



**BOLETÍN INFORMATIVO DE LA
COMISIÓN DE GEOSPELEOLOGÍA
Federación Espeleológica de América Latina
y el Caribe
-FEALC-**

*[Geospeleology Commission Newsletter,
Speleological Federation of Latin America and the
Caribbean -FEALC-]*

No. 52, Octubre 2004

Coordinador: Prof. Dr. Franco Urbani
Sociedad Venezolana de Espeleología. Apartado 47.334, Caracas 1041A, Venezuela.
Telefax: (58)-212-272-0724, Correo-e: urbani@cantv.net

Boletín Informativo de la Comisión de Geoespeleología, Federación Espeleológica de América Latina y el Caribe (FEALC). *Esta publicación es de carácter informal y no arbitrada, preparada con el único objetivo de divulgar rápidamente las actividades geoespeleológicas en la región de la FEALC. Sólo se difunde por vía de correo electrónico. Es de libre copia y difusión y explícitamente se solicita a quienes lo reciban que a su vez lo reenvíen a otros posibles interesados, o lo incluyan en páginas web. Igualmente se pide que obtengan copias en papel para las bibliotecas de sus instituciones. Se solicitan contribuciones de cualquier tipo y extensión para su divulgación. Todos los números anteriores están disponibles en <http://www.fealc.org/geoespeleologia.htm> o solicitándolos a fealc-sve@cantv.net.*

Geospeleology Commission Newsletter, Speleological Federation of Latin America and the Caribbean (FEALC). *This publication is informal and not peer-reviewed. Its only objective is to quickly disseminate the geoespeleological activities in the FEALC region. It is only distributed by electronic mail. It can be copied freely and we ask the recipients to forward it to other interested parties or to include it in Web pages. We recommend that you obtain a paper copy for the library of your institution. Contributions of any type and extension are welcomed. All previous issues are available at <http://www.fealc.org/geoespeleologia.htm> or ask for them to fealc-sve@cantv.net.*

Índice – Index

**Modelo de desarrollo de cuevas y conductos cárnicos.
Leslie F. MOLEIRO-LEÓN**

2-9



MODELO DEL DESARROLLO DE CAVERNAS Y CONDUCTOS CÁRSICOS

Leslie F. Molerio León

Grupo de Aguas Terrestres, Instituto de Geofísica y Astronomía, Ministerio de Ciencia, Tecnología y Medio Ambiente. Apartado 6219, CP 10600, Habana 6, e-mail: leslie@cesigma.com.cu

RESUMEN

La modelación del desarrollo del cavernamiento es una herramienta muy potente para incrementar la efectividad de las investigaciones y reducir los costos de investigación y construcción. Este trabajo, cuyos principios fueron enunciados inicialmente en 1982, presenta una aproximación de tipo determinístico- estocástica basada en los principios de la termodinámica de no equilibrio para la simulación y pronóstico de la posición de cavernas y conductos cársicos bajo diferentes condiciones iniciales y de contorno. El modelo ha sido aplicado con éxito sostenido en Bulgaria, Cuba y Francia en la resolución de problemas relacionados con la construcción de túneles, adaptación ingeniera de cavernas, construcción de obras y estructuras hidráulicas, prospección hidrogeológica y contaminación de las aguas.

ABSTRACT

The mathematical simulation of cave development is a very potent tool to increase the effectiveness of the investigations and to reduce the costs of research and construction in karst regions. This paper whose theoretical principles were enunciated initially in 1982, improves the model with a deterministic - stochastic approach based on the principles of non equilibrium thermodynamic for the simulation and forecast of the position of caves and karst conduits under different initials and boundary conditions. The model has been successfully applied in Bulgaria, Cuba and France in the resolution of problems related with the construction of tunnels, engineering adaptation of caves, construction of works and hydraulic structures, hydrogeological prospecting and on the assessment and forecasting of groundwater pollution.

