

Procesos de cavernamiento (espeleogénesis) en sistemas hipogenéticos

INTRODUCCIÓN

Los procesos de carsificación y cavernamiento (espeleogénesis) se agrupan en tres grandes tipos:

Singénéticos, cuando ocurren durante el proceso de deposición de los carbonatos y se producen asociados a ligeras variaciones en la superficie del mar de la cuenca sedimentaria, que permite la acción de procesos subaéreos.

Epigenéticos, cuando tienen lugar en la zona no saturada (vadosa para los autores clásicos), en el epikarst o en la zona saturada (freática para algunos autores).

Hipogenéticos, cuando tienen lugar en profundidad sin intercambio con la superficie y, por supuesto, sin estar sometidas a la acción de procesos superficiales o subsuperficiales. En la tabla 1 se resumen los procesos de control fundamentales.

Los procesos epigenéticos están bien estudiados y, en general, los modelos clásicos y convencionales de carsificación y cavernamiento aprovechan las relativamente sencillas condiciones de contorno del problema, donde casi siempre se trata de acuíferos libres en los que la disolución de la roca está controlada por la bien conocida cinética de los carbonatos en intercambio con procesos subaéreos. En cambio, los procesos epigenéticos presentan una diferente problemática, más compleja, donde se trata de ambientes profundos, por lo común en condiciones de confinamiento o artesianismo y donde los controles de disolución dependen más del balance de masas que de la cinética, donde el ácido sulfúrico es el agente de disolución en detrimento del ácido carbónico, que controla la carsificación en los sistemas epigenéticos.

Si bien el caso epigenético tiene una importancia extraordinaria en el desarrollo y almacenamiento de importantes reservas de agua subterránea, la carsificación profunda presenta relaciones únicas con el emplazamiento de ciertos minerales, como el petróleo, hierro, manganeso y algunos minerales radioactivos. Tal es la razón por la

Resumen / Abstract

La mezcla de aguas con concentraciones diferentes de H_2S puede producir una insaturación considerable y, por ello, muestran una capacidad idéntica a los sistemas H_2CO_3 para renovar su agresividad. Por ello puede producirse cavernamiento (espeleogénesis) a cualquier profundidad, sin relación alguna con el terreno suprayacente. Si el H_2S acuoso o gaseoso entra en contacto con aguas ricas en oxígeno, el H_2S se oxida a H_2SO_4 , lo que provoca un incremento tan notable de la capacidad de disolución que un equivalente de H_2S es capaz de disolver uno de dolomita o dos de calcita. Este trabajo aplica los principios básicos de la modelación de cavernamiento y carsificación desarrollados por el autor en sistemas H_2CO_3 - $CaCO_3$, al caso particular de disolución profunda por mecanismos hipogenéticos donde la porosidad cársica y las cavernas se generan en la vecindad de zonas de reducción, bacteriana o térmica, de sulfatos y las cavernas almacenan importantes volúmenes de minerales, en particular de hidrocarburos. En ellas, la propia maduración de los hidrocarburos, la degradación térmica y la reacción con ácidos orgánicos, crea excedentes de capacidad de disolución de los carbonatos y, por ende, de cavernamiento. Como modelo natural, se adopta el escenario de la evolución de la porosidad en la plataforma asociados a fluctuaciones con episodios de exposición subaérea (y su asociación con leaching y cementación) y al impacto del sistema cársico asociado a la Discordancia del Cretácico Medio (MCU).

Palabras clave: cavernamiento, carsificación

Mixture of waters with different concentrations of H_2S produce a considerable undersaturation and, therefore, show the same capacity of H_2CO_3 systems to renew its aggressiveness. Cave growing can be produced at any depth without any relation with the overlying strata. If aqueous or gaseous H_2S become in contact with oxygen-rich waters, H_2S is oxidized to H_2SO_4 , producing a notable increase in their solution capacity that an H_2S equivalent is capable to dissolve one of dolomite or two of calcite. This paper applies the author's basic principles of cave development simulation in H_2CO_3 - $CaCO_3$ systems to the particular case of deep dissolution by hypogenetic mechanisms, where the karst porosity and caves are generated in the vicinity of sulphate bacterial or thermal reduction zones where caves are able to store huge amounts of hydrocarbons. Within them thermal degradation, hydrocarbon maturity and organic acids reactions increases solution capacity of carbonates and, therefore, of cave development. The natural model adopted for model validation is the scenario of porosity evolution of Cuban platform associated with fluctuations with episodes of subaerial outcropping and with the impact of karst development linked to the Middle Cretaceous Unconformity (MCU).

