

Dimensión fractal de redes de drenaje controladas estructuralmente en cuencas hidrográficas de Pinar del Río, Cuba

Robert Ramírez-Hernández
Alina Rodríguez-Infante
Alexis Ordaz-Hernández

Resumen

Se investiga, bajo el enfoque de los sistemas fractales y con base en parámetros morfométricos, la red de drenaje conformada por las cuencas hidrográficas de los ríos Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz y San Cristóbal (Pinar del Río, Cuba). A partir de la configuración de las curvas de nivel y la longitud de los ríos se extrajeron las áreas de drenaje de cada una de las corrientes y se calcularon las longitudes real y euclidiana de estas como paso intermedio para estimar los parámetros del cálculo de la dimensión fractal. Se encontró que para cuencas con características geológicas como las aquí estudiadas, la dimensión fractal promedio de las corrientes según Takayasu parece ser la más apropiada. El desplazamiento de las corrientes de orden 2 con respecto a las de orden 1 se atribuye a zonas de drenaje asociadas a corrientes de corto recorrido, propias de zonas tectónicamente activas. El factor litológico parece influir en las características del drenaje de la cuenca Cangre, aunque la mayor influencia sobre el sistema la ejercen las abundantes fallas y fracturas existentes en el área, lo que se sustenta en los altos valores fractales de las cuencas Cangre, San Diego y Los Palacios. El coeficiente de Hurst de estas cuencas es próximo a uno, lo que revela el comportamiento autosimilar de la red. Para el resto de las cuencas no es posible asumir un tipo de comportamiento debido a que el valor de Hurst es muy superior a uno.

Palabras clave: dimensión fractal; tectónica; red de drenaje; parámetros morfométricos; cuencas hidrográficas; Pinar del Río.

Fractal dimension of structurally controlled river networks of Pinar del Río, Cuba

Abstract

River networks were studied applying the fractal systems approach and based on morphometric parameters. Procedures are applied to Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz and San Cristóbal river basins (Pinar del Río, Cuba). Drainage areas were extracted taking into account isolevel lines configurations and river lengths. For every stream the Euclidian length was also estimated, to calculate the river network fractal dimension. It seems that Takayasu approach is the most appropriate to describe basins with the geological characteristics like those included in this study. The shift of order 2 streams with respect to order 1 streams is explained by the presence of drainage zones where streams have short lengths, typically in tectonically active areas. The lithologic factor seems to have influenced the drainage characteristics of Cangre basin, although, in general, the numerous faults and fractures exert a major control on every basin, which is supported by the high fractal values of Cangre, San Diego and Los Palacios basins. The Hurst coefficients of these basins are close to one, revealing a self-similar behavior of the river network. For the remaining basins it is no possible to assume a typical behavior because of the Hurst values are greater than one.

Keywords: fractal dimension; tectonics; drainage networks; morphometric parameters; hydrographic basins; Pinar del Río.

1. INTRODUCCIÓN

En el origen del relieve las fuerzas internas de la tierra juegan el papel primordial, sin embargo, su evolución queda sujeta a la combinación de estas fuerzas con los factores climáticos. Diversos trabajos abordan el estudio del relieve desde el punto de vista tectónico y estructural; otros consideran el papel de estructuras primarias como la estratificación y su influencia sobre el desarrollo del drenaje.

Clark *et al.* (2004) asocian anomalías del drenaje a factores tectónicos y litológicos; Huggett (2007) realiza un estudio de las formas de relieve, así como la orientación de los ejes de estas formas en ambientes transpresionales y transtensionales. Las características de la red de drenaje han sido descritas en varios trabajos, prestando especial atención a los parámetros morfométricos introducidos por Horton (1932, 1945), Strahler (1946) y Hack (1957).

La geometría fractal permite describir patrones irregulares y fragmentados, los que se repiten a diferentes escalas, generalmente, de forma isotrópica. Cuando estos patrones sufren variaciones anisotrópicas al cambio de escala estamos en presencia de un sistema fractal autoafín (Nikora & Sapozhnikov 1993; Nikora *et al.* 1996). La invarianza de escala no es constante en procesos autoafines y los modelos basados en autoafinidad parecen ser más adecuados para describir los patrones de drenaje (Veltri *et al.* 1996). Partiendo de las condiciones de autosimilitud, entre la longitud de los ríos y el área de las cuencas de drenaje Mandelbrot (1977) llegó a la conclusión que la dimensión fractal para corrientes individuales (**d**), era igual a 1,2, mientras que la dimensión fractal de todo el sistema (**D**), era igual o próximo a 2. Los estudios de autosimilitud de la red de drenaje se iniciaron con las leyes de Horton (1932, 1945) cuya definición matemática es:

$$R_B = \frac{N_{u-1}}{N_u} \quad R_L = \frac{\bar{L}_u}{\bar{L}_{u-1}} \quad R_A = \frac{\bar{A}_u}{\bar{A}_{u-1}} \quad R_S = \frac{\bar{S}_u}{\bar{S}_{u-1}} \quad (1)$$

Donde: R_B , R_L , R_A y R_S son relación de bifurcación, relación de longitud, relación de área y relación de gradiente, respectivamente. N_u , \bar{L}_u , \bar{A}_u y \bar{S}_u cuantifican el número, longitud promedio, área promedio y gradiente promedio de las corrientes de orden u .

