

REVISTA TECNOLOGICA



Publicación Bimestral del
Vice-Ministerio para el Desarrollo
Técnico
Ministerio de la Industria Básica
República de Cuba.

REVISTA TECNOLOGICA



DIRECTOR:

Ing. Ignacio González Planas

CONSEJO TECNICO ASESOR:

Ing. Emir Madruga
Ing. Felipe Pérez
Ing. Francisco Haya
Ing. Alberto Álvarez
Ing. Santiago Figueroa

JEFE DE REDACCION:

Rafael Pérez Vega

DISEÑO:

Luciano Castellanos
Nelson Navarrete
Plácido Gómez
José Fernández

LABORATORIO FOTOGRAFICO:

Alberto Rigau
René Marchante
Jesús Olivera

Impresa en los talleres 01 "Osvaldo
Sánchez"
Del INSTITUTO CUBANO DEL
LIBRO.

VOL.XI No.3

Mayo - Junio / 1974

SUMARIO

Pág.

Direcciones fundamentales en la disminución de la vibroactividad de los motores diésel. Por Leonid Tuzov y Manuel Alonso	3
Sistema de telemedición de humedad. Por Patricia La Paz y otros	11
Influencia de los haluros alcalinos en las curvas térmicas obtenidas por A T D de una serpentina natural. Por Antonio Rabilero Bouza	15
Nuevo elemento para el estudio cuantitativo de la hidrología de los cursos obtenido mediante el análisis dimensional y su utilidad en el cálculo de paleoprocesos geohidrológicos. Por Julio J. Valdés Ramos	23
Ingenieros del Minbas destacados en 1973	37
Diseño de procesos de polimerización continuos y discontinuos. Por Norbert Platzer	39
Efectividad de la utilización de plásticos en la economía nacional de la U.R.S.S. Por I. V. Rajlin y L. Z. Koshkin ..	55
Deriva continental. Propuesta de hipótesis para la tectónica terrestre. Por A. A. Meyerhoff y otros	68
Avances de la Ciencia y la Técnica	88

- Redacción: Ministerio de la Industria Básica, Ave. Salvador Allende No. 666, La Habana, Cuba
- Suscripción anual en el extranjero: \$3.10 (US).
- Se desea el cambio con las publicaciones congéneres.
- On accepte des échanges avec les publications congéneres.
- Exchange with similar publications is desired.
- Si desidera il cambio colle pubblicazioni congeneri.
- Aceitam-se permutas con publicacao congene.
- Wir bitten um Austausch ähnlichen Fachzeitschriften.

nuevo elemento para el estudio cuantitativo de los carsos obtenidos mediante el análisis dimensional y su utilidad en el cálculo de paleoprocesos geohidrológicos¹

Por JULIO J. VALDES RAMOS²

Tradicionalmente, el estudio de los procesos de la evolución geológica y geomorfológica de las regiones, ha estado basado en toda una serie de razonamientos lógicos derivados de los fundamentos y métodos de éstas ciencias, es decir esencialmente de orden cualitativo; sin embargo, teniendo en cuenta que el objeto fundamental de la ciencia es no sólo describir la Naturaleza sino también medirla, resultaba evidente la necesidad de incorporar métodos y herramientas de investigación más poderosos a las ciencias geológicas, con

vistas a obtener una mayor y más exacta información de los fenómenos, que condujeran a un conocimiento más cabal de los mismos.

Como línea fundamental encaminada al logro de tal propósito debe considerarse la aproximación mediante **modelos físicos** de los fenómenos a estudiar, tanto en el aspecto teórico como en el experimental. Dichos modelos deben estar directamente concatenados, de tal modo que cada uno se asemeje más a la realidad natural que el anterior, evolucionando en forma escalonada partiendo de un modelo ideal.

Este trabajo constituye precisamente un intento de aportar un nuevo método para complementar las investigaciones en la rama de la hidrogeología cársica, y al mismo tiempo comenzar a conocer cuantitativamente las características de los eventos pretéritos en el marco de su evolución geológica.

* Trabajo presentado ante la Primera Reunión Nacional de Normas y Metodología para los Estudios Hidrogeológicos, celebrada en La Habana, del 3 al 6 de Mayo de 1973.

² Estudiante de Ingeniería Geofísica, Universidad de La Habana, Presidente del Grupo Espeleológico Martel de Cuba.

De gran valor resultaron siempre los atinados consejos, sugerencias y ayuda fraternal de los compañeros del Grupo Espeleológico Martel de Cuba, en particular del geomorfológico Profesor Manuel Acevedo, de Manuel Iturralde, Gabriel Barceló, y de Alexis Rives, a los cuales es necesario agradecer su valiosa cooperación y estímulo.

Finalmente, tanto por el interés y ayuda material, como por el apoyo y estímulo moral brindado para hacer posible la presentación de éste trabajo, existe una deuda de gratitud con los trabajadores y responsables de la dirección política y administrativa del Centro de Investigaciones Mineras "José Isaac del Corral", especialmente con los compañeros Jesús Medina, Alfredo Muñoz, Roberto Duany, Javier Rodríguez, María Spínola y Maritza Prats, a los cuales se expresan desde aquí las más sinceras gracias.

Los scallops y su origen.