Key words: cave growing

que autores recientes han dedicado especial atención a aclarar el papel de la espeleogénesis en el desarrollo de los depósitos de hidrocarburos y otros minerales.¹⁻³ En particular, en cuanto concierne al desarrollo de los depósitos de hidrocarburos, actualmente se considera que muchos yacimientos de petróleo y gas están asociados al desarrollo de cavernamiento profundo, como es el caso del campo petrolífero de Yates, Texas, descubierto en 1926 y con reservas evaluadas en 3 000 millones de barriles, de los cuales se han extraído mil millones hasta la fecha, o el de Kirkuk en Iraq.

Las diferencias fundamentales entre los procesos de espeleogénesis hipogenéticos son las que se muestran en la tabla 2.

Los patrones de cavernamiento son sustancialmente diferentes, como se muestra en las figuras 1 y 2.

Para Cuba resulta de especial importancia la carsificación profunda por cuanto los yacimientos actuales y perspectivas de petróleo están asociados a espeleogénesis profunda, como convienen la mayor parte de los autores.⁴⁻⁷

Epigenéticos	Hipogenéticos
Los ácidos se generan en la zona de recarga y la capacidad de disolución se atenúa en la dirección del flujo.	Se generan por irrupciones de agresividad limitadas en tiempo y espacio.
La tasa de disolución está controlada por la cinética de la disolución.	La tasa de disolución está controlada por el balance de masas.

Tipo	Zona hidrodinámica	Tipo de acuífero	Controles hidráulicos	Sistemas físico-químicos	Controles físico-químicos	Procesos dominantes en el control de la tasa de disolución
Singenéticos	No saturada o vadosa	Libre	Intercambio con procesos subaéreos (efecto de mezcla)	H_2CO_3 - $CaCO_3$	Cinéticos	Mezcla de aguas (fundamentalmente efecto salino y de insaturación por mezcla agua dulce/agua salada)
Epigenéticos	Epikarst Zona no saturada o vadosa	Libre	Intercambio con procesos subaéreos (agua en movimiento y mezcla de aguas). La capacidad de disolución se atenúa en la dirección del flujo	H_2S - H_2SO_4	Balance de masas	Efecto de mezcla
				Sistemas mixtos: H_2CO_3 - $CaCO_3$ y H_2S - H_2SO_4	Controles mixtos: cinético y balance de masas	Efectos combinados de agua en movimiento y mezcla de aguas
Hipogenéticos	Circulación profunda	Confinado semiconfinado o semilibre	Sin intercambio con procesos subaéreos. La capacidad de disolución es independiente del flujo	H_2S - H_2SO_4	Balance de masas	Irrupciones de agresividad limitadas en tiempo y espacio: Efecto de mezcla Oxidación del H_2S Enfriamiento de aguas termales ascendentes Metamorfismo Reducción de sulfatos Maduración de hidrocarburos Dedolomitización