INTRODUCCION

La aplicación de este grupo de avanzadas de técnicas matemáticas y físicas en una metodología única para la simulación de redes y conductos cársicos, aún cuando necesita perfeccionarse en el futuro inmediato, ha mostrado su validez en un amplio rango de aplicación, al tratar problemas tan diferentes como la prospección y el manejo de los recursos de agua subterránea, la optimización de la red de monitoreo de niveles de aguas subterráneas, la prevención de la contaminación, la adaptación ingeniera de cuevas o el pronóstico de filtraciones y vida útil de un embalse.

Los resultados obtenidos han permitido:

- Simular el desarrollo natural de cavernas y conductos cársicos y pronosticar su posición en el espacio.
- Simular y pronosticar el desarrollo de carsificación y cavernamiento inducidos en la vecindad de obras hidráulicas.
- Pronosticar la posición de manantiales cársicos y zonas de descarga natural de las aguas subterráneas.
- Identificar las zonas de vulnerabilidad geomecánica en los sistemas cársicos.
- Orientar la captación de las aguas subterráneas en zonas cársicas.
- Mejorar sustancialmente el conocimiento de los patrones y direcciones de flujo en los acuíferos cársicos y, en particular, en el epikarst.
- Contribuir a la protección adecuada de las captaciones y de los manantiales cársicos.



Está claro que a los efectos hidráulicos, geomecánicos, geotécnicos y ambientales, el rasgo distintivo más importante del carso es la alteración que sufre la porosidad primaria debido a los procesos de disolución que promueven el crecimiento de las grietas y los poros de la roca. Esta pérdida de material y su traslado dentro o fuera del macizo carbonatado es la causa de todas las complicaciones que surgen al tratar el medio con fines de uso o conservación. Tal es la razón fundamental que ha promovido el desarrollo de investigaciones encaminadas a aclarar los procesos que lo originan, a describirlo matemáticamente, a diagnosticar su estado físico y a pronosticar su desarrollo y su respuesta a acciones naturales o artificiales.

DESCRIPCIÓN DEL MODELO

Los resultados de la simulación, precedidos en no pocas ocasiones por la necesidad de resolver algunos problemas teóricos y de la descripción físico-matemática de muchos de los procesos que dan lugar al desarrollo del cavernamiento permitieron obtener una idea más precisa de algunas regularidades en la formación de las cavernas. Muchas de ellas han sido adelantadas oportunamente.

La identificación de un grupo importante de regularidades en la formación del cavernamiento es un resultado altamente promisorio en tanto conduce al descubrimiento de las leyes que rigen el desarrollo de la carsificación y el cavernamiento y, por tanto, a la gestión económica, social, política y ambiental del medio cársico.

La conclusión más importante de esta investigación es que la carsificación y el cavernamiento no son procesos aleatorios. Están regidos por leyes termodinámicas y, por tanto, su origen, evolución en el tiempo y posición en el espacio pueden pronosticarse.

Las diferentes aproximaciones al pronóstico del desarrollo de cavernas se han concentrado en tres direcciones fundamentales:

- Pronóstico de la dirección del cavernamiento, esencialmente basados en el análisis tectónico y su generalización estadística o geoestadística (Eraso, 1975, 1982, 1985/1986; Eraso et al., 1992).
- Simulación del crecimiento tridimensional de los conductos aplicando técnicas hidráulicas y de cinética química (Annable y Sudicky, 1998; Clemens et al., 1996, 1997, 1998; Curl, 1965, 1966, 1971; Dreybodt, 1990, 1992, 1993, 1995, 1996, 1998; Dreybodt y Buhmann, 1991; Dreybodt y Siemers, 1997; Groves y Howard, 1994)
- Simulación de la posición y distribución espacial aplicando métodos complejos geodinámicos, morfodinámicos, hidrodinámicos, físico-químicos y termodinámicos integrados y su generalización estadística o geoestadística (Carlier, 1984; Carnahan, 1976; Molerio, 1882a, 1982b, 1985a, 1985b, 1985c, 1986a, 1986b, 1988, 1989a, 1989b, 1989c, 1990, 1992a, 1992b, 1993, 1995^a, 1996; Molerio, Guerra y Flores, 1984; Renshaw, 1996)

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

- 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;
- 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.