Los scallops, "cazuelitas" o "golpes de gubia", son ampliamente conocidos por constituir una de las morfologías más comunes en conductos de activa o pretérita circulación hídrica, especialmente en las cavernas del tipo "transfluente"; sus condiciones genéticas han sido muy discutidas y no existe un acuerdo en las interpretaciones, pero la idea de asociar su origen a la erosión-corrosión presentes en los patrones de flujo creados por la hidrocirculación en los conductos subterráneos es la más aceptada. Esta opinión, expresada por Coleman y Rudnicki (en Núñez Jiménez, 1967) la compartimos y demostramos hidrodinámicamente en un trabajo anterior. Partiendo de aquel criterio, desarrollaremos un análisis teórico diferente del fenómeno lógico empleado en aquella oportunidad, en este trabajo sólo se empleará el Análisis Dimensional.

Determinación de la relación longitud del scallop/velocidad del fluido según el análisis dimensional

Supóngase un conducto hipogeo parcial o totalmente ocupado por el agua en circulación, el patrón de flujo estará, en general, controlado por la velocidad, viscosidad y densidad del fluido, así como por las dimensiones del conducto. El factor litológico no influye sustancialmente en la forma del scallop, pero sí en el tiempo necesario para su formación. Acorde con el criterio genético expresado anteriormente se establece implícitamente una relación del tipo:

Donde:

- (1) $F(l, v, u, d, e) = 0$
- l Longitud del scallop
 - v Velocidad del fluido
 - u Viscosidad del fluido
 - d Densidad del fluido
 - e Espesor hidráulico medio del conducto

En rigor debía considerarse la **razón de difusividad** de las especies químicas que toman parte en la reacción de disolución, pero teniendo en cuenta la lentitud de la corrosión de las calizas y el que tales parámetros dependen de la velocidad del agua de modo bastante complejo, su tratamiento no resulta compatible con la primera aproximación que supone este trabajo.

Las variables que toman parte en el proceso poseen las siguientes ecuaciones dimensionales, tomando como sistema fundamental de magnitudes el **M, L, T**.

Donde:

$l = L$	
$v = L T^{-1}$	L-Magnitud longitud
$u = M L^{-1} T^{-1}$	M-Magnitud masa
$d = M L^{-3}$	T-Magnitud tiempo
$e = L$	

Atendiendo a las condiciones hidráulicas en que se realiza el flujo del agua, puede considerarse, a los efectos del estudio de las galerías subterráneas, que son tuberías irregulares de roca en las que el flujo dependerá del caudal de agua, el espesor hidráulico y la pendiente motriz. La relación entre el espesor hidráulico de la sección mojada y el máximo permisible, determinado por las dimensiones del pasaje subterráneo, decidirá si se produce la circulación en **conducción forzada** o con **superficie libre** (Valdés Ramos, 1972). Salvo en la conducción forzada, en que el movimiento se efectúa bajo presión, existe una pendiente motriz causante de la flucción.

Se ha demostrado tanto empírica como teóricamente, que la velocidad de un líquido en una tubería o canal abierto depende de la pendiente motriz, el espesor hidráulico medio y un factor de rugosidad. La expresión matemática de tal relación es la conocida fórmula de Manning:

Donde:

- V -Velocidad
- e -Espesor hidráulico medio
- n -Coeficiente de rugosidad
- I -Pendiente motriz

$$V = \frac{e^{2/3}}{n} I^{1/2}$$

El coeficiente de rugosidad depende de la naturaleza del material que constituye la superficie que limita el líquido y la altura media de las irregularidades de esa superficie. El espesor hidráulico medio es la relación entre el área de la sección mojada y su perímetro, por lo que es un factor que refleja dimensiones y geometría del canal o tubería.

Este enfoque del estudio hidráulico de la circulación subterránea no posee un rango de validez ilimitado; depende ante todo del tipo de Carso y del intervalo para el cual pueden aplicarse las fórmulas hidromecánicas. Así, la ecuación mencionada más arriba sólo es aplicable a aquellas circulaciones que se efectúen bajo pequeñas pendientes.

Es de notar que tal circunstancia no invalida el análisis ya que las pendientes, tanto de los ríos, como de la gran mayoría de los pasajes subterráneos de tipo transfluente, se encuentran dentro del rango admisible.

Considerando nuevamente (1) se concluye que la variable que representa el espesor hidráulico se halla implícitamente involucrada con la velocidad, al estar ligadas por una relación funcional que viene dada por la fórmula de Manning; de aquí que sólo merezcan ser analizadas tres variables independientes. En consecuencia, es posible obtener una ligazón matemática entre las variables que toman parte en el fenómeno, utilizando el Teorema de π de Buckingham, del Análisis Dimensional:

"En la función expresiva de un fenómeno físico en que interviene en total r parámetros Q (en un sistema de medidas que contiene m magnitudes fundamentales), representativas de otras tantas magnitudes, sean éstas fundamentales o derivadas:

$$(2) \quad f(Q_1, Q_2, Q_3, \dots, Q_j, \dots, Q_r) = 0$$

sean $a_{j1}, a_{j2}, \dots, a_{jm}$ las dimensiones de Q_j , respecto a las magnitudes fundamentales; sea $n \leq m$ la característica de la matriz $[a_{jk}]$ llamada matriz dimensional.

Entonces la ecuación (2) es reducible a otra equivalente de la forma

$$G(\pi_1, \pi_2, \dots, \pi_j, \dots, \pi_{r-n}) = 0$$

Siendo los π_j , $r-n$ monomios adimensionales formados por productos de potencias de las variables Q

$$(3) \quad \pi_j = Q_1^{-p_1} Q_2^{-p_2} \dots Q_n^{-p_n}$$

La matriz dimensional se construye colocando en columnas las magnitudes fundamentales del sistema de unidades adoptado y, en fila, las variables, situando en los puntos correspondientes a la intersección de cada variable de la fila con la magnitud fundamental de la columna, el exponente a que se encuentra elevada la magnitud fundamental (dimensión de la variable) en la ecuación dimensional de la variable en cuestión elegida".