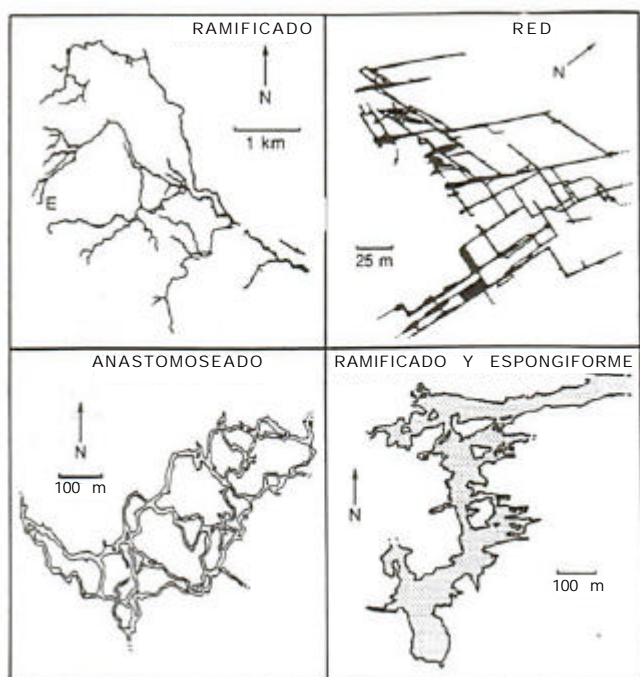


FIG. 1 *Patrones de cavernamiento epigenético (según Palmer, 1993).*

MODELO CONCEPTUAL GENERAL

El carso, como resultado de la interacción de procesos físicos y químicos sobre las rocas carbonatadas, viene definido por las siguientes propiedades.⁸⁻¹⁴

- Se trata de un sistema termodinámico abierto, es decir, en interacción con el medio exterior.
- Las variables del campo de propiedades físicas exhiben anisotropía tridimensional progresiva.
- El espacio que constituye el medio acuífero se presenta rigurosamente jerarquizado (tabla 1).
- Cada espacio presenta un dominio de flujo particular y entre ellos se manifiesta intercambio de masa y energía.
- Consecuentemente, el campo de propiedades físicas se define y estructura para cada espacio.
- Se manifiesta una fuerte influencia del factor de escala sobre el campo de propiedades físicas.
- En el sistema, el trabajo se manifiesta mediante la formación y desarrollo de estructuras autorreguladas de disipación de energía que, mediante retroalimentación, afectan el proceso.
- Un momento de inercia, función del estado inicial del sistema, que modula jerárquicamente las respuestas a los estímulos inducidos natural o artificialmente.
- La elevada dependencia del tiempo de las propiedades que caracterizan el campo de propiedades físicas;
- La irreversibilidad del proceso de carsificación y su evolución unidireccional.

De este modo, puede concluirse que el carso se caracteriza por constituir un sistema en el que interactúan diferentes espacios. Circunscribiéndonos a la fase líquida, esta interacción representa un intercambio de materia y energía entre los diferentes espacios constitutivos del sistema y entre estos y el medio exterior (tabla 3).

En estos sistemas sucede que la mezcla de aguas con concentraciones diferentes de H_2S puede producir una insaturación considerable y, por ello, muestran una capacidad idéntica a los sistemas H_2CO_3 para renovar su agresividad. Por ello puede producirse cavernamiento (espeleogénesis) a cualquier profundidad, sin relación alguna con el terreno suprayacente. Si el H_2S acuoso o gaseoso entra en contacto con aguas ricas en oxígeno, el H_2S se oxida a H_2SO_4 , lo que provoca un incremento tan notable de la capacidad de disolución que un equivalente de H_2S es capaz de disolver uno de dolomita o dos de calcita.

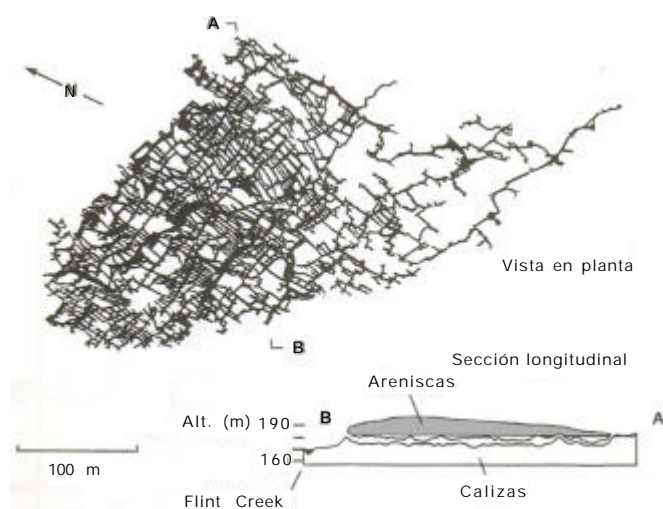


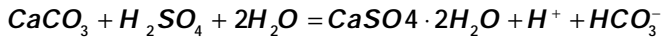
FIG. 2 *Patrones de cavernamiento hipogenético (según Palmer, 1993).*