Las cavernas son fragmentos, truncados o no, de sistemas de drenaje subterráneo. Este concepto es el fundamento del modelo conceptual y, por ello, el eje de desarrollo de la modelación. El origen de las cavernas está gobernado por un balance de masas tal que la tasa de crecimiento de los conductos, como consecuencia de la remoción de masa de las paredes de la cavidad o el conducto, es igual a la tasa de transporte de masa en solución. La hipótesis de trabajo sobre el desarrollo de los conductos cárnicos parte de los siguientes presupuestos:

- Las galerías subterráneas son espacios lineales y no planares o areales;
- Las topologías lineales por lo común se desarrollan a lo largo de las intersecciones entre superficies;
- En cuanto al desarrollo de las cavernas estas superficies son de dos tipos: la zona de máxima concentración de solvente y la zona de máxima concentración de flujo;
- La superficie máxima de concentración de solvente (MCS) es generalmente horizontal o subhorizontal y depende de la evolución geoquímica del medio, la fuente de aporte y el tiempo de residencia de las aguas en el macizo;
- Las superficies de máxima concentración de flujo (MCF) suelen estar fuertemente inclinadas y, con menor frecuencia, pueden ser completamente horizontales;
- En la intersección de las superficies MCF y MCS se encuentra no solamente el mayor volumen de fluido sino la más elevada concentración de solvente, de ahí que en ella ocurre la mayor probabilidad de disolución y por ello, de desarrollo de cavernas;
- El trabajo que se realiza en el punto de intersección no da lugar al equilibrio térmico. El intercambio de masa y energía conduce al desarrollo progresivo de un sistema abierto en el cual, la entropía crece a partir de un instante inicial t_0 en que el sistema deja de ser cerrado;
- Las superficies MCF se encuentran en la dirección de la componente de conductividad hidráulica en el sentido de la velocidad. Flujo lateral se encuentra en la dirección de la componente de gradiente hidráulico, de manera que la máxima probabilidad de desarrollo puede determinarse conociendo éstas, lo que significa que el desarrollo de la red de cavernas no es un fenómeno aleatorio y por tanto, puede predecirse;
- Conociendo la orientación de las superficies más favorables para el desarrollo de las redes de conductos es imprescindible entonces, determinar la dirección en que ocurre el proceso de excavación. De acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, ella ocurre en la dirección del máximo incremento de la entropía;
- Cada espacio del universo cárnico, incluidas las cavernas, se desarrolla según los principios de la termodinámica de los procesos de no equilibrio y a ella corresponden valores de la función de disipación de energía crecientes que se expresan como una sumatoria a partir del centro de gravedad del mismo.

El *coupling* termodinámico, para la definición de la función de disipación de energía, se planteó a partir de las relaciones clásicas de Onsager que relacionan fuerzas y flujos entre las componentes de calor y fluido, difusión y afinidad química. La estructura del campo de propiedades físicas de los acuíferos en rocas agrietadas y, en particular, los cárnicos, está afectada por la homogeneidad, heterogeneidad y anisotropía; la dependencia del tiempo y el efecto de escala que fueron especialmente considerados en el modelo.



ALGORITMO GENERAL

El algoritmo general ha sido desarrollado a partir de los principios de la termodinámica de no equilibrio, que se considera esencial para determinar la dirección de los procesos de cavernamiento. El algoritmo se basa en un conjunto de ecuaciones de control que describen la continuidad macroscópica del campo de propiedades físicas, los mecanismos de triggering en el sistema físico-químico, la competencia entre diferentes líneas de flujo y la dirección de la evolución en tiempo y espacio, de los procesos de desarrollo del cavernamiento.

En este modelo, los espacios que integran el universo cársico son tratados como medios continuos. La validez de esta aproximación depende de poder demostrar la continuidad estadística del campo de propiedades físicas entre espacios jerarquizados por su longitud característica definiéndose, en el mundo real, una longitud, volumen o área elemental representativa. Ella debe tomar en cuenta la distorsión que producen el efecto de escala y la dependencia del tiempo de las variables que estructuran el campo de propiedades físicas.