M L T

$$\begin{array}{l} Q_1 = v \\ Q_2 = u \\ Q_3 = d \\ Q_4 = l \end{array} \quad \begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & -3 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{bmatrix}$$

Dado que participan cuatro variables $r = 4$

De la composición de la matriz dimensional se desprende que $n = 3$ ya que un determinante de orden 3 extraído de ella, es distinto de cero.

$$\begin{bmatrix} 0 & 1 & -1 \\ 1 & -1 & -1 \\ 1 & -3 & 0 \end{bmatrix} \neq 0$$

La aplicación consecuente del Teorema π da como resultado, la posible construcción de un grupo adimensional, ya que $r - n = 1$.

Entonces el monomio adimensional es, según (3).

$$\pi_1 = Q_4 Q_1^{-p_1} Q_2^{-p_2} Q_3^{-p_3}$$

o bien

$$(4) \quad 1 = \pi_1 v^p u^p d^p$$

Esta última expresión, en función de las magnitudes fundamentales, resulta

$$L = L^{p_1} T^{p_1} M^{p_2} L^{p_2} M^{p_3} T^{p_2} L^{-3p_3}$$

Y, en virtud del principio de homogeneidad dimensional debe cumplirse

$$(5) \quad 1 = p_1 - p_2 - 3p_3$$

$$(6) \quad 0 = -p_1 - p_2$$

$$(7) \quad 0 = p_2 + p_3$$

Sistema de tres ecuaciones lineales que posee tres incógnitas y por tanto, solución única, la que puede obtenerse por el método de Gauss.

Sumando 6 y 7

$$p_1 = p_3$$

Sustituyendo éste resultado en 6

$$p_2 = -p_3$$

Incorporando ambos en 5

$$1 = p_3 + p_3 - 3p_3$$

de donde

$$p_3 = -1$$

que implica

$$p_2 = 1 \text{ y } p_1 = -1$$

Quedando entonces la expresión (4)

$$l = \pi_4 v^{-1} u d^{-1}$$

Llamando **K** al número (adimensional), π_4 se llega a

$$l = K v^{-1} u d^{-1}$$

o bien

$$(8) \quad \frac{d v l}{u} = K$$

Obsérvese como la expresión es similar al número de Reynolds de la hidrodinámica. En ella se relaciona la longitud media del **scallop** con la velocidad del fluido necesario para generarlo, su densidad y viscosidad. La constante **K** queda indeterminada, y sólo será posible precisar su valor mediante experimentos en un laboratorio de mecánica de fluidos.

Determinación de la constante según observaciones geomorfológicas, e hidrogeológicas.

El análisis dimensional no ha podido ir más lejos que brindar una relación de proporcionalidad entre las variables involucradas en el fenómeno estudiado; sin embargo, los análisis geomorfológicos e hidrogeológicos efectuados en distintos cauces subterráneos, utilizando el corolario de que la longitud del **scallop** es inversamente proporcional a la velocidad de la corriente, ha suministrado datos suficientes para evaluar la constante.

El más completo de estos análisis fue el efectuado en la Cueva de los Gigantes, cauce subterráneo fósil del Sistema Majaguas-Cantera, ubicada en la Ensenada de Bordayo, perteneciente al Valle de San Carlos en la Sierra de los Organos, Pinar del Río.

La primera porción de esta cavidad consiste en una gran sala en la que existe una antigua terraza aluvial acumulativa disecada por un pequeño cañón fluvial, cuyo lecho se encuentra cubierto parcialmente por cantos rodados, testigos del funcionamiento hídrico, gran parte de los cuales poseen un peso promedio de 4kg; del mismo modo afloran porciones de la roca estructural, calizas de la formación Viñales del Jurásico superior, que constituyen el piso de la galería y que han escapado al cubrimiento provocado por la deposición de grandes masas de sedimentos aluviales y aluvio-deluviales, entre los que sobresalen notablemente los mencionados cantos rodados. Dichas porciones de roca estructural se encuentran totalmente cubiertas por **scallops** con una longitud promedio de 1,5 cm.

Exámenes geomorfológicos pusieron de manifiesto que el transporte, los cantos rodados y la formación de los **scallops**, constituían procesos isocronológicos.

Los estudios sobre el poder de erosión y transporte de los cursos fluviales han dado una fórmula aproximada para la cantidad de materiales que es posible arrastrar... "el peso límite de éstos es, aproximadamente, igual a un sexto de la potencia de la velocidad, esto es, si la velocidad se duplica pueden transportarse materiales de un calibre 64 veces mayor" (Derruau, 1965).

Esta relación no cumple con la homogeneidad dimensional y tiene la forma

Donde:

$$(9) \quad M = V^6 \quad \begin{array}{l} V \text{ Velocidad de la corriente} \\ \text{en metros por segundo.} \end{array}$$

M Masa del canto en kg.

En el caso de la calzada de cantos rodados de la Cueva de los Gigantes, la velocidad necesaria para transportar los cantos hasta allí sería calculable por

$$V = M^{1/6}$$

Dado que el peso promedio de los cantos es 4 kg queda

$$V = (4)^{1/3 \cdot 1/2} = 1,26 \text{ m/seg}$$

Es decir, la velocidad necesaria para transportar los cantos rodados era de 1,26 m/seg; más el carácter simultáneo de este proceso con el tallado de los **scallops** en la roca estructural aflorante implica que, en la ecuación (8) se cumple

$$\frac{(126 \text{ cm/seg}) (1,5 \text{ cm}) (1 \text{ g/cm}^3)}{10^{-2} \text{ g/cm seg}} = K$$

tomando los valores de 1 g/cm³ para la densidad del agua y 10⁻² g/cm seg para la viscosidad.

