

## ESPELEOCLIMATOLOGÍA

Julio J. Valdés Ramos<sup>1</sup>

Los fenómenos climáticos del medio subterráneo se encuentran directamente relacionados con multitud de variables, tanto epigeas como hipogeas, a saber: climática exterior, distribución de fuentes de energía en el medio geográfico y su balance energético-entálpico, geomorfología e hidrología regionales, espeleomorfología e hidrogeología subterránea, desarrollo biológico, etc., cuya manifestación se resuelve en un complejo de interacciones determinantes de una dinámica específica.

El hecho de que los procesos de la meteorología hipogea deban desarrollarse en una atmósfera confinada por una **superficie frontera acotante**, al contrario de la exterior y, a su vez, con una composición diferente, obliga a establecer límites entre lo epigeo y lo hipogeo con vistas a estudiar dicha dinámica de interacciones.

Así, deberá considerarse "medio cavernario", tanto aquella porción de la corteza terrestre que ejerza y reciba efectos producidos por la interacción derivada de la presencia de una cavidad subterránea, como esta misma en sí; dichos efectos de interacción constituyen intercambios de masa y energía. Este sistema físico que en realidad es abierto, puede considerarse cerrado, pero se opera con los flujos de masa y energía a través de sus fronteras como producto de agentes externos al mismo.

La participación conjunta de las condiciones geoespeleológicas y biológicas, a lo largo del tiempo, han propiciado en la Cueva del Túnel el desarrollo de un espeleoclima interesante y con compleja evolución, que ha sido favorable al desarrollo de diversas especies vivientes, las que —añadido el hombre—, incluso lo han modificado en parte.

<sup>1</sup> Miembro del Grupo Espeleológico "Martel" de Cuba.

En consecuencia, y como condición imprescindible en el desarrollo interpretativo de los datos existentes, debe prestarse atención a los aspectos geográficos, climáticos e hidrológicos característicos de la región, que han sido ya expuestos por los autores.

Lamentablemente en las investigaciones de campo no pudo disponerse de equipos registradores dirigidos a distancia para obtener realizaciones higrobarotermométricas, es por ello que nada puede decirse por ahora acerca de la existencia de microclimas.

Por último, si tenemos en cuenta las limitaciones impuestas por los psicrómetros utilizados (0,1°C de apreciación en los termómetros y un 1 % en la humedad relativa), no se aplicaron las correcciones de coeficiente de ventilación, tensión de vapor a temperaturas seca y húmeda y constante psicrométrica; así los datos son de precisión elemental, pero apropiados para esclarecer el funcionamiento meteorológico de la cavidad, incluso cuando no son de carácter sistemático y dar una idea del orden de los parámetros espeleoclimáticos.

Los datos espeleometeorológicos existentes pertenecen al material de archivo del Grupo Espeleológico "Martel" de Cuba (GEMC) en lo concerniente al plan de estudios e investigaciones sobre espeleología física.

Las lecturas correspondientes a 1966 fueron tomadas con un psicrómetro de fabricación norteamericana por Manuel Rivero Glean y Julio J. Valdés; las mediciones de 1971 se deben a Manuel Acevedo, quien utilizó un psicrómetro soviético modelo MB-4M y las de 1974 a Ernesto y Leonardo Flores, Jesús Pajón y Julio J. Valdés, con el mismo instrumento.

La valiosa ayuda brindada en las investigaciones directas por los anteriores compañeros, todos miembros del GEMC, se agradece desde estas líneas, especialmente la de los últimos mencionados.

## ANÁLISIS DE LA BAROCIRCULACIÓN

La espeleomorfología de la cueva, una serie de cavidades fusiformes intercomunicadas, con tres aberturas al exterior (el Túnel, la Dolina y la Claraboya), a corta distancia una de la otra y aproximadamente a la misma altura sobre el nivel del mar, hace que no se produzcan ostensibles variaciones de presión entre las dos entradas, por lo que no se manifiestan grandes corrientes de aire. En este sentido la cueva es cuasiestática; sin embargo, en ella pueden observarse en acción conjunta los fenómenos de barorrespiración (esporádicos) y termocirculación en saco de aire múltiple (este último por el mecanismo de circuitos de convección externo-internos e inverso).

