas a la cueva y la medida de precaución tomada de no permitir más de 80 personas simultáneas en la cueva.
5. A pesar de una cifra límite de concentración de CO<sub>2</sub> señalada por otros autores de 2400 ppm, como límite para el comienzo del proceso de decalcificación, se ha comprobado que en Pozalagua este proceso ya tiene su efecto, en ciertos sectores muy avanzados, con una concentración menor de 1300 ppm.
6. Se obtuvo una ecuación empírica, partiendo de un análisis de regresión lineal, que predice, a partir del número de visitantes, la concentración de CO<sub>2</sub> en la cavidad con un error estándar de 19 ppm. La ecuación es:

$$\Delta CO_2 = -1,11068 + 0,2205 * No.deVisitas$$

7. La condensación en Pozalagua presenta dos causas bien definidas en la estación Entrada y en la porción más cercana a la misma:
  - El régimen de visitas, cuando sobrepasa una cierta cifra posiblemente más de 60 personas simultáneas en periodos continuos de tiempo, ejemplo: Semana Santa.

- Por la circulación natural de la cueva, cuando en invierno penetra el aire del exterior, que enfría la masa gaseosa del interior y se sobresatura de agua.
8. En las estaciones Órgano y Versailles es la condensación se manifiesta por la primera causa sólo.
  9. La variación de la concentración de radón en la atmósfera de la cueva no parece estar influenciada por la temperatura, la presión atmosférica ni el régimen de visitas.
  10. Se corrobora, partiendo del mecanismo de condensación explicado para la estación de la estación Entrada, la periodicidad del intercambio de masa y energía entre el exterior y el interior de la cueva.

### **Bibliografía.**

Andrieux, C. (1969 a). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques. Thèse Doctorat, Université Bordeaux.

Andrieux, C. (1969 b). Étude du climat de la grotte de Sainte-Catherine en Ariège selon le cycle 1967. Annales de Spéléologie, 24(1), 19-74.

Andrieux, C. (1970 a). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (1. Instrumentation en climatologie souterrain. 2. Aérodynamique souterraine). Annales de Spéléologie, 25(2), 441-529.

Andrieux, C. (1970 b). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (3. Évapocondensation souterraine). Annales de Spéléologie, 25(3), 531-559.

Andrieux, C. (1971 a). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (4. Influence de la morphologie des galeries, de la forme et de l'orientation des ouvertures sur le climat souterrain). Annales de Spéléologie, 26(1), 5-30.

Andrieux, C. (1971 b). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (4. Les bilans climatiques). Annales de Spéléologie, 26(2), 367-386.

Andrieux, C. (1972). Contribution á l'étude du climat des cavités naturelles des massifs karstiques (6. Étude du climat de la grotte-laboratoire de Soulabé en Ariège - cycle 1967-1968). Annales de Spéléologie, 27(1), 5-77.

Andrieux, C. (1973). Étude du climat de la grotte du Pigailh (Ariège). Problèmes posés par les mécanismes des transferts thermiques. Annales de Spéléologie, 28(3), 361-374.

Bennet. C. O. y J. E. Myers: Momentum, heat and mass transfer. EPUH – MINED. 1962.

Cigna. A. A. (2005). Radon in caves. International Journal of espeleology, 34 (1-2), 1-18. Bologna (Italy).

Dublyansky. V N, y Dublyansky. Y. V. (1998). The problems of condensation in karst studies. Journal of cave and karst studies 60(1): 3 – 17.

Eraso Adolfo. Ideas sobre la climática subterránea. Separata de Estudios del GE Alavés. 1963.

----- . Corrosión climática en las cavernas. Estratto de Ressegna Speleologica Italiana. Anno XXI. Fascicolo 1.4. 1969.

----- . Tentative nomogram for cave climate calculations. Separatum Problems of the speleological research. Praga. 1965.

----- . Estudio del complejo de cavidades de Orratzeta (Monte Albertia-Alava). Separata del GE Alavés. 1963.

Fernández Cortés. Ángel. (2004). Caracterización microclimática de cavidades y análisis de la influencia antrópica de su uso turístico. Tesis Doctoral. Universidad de Almería. 425 pp.

Irazabal. N. y Otero. V. (2006). Caracterización hidroquímica y microbiológica de las aguas de Pozalagua. Memoria anual.

Kern. D. Q. (1985). Procesos de transferencia de calor. Edición Revolucionaria. Instituto Cubano del Libro.

Lario. Javier, Sergio Sánchez, Vicente Soler, Soledad Cuezva, Juan C. Cañaveras. Estudio microclimático y geoquímico de la cueva de Pozalagua (Carranza, Vizcaya). IX Congreso Español de Espeleología. 2005.

Les. J., Malanda. R y Otero. V. (2005). Estudio del microclima de la Cueva de Pozalagua. (Bizkaia). Período Junio de 2004 a Junio de 2005. Memoria anual.

Otero. Vladimir. Estudio del comportamiento actual de las variables físicas y químicas de la cueva El Cable. Boca de Jaruco. La Habana. Tesis de Categorización Superior de Espeleología. 1990.

----- . Contribución al estudio de la transferencia de masa y energía en las cavernas. Algoritmo de Cálculo. II Congreso Espeleológico de FEALC. 1992.

Sarbu. S. y Lascu. C. (1997). Condensation corrosion in Movice Cave, Romania. Journal of cave and karst studies 59(3): 99 – 102.

Sears. F. Y M. Zemansky: Física General. Asociación de estudiantes de la facultad de Tecnología. Publicaciones. 1962.

Sears. F. W.: Mecánica, movimiento ondulatorio y calor. Ed. Revolucionaria. 1971.