Este trabajo aborda el cálculo de la dimensión fractal de varias cuencas hidrográficas, aplicando modelos fractales de autosimilitud y autoafinidad, con el propósito determinar a qué modelos se ajustan estas cuencas, y analiza la influencia de las condiciones geológicas de cada una de ellas sobre el cumplimiento de los modelos fractales mencionados.

1.1. Características del área de estudio

El área de estudio se ubica en la zona occidental de Cuba y se extiende desde la cuenca del río Cangre, en el municipio Pinar del Río, hasta la cuenca del río San Cristóbal en el municipio del mismo nombre, provincia Artemisa. Los límites del área están entre los 22° 25' 0.0" y 22° 50' 0.0" de latitud norte y los 83° 0' 0.0" y 83° 50' 0.0" de longitud oeste. Las cuencas estudiadas ocupan una superficie de 343 km², Figura 1.

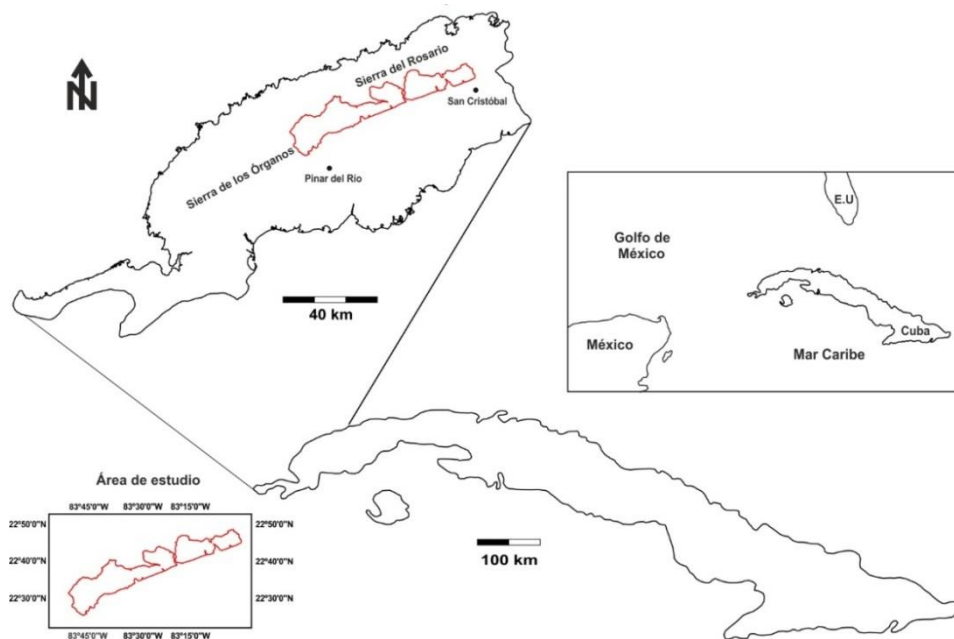


Figura 1. Ubicación geográfica del área de estudio.

Geológicamente las cuencas se ubican en las unidades tectónicas de Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza, Alturas de Pizarras del Sur y Cinturón Cangre, definidas por Cobiella-Reguera (2008). Estas unidades constituyen una de las áreas más extensas de afloramientos del margen continental pasivo norteamericano.

Existen notables diferencias entre los cortes terrígenos de las unidades Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza y Alturas de Pizarras del Sur. Aunque en ambas unidades están presentes las rocas de la Fm. San Cayetano, en las Alturas de Pizarras del Sur predominan los sedimentos de aguas someras. Depósitos de turbiditas predominan en la unidad Sierra del Rosario/Alturas de Pizarras del Norte/Esperanza. Hay que destacar que junto a las rocas carbonatadas aparecen intercalaciones de material silíceo (Cobiella-Reguera 2008).

Las alturas de Pizarras del Sur están formadas casi exclusivamente por las rocas de la Fm. San Cayetano. En esta unidad se encuentra, ocupando una

pequeña área, el Cinturón Cangre, considerado el equivalente metamorizado de la Fm. San Cayetano. Piotrowska (1978) plantea que su metamorfismo de alta presión no está vinculado a la orogénesis cubana y es posiblemente un evento Cretácico, aunque su actual posición estructural es resultado de los sobrecorrimientos del Paleoceno tardío-Eoceno temprano.

En los últimos años se han realizado trabajos de detalle para precisar las características estructurales del corte de la parte oriental de la Sierra del Rosario y esclarecer aspectos relacionados con la orogenia cubana, así como con movimientos neotectónicos, en especial, relacionados con falla Pinar (Cofiño & Cáceres 2003; Ordaz 2013).