Los procesos de transporte de masa, momento y energía entre medios continuos equivalentes fueron resueltos para cada uno de los espacios involucrados, en términos de la derivación de un conjunto de ecuaciones que describieran las correspondientes funciones de transporte. Del mismo modo, el trabajo que tiene lugar en el sistema, y que conduce a la formación de estructuras autorreguladas de disipación de energía, fue examinado a partir de la derivación de un conjunto de ecuaciones que describen la función disipativa de los espacios.

Se obtuvo una ecuación general para definir el cambio de entropía en el sistema en función de la diferencia de potenciales y la afinidad química de las reacciones fundamentales. Las fuerzas y flujos considerados en el balance termo hidrodinámico básico son: a/ transporte de calor (ley de Fourier); b/ flujo volumétrico (ley de Darcy); c/ transporte dispersivo-difusivo (ley de Fick); d/ conductividad eléctrica (ley de Ohm) y e/ la afinidad química de las reacciones, enlazadas por las funciones de transferencia y disipación de energía mediante coupling termodinámico múltiple.

Los resultados obtenidos en la simulación de sistemas reales fueron altamente promisorios. Sin embargo, las desviaciones respecto al modelo natural se derivaban de numerosas fuentes de incertidumbre cuya discriminación resulto una tarea ardua. La mas importante de estas se reducía a distinguir las condiciones que provocasen que un sistema inicialmente cerrado o aislado, reversible, sin coacciones exteriores, se transformase en un sistema termodinámico abierto, que estuviese caracterizado por las propiedades definidas en el modelo conceptual del carso. En este sentido, se oriento la investigación hacia la caracterización de acciones aleatorias exteriores, o producidas por el sistema, en términos de la adaptabilidad de este para filtrar tales estímulos, definir su efecto en el caso de provocar fluctuaciones termodinámicas, diferenciar la estacionalidad de las señales aleatorias y tratar de resolver la respuesta del sistema en la dirección de los niveles crecientes de entropía. Uno de los aspectos básicos involucrados en el cambio de tipo termodinámico del sistema lo constituyen los mecanismos de triggering cinético.

La cuestión mas importante en este sentido, es que el crecimiento de la entropía del sistema ocurre solamente a partir de ese instante inicial. Así, para un sistema aislado, las ecuaciones macroscópicas son



Fig. 1. Simulación del sistema cavernario Majaguas – Cantera, Pinar del Río, Cuba (arriba. Sistema real; abajo, Sistema simulado)



tales, que para un intervalo infinito de tiempo, todo es reversible, ya que la entropía primero decrece y después crece. Para un sistema que no está aislado siempre, el instante inicial se destaca físicamente y, a partir de él, las ecuaciones macroscópicas solo pueden dar lugar al crecimiento de la entropía, lo que no contradice la irreversibilidad microscópica.

Se requirió definir un conjunto de mecanismos que produzcan un efecto de alteración del estado cuasi estacionario de equilibrio del sistema. Resulta lógico suponer que el desarrollo privilegiado de algunos conductos en detrimento de otros se deba a una combinación entre la cinética del proceso de disolución y el régimen de flujo en el sistema. Desde el punto de vista de la cinética del proceso de disolución, toda vez que parece claro que la aparición de régimen no lineal de alta velocidad no es, necesariamente, el único mecanismo de triggering, aun cuando la turbulencia contribuya, significativamente, al incremento en la disolución.

En tanto indican dos regímenes de disolución: uno fuertemente insaturado y otro próximo a la saturación de calcita. Las tasas de disolución transformadas en tiempos de tránsito bajo ciertas condiciones iniciales de porosidad, gradiente hidráulico y suministro de dióxido de carbono permiten validar la aproximación de la ley cúbica de distribución de velocidad en capilares. La distancia crítica de recorrido varía con la tercera potencia del diámetro del conducto.