El valor de la constante así calculado resulta ser **K** = 18 900.

Este cálculo, derivado de un estudio geomorfológico e hidrogeológico realizado en una caverna de la Sierra de los Organos, completa la ecuación buscada y tanto la naturaleza matemática de su deducción como los principios físicos empleados, le confieren la generalidad necesaria para su aplicación a otros sistemas de circulación subterráneos, incluso en otras latitudes geográficas.

Finalmente la ecuación

$$\frac{d v l}{u} = 18 900$$

puede considerarse como la solución del problema planteado, al significar la relación existente entre las dimensiones de los scallops y sus condiciones morfogénicas flujodinámicas.

Es posible utilizar la relación hallada como un elemento cuantitativo más en el estudio de la hidrología de los carsos y en las disciplinas espeleológicas, tan importantes en el conocimiento de la evolución geomorfológica y en la hidrogeología. En galerías de pretérita circulación hídrica, la fórmula permitiría conocer el régimen de flujo y drenaje de etapas geológicas pasadas, como en el caso de antiguos cauces fluviales subterráneos relacionados directamente con la evolución geológica del Cuaternario cubano. El autor se encuentra trabajando actualmente en dicha dirección.

Cálculo del margen del error.

La fórmula final obtenida estaría realmente incompleta si no conoce el margen de error que posee. El carácter dimensional de su deducción y la ausencia de aproximaciones matemáticas hace que cualquier determinación realizada con ella, solamente esté afectada por la precisión con que haya sido obtenida la constante, es decir, por su grado de error. Procediendo a realizar la propagación de errores en la fórmula (8) según la Teoría de Errores; se tiene, tomando logaritmos neperianos en ambos miembros.

$$\ln K = \ln d + \ln v + \ln l - \ln u$$

Sin embargo, siguiendo el criterio de la suma de errores

$$\ln K = \ln d + \ln v + \ln l + \ln u$$

Diferenciando también en ambos miembros

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{\Delta v}{v} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta u}{u}$$

que constituyen ya los errores relativos de las variables implicadas en el fenómeno.

Nuevos elementos para el estudio...

El error relativo de la velocidad, hay que obtenerlo de (9):

Tomando logaritmos en (9)

$$\ln v = \frac{1}{6} \ln M$$

y ahora diferenciando

$$\frac{\Delta v}{v} = \frac{1}{6} \frac{\Delta M}{M}$$

Entonces, sustituyendo en la ecuación de los errores relativos, se llega a

$$\frac{\Delta K}{K} = \frac{\Delta d}{d} + \frac{1}{6} \frac{\Delta M}{M} + \frac{\Delta l}{l} + \frac{\Delta u}{u}$$

En cada uno de los sumandos, el numerador representa el error absoluto de la magnitud y el denominador el valor de la misma en la medición. Dado que, tanto la densidad del agua, como su viscosidad, se han determinado experimentalmente con altísimo grado de precisión, los errores relativos de d y u son prácticamente despreciables frente a los errores relativos de la masa de los cantos y la longitud de los scallops.

El error absoluto en la determinación de la masa de los cantos rodados es de 0,5 kg, y el de la longitud de los scallops es de 0,1 cm. De ésta forma el error relativo de K resulta:

$$\frac{\Delta K}{18\,900} = \frac{1}{6} \frac{0,5}{4} + \frac{0,1}{1,5} = 0,026 + 0,0066 = 0,032$$

es decir

$$\Delta K = 605$$

Entonces el verdadero valor de la constante es:

$$K = 18\,900 \pm 605$$

y el error porcentual

$$\% \text{ error} = 0,032 \times 100 = 3,2\%$$

$$\% \text{ de error} = 3,2\%$$

Aplicación de la fórmula a un cauce fluvial fósil

La aplicación de la ecuación a cauces fósiles requiere especiales análisis geomorfológicos, espeleológicos e hidrodinámicos, puesto que se trata de investigar un paleoproceso en el que participan gran cantidad de factores cuyas intensidades difieren de las modernas, y si éstas últimas resultan difíciles de evaluar, se comprenderá lo que supone una tentativa de aproximación en tal sentido para un fenómeno ocurrido hace miles de años.

Los cauces fósiles se presentan generalmente con una superposición de morfologías clástico-litogénicas que alteran, enmascaran u ocultan totalmente la primitiva morfología hidroglotogénica producida por el antiguo funcionamiento hídrico (Acevedo, 1971, Valdés Ramos, 1972). Es por ello que sólo en un lugar en el que las alteraciones fuesen mínimas sería posible una tentativa de cálculo con probabilidad de reflejar las condiciones reales.

Investigaciones llevadas a cabo por el Grupo Espeleológico Martel de Cuba en la zona de Sumidero han permitido descubrir algunos sectores de

cauces fósiles con las características apropiadas que actualmente se encuentran en proceso de estudio. Uno de ellos, sin embargo, ha podido ser suficientemente examinado. El sitio en cuestión es una porción de la galería principal del nivel inferior de la Cueva de Perfecto, situada en el Valle de Pica Pica, Sierra de los Organos, Pinar del Río.