2. MATERIALES Y MÉTODOS

Se estudiaron las cuencas de siete ríos: Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz y San Cristóbal, Figura 2. El área de trabajo es cubierta por 17 hojas topográficas escala 1:25 000.

En una primera etapa se extrajo la red de drenaje que aparece representada en las hojas cartográficas. Además, la red de ríos se completó con todos los posibles cauces que pueden ser cartografiados a partir de la configuración de las curvas de nivel. Las corrientes fueron clasificadas según el método de Strahler (1952), Figura 3.

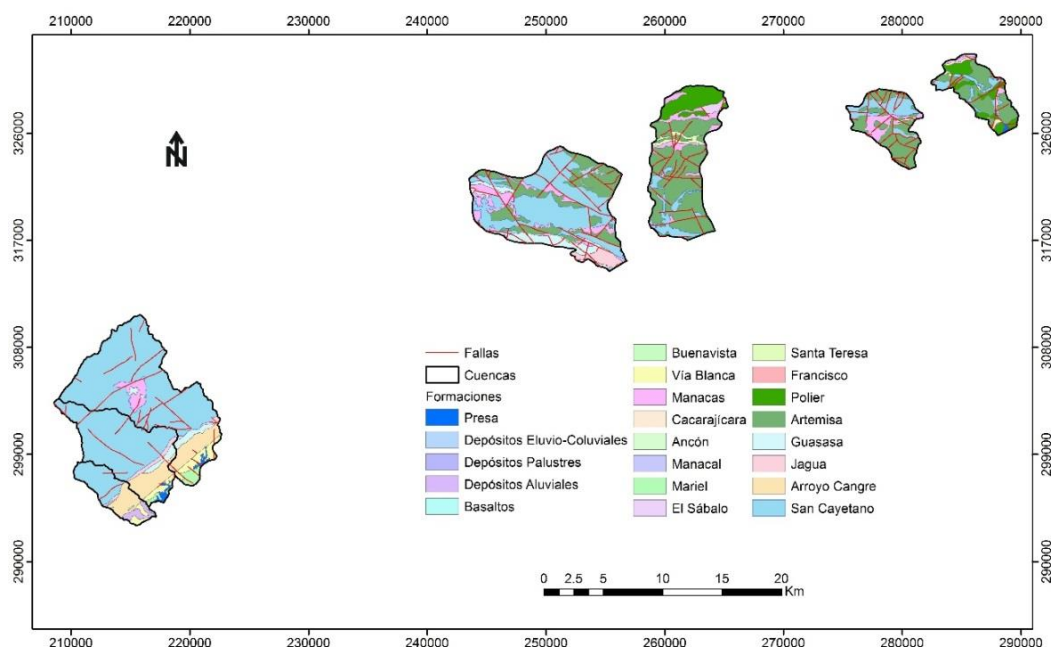


Figura 2. Ubicación de las cuencas hidrográficas y esquema geológico del área de trabajo. De izquierda a derecha y separadas por líneas gruesas: Arroyo Cangre, Los Pozos, Paso Viejo, San Diego, Los Palacios, Santa Cruz y San Cristóbal.

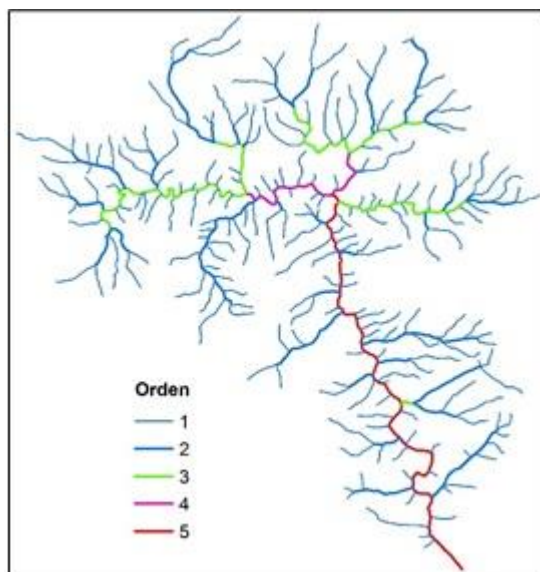


Figura 3 Clasificación de la red de drenaje, según Strahler (1952).

La configuración de las curvas de nivel permitió extraer las subcuencas superficiales y asociarlas a las corrientes que las drenan. Además de la longitud real de las corrientes se calculó la longitud euclidiana de las mismas, como paso intermedio para la estimación de parámetros que intervienen en el cálculo de la dimensión fractal.

Los parámetros morfométricos dependen directamente de propiedades litológicas, tectónicas y estructurales, los que a su vez determinan las características geométricas de la red de drenaje y la cuenca hidrográfica. Debido a la existencia de modelos de autosimilitud (Mandelbrot 1977, 1983; Liu 1992) y modelos de autoafinidad (Nikora & Sapozhnikov 1993; Nikora *et al.* 1996; Veltri *et al.* 1996) para las redes de drenaje se aplicaron métodos de cálculo que tienen en cuenta los fundamentos de ambos modelos (Tabla 1).