La cueva barorrespira cuando se produce una variación entre la presión exterior y la interior ( $\Delta p$ ), sea ésta positiva o negativa. Este desbalance provoca la aparición de un gradiente de presiones ( $\nabla p$ ) que da origen a la fuerza causante del movimiento de la masa gaseosa, con el fin de que el sistema alcance el equilibrio, es decir:

$$\Delta p \propto \nabla p.$$

La función que relaciona explícitamente ambas magnitudes es, en general, bastante complicada y, en el caso que nos ocupa, es extraordinariamente difícil de hallar, si tenemos en cuenta que dicha función debe contener otras variables independientes. Pese a que la barorrespiración supone relación externo-interna o a la inversa, en el caso de la Cueva del Túnel, también provoca corrientes que pudieran denominarse "internobáricas".

La condición de cercanía de las dos entradas principales y de la Claraboya, prácticamente al mismo nivel, hace, como ya expresamos, que en un momento dado la presión en esos puntos sea igual, pero también y por esta misma causa, que la variación de la presión sea la misma en esos lugares y, por lo tanto, como en cada uno el estado físico del gas interior es sensiblemente diferente y las condiciones flujodinámicas establecidas por la superficie frontera, que constituyen las distintas cámaras irregulares, radicalmente distintas, no se producirán corrientes gaseosas semejantes; ello acarrea —si se recuerda que el gas se encuentra contenido en una serie de cámaras comunicadas unas con otras— la diferencia de presión entre dos puntos interiores (en general, no cercanos) que provoca la aparición de corrientes internas que interactúan durante todo el tiempo que demora el sistema en alcanzar su equilibrio.

Si denominamos negativas las corrientes gaseosas que salen al exterior y abandonan, por tanto, el medio subterráneo; y positivas las que penetran en él, tendremos que las variaciones positivas de la presión exterior provocan desplazamientos positivos del gas cavernario y a la inversa. Estos razonamientos pueden comprenderse, más fácilmente, si se observa el mapa de la cueva y su perfil longitudinal. (Ver figura 2)

Existe otra forma de aerocirculación por diferencias de presión entre las entradas. La dificultad de este mecanismo radica como ya se explicó, en que dada la posición de las bocas no ocurren desniveles de presión, como para provocar corrientes heterobáricas apreciables. No obstante, en determinados momentos esta diferencia de presión puede existir, si su aparición está determinada por la presencia de corrientes de aire exteriores, es decir, en la atmósfera epigea; y si tenemos en cuenta que la entrada del Túnel está descu-

bierta, mientras que la de la Dolina está cubierta por un bosque secundario, la presión descenderá más rápidamente en el Túnel que en la Dolina, lo que provocará una corriente de aire subterráneo dirigida hacia la salida del Túnel, que ha podido ser apreciada en días cuyas condiciones atmosféricas son apropiadas.

Las anteriores consideraciones barométricas no constituyen más que regímenes transitorios en el comportamiento meteorológico de la cavidad y, por tanto, el factor presión no ocupa un lugar importante, por lo que no se deben confundir los análisis de situaciones específicas con un funcionamiento permanente de la cavidad, que en este caso no se debe a causas barométricas puesto que sus efectos no son significativos.

## ANÁLISIS DE LA TERMOCIRCULACIÓN

En la ecuación general de los gases ideales:  $PV = RT$

Donde:  $P$  = Presión

$V$  = Volumen

$R$  = Constante de los gases

$T$  = Temperatura absoluta

Se deduce que la temperatura es inversamente proporcional a la densidad. Existe otro factor que se debe considerar en la ecuación de los gases, la constante  $R$  no puede ser la misma que para el aire, puesto que en las cavernas el porcentaje de humedad relativa es mayor que en el exterior (ver tablas 1-5); es decir, se trata de una mezcla. En nuestro caso  $R$  aumentará puesto que es inversamente proporcional al peso molecular del componente gaseoso que se introduce al aire y este componente es vapor de agua, cuyo peso molecular es menor que el del aire seco; además, en general el contenido de  $CO_2$  es ligeramente mayor que en la atmósfera epigea. Debe entenderse que se trata de un peso molecular promedio, puesto que una mezcla de gases no es, en modo alguno, una sustancia pura.