ESPELEOGÉNESIS EN SISTEMAS

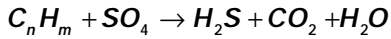
H₂S-H₂SO₄

Las reacciones básicas son las siguientes:

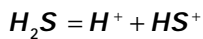
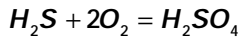
- Ecuación general:



- Reacción profunda asociada al contacto con hidrocarburos:



- Oxidación del H₂S:



El esquema general de cavernamiento, tomado de Palmer (1993), se muestra en la figura 3.

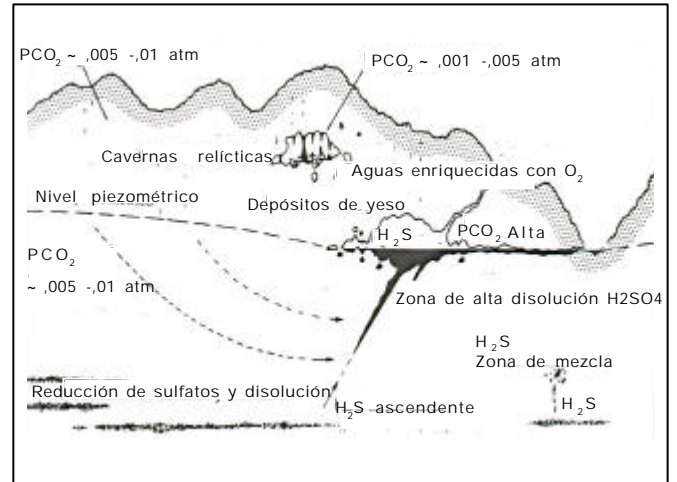


FIG. 3 *Procesos de espeleogénesis en sistemas H₂S-H₂SO₄*

Tabla 3
Espacios constitutivos del sistema cársico (según Molerio, 1985)

Categorías	Denominación del espacio	Volumen con relación al sistema	Longitud característica	Régimen de flujo	Diámetro
- Espacio agrietado no cársico - Macro - Discontinuidad - Espacio cársico	1. Cavernas	$V \leq 1\%$	km	No lineal de alta velocidad	m
	2. Grietas y discontinuidades en general	$1\% \leq V \leq 5\%$	km	No lineal de alta velocidad	mm - m
	- Fallas		km	Lineal	m
	- Diaclasas.		km	Lineal	mm-cm
	- Planos de estratificación		km	Lineal	cm
	- Planos de esquistosidad		cm	Lineal	mm
- Espacio poroso - Espacio agrietado no cársico - Micro - Espacio cársico - Discontinuidad	3. Poros de la matriz rocosa microfracturas:	$5\% < V \leq 40\%$	mm	No lineal de baja velocidad (microflujo)	0,1 mm
	- Esfoliación - Esquistosidad - Clivaje		mm mm		10 μ 0,1 μ
	4. Matriz sólida	$V > 40\%$	-	No lineal de baja velocidad (no flujo)	< 1 μ

CONCLUSIONES

La razón fundamental de estos trabajos de simulación, validados en paleokarsts onshore, en rocas madre del Tithoniano-Cretácico medio, es que procesos similares deben encontrarse en los reservorios esperados en la Zona Económica Exclusiva de Cuba en el Golfo de México, de manera que la modelación matemática permita contribuir a predecir su posición geográfica y estructura tridimensional.

Muchos de los resultados obtenidos hasta la fecha han permitido validar los modelos conceptuales básicos adoptados. Los más importantes son los siguientes:

- Existen procesos de espeleogénesis asociados a condiciones artesianas en el territorio cubano. Algunos de ellos son paleokarsts otros se han desarrollado en condiciones actuales; sin embargo, los primeros están asociados a depósitos minerales importantes y los segundos, esencialmente, a reservas acuíferas.