Tabla 1. Relaciones para la determinación de la dimensión fractal de una corriente (**d**) y la red de drenaje (**D**)

Estimado	Ecuación	Autor(es)	No
d	$L \propto A^{d/2}$	Mandelbrot (1983)	(2)
d	$L'/L^{1/d}$	Takayasu (1990)	(3)
d	$\max\left(1,2 \cdot \frac{\log R_B}{\log R_A}\right)$	Rosso <i>et al.</i> (1991)	(4)
d	$2 \cdot \frac{\log R_L}{\log R_A}$	Liu (1992)	(5)
D	$Z \propto A^{D/2}$	Mandelbrot (1983)	(6)
D	$d \cdot \frac{\log R_B}{\log R_L}$	Tarboton <i>et al.</i> (1990)	(7)

D	$\left(\frac{1}{2-d}\right) \frac{\log R_B}{\log R_L}$	La Barbera & Rosso (1990)	(8)
D	$2 \cdot \frac{\log R_B}{\log R_A}$	Liu (1992)	(9)
D_G^*	$Z \propto A^{D_G/2}$	Nikora & Sapozhnikov (1993)	(10)

* D_G es la dimensión de lagunaridad, estimador de la dimensión fractal

Adicionalmente el modelo de autoafinidad plantea que los exponentes de escala en las direcciones longitudinal y transversal de la red de drenaje son diferentes. Las relaciones entre los tamaños característicos longitudinal y transversal del drenaje con respecto a la longitud total de las corrientes (Z) y la relación entre el tamaño característico longitudinal de la cuenca y la longitud de una corriente principal son:

$$l \propto Z^{v_l} \quad w \propto Z^{v_w} \quad L \propto l^{1/v_{li}} \tag{11}$$

En estas ecuaciones v_l y v_w representan los exponentes de escala en las direcciones longitudinal y transversal, al tiempo que l y w son los tamaños característicos de la red en las direcciones mencionadas; de forma práctica los exponentes de escala se calculan como:

$$v_l = \frac{\beta v_{li}}{\varepsilon} \quad v_w = \frac{(1-\beta v_{li})}{\varepsilon} \quad D_G = \frac{2}{v_l+v_w} \tag{12}$$

Gráficos logarítmicos de longitud euclidiana vs longitud real de las corrientes permiten probar la hipótesis que plantea que las corrientes a escalas pequeñas son autosimilares: $v_{li} = 1$ (Sapozhnikov & Nikora 1993; Nikora 1994b en Nikora *et al.* 1996). El valor ε se determina a partir de la pendiente de la recta del mejor ajuste en el gráfico de longitud total de las corrientes vs área de las subcuencas, mientras que β es dos veces la pendiente de la recta del mejor ajuste en el gráfico de longitud de la corriente principal vs área de las subcuencas. Si los exponentes v_l y v_w son iguales la red es autosimilar, de lo contrario se plantea que la red es autoafín. En el caso en el cual ambos exponentes son diferentes la dimensión fractal es reemplazada por la dimensión de lagunaridad (D_G), ecuación 12.

Nikora & Sapozhnikov (1993) interpretaron la relación v_w/v_l como el exponente de Hurst, H , el cual caracteriza el grado de autoafinidad de la red; mientras más alejado de 1, más autoafín es la red.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El estudio del comportamiento fractal de la red de drenaje comenzó con el cálculo de los parámetros morfométricos para siete cuencas hidrográficas; los resultados se recogen en la Tabla 2.

Tabla 2. Parámetros morfométricos de las cuencas

Ríos	R _B	R _L	R _A	R _s
Cangre	4,59	2,38	5,94	0,42
Los Pozos	4,82	3,13	7,36	0,35
Paso Viejo	3,87	2,49	5,00	0,54
San Diego	3,64	2,20	4,53	0,50
Los Palacios	4,29	3,42	5,36	0,50
Santa Cruz	4,17	2,70	7,45	0,58
San Cristóbal	3,79	2,39	6,14	0,38

Los valores en itálica y negritas son aquellos que exceden o están en los límites de los valores máximos probables observados para la mayoría de las cuencas. Puede apreciarse que casi todos los valores se encuentran en los intervalos más comunes. En la Tabla 3 se muestran los resultados del análisis fractal para las siete cuencas.