Si aumentamos el valor de  $R$ , la densidad disminuirá, de aquí puede inferirse que el gas será tanto más ligero cuanto más grande sea el valor de  $R$  (entiéndase cantidad de vapor de agua) y el de  $T$ .

Resulta entonces evidente que los causantes de los movimientos del gas en la cavidad subterránea son los gradientes de humedad y temperatura.

La presión motriz causante de la aerocirculación, cuyo valor influye en la intensidad de la corriente y su signo en el sentido de la misma, puede determinarse mediante la fórmula que se propone a continuación (Valdés, 1969):

$$P_m = \Delta p + \left[ \frac{2,165 \times 10^{-9} \overline{Hr} P_{ws} + (\overline{p} - \overline{Hr} P_{ws} \times 10^{-2}) 3,46 \times 10^{-7}}{T} \right] g$$

Donde:  $P_m$  = Presión motriz

$\Delta p$  = Diferencia de presión atmosférica entre las bocas

$Hr$  = Porcentaje medio de humedad relativa del aire interno

$P_{ws}$  = Presión del vapor saturante a la temperatura  $T$

$T$  = Temperatura media del aire interno

$\overline{p}$  = Presión media del aire interno

$g$  = Aceleración gravitacional

$\Delta Z$  = Diferencia de cotas entre las bocas

Si tenemos en cuenta que la profundidad de la Dolina es tan sólo de 10 m por debajo de la superficie de la llanura en la que, a pocas decenas de metros, se abre la entrada del Túnel y que el Salón Mayor está a 26 m de profundidad respecto a la superficie, resulta evidente que, tanto el valor insignificante de la presión motriz, como la propia relación espacial de las cámaras con las entradas y lo exiguo de las mismas, invalida la termocirculación en tubo de viento, a pesar de la existencia de dos entradas a distinto nivel. Así, realmente, las condiciones geomorfológicas sólo permiten el desarrollo del mecanismo de circulación basado en una termocirculación en saco de aire descendente de carácter múltiple. Uno utiliza como boca la zona Claraboya-Dolina, mientras el otro, la entrada al Túnel. Estos han sido bien identificados en el terreno en numerosas oportunidades y, como se verá más adelante, han experimentado una notable evolución.

En particular, la regularidad en sección y pendiente del túnel artificial (unos 35°) que comunica con el Salón Mayor por una abertura de tamaño muy pequeño respecto al mismo, confiere a tal saco de aire un funcionamiento marcadamente polarizado al efecto del tiro subvertical o chimenea, como también sucede con la Claraboya.

De forma general las condiciones del funcionamiento de la cavidad son las siguientes:

**Verano:** Durante el verano la temperatura exterior es mayor que la interior ( $T_e > T_i$ ); así el aire de la cavidad, más frío y por tanto más denso, queda atrapado por la profundidad en las cámaras subterráneas a causa de su poca movilidad y mayor densidad, por lo que se originan pequeños circuitos de convección en la zona de las entradas, guiados por los gradientes de temperatura y humedad, que son más intensos. En general existe pasividad ambiental.

**Invierno:** Como en invierno la temperatura exterior es menor que la interior ( $T_e < T_i$ ), la circulación gana alcance en profundidad ya que el aire interno, más caliente, ascenderá y saldrá al exterior por el Túnel, la Claraboya y la Dolina, se incorporará aire frío al medio cavernario, que descenderá a las partes profundas, completándose el circuito con su calentamiento en el interior.

Entre las zonas de máxima penetración de los sacos de aire se establece un circuito de convección interno que corresponde al Salón de la Excavación.

En ambas estaciones las participaciones barométricas son circunstanciales, pero por el régimen eólico algo activo del período invernal debe tener mayor influencia que en el verano. Por otra parte, siempre que en las alternancias día-noche en determinada estación se dé una relación térmica externo-interna inversa respecto a la estacional dada, se producirá también una inversión del funcionamiento de los sacos de aire, cuyo grado e intensidad será función de la diferencia térmica.