Asumiendo válidos tales mecanismos, y tomando en cuenta la naturaleza de las reacciones y el control por difusión-dispersión, el problema se reduce a determinar los coeficientes de difusión y de dispersión. El tratamiento de la fluctuación termodinámica provocado por la coincidencia entre la aparición del coeficiente fenomenológico de dispersión, el flujo no lineal de alta velocidad, y el incremento de la tasa de disolución, parecen susceptibles de ser tratados como impulsos únicos de duración t_0 en el instante aleatorio, de manera que satisfaga las condiciones en que el instante inicial sea mucho menor que el tiempo total ($t_0 \ll t$) y que la probabilidad de los extremos de la funcional sea de magnitud despreciable ($t_0/2t$) cuando el tiempo total tiende a infinito.

APLICACIONES

El modelo de predicción (GLORIA) ha sido ensayado para la resolución de los siguientes problemas de pronóstico:

- Validación del modelo y pronóstico del desarrollo del cavernamiento en diferentes sistemas cavernarios de Cuba, Bulgaria y Francia (Figs. 1-2).
- Protección de los Manantiales Los Portales.
- Evaluación del riesgo de contaminación de las aguas superficiales por descargas no controladas al subsuelo.
- Validación del modelo en términos de la distribución de las vías de drenaje de los hoyos de montaña para el pronóstico de inundaciones asociadas al llenado de la CHA Cuyaguaje.
- Pronóstico de puntos de descarga natural de las aguas subterráneas (Fig. 3).
- Pronóstico de contaminación por hidrocarburos.
- Pronóstico de vida útil de un repositorio de desechos peligrosos (hidrocarburos y metales tóxicos).
- Orientación de la adaptación ingeniera de cuevas.

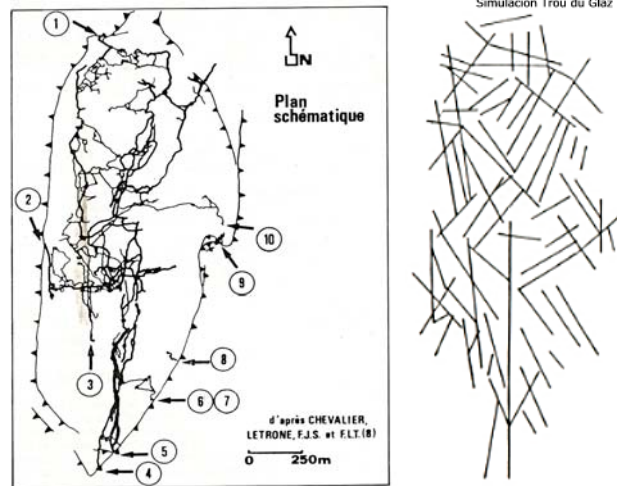


Fig. 2. Simulación del sistema cavernario Dent de Crolles – Trou Du Glaz, Francia (izquierda Sistema real; derecha, Sistema simulado)



CONCLUSIONES

Los resultados obtenidos tienen las siguientes implicaciones para el desarrollo de las cavernas:

- En un conducto cualquiera, la velocidad de crecimiento se incrementa con la descarga, pero sólo hasta una tasa máxima, crítica, a partir de la cual no tiene lugar cualquier incremento en la velocidad del crecimiento por disolución, excepto, quizás, por abrasión.
- El crecimiento tiene lugar, solamente, si la descarga se incrementa con el tiempo.
- Las líneas de flujo, conductos, cavidades que exhiban la mayor descarga en la menor longitud, es decir, la mayor relación Q/L , crecen más rápidamente.

Considerando que la energía potencial del sistema de flujo se convierte en calor absorbido por el sistema, los cambios en la entropía, debidos a la pérdida de carga, que pueden tratarse como procesos reversibles, permiten calcular los cambios en la energía potencial asociados con el flujo en el sistema y, en consecuencia, obtener la mínima producción de entropía debida a los cambios en la altitud. Cuando es posible separar todas las fuentes de calor en el sistema (flujo de calor terrestre, radiación solar, calores de disolución y precipitación y producción de calor de fricción), la producción adicional de entropía puede combinarse con el mínimo para obtener, así, la entropía total producida por procesos físicos.