Tabla 3. Valores fractales para la red y promedios para las corrientes

Cuenca	d ²⁺	d ³⁻	d ⁴	d ⁵	D ⁶⁺	D ⁷	D ⁸	D ⁹	D ₆ ¹⁰⁺	H
Cangre	1,08	1,09	1,71	0,97	1,81	1,92	1,94	1,71	1,81	0,85
Los Pozos	0,75	1,08	1,58	0,94	1,62	1,81	1,83	1,58	1,62	1,66
Paso Viejo	0,81	1,08	1,68	1,14	1,66	1,58	1,59	1,68	1,66	1,46
San Diego	0,97	1,06	1,71	1,04	1,92	1,75	1,75	1,71	1,92	1,05
Los Palacios	1,09	1,04	1,73	1,46	1,96	1,24	1,24	1,73	1,96	0,83
Santa Cruz	0,31	1,05	1,42	0,99	1,70	1,51	1,52	1,42	1,70	2,17
San Cristóbal	0,70	1,04	1,47	0,96	1,80	1,59	1,59	1,47	1,80	1,83

2: Mandelbrot (1983), 3: Takayasu (1990), 4: Rosso et al. (1991), 5: Liu (1992), 6: Mandelbrot (1983), 7: Tarboton et al. (1990), 8: La Barbera & Rosso (1991), 9: Liu (1992), 10: Nikora & Sapozhnikov (1993);

+ : valores estimados según las pendientes de las rectas ajustadas en gráficos de longitud-área.

- valores estimados según las pendientes de las rectas ajustadas en gráficos de longitud-longitud

Se aprecian en la tabla anterior marcadas diferencias entre los valores estimados y calculados de la dimensión fractal promedio de las corrientes. La diferencia fundamental entre los métodos radica en empleo o no de los coeficientes de Horton para la determinación de los valores fractales. Otro aspecto a tener en cuenta es efecto del área de drenaje que es asignada a

cada una de las corrientes. Hack (1957) calculó la dimensión fractal de las corrientes en las cuencas de los ríos Virginia y Maryland, encontrando d igual a 1,2. Este autor también realizó cálculos para cuencas en el oeste de los Estados Unidos y encontró un valor promedio de 1,4, llegando a la conclusión que d variaba de región a región.

Eagleson (1970 en Tarboton *et al.* 1990) estableció el valor 1,14 como valor fractal promedio para la corriente principal. Este valor fue confirmado más tarde por Tarboton (1988, en Tarboton *et al.* 1990). Gray (1961), Muller (1973) y Hjelmfelt (1988), todos en Tarboton *et al.* (1990), calcularon valores de 1,14, 1,2 y 1,16 respectivamente. Todos los cálculos anteriores se basan en el supuesto del cumplimiento de las leyes de Horton sobre la composición del drenaje. La dimensión fractal de la red, D , se estimó empleando los valores de d^3 , obtenidos según Takayasu (1990). Como se aprecia sólo coinciden en los cálculos los valores de D estimados por Mandelbrot (1983) y Nikora & Sapozhnikov (1993). La Figura 3 muestra la comparación entre diferentes métodos de cálculo de la dimensión fractal d .