## PARÁMETROS DEL CLIMA HIPOGEO Y SU EVOLUCIÓN

Los datos espeleometeorológicos correspondientes a los años 1966, 1971 y 1974 aparecen tabulados a continuación:

Tabla 1

19 de octubre de 1966

Estación	Humedad relativa %	Temperatura °C
1. Dolina	87	23,5
2. Salón del Depósito		
3. Salón de la Claraboya	89	24,5
4. El Puente	87	23
5. Salón de los Balcones	86	24
6. Salón de la Excavación	86	26
7. Salón Mayor	84	27,5
8. Exterior junto al Túnel	70	32

Tabla 2

26 de octubre de 1966

Estación	Humedad relativa %	Temperatura °C
1. Dolina	88	23,6
2. Salón del Depósito		
3. Salón de la Claraboya	90	29,5
4. El Puente	88	23
5. Salón de los Balcones	88	24
6. Salón de la Excavación	87	25,8
7. Salón Mayor	85	27
8. Exterior junto al Túnel	73	30

Tabla 3

31 de octubre de 1971

Estación	Humedad relativa %	Temperatura °C
1. Dolina	93	22
2. Salón del Depósito	95	21,4
3. Salón de la Claraboya	95,5	22
4. El Puente		
5. Salón de los Balcones	97	22
6. Salón de la Excavación	95,5	22
7. Salón Mayor	96	22,4
8. Exterior junto al Túnel		

Tabla 4

Fecha	Salón de la Dolina			Salón del Depósito		
	H.R. %	T°C	Hora	H.R. %	T°C	Hora
VII-21/71	70	26,5	12:30	77	29	13:20
VIII- 8/71	99	23,5	11:07	98	22,3	11:20
X-31/71	93	22	10:05	95	21,4	10:15
PROMEDIOS	84	24		90	22,6	

Tabla 5

30 de julio de 1974

Estación	Humedad relativa %	Temperatura °C
1. Dolina	92	23
2. Salón del Depósito		
3. Salón de la Claraboya	95	23,2
4. El Puente	98	23,2
5. Salón de los Balcones	99	22,6
6. Salón de la Excavación	99	23,8
7. Salón Mayor	96	23,4
8. Exterior	90	23



Si observamos la distribución de temperaturas mostradas en la figura 14, pueden apreciarse dos "zonas de influencia internas" bien marcadas: una correspondiente a la boca del Túnel, que abarca los salones Mayor y de la Excavación y otra correspondiente a la Dolina, que incluye los salones del Depósito, de la Claraboya y de los Balcones, comportándose como "zonas de salto", puesto que no existen "zonas de enlace" a causa de las características espeleomorfológicas.

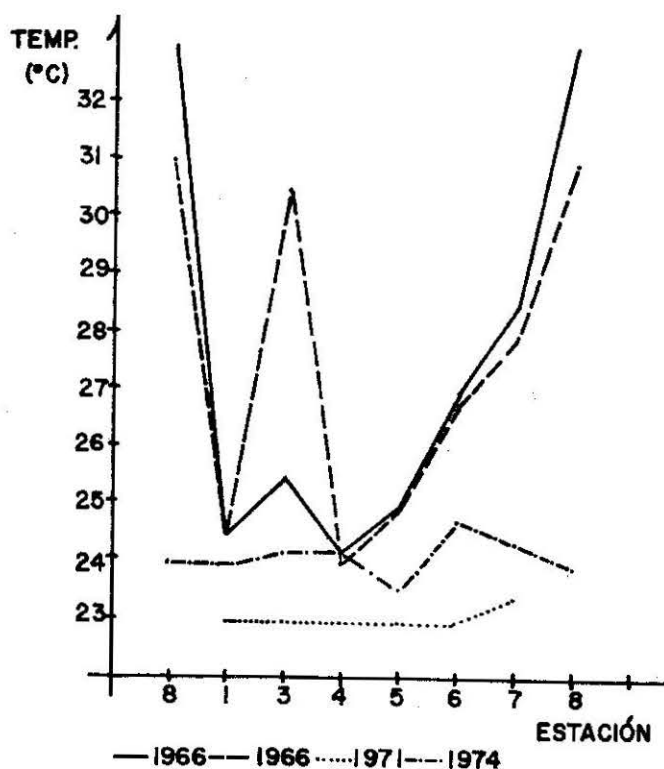


Fig. 14

El salto brusco de temperatura entre las dos zonas se debe a que en la época en que se tomaron los datos, la caverna era asiento de miles de quirópteros establecidos fundamentalmente en los salones Mayor y de la Excavación, con grandes cantidades de guano de murciélago en los mismos. Si tenemos en cuenta las calorías entregadas al aire por el guano (producto de reacciones químicas de descomposición exotérmicas) y por los propios murciélagos, con temperatura rectal del orden de los 35-40°C, y contamos, además, con el estudio del perfil de los dos salones y la baja