La producción de entropía en el sistema es el elemento más importante para pronosticar la dirección en que ocurrirán los procesos de desarrollo del cavernamiento toda vez que, de acuerdo con el segundo principio de la termodinámica, ella ocurre en la dirección del máximo incremento de la entropía.



Fig. 3. Pronóstico de la posición de manantiales en Valle Ancón, Pinar del Río, Cuba.

BIBLIOGRAFÍA

- Annable, W.K., E.A. Sudicky (1998): **Simulation of Karst genesis: hydrodynamic and geochemical rock-water interactions in partially filled conduits.** Bull. Hydrogeol., Centre Hydrogeol. Univ. Neuchatel, 16:211-221
- Atkinson, T.C. (1977): **Diffuse flow and conduit flow in limestone terrains in the Mendip Hills, Somerset (Great Britain)** Jour. Hydrol. 35: 93-110
- Carlier, E. (1984): **Essai de simulation de l'écoulement á surface libre dans une fissure.** Hydrogeologie-Geologie de l'ingénieur, 3 :227-232
- Carnahan, C.L.(1976): **Non-equilibrium thermodynamics of groundwater flow systems: Symmetry properties of phenomenological coefficients and considerations of hydrodynamic dispersion.** Jour.Hydrol 31:125-150
- Clemens, T.; D. Hückinghaus ; M. Sauter; R. Liedl; G. Teutsch (1996): **A combined continuum and discrete network reactive transport model for the simulation of Karst development.** IAHS Publ. 237: 309-318
- Clemens, T.; D. Hückinghaus ; M. Sauter; R. Liedl; G. Teutsch (1998): **Simulation of the evolution of maze caves.** Bull. Hydrogeol., Centre Hydrogeol. Univ. Neuchatel, 16:201-209
- Clemens, T.; D. Hückinghaus ; R. Liedl; M. Sauter; G. Teutsch (1997): **Modelling of the genesis of Karst aquifer systems using a coupled reactive network model.** In/ Pointet, T. (ed): **Hard rocks hydrosystems**, IAHS Publ. 241:3-10