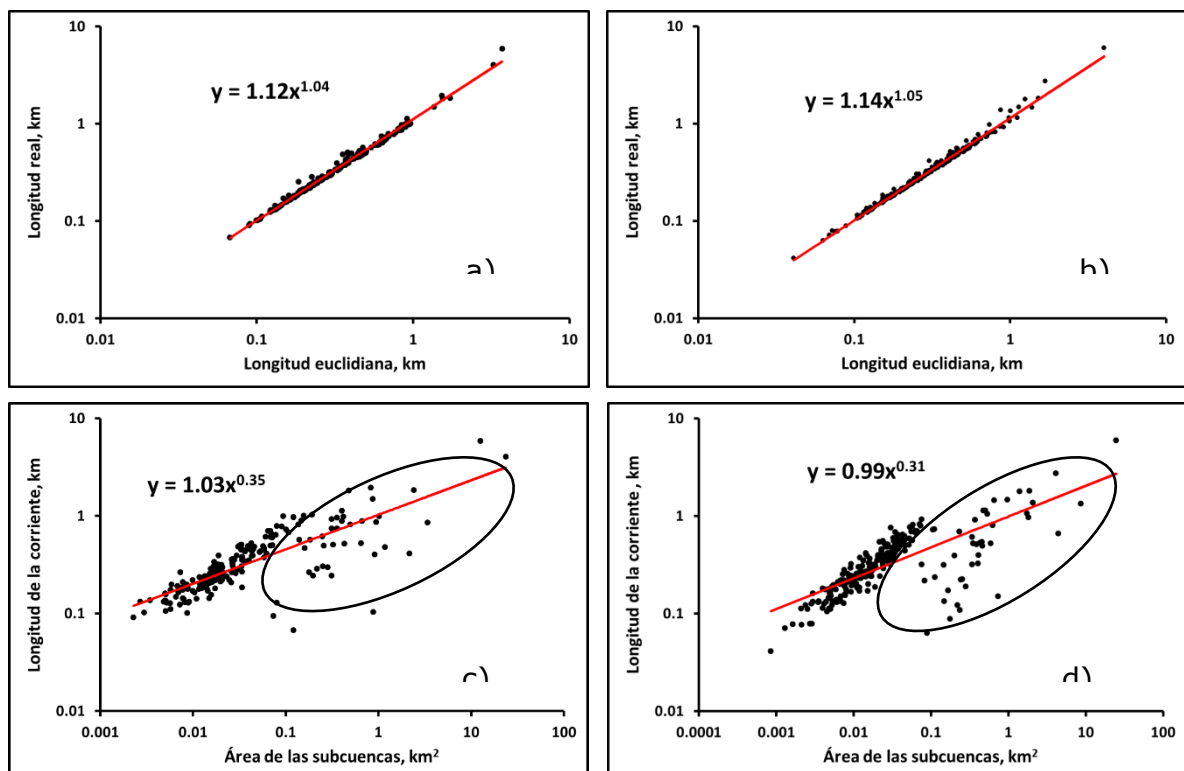


Figura 3. Determinación de la dimensión fractal promedio de la corriente para los ríos San Cristóbal y Santa Cruz a partir de las pendientes de las rectas ajustadas. a) y b) según Takayasu (1990); c) y d) según Mandelbrot (1983). Las elipses encierran los ríos que se alejan de la nube principal, mayormente de orden dos en adelante.

Los valores d según Mandelbrot (1983) son: 0,7 y 0,62, los cuales carecen de interpretación práctica. El parámetro ε se estima a partir de las pendientes de las rectas que se muestran en la Figura 4.

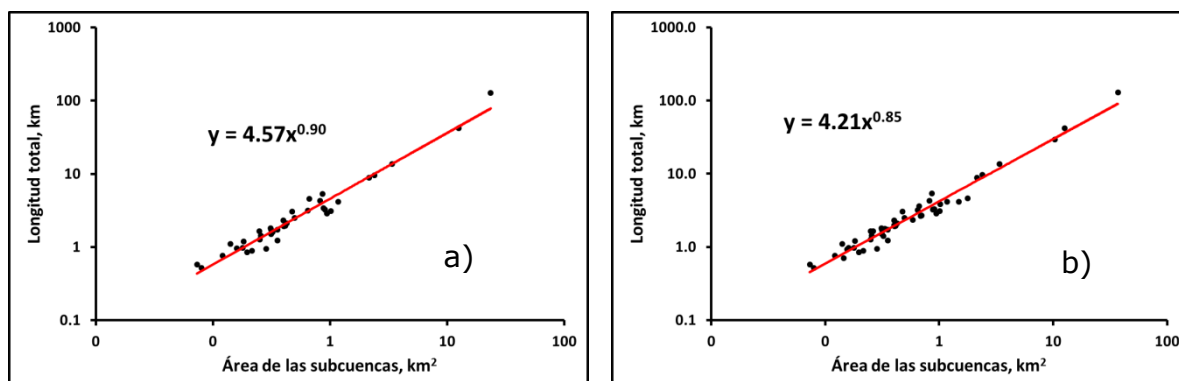


Figura 4. Gráficos para la estimación del parámetro ε , empleado en cálculo de la dimensión fractal de la red: a) río San Cristóbal, b) río Santa Cruz. El eje de las ordenadas representa la longitud total de todas las corrientes que caen dentro de una subcuenca.

4. DISCUSIÓN

Al analizar los parámetros morfométricos de las cuencas llama la atención los valores de la relación de área (R_A) para las cuencas de los ríos Los Pozos y Santa Cruz principalmente. Los valores de ambas cuencas exceden el valor máximo probable de 6. Las variaciones de estos valores promedio fuera de rangos más observados: R_L : 1,5-3; R_B : 3-5; R_A : 3-6; R_S : 0,3-0,6; es el resultado del control tectónico sobre las redes de drenaje. Ríos cortos con amplias áreas de drenaje, ríos extensos con pequeñas subcuencas, ríos de orden superior de pequeña longitud y áreas de drenaje grandes son el resultado de los efectos de los movimientos neotectónicos sobre la conformación del relieve actual y de la configuración del drenaje como el elemento más dinámico dentro del paisaje.

La cuenca Los Pozos posee varios ríos de orden 4, pero uno de ellos es especialmente largo, recorriendo casi toda la cuenca. A diferencia de esta cuenca el río Santa Cruz presenta dos pequeñas corrientes de orden 4 y su corriente de mayor orden, 5, posee una gran longitud. Las corrientes de orden 4 y 5 en las cuencas estudiadas poseen una dirección preferencial NW-SE, siguiendo la dirección de fallas de gran magnitud que según Cofiño & Cáceres (2003) son el resultado del avance diferencial de los mantos durante los cabalgamientos. Un terreno fragmentado en bloques, la presencia de numerosas fallas tectónicas y la existencia de los frentes de cabalgamientos justifican estos comportamientos anómalos, que su vez, alteran los valores promedios de los parámetros morfométricos.

Los puntos encerrados en elipses en las Figuras 3c) y 3d) representan los ríos de orden 2 en adelante, para los cuales sus áreas de drenaje crecen más rápidamente que sus longitudes. Este comportamiento es similar para todas las cuencas estudiadas y ejerce influencia en el cálculo de la dimensión de lagunaridad, así como en la determinación del coeficiente de Hurst (H_{lw}).