El corte transversal de la galería presenta una sección que posee una morfología que permite reconocer un "tubo de conducción forzada elíptico" (Valdés Ramos, 1972), disecado en parte por un pequeño cañón cuyo piso constituye la actual vía de tránsito. En dicho tubo se localiza un "patrón en sistemas desordenados de scallops" (Valdés Ramos, 1971) uniformemente distribuido por la superficie remanente del tubo elíptico actualmente mutilado. El estudio estadístico de los scallops arrojó una longitud promedio de 3 cm y profundidad de 1 cm.

Utilizando la ecuación (8) es posible determinar la velocidad necesaria para generar los scallops; tomando previamente $d = 1 \text{ g/cm}^3$ y $u = 0,01 \text{ g/cm seg}$, y sustituyendo los valores conocidos.

$$\frac{3 v}{0,01} = 18 900$$

de donde

$$v = 0,63 \text{ m/seg}$$

Esta velocidad hallada no es sino el valor medio de la velocidad en las proximidades de la pared, que atendiendo a la profundidad media de los scallops (1 cm), puede situarse a 1 cm de la hipotética pared del tubo.

El movimiento del caudal de agua se efectuaba en conducción forzada (como lo atestiguan tanto la morfología elíptica del conducto, como la distribución de los scallops por la bóveda y paredes) y en régimen turbulento rugoso; en que la distribución de velocidades depende, entre otras cosas del espesor hidráulico del corredor hipogeo. Cabe aclarar que esa ley es válida para tuberías con rugosidad artificial pero las características de simetría del sistema permiten hacer esa aproximación.

La velocidad media para este movimiento viene dada por la fórmula:

$$\frac{c}{v} \sqrt{f \left(2,15 \frac{\log y}{4e} + 2,08 \right) + 1} \quad (10)$$

donde c es la velocidad en un punto a una distancia y de la pared, e el espesor hidráulico del tubo y f el coeficiente de fricción de Darcy Weisbach.

1) Determinación de e para el tubo elíptico

El problema consiste en determinar el área y el perímetro de una elipse cuyos semiejes son de 2 y 1 m respectivamente.

El área total de una elipse viene dada por:

Donde:

$$A = \pi ab \quad \begin{array}{l} a - \text{semieje mayor} \\ b - \text{semieje menor} \end{array}$$

En este caso el área resulta ser $6,3 \text{ m}^2$

Para hallar el perímetro se procederá a rectificar el arco de elipse correspondiente a un cuadrante completo adoptando la representación paramétrica, es decir

Donde:

$$\begin{array}{ll} x = b \cos \theta = \cos \theta & x - \text{abcisa cartesiana} \\ y = a \sin \theta = 2 \sin \theta & y - \text{ordenada cartesiana} \\ \theta - \text{ángulo con el eje } x & \rightarrow \\ & \text{del vector (OP)} \end{array}$$

y el diferencial de arco queda

$$ds = b \sqrt{1 - \frac{b^2 - 1}{b^2} \sin^2 \theta} d\theta$$

y el arco rectificado

$$\frac{L}{2} = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - \frac{3}{4} \sin^2 \theta} d\theta$$

Se trata de una integral elíptica completa de segundo tipo, es decir, una de la forma

$$E = \int_0^{\pi/2} \sqrt{1 - k^2 \sin^2 \theta} d\theta \quad 0 < k < 1$$

Esta clase de integral no posee solución a base de funciones elementales, sino solución numérica, estando tabulada para los distintos valores de k .

En éste caso

$$k = \sqrt{0,75} = 0,86$$

Procediendo según se indica en Allen (1954)

$$\sin^{-1} k = 60^\circ$$

de donde

$$E = 1,211$$

entonces

$$L = 2 E = 2,422$$

De aquí que el perímetro total de la elipse sea

$$P = 4 L = 9,7 \text{ m}$$

De todo lo anterior queda

$$\begin{aligned} \text{Area} &= 6,3 \text{ m}^2 \\ P &= 9,7 \text{ m} \end{aligned}$$

y el espesor hidráulico será

$$e = \frac{A}{P} = 0,65 \text{ m}$$

2) Determinación del coeficiente de fricción de Darcy-Weisbach

El ajuste basado en los datos experimentales de las ecuaciones de la conducción turbulenta a tubería rugosas permiten calcular el coeficiente f por

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log \frac{4 e}{S} + 1,14$$

siendo S un parámetro característico del tamaño medio de las irregularidades de la superficie de la tubería (con dimensiones de longitud), pudiéndose tener en cuenta el efecto de dichas irregularidades en el movimiento.

Según fue señalado con anterioridad, la profundidad media de los scallops era de 1 cm; tomando ese valor aproximadamente como S se tiene

$$\frac{1}{\sqrt{f}} = 2 \log 2,6 \times 10^{-2} + 1,14 = 5,96$$

de donde

$$f = 0,17$$

Ya conocido e y f es posible obtener la velocidad media utilizando (10)

$$\begin{aligned} \frac{0,63}{V} &= 0,17 \left[2,15 \log (2,6 \times 10^{-2})^{-1} + \right. \\ &\quad \left. + 2,08 \right] + 1 = 0,47 \end{aligned}$$

de donde

$$V = \frac{0,63}{0,47} = 1,34 \text{ m/seg}$$

$$V = 1,34 \text{ m/seg}$$

Ya se ha encontrado el valor de la velocidad media del agua cuando circulaba por la galería,

y con ella es posible calcular el gasto a través de la sección ya que:

Donde:

$$\begin{aligned} Q &= \text{Gasto} \\ V &= \text{Velocidad media} \\ C &= \text{Area de la sección} \\ &\quad \text{ortogonal a la di-} \\ &\quad \text{rección de flujo.} \end{aligned}$$

Operando formalmente

$$Q = 1,34 \times 6,3 = 8,5 \text{ m}^3/\text{seg}$$

y el gasto anual resulta

$$Q_a = 8,5 \times 3600 \times 24 \times 365 = 27 \times 10^7 \text{ m}^3/\text{año}$$

Este dato representa el gasto anual de la antigua cuenca total del Cuyaguaje ya que la Cueva de Perfecto no es sino un cauce fósil de ese curso fluvial "originado durante el pluvial correspondiente con la glaciación de Illinois equivalente a la Riss europea y tendría una edad de 250 000 a 350 000 años" (Cruz y Barceló, 1970) lo cual viene confirmado en Acevedo (1971).