conductividad térmica de la caliza, se puede explicar la existencia de esa diferencia de temperaturas entre las estaciones 6-7 respecto a los otros salones (3-4-5), que no participan de tal circunstancia.

Dichas zonas de influencia no son más que la acción simultánea de los dos sistemas de termocirculación en saco de aire a los cuales corresponde el papel principal en la circulación del aire en la caverna; por esta razón —obsérvese además el perfil de la cueva— la espelunca no se distingue por un funcionamiento regular, sino por un comportamiento estival e invernal comprobado; no existe tampoco ninguna "zona de isoterminia". A causa de la espeleomorfoloía, debía esperarse su existencia, mas el establecimiento de una fuente de energía calórica de naturaleza biológica en 6-7 crea el desbalance respecto a los otros salones.

Obsérvese cómo la higrodistribución (figura 15) refleja también las "zonas de salto" térmicas en las bocas, así como una isohigrometría generalizada a toda la cavidad, pero de promedio algo bajo (87%) propio de un ambiente cavernario no muy húmedo.

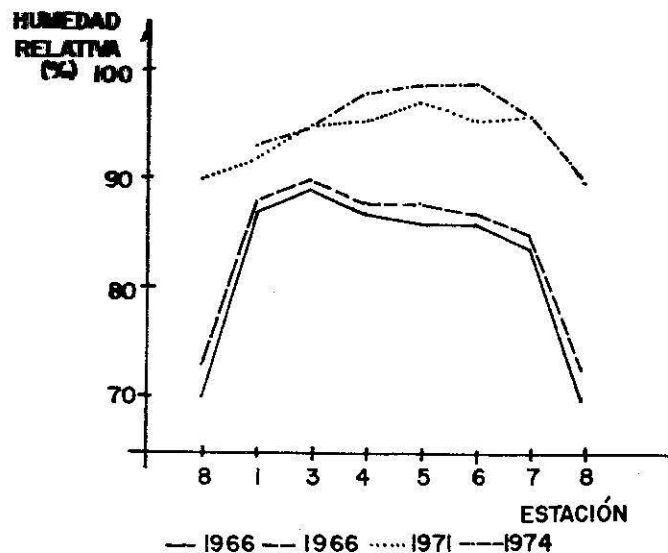


Fig. 15

Así se comportaba la cueva en 1966; mas si se observan los datos de 1971, se aprecian notables variaciones. Existe una variación del orden de 2° en las temperaturas y del 10% en la humedad relativa, que se manifiesta más acentuadamente en los salones Mayor y de la Excavación. Esta situación está relacionada directamente con los siguientes acontecimientos: alrededor de 1969, comenzaron

a realizarse en la cueva labores de extracción de guano de murciélago, en los dos salones mencionados anteriormente.

La extracción propició una mejor interacción entre las dos "zonas de influencia internas", lo que facilitó el desarrollo de circuitos de convección interna entre el Salón de la Excavación y el de los Balcones. Súmese a todo esto, que el retiro del guano pudo haber privado a esa zona de la cueva de una fuente de calor meta-estable.

Posteriormente a las labores de la extracción del guano, pero también en esa época, se produjo un ascenso del nivel freático de la zona que trajo, por consecuencia, la parcial inundación del Salón Mayor y la total del Salón de la Excavación, con una capa de agua de un promedio de 1,5 m de profundidad, hecho observado durante viajes realizados a la cavidad.