- Los paleokarsts son, en todos los casos, preneógenos, aunque se han encontrado evidencias de paleokarsts o, al menos de cavernas holofósiles en rocas del Mioceno medio.

- La porosidad de cavernamiento y los sistemas de cavernas confinados o formados bajo condiciones artesianas, no guardan relación con el relieve moderno superficial, lo que indica la falta de intercambio con procesos subaéreos.

- Los patrones de cavernamiento de patrón agrietamiento en determinados contextos hidrológicos y geológicos muestran pocas variaciones en su geometría, excepto en los casos en que han ocurrido procesos colaterales de mezcla.

REFERENCIAS

- LOWE, D.J.: "The Forest of Dean Caves and Karst: Inception Horizons and Iron-Ore Deposits, *Cave Science* 20(2):31-43, 1993.
- HILL, C. A.: "H₂S-related Porosity and Sulfuric acid Oil Field Karst". In: Budd, D.A., A.H. Saller, P.M. Harris (eds): *Unconformities and Porosity in Carbonate Strata*, AAPG, 63:301-306, 1995.
- KLIMCHOUK, A. B.: "The Role of Karst in the Genesis of Sulfur Deposits. Pre-Carpathian Region, Ukraine, *Env. Geol.* 31 (1-2):1-20, 1997.
- MIRANDA, E., *et al.*: "La evolución tectonosedimentaria de las cuencas del Golfo de México. Su relación con los sistemas petroleros". V Congreso Cubano de Geología y Minería, 2003.
- PINDELL, J. Y L. KENEAN: "Timing, Kinematics and Paleogeography of the Evolution of SE Gulf of Mexico and Northern Proto-Caribbean Sea: Template for the Paleogene Cuban Orogeny", V Congreso Cubano de Geología y Minería, 2003.
- VALLADARES, S. *et. al.*: "Identificación de reservorios y sellos en la ZEE de Cuba en el Golfo de México. Comparación con los conocidos en Cuba y el SE del Golfo de México 2", V Congreso Cubano de Geología y Minería, 2003.
- LÓPEZ QUINTERO, J.O. *et al.*: "Desarrollo de rocas madre y petróleo en nuevas fronteras en el sureste del Golfo de México y su relación con rocas vecinas". V Congreso Cubano de Geología y Minería, 2003.
- MOLERIO LEÓN, LESLIE F.: "Pronóstico de vías preferenciales de circulación en el Carso". Simp. XLV Aniversario, Sociedad Espeleológica de Cuba, pp. 52-53, Ciudad de La Habana, 1985.
- : "Dominios de flujo y jerarquización del espacio en acuíferos cársicos". Simp. XLV Aniversario, Sociedad Espeleológica de Cuba, p. 54, Ciudad de La Habana, 1985.
- : "Determinación de la conductividad hidráulica direccional en acuíferos cársicos mediante fotointerpretación y cálculo tensorial. Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, p. 66, Ciudad de La Habana, 1986.
- : "Fundamentos hidrodinámicos y termodinámicos para la predicción empírica de la posición, distribución y geometría de las redes de cavernas". Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, pp. 67-68, Ciudad de La Habana, 1986.
- : Particularidades de la transformación matemática de un modelo conceptual del karst. Conferencia Invitada. Taller Internacional Hidrología Cársica de la Región del Caribe, p. 10, UNESCO, Ciudad de La Habana, 1988.
- : "Inducción artificial de la respuesta jerarquizada de los espacios acuíferos en el karst. Jornada Científica Filial Habana y Ciudad de La Habana, Sociedad Cubana Geología, 1989.
- : "Aproximación multidisciplinaria a un modelo matemático del desarrollo del carso", *Ingeniería Hidráulica*, Vol. X, No. 2, pp. 133-144, Ciudad de La Habana, 1989.
- : Modelo del desarrollo de cavernas y conductos cársicos, p. 98, 2002.
- KLIMCHOUK, A.B.: *Speleogenesis Under Deep-Seated and Confined Settings*. Comm. Hydrogeology and Speleogenesis, UIS, 2001.