La utilidad de la fórmula encontrada se hace evidente por sí misma, ya que mediante ella ha sido posible conocer uno de los parámetros más importantes que caracterizan los mecanismos impulsadores de la evolución geomorfológica, pero en este caso, para un proceso ocurrido hace varios miles de años.

Es posible, sin embargo, llegar aún más lejos y efectuar un análisis adicional, aceptando como cierta la edad Cuaternaria atribuida a la Cueva de Perfecto.

La evolución geomorfológica en la región de Sumidero en el Cuaternario ha estado directamente controlada por los ascensos y descensos glacioeustáticos del nivel medio del mar producidos por las glaciaciones pleistocénicas y los períodos pluviales provocados por ellas. Estas acciones ocasionaron progresivos hundimientos en la red de drenaje alóctono de la región, pudiendo haber ocurrido también un levantamiento general del terreno.

Teniendo en cuenta la existencia de una Subzona Montañosa no Cársica (base de la red hidrográfica), y una Subzona Montañosa Cársica (Acevedo, 1970), lindadas por tabiques tectónicos sobre los que generalmente se han asentado los poljes, puede deducirse (sabiendo que la ampliación de las cuencas fluviales se efectúa por retroexcavación), que las paleocuenas de drenaje no hubieran podido ser mayores que las actuales, y que, en general, debieron ser menores. En efecto, actualmente las Alturas de Pizarra (Cuchillas de Pinares) actúan como divisorias de las aguas, uno de cuyos cursos derivados, constituye la red fluvial que atraviesa la zona de Kegelkarst de Sumidero; si progresivamente se va reincorporando hipotéticamente todo el material que fue

eliminado por erosión regresiva puede deducirse fácilmente que la distancia entre el nacimiento de los ríos y los ponores que utilizaban en pretéritas etapas (que son los actuales cauces fósiles) debió ser menor que la actual o, cuando mucho, aproximadamente igual; con la pendiente no sucedía así, pues debió ser mayor que la presente.

Con relación a los cambios climáticos (de lo cual son exponente los periodos pluviales), se insiste particularmente en destacar, más que otros factores (vientos, temperaturas, etc.), **el régimen de precipitaciones anuales** como fundamental agente climamorfogenético, de aquí que toda tentativa de conocer la cantidad de lluvia caída, al menos aproximadamente, en cualquiera de los pluviales cuaternarios, revista gran importancia por su influencia en el modelado y evolución del relieve de las comarcas cubanas, ya que "...casi toda la geomorfología actual, tiene su origen durante el periodo Pleistoceno y, en ésta época, se produjeron también notables depósitos sedimentarios que han dejado una huella indeleble en todos los paisajes del globo" (Acevedo, 1969).

Referencias a diferencias climáticas con el pasado expresan los doctores Núñez Jiménez, y Panos y Stelcl (1968) al señalar "...en el pasado, el clima de la región cubana era diferente al actual". Y sabido es que uno de los parámetros más importantes que definen al clima es la cantidad de precipitaciones.

Con respecto al Arroyo del Alcalde-los Güines, afluente del Cuyaguatzeje, que nace en las alturas de Pizarra y atraviesa subterráneamente la Sierra de Sumidero, el profesor M. Acevedo (1971) expresa:

"...Incluso en condiciones de clima más húmedo (que son muy posibles) y con una cuenca de captación más extensa (que no es tan posible), es altamente improbable que el Arroyo del Alcalde o su antecesor cuaternario, pudieran haber dado origen a esos gigantescos cauces subterráneos", y refiriéndose al proceso espeleogenético producido por el tipo de circulación "**transfluente**" (Gradzinski y Rodomski, 1965), "este proceso espeleogenético (u otro semejante) requiere, indudablemente, un volumen de escurrimiento muy superior al actual" (Acevedo, op. cit.).

Considerando lo anteriormente señalado con respecto a la cuenca y al gasto anual calculado, puede entonces, intentar evaluarse el régimen antiguo de precipitaciones.

Sabido es que el producto de la pluviosidad anual (M) y el área de la cuenca de captación (R) arroja el gasto anual (G) drenado por la cuenca:

$$M R = G$$

Recordando lo expresado sobre la relación entre la cuenca antigua y la actual, puede verse que la sustitución en la fórmula anterior del área de la cuenca actual, en lugar de la antigua, da el valor mínimo de precipitación posible. La cuenca actual del Cuyaguatzeje, aguas arribas de la Cueva de Perfecto, es aproximadamente de 192 km² (M. Acevedo, comunicación personal).

Incorporando los valores conocidos en la fórmula

$$M = \frac{27 \times 10^7}{19,2 \times 10^7} = 1,41 \text{ m}$$

Obteniéndose finalmente $M = 1410 \text{ mm}$.