El efecto termodinámico, de semejante volumen de agua en esa zona, es evidente si se tiene en cuenta que la temperatura promedio de las aguas freáticas es allí de unos 20°C. En estas condiciones la masa de agua se comporta como un foco frigorífico, que extrae, constantemente, calorías al sistema gas-paredes, lo que disminuye, poco a poco, la temperatura y aumenta la humedad relativa del gas producto del intercambio líquido-vapor. Lamentablemente, la carencia de datos suficientes nos priva de efectuar tan interesantes cálculos, pudiendo en este caso aproximarse la situación real a modelos teóricos combinados en distintas condiciones.

Con probabilidad, la alteración del medio influyó en la sensible disminución de las poblaciones de quirópteros observada en esa época.

La retirada del nivel freático en 1970-1971, dejó libre de nuevo los salones; esta vez más fríos y húmedos, pero ambientalmente más equilibrados con el resto de la cueva. Así, en 1971, la caverna se distinguía por constituir una zona de isoterma, que también se manifestaba en la higródistribución, colocada a un nivel más alto y ligeramente creciente hacia los salones Mayor y de la Excavación, que fueron precisamente los salones inundados.

El incremento de la interacción entre las zonas de influencia ayuda a la uniformidad y estabilización de la temperatura, manifestándose un poco más la termocirculación en saco de aire doble, pero con mucha mayor uniformidad interior, como puede apreciarse en la Tabla 3. Además la relativa profundidad del conjunto de cavidades subterráneas y las reducidas dimensiones de las bocas posibilitan, junto al factor termorregulador de la caliza, el mantenimiento de la temperatura.

En 1973, se produjo otro ascenso del nivel freático que inundó de nuevo los mismos salones, pero esta vez con una capa de agua de sólo centímetros de espesor, que desapareció a principios de 1974. Es por ello que el nivel higrométrico aumentó ligeramente aunque con un comportamiento similar al de 1971, al igual que la termodistribución que, con bastante homogeneidad, elevó su valor absoluto, pero ya mostrando la incipiente semejanza en las estaciones 6 y 7 a causa del progresivo incremento de las colonias de murciélagos desde 1972 hasta el presente que son ya muy numerosas y activas.

La tendencia de la evolución térmica e higrométrica puede observarse en las figuras 16 y 17 que constituyen un resumen de la secuencia de los procesos analizados.

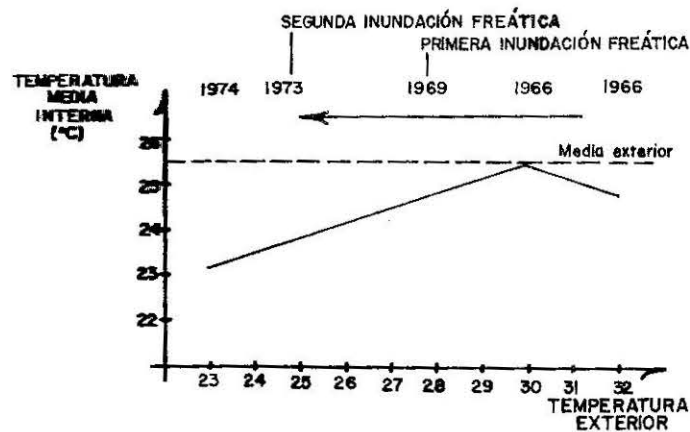


Fig. 16

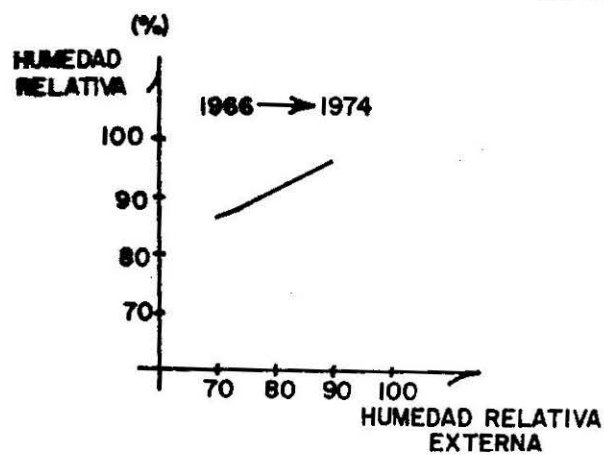


Fig. 17

## INVESTIGACIONES PALEOESPELEOCLIMÁTICAS

Existen evidencias de que el espeleoclima de la Cueva del Túnel y sus mecanismos de funcionamiento han diferido sustancialmente de los actuales.