Los esfuerzos que originaron la estructura de mantos cabalgados que hoy se observa en toda la cordillera de Guaniguanico cambiaron de dirección al terminar los cabalgamientos. En el Eoceno Medio temprano comienza la rotación horaria del máximo estrés compresivo, al mismo tiempo que σ_3 se acerca también al plano horizontal. Esto favorece las condiciones de transcurrencia, dando lugar a la Zona de Falla Pinar, y con ella a todo un patrón de fracturas de Riedel de segundo orden asociadas a esta, por las cuales circulan las aguas superficiales.

Ríos alargados y rectos, corrientes principales encajadas en sus cauces, con vertientes de pendientes elevadas, pocos afluentes y un medio geológico con presencia de rocas carbonatadas hacen que se violen sistemáticamente las leyes de Horton sobre la composición del drenaje. En opinión de los autores de este trabajo, las condiciones de tectónica activa, transcurrente y vertical, así como el factor litológico, que permite el desarrollo del carso y por lo tanto no favorece el escurrimiento superficial, actúan de forma conjunta impidiendo el desarrollo de la red de drenaje.

4.1. Comportamiento fractal de la red de drenaje

Los valores de la dimensión fractal para las corrientes (Tabla 3) demuestra que los métodos de Mandelbrot (1983) y Rosso *et al.* (1991) no son apropiados para condiciones en las cuales la tectónica y la litología ejercen un fuerte control sobre el drenaje. Valores demasiado bajos (d^{2+}) o demasiado altos (d^4) no son correctos para la dimensión fractal de la corriente.

Tomando como ejemplo el valor $d=1,71$ para la cuenca del río San Diego y sustituyéndolo en ecuación (7) ofrece $D=2,8$; si d se sustituye en ecuación 8 el resultado $D = 5,69$. Ambos valores carecen de significado práctico, debido a que D no puede ser mayor que 2, que es la dimensión topológica de una red que cubre por completo el espacio. Según Robert & Roy (1990) la dimensión fractal de las corrientes no debe estimarse a partir de la relación longitud-área porque es probable que este valor sea dependiente de la escala. Todos los valores de D fueron calculados utilizando d^{3-} , que es la dimensión según Takayasu (1990).

Aunque los métodos de Mandelbrot (1983) y Nikora & Sapozhnikov (1993) producen los mismos resultados **D**, el segundo permite calcular el coeficiente de Hurst, indicador del grado de autosimilitud de la red. Los coeficientes de Hurst ofrecen resultados interesantes para las cuencas Cangre (0,85), San Diego (1,05) y Los Palacios (0,83). En la cuenca del río Cangre predominan los materiales terrígenos de la Fm. San Cayetano, mientras que en San Diego la proporción entre rocas terrígenas y carbonatadas es similar. En esta última cuenca tiene lugar un proceso interesante y es que esta es la zona en la cual las secuencias de Sierra de los Órganos son sobrecorridas por las secuencias de Sierra del Rosario, creando una gran zona de trituración de las rocas, en especial las carbonatadas.

En la cuenca Los Palacios los ríos corren casi exclusivamente sobre calizas. Tomando en cuenta que los valores **D**, obtenidos según los diferentes autores, varían entre ellos se calcula el valor promedio para cada cuenca: Cangre (1,84), Los Pozos (1,69), Paso Viejo (1,63), San Diego (1,81), Los Palacios (1,63), Santa Cruz (1,57) y San Cristóbal (1,65). Puede notarse cómo los valores más altos de **D** promedio coinciden también con los valores más altos del coeficiente de Hurst (Tabla 3) excepto para la cuenca del río Los Palacios como consecuencia de una relación de longitud anómala.

5. CONCLUSIONES

- Los valores de los índices morfométricos están dentro de los rangos calculados para la mayoría de las cuencas a nivel mundial. Excepciones son la R_A para las cuencas Los Pozos y Santa Cruz y la R_L para la cuenca Los Palacios. Ríos encajados profundamente en sus cauces y áreas de drenaje muy variables son las causas de estas desviaciones. La dimensión fractal promedio de las corrientes según Takayasu (1990) parece ser la más apropiada para cuencas con las características geológicas del área estudiada. El método de Mandelbrot (1983) produce valores demasiado pequeños mientras que el método de Rosso et al. (1991) los sobreestima.
- El desplazamiento de las corrientes de orden 2 en adelante con respecto a las de orden 1 puede ser el resultado de amplias zonas de drenaje asociadas a corrientes de corto recorrido, características de zonas tectónicamente activas. El factor litológico parece ejercer influencia sobre las características del drenaje, especialmente en la cuenca Cangre, aunque la mayor influencia sobre el sistema surge de las abundantes fallas y fracturas de las rocas en el área de estudio.

Los elevados valores fractales de las cuencas Cangre, San Diego y Los Palacios confirman esta aseveración. El coeficiente de Hurst de estas cuencas se aproxima a 1 indicando el comportamiento autosimilar de la red. Para el resto de las cuencas no es posible asumir un tipo de comportamiento, pues los valores de Hurst son bastante superiores a uno, lo cual contradice lo planteado en la literatura sobre el tema.