Esta cifra representa sólo la porción de las precipitaciones que constituyen el escurrimiento. Teniendo en cuenta que el máximo actual de la zona es de 700 mm (Acevedo y Gutiérrez, 1970), puede observarse que el mínimo antiguo era el doble, y ello proporciona una prueba cuantitativa de que **el clima de la región en la época de funcionamiento hidrológico de la Cueva de Perfecto era más húmedo que el actual.**

Aceptando la cronología propuesta por los investigadores ya citados, resulta que los datos calculados en el desarrollo matemático corresponden al Pluvial Cubano Illinois, y constituyen las primeras determinaciones paleohidrogeológicas y paleoclimáticas efectuadas en Cuba. Sin embargo, hay que decir que la deducción físico-matemática de los resultados los independiza de cualquier cronología atribuida ya que ésta es obtenida a partir de otros métodos, específicamente, cualitativos.

Un análisis más completo debía hacerse considerando las pérdidas por evaporación e infiltración, para evaluar el total de precipitaciones pretéritas.

En el caso de las infiltraciones sucede que, como no es muy posible la existencia de variaciones en la composición litológica de las estructuras fundamentales de la región, la infiltración antigua no diferiría sustancialmente de la actual, y ésta es muy pequeña debido a que las pizarras constituyentes de la Formación San Cayetano son consideradas prácticamente impermeables.

No puede hablarse de igual modo con respecto a la evaporación. Ella depende fundamentalmente de la temperatura, y el estado en que se encuentran los estudios paleoclimáticos en nuestro país no permite aún conocer esos datos. Sellers (1970) plantea que, durante las etapas de glaciación, la temperatura debió descender unos 6° en las zonas no afectadas directamente por los hielos, pero el carácter general de esa cifra hace que deba optarse por esperar que estudios regionales ofrezcan un valor aproximado, al menos para las áreas del Caribe.

Sin embargo, considerando lo anterior y atendiendo a que el establecimiento de un casquete de hielos perennes en las latitudes medias de Norteamérica templaría notablemente el clima de la región cubana, se infiere que habría una reducción general de la evaporación, es decir, que la **evaporación pretérita era inferior a la actual.**

Existe también en lo tocante a la evaluación del escurrimiento un factor geomorfológico e hidrogeológico local a considerar. Estudios efectuados sobre la morfogénesis de los conductos hídricos subterráneos del área (Valdés Ramos, 1972), apli-

cados a los corredores de la Cueva de Perfecto, señalan la posibilidad de que dicho sistema de conductos fuesen utilizados como **trop-plein** por el Río Cuyaguaje, y no como cauce principal, aunque sí de modo permanente, o que sí lo fuera, pero con difluencias en el avenamiento tanto subáereo como subterráneo. De acuerdo con ello, el escurrimiento calculado sería un dato parcial, y los estudios distan mucho de estar finalizados.

Asumiendo que todo el escurrimiento pretérito fuese efectivamente drenado por la Cuenca de Perfecto, y suponiendo una pérdida de unos 700 mm (con base en el descenso de temperaturas planteado por Sellers y la pobre infiltración), las precipitaciones totales nunca serían inferiores a 2 100 mm anuales ya que se han supuesto valores mínimos para el escurrimiento, y pérdidas. Se ha visto que la cifra antigua real debe ser mucho mayor, pero, por el momento, no es posible llegar más lejos, y este valor ofrecido para las precipitaciones pluviales debe interpretarse como **la cota inferior** de dato.

Sin embargo, la aplicación de este método a los estudios hidrogeológicos en distintas cavernas que posean las características adecuadas, permitiría obtener mayor número de valores, cuyo análisis estadístico aportaría los datos necesarios para las investigaciones paleohidrogeológicas y paleoclimáticas a mayor escala con vistas a estudios comparativos y correlativos sumamente útiles en la investigación de la evolución geomorfológica e hidrogeológico-dinámica de los carsoes tropicales en función del clima y los procesos morfogenéticos actuales y pretéritos, actuantes sobre el problemático *Kegelkarst* de Cuba.

Conclusiones

1) Utilizando la línea de investigación teórica basada en **modelos físicos**, se obtuvo una ecuación que relaciona la longitud de los scallops con la velocidad del agua del flujo, asociado a su morfogénesis. La fórmula es válida para cualquier latitud en virtud de la naturaleza físico-matemática de su deducción.

2) Es necesario abordar el estudio de los mecanismos de hidrocirculación kárstica basándose en modelos hidráulicos, resueltos de acuerdo a la Teoría Hidrodinámica, empleando herramientas matemáticas adecuadas, las que permitirían lograr un conocimiento cuantitativo de éstos fenómenos y procesos naturales.

3) La conjugación de los estudios teóricos con la realidad natural es puesta de manifiesto al valorarse la constante característica de la ecuación, (K), a partir de observaciones geomorfológicas e hidrogeológicas directas en la Naturaleza, en éste caso, en la Cueva de los Gigantes. La constante fue determinada con un 3,2% de error aunque su valor debe en rigor obtenerse a través de experimentos en un laboratorio de mecánica de fluidos.

4) La aplicabilidad de la ecuación a cauces fluviales fósiles (uno de sus principales objetivos), requiere especiales análisis geomorfológicos, es-

peleológicos e hidrodinámicos debido a que dichos cauces antiguos se presentan generalmente con una superposición de morfologías clástico-litogénicas que alteran, enmascaran u ocultan totalmente las primitivas morfologías hidroglyptogénicas producidas por el funcionamiento hídrico.