- Clemens, T.; D. Hückinghaus ; M. Sauter; R. Liedl; G. Teutsch (1999): **Simulation of the development of Karst aquifers by using a coupled continuum pipe-flow model, 2. Model verification and sensitivity analysis.** Water Resour. Res.
- Curl, R.L. (1965): **Solution kinetics of calcite.** Proc. 4th Internatl. Congr. Speleol., Ljubljana, Vol III:61-66
- Curl, R.L. (1966): **Scallops and fluttes.** Cave. Res. Group, Gr.Br.Trans. 7:121-160
- Curl, R.L. (1971): **Cave conduit competition. I: Power law models for short tubes.** Caves and Karst 13(5):39
- Dreybodd, W. (1990): **The role of dissolution kinetics in the development of Karst aquifers in limestone: a model simulation of Karst evolution.** J. Geol. 98(5): 639-655
- Dreybodd, W. (1992): **Dynamics of Karstification: A model applied to hydraulics structures in Karst terranes.** Applied Hydrogeol. 1:20-32
- Dreybodd, W. (1993): **A model of Karstification in the vicinity of hydraulic structures.** IAHS Publ. 207:33-45
- Dreybodd, W., D. Buhmann (1991): **A mass transport model for dissolution and precipitation of calcite from solutions in turbulent motion.** Chemical Geol. 90:107-122
- Dreybodd, W. (1995): **Principles of Karst evolution from initiation to maturity and their relation to physics and chemistry.** Contribution to IGCP 299. Geology , Climate and Hydrology in Karst Formation.
- Dreybodd, W. (1996): **Principles of early development of karst conduits under natural and man-made conditions revealed by mathematical analysis of numeric models.** Water Resour. Res. 30(10): 2837-2846
- Dreybodd, W. ; J. Siemers (1997): **Early evolution of Karst aquifers in limestone: models on two dimensional percolation clusters.** Proc. 12th Internatl. Speleol. Congr., La Chaux-de-Fonds, Suiza, 2:75-80
- Dreybodd, W. (1998): **Limestone dissolution rates in Karst environments.** Bull. Hydrogeol., Centre Hydrogeol. Univ. Neuchatel, 16:167-183
- Egemeier, Stephen Jay (1969): **Origin of caves in eastern New York as related to unconfined groundwater flow.** Natl. Speleol. Soc. Bull., 31(4):97-111
- Eraso, A. (1975): **Nuevo método en la investigación del carso. Los modelos naturales y la convergencia de formas.** Cuad. Geog. I:121-126
- Eraso, A. (1982): **Consideraciones sobre el problema de la génesis y evolución del Karst.** UIS, Madrid, 28:
- Eraso, A. (1985/1986): **Método de predicción de las direcciones preferenciales de drenaje en el karst.** Kobie. Serie Cienc. Nat. XV, Bilbao:15-165
- Eraso, A., P. Garay, R. Medina, C. Paredes (1992): **Aplicación del método de predicción al karst de las montañas de Nakanai en Nueva Bretaña, Papua Nueva Guinea.** GTICEK. Taller Internac. sobre Cuevas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló,:233-239
- Ewers, R.O. (1982): **Cavern development in the dimensions of length and depth.** PhD Thesis, McMaster Univ., Ontario, 398:
- Flores Valdés, Ernesto & L.F. Molerio León (1995): **Patrones de Agrietamiento en la Sierra de Quemado, Pinar del Río, Cuba.** Congr. Internac. LV Aniv. Soc. Espel. Cuba y Primera Reunión Iberoamericana, La Habana,:35-36
- Groves, C.G.; A.D. Howard (1994): **Minimum hydrochemical conditions allowing limestone cave development.** Water Resour. Res. 30(3):607-615
- Howard, A.D.(1964): **Processes of limestone cave development.** Internatl. Jour. Speleol 1(1):47-60
- Jacquet, O, P.Y. Jeannin (1994): **Modelling the karstic medium: a geostatistical approach.** In m. Armstrong y P.A. Dowd (eds.): **Geostatistical simulations.** Kluwer Acad. Publ. The Netherlands,: 185-195
- Jeannin, P-I; T. Bitterli (1998): **Speleogenesis of the north of Lake Thun cave system (Canton Bern, Switzerland): adequacy between models and reality.** Bull. Hydrogeol., Centre Hydrogeol. Univ. Neuchatel, 16:157-165
- Jennings, J.N. (1971): **Karst.** Boston, M.I.T. Press, 252:
- Molerio León, Leslie F. (1982a): **Análisis de un Modelo Teórico de la Conductividad Hidráulica en el Carso.** Bol. Grupo Espel. Martel de Cuba, La Habana (4):6
- Molerio León, Leslie F. (1982b): **Contribución al Estudio de los Procesos de Dolinización en el KegelKarst de Cuba Occidental.** Bol. Grupo Espel. Martel de Cuba, La Habana (4):2