6. REFERENCIAS

- CLARK, M. K.; SCHOENBOHM, L. M.; ROYDEN, L. H.; WHIPPLE, K. X.; BURCHFIEL, B. C.; ZHANG, X.; TANG, W.; WANG, E. & CHEN, L. 2004: Surface uplift, tectonics and erosion of eastern Tibet from large-scale drainage patterns. *Tectonics* 23(1): 1-21.
- COBIELLA-REGUERA, J. L. 2008: Reconstrucción palinspástica del paleomargen mesozoico de América del Norte en Cuba occidental y el sudeste del Golfo de México. Implicaciones para la evolución del SE del Golfo de México. *Revista Mexicana de Ciencias Geológicas* 25(3): 382-401.
- COFIÑO, C. E. & CÁCERES, D. 2003: Efectividad de la utilización de métodos microtectónicos en el desciframiento de la evolución de estructuras tectónicas (Falla Pinar). *Minería y Geología* 19(3-4): 29-34.
- HACK, J. T. 1957: Studies of longitudinal stream profiles in Virginia and Maryland. U.S. Geological Survey, Professional Paper 294: 45-97.
- HORTON, R. E. 1932: Drainage basin characteristics. *Transactions American Geophysical Union* 13(1): 350-361.
- HORTON, R. E. 1945: Erosional development of streams and their drainage basins: hydrophysical approach to quantitative morphology. *Geological Society America Bulletin* 56(3): 275-370.
- HUGGETT, R. J. 2007: *Fundamentals of Geomorphology*. Second edition. Routledge, London, 458 p.
- JAIN, V. E. 1973: *Geotectónica General*. Parte I. Mir, Moscú, 357 p.
- LA BARBERA, P. & ROSSO, R. 1990: Reply. *Water Resources Research* 26(9): 2245-2248.
- LIU, T. 1992: Fractal structure and properties of stream networks. *Water Resources Research* 28(11): 2981-2988.
- MANDELBROT, B. B. 1977: *Fractals, form, chance and dimension*. W. W. Freeman and Company, San Francisco.
- MANDELBROT, B. B. 1983: *The fractal geometry of nature*. W. H. Freeman and Company, New York.
- NIKORA, V. I. & SAPOZHNIKOV, V. B. 1993: River network fractal geometry and its computer simulation. *Water Resources Research* 29(10): 3569-3575.

- NIKORA, V.; IBBITT, R. & SHANKAR, U. 1996: On channel network fractal properties: A case of study of the Hutt River basin, New Zealand. *Water Resources Research* 32(11): 3375-3384.
- ORDAZ, A. 2013: *Evaluación de las condiciones ingeniero-geológicas para el pronóstico de la respuesta dinámica de los suelos. Caso de estudio: Ciudad de San Cristóbal, Cuba occidental*. Tesis de doctorado. Universidad de Pinar del Río.
- PIOTROWSKA, K. 1978: Nappe structure of Sierra de los Órganos, western Cuba. *Acta Geologica Polonica* 28(1): 97-170.
- ROBERT, A. & ROY, A. G. 1990: On the fractal interpretation of the mainstream length-drainage area relationship. *Water Resources Research* 26(5): 839-842.
- ROSSO, R.; BACCHI, B. & LA BARBERA, P. 1991: Fractal relation of mainstream length to catchment area in river networks. *Water Resources Research* 27(3): 381-387.
- STRAHLER, A. N. 1946: Elongate entrenched meanders of Conodoguinet Creek. *American Journal of Science* 244(1): 31-40.
- STRAHLER, A. N. 1952: Dynamic basis of geomorphology. *Geological Society of America Bulletin* 63(9): 923-938.
- TAKAYASU, H. 1990: *Fractals in the physical sciences*. Manchester University Press, Manchester.
- TARBOTON, D. G.; BRAS, R. L. & RODRÍGUEZ-ITURBE, I. 1990: Comment on "On the fractal dimension of stream networks" by Paolo La Barbera and Renzo Rosso. *Water Resources Research* 26(9): 2243-2244.
- TARBOTON, D. G. 1996: Fractal river networks, Horton's laws and Tokunaga cyclicity. *Journal of Hydrology* 187(1-2): 105-117.
- VELTRI, M.; VELTRI, P. & MAIOLO, M. 1996: On the fractal description of natural channel networks. *Journal of Hydrology* 187(1-2): 137-144.

Robert Ramírez-Hernández, robertrh@upr.edu.cu

Máster en Ciencias. Profesor Auxiliar
Universidad de Pinar del Río, Cuba

Alina Rodríguez-Infante, rinfante@ismm.edu.cu

Doctora en Ciencias Geológicas. Profesora Titular
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, Cuba

Alexis Ordaz-Hernández, alexisordaz.1978@gmail.com

Doctor en Ciencias Técnicas. Profesor Categoría B
Universidad Autónoma del Estado de México, México.