La construcción del Túnel artificial se efectuó a principios de siglo, por tanto, el funcionamiento actual de la cavidad, ya estudiado, es realmente contemporáneo en la escala espeleocronológica. De esta forma las únicas entradas naturales serían la Dolina y la Claraboya, esta última también de fase reciente, por lo que sólo podría ventilarse la cavidad por un saco de aire descendente, probablemente de intensidad muy débil, puesto que la comunicación de la Dolina con las cámaras interiores es a través de pasajes cortos, pero de pequeña sección transversal, y constituyen así una cavidad del tipo cuasigeoda.

A consecuencia de no estar nunca la cavidad en contacto directo con la atmósfera, debió presentar características de estabilidad intraclimática, por lo que la termocirculación sólo debió afectar a la zona de las cámaras más cercanas a la Dolina.

El estudio de la morfología quimiolitogénica de la Cueva del Túnel demuestra que la meteoclimática hipogea también ha experimentado variaciones.

Al abordar el estudio de las diversas morfologías que presenta la Cueva del Túnel resalta el hecho de que la morfología quimiolitogénica es la más escasa y menos importante, frente a un desarrollo excepcional de las formas de corrosión-glyptogénesis que abarca todos los rincones de la caverna.

Las formas constructivas se localizan en las cámaras y porciones cercanas a la Dolina pero son prácticamente inexistentes en los salones Mayor y de la Excavación. El distinto grado de decalcificación-redisolución (que en algunos casos ha devorado totalmente las espeleotemas) y su vitalidad, permiten reconocer distinciones generacionales relativas, que se resumen como sigue:

**Generación A.** Espeleotemas totalmente redisueltas de las que sólo han quedado porciones de su basamento y por tanto de inidentificables elementos morfológicos.

**Generación B.** Formas litogénicas muy atacadas por la decalcificación-redisolución pero que conservan sus caracteres morfológicos. Todas son formas muertas.

**Generación C.** Espeleotemas no atacadas sustancialmente, pero sin funcionamiento hídrico.

**Generación D.** Corresponde a formas vivas sin redisolución.

Los morfotipos de espeleotemas comprendidos por cada una de dichas generaciones se distribuyen del siguiente modo, según el grado de decalcificación (equivalente al de antigüedad):

**Generación B.** 1) Combinación axial de estalactita climática con estalagmita de caudal.  
2) Estalagmita mixta.

**Generación C.** 1) Estalagmita mixta. 2) Combinación axial de estalactita mixta con estalagmita climática.  
3) Combinación de estalactita de caudal con pequeños gour. 4) Combinación axial de estalactita climática con estalagmita pagodítica.

**Generación D.** Combinación axial de estalactita y estalagmita climáticas.

Sólo para los gour y estalagmitas pagodíticas, la relación entre las dos variables fundamentales: dificultad de cesión de  $\text{CO}_2$  y caudal y degoteo, determinantes de los morfotipos de espeleotemas, ha sido establecida no sólo cualitativamente (Montoriol, 1959), sino también cuantitativamente y acotando los morfotipos no determinados quimicofísicamente (Eraso, 1963).

En el caso presente las relaciones morfogénicas referentes a las causas climáticas (Cl) y de caudal (Ca) se expresan en la Tabla VI en función de su importancia relativa: mucho mayor (++), mayor (+), menor (—) y mucho menor (— —).

Tabla 6

Generación	Morfotipo litogénico	Ca	Cl	
B	B1	Estalactita climática	+	—
		Estalagmita de caudal	+	—
	B2	Estalagmita mixta	++	+++
	<hr/>			
C	C1	Estalagmita mixta	++	+++
		Estalactita mixta	—	—
	C2			
		Estalagmita climática	—	+
		Estalactita de caudal	— —	+
	C3			
		Gours	++	+
		Estalactita climática	+	—
	C4			
		Estalagmita pagodítica	+	—
<hr/>				
D	D1	Estalactita climática	+	—
		Estalagmita pagodítica	+	—