- Molerio León, Leslie F.; M. Guerra Oliva & E. Flores Valdés (1984): **Patrones y Regímenes de Flujo en Cavidades Directas del Sur de la Provincia de Matanzas.** *Voluntad Hidráulica*, La Habana, (63):37-52
- Molerio León, Leslie F. (1985a): **Pronóstico de Vías Preferenciales de Circulación en el Carso.** Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana,:52-53
- Molerio León, Leslie F. (1985b): **Dominios de Flujo y Jerarquización del Espacio en Acuíferos Cársicos.** Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana,: 54
- Molerio León, Leslie F. (1985c): **El Área Elemental Representativa (AER) para la Evaluación de las Propiedades Físicas del Karst. Modelo Teórico.** Simp. XLV Aniv.Soc. Espel. Cuba, La Habana,: 45
- Molerio León, Leslie F. (1986a): **Determinación de la Conductividad Hidráulica Direccional en Acuíferos Cársicos Mediante Fotointerpretación y Cálculo Tensorial.** Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, La Habana: 66
- Molerio León, Leslie F. (1986b): **Fundamentos Hidrodinámicos y Termodinámicos para la Predicción Empírica de la Posición, Distribución y Geometría de las Redes de Cavernas.** Encuentro Técnico Ramal de Hidroeconomía, La Habana: 67-68
- Molerio León, Leslie F. (1988): **Particularidades de la Transformación Matemática de Un Modelo Conceptual del Karst. Conferencia Invitada.** Taller Internac. Hidrol. Cársica de la Región del Caribe, UNESCO, La Habana, 10:
- Molerio León, Leslie F. (1989a): **Aproximación Multidisciplinaria a un Modelo Matemático del Desarrollo del Carso.** *Ing. Hidráulica*, La Habana, X(2):133-144
- Molerio León, Leslie F. (1989b): **¿Podemos Simular la Evolución del Carso?.** Jor. Cient. Cté. Espel.Prov.Villa Clara, Remedios,:23
- Molerio León, Leslie F. (1989c): **El Origen de las Cavernas.** Jor. Cient. Cté. Espel.Prov.Villa Clara, Remedios,:26
- Molerio León, Leslie F. (1990): **Simulación Matemática del Desarrollo de las Cavernas.** Congr. 50 Aniv.Soc.Espel. Cuba, La Habana: 55
- Molerio León, Leslie F. (1992a): **Complementos de un Modelo de Simulación Matemática del Desarrollo del Carso.** GTICEK. Taller Internac. sobre Cuencas Experimentales en el Karst, Matanzas, Publ. Universitat Jaume I de Castelló,:83-92
- Molerio León, Leslie F. (1992b): **Distribución del Cavernamiento en las Sierras del Pesquero, San Carlos, Resolladero y Mesa, Pinar del Río Cuba.** II Cong. Espel. Latinoamérica y el Caribe, Viñales, Pinar del Río, Cuba,:19-20
- Molerio León, Leslie F. (1993): **Problemas Ingenieriles en Áreas Cársicas: La Estabilidad de las Cavernas.** II Jornadas Venezolanas de Geología Ambiental, Maracaibo, Venezuela, 15:
- Molerio León, Leslie F.(1995a): **Mathematical Modelling of Cave Systems. Developments and Achievements.** Internatl. Geogr. Union (IGU) Conf. of Latin America and Caribbean Countries, La Habana, 38:
- Molerio León, Leslie F.(1996): **Mathematical Simulation of Karst Development.** Internatl. Symp. Hydrology in the Humid Tropic Environment, Kingston, Jamaica, AIHS,:9
- Palmer, A.N. (1965): **A hydrologic study of Indiana karst.** Ph.D. Thesis abs. Indiana Univ. 181:
- Palmer, A.N. (1981): **Hydrochemical controls in the origin of limestone caves.** Proc. 8th Internatl. Congr. Speleolo., Bowling Green, Kentucky:120-122
- Palmer, A.N. (1987): **Cave levels and their interpretation.** NSS Bull. 49:50-66
- Palmer, A.N. (1988): **Solutional enlargement of openings in the vicinity of hydraulic structures in Karst regions.** Proc. 2nd. Internatl. Conf. Environmental Problems in Karst Terrains, Ass. Groundwater Scientists and Eng., Dublin, Ohio:3-13
- Palmer, A.N. (1991): **Origin and morphology of limestone caves.** Geol. Soc. America Bull, 103:1-21
- Palmer, A.N. (1995): **The origin of maze caves.** Natl. Speleol. Soc. Bull.37:56-76
- Palmer, A.N. (1998): **Modelling the evolution and morphology of limestone caves.** Bull. Hydrogeol. Centre Hydrogeol. Univ. Neuchatel, 16:157-165
- Renshaw, C.E. (1996): **Influence of subcritical fracture growth on the connectivity of fracture networks.** Water Resour. Res. 32(6): 1519-1530