5) Como resultado del desarrollo de un primer método de trabajo (suceptible de perfeccionamiento) en la Cueva de Perfecto, antiguo cauce fósil del Río Cuyaguaje, se obtuvo el **paleogasto de drenaje** y, a través de consideraciones sobre la evolución geomorfológica y climática de la región, un estimado de las **paleoprecipitaciones** de la región.

6) Teniendo en cuenta que estudios espeleológicos (Cruz y Barceló, 1970) y geomorfológicos (Acevedo, 1971) consideran la espeleogénesis de la Cueva de Perfecto como producto del drenaje transfluente de las aguas del Río Cuyaguaje durante el Pluvial Cubano Illinois (provocado por la glaciación continental cuaternaria del mismo nombre), resulta que los parámetros calculados no sólo constituyen los primeros datos cuantitativos hidrogeológicos y climáticos para etapas geológicas anteriores en Cuba, sino que pertenecen al Cuaternario, el menos conocido de nuestros períodos geológicos.

7) Asumiendo la edad Illinois para la Cueva de Perfecto, la comparación de los valores de escurrimiento obtenidas, con los actuales, brinda una prueba de que el clima imperante hace aproximadamente 300 000 años en nuestra Región Occidental era **más húmedo que el actual**, ya que el mínimo escurrimiento antiguo (1 400 mm) resulta ser el doble del máximo actual en la zona (700 mm).

8) Un mayor número de investigaciones utilizando este método, conjuntamente con análisis estadísticos en distintas cavernas que posean las características adecuadas, permitiría lograr valores más precisos y representativos, no sólo de una época geológica sino de varias, así como la posibilidad de extender la esfera de estudios y realizar investigaciones comparativas entre distintas zonas, con vistas a una correlación entre las distintas regiones que arroje alguna luz sobre el desarrollo de nuestro paisaje y su evolución paleohidrogeológica y paleoclimática.



BIBLIOGRAFIA

1. ACEVEDO, MANUEL. El cuaternario y su importancia geográfica. Inst. Ped. Enrique José Varona, Universidad de la Habana, 1969. Geomorfología de Sumidero y sus inmediaciones, Sierra de los Organos, Pinar del Río, Cuba, *Tecnológica IX* 3-4, 1971.
2. ACEVEDO, MANUEL y GUTIERREZ, ROBERTO. La región de Sumidero y sus inmediaciones, Sierra de los Organos, Pinar del Río. Serie Espeleológica y Carsológica. Simposio XXX Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba 1970 (en prensa).
3. ALLEN, EDWARD. Tablas matemáticas con seis cifras decimales. Edit. Minerva, Obispo 530, 1956.
4. BECERRIL, ENRIQUE. Hidromecánica. Edit. Dessat, S.A., Madrid, 1960.
5. CHOW, VEN-TE. Open Channel hydraulics. Mc Grau Hill, New York, 1959.
6. CRÚZ, SAÚL y BARCELÓ, GABRIEL. Estudio espeleológico preliminar de la Cueva de Perfecto. Serie Espeleológica y Carsológica, Simposio XXX Aniversario de la Sociedad Espeleológica de Cuba. 1970 (en prensa).
7. DERRUAU, M. Geomorfología. Ediciones Ariel S.A., Barcelona, 1965.
8. GILES, RANARD. Theory and problems of hydraulics and fluid mechanics. Drexel Institute of Technology, Philadelphia, 1959.
9. MARTINOT, LAGARDE, A. Sur L'application des variables sans dimensions aux phenomenes discontinus. *Comptes Rendus*, 223, 1946.
10. MILNE THOMSON, L. M. Tratado de hidrodinámica teórica. Ediciones Aguilar, Madrid, 1951.
11. NEKRASOV, B. Hidraulica. Edit. Mir, Moscú, 1968.
12. NÚÑEZ JIMENEZ, ANTONIO. Clasificación genética de las cuevas de Cuba. Edición Provincial, Ac. de Cs. de Cuba, de 1967.
13. NÚÑEZ JIMENEZ, ANTONIO, y otros. Carsos de Cuba. Serie Espeleológica y Carsológica No. 2, Ac. de Cs. de Cuba. La Habana, 1968.
14. SELLERS, WILLIAM. Physical Climatology. Edit. Ciencia y Técnica. Inst del Libro, La Habana 1970.
15. SHAMES, IRVING. La mecánica de los fluidos. Ediciones del Castillo, Madrid, 1967.
16. VALDÉS RAMOS, JULIO J. Opinión y razonamiento hidrodinámico sobre los flutes o scallops de algunas cavernas del occidente de Cuba. Manuscrito inédito. Archivo Grupo Espeleológico Martel de Cuba. 1971.
17. El estudio hidrodinámico de la morfogénesis de los conductos hídricos subterráneos en los macizos del kegelkarst occidental de Cuba y sus problemas. Manuscrito Inédito. Archivo Grupo Espeleológico Martel de Cuba. 1972.
18. Sobre la posibilidad del estudio cuantitativo de la paleohidrología y paleoclimatología del cuaternario cubano. Manuscrito Inédito. Archivo Grupo Espeleológico Martel de Cuba, 1972.

JULIO J. VALDES RAMOS, joven estudiante de tercer curso de Ingeniería Geofísica en la Universidad de La Habana, ha desarrollado gran actividad práctica en las experiencias propias de su especialidad, lo que le ha permitido publicar artículos y colaborar en un texto aún en prensa. Ha participado en congresos en el extranjero.

Es presidente del Grupo Espeleológico Martel de Cuba.