Tabla 6

Generación	Morfotipo litogénico	Ca	Cl			
B	B1	Estalactita climática		+	—	
		Estalagmita de caudal		+	—	
	B2	Estalagmita mixta		++	+++	
	<hr/>					
C	C1	Estalagmita mixta		++	+++	
		Estalactita mixta		—	—	
	C2	Estalagmita climática		—	+	
		Estalactita de caudal		— —	+	
	C3	Gours		++	+	
		Estalactita climática		+	—	
	C4	Estalagmita pagodítica		+	—	
		<hr/>				
	D	D1	Estalactita climática		+	—
			Estalagmita pagodítica		+	—



Puede apreciarse claramente que los distintos morfotipos exigen variaciones de caudal y presión parcial de  $\text{CO}_2$ .

Las causas de caudal han evolucionado según:

+ Ca  $\rightarrow$  ++ Ca  $\rightarrow$  — Ca  $\rightarrow$  ——Ca  $\rightarrow$  ++ Ca  $\rightarrow$  + Ca

O simplificando + Ca  $\rightarrow$  — Ca  $\rightarrow$  + Ca

Como las variaciones del caudal están estrechamente ligadas a la cantidad de precipitaciones atmosféricas, la evolución quimiolitogénica pone al descubierto, al menos, dos cambios globales (cuyo detalle puede seguirse en la primera secuencia): el paso de una fase húmeda a una más seca y luego el retorno a una etapa más húmeda.

Si se tiene en cuenta que toda la evolución litogénica ha tenido lugar durante el Cuaternario, las variaciones de caudal ya demostradas deben ser un reflejo de los cambios ocurridos en el régimen pluviométrico de superficie, mas para una debida correlación, los datos son insuficientes aunque con gran probabilidad pertenezcan al Pleistoceno superior, como se verá más adelante.

Por su parte las causas climáticas —especialmente la presión parcial de  $\text{CO}_2$ — han experimentado la sucesión

—Cl  $\rightarrow$  + Cl  $\rightarrow$  — Cl  $\rightarrow$  + Cl  $\rightarrow$  — Cl

Dado que el aire cavernario es en general más rico en  $\text{CO}_2$  que el exterior y como su concentración está en el medio cavernario regulada por la aerocirculación, se ponen de manifiesto oscilaciones en el funcionamiento meteorológico que repercuten en etapas con menor y mayor contenido de  $\text{CO}_2$ , correspondientes a mejor y peor aeración respectivamente.

Si recordamos el carácter de cuasigeoda y el mecanismo de saco de aire contrado en la Dolina de la Cueva del Túnel en tiempos pretéritos, tales oscilaciones sólo pudieron haberse producido mediante la obturación-desobturación total o parcial de los reducidos pasajes que ponen en comunicación la Dolina con las cámaras interiores (en las que está concentrada la morfología litogénica). Tal proceso puede perfectamente asociarse a las fases de relleno y excavación del Salón del Depósito (Bolsón de los Huesos), cavidad lateral de la Dolina de la que parte el pasaje de mayor sección hacia el interior de la cavidad, este proceso ya ha sido descrito y estudiado por los autores. Prueba fehaciente de ello es que la dovela del pasaje de acceso está comprendida dentro de la

bóveda del Bolsón. Con anterioridad se había puesto en claro la existencia de fases de relleno total del depósito y posteriores reexcavaciones.

La fauna del Pleistoceno superior asociada a los sedimentos del depósito condiciona dicha edad para este proceso, que está en íntima conexión también con los cambios climáticos exteriores y especialmente con las precipitaciones, de cuya intensidad y distribución depende el transporte y deposición del material sedimentario.

De este modo, la Cueva del Túnel sufrió alternativamente fases de incomunicación con el ambiente externo en el Cuaternario como resultado de los cambios climáticos regionales durante él ocurridos, en especial los hidrológicos.

Aún cuando los datos existentes son insuficientes y en una sola cavidad, por lo que poseen un bajo peso estadístico, el solo hecho de haber llegado a los resultados ya examinados por una vía puramente espeleofísica, obliga a reconsiderar las posibilidades y alcance de tales métodos de investigación al profundizar en las relaciones paleoespeleometeorológicas, espeleomorfológicas e hidrológicas.