

El Análisis de Entropía. Un Método para Determinar el Grado de Selección en un Sedimento. Aplicación en un Área del Caribe Colombiano.

JORGE A. BRIEVA & LUIS MONTES

Departamento de Geociencias, Universidad Nacional de Colombia, Apartado 14490, Bogotá, Colombia

BRIEVA, J.A. & MONTES, L. (1995): El Análisis de Entropía. Un método para determinar el grado de selección en un sedimento. Aplicación en un área del Caribe Colombiano.- GEOLOGIA COLOMBIANA, 19, pgs. 145-152, 5 Figs., 1 Tabla, Santa Fé de Bogotá.

Palabras Claves: Entropía, Mar Caribe, Costa norte de Colombia, Sedimentos-Textura, Procesos deposicionales.

RESUMEN

El concepto de entropía se puede expresar como una medida de la probabilidad de que un sistema dado exista en un cierto estado. Esta propiedad aleatoria de la entropía es de utilidad en la teoría de la información y se puede usar para determinar la selección en un sedimento (0.0 = selección perfecta; 1.0 = selección pobre).

Esta técnica se ha aplicado en una zona de la costa norte colombiana, en la llamada Plataforma de Ciénaga; de acuerdo a los resultados obtenidos, los sedimentos en el área se hallan bien seleccionados, pudiendo diferenciarse tres zonas, con diferentes grados de selección. Las diferencias halladas se interpretan como producidas por diferentes procesos de transporte y sedimentación, debidos a las corrientes, al oleaje predominante, al intercambio de masas de agua entre la Ciénaga Grande y el mar y a la influencia de corrientes menores de agua dulce que desembocan en la zona.

ABSTRACT

The concept of entropy may be defined as the probability that a given event can exist as a certain state information theory

This aleatory attribute of entropy is useful in the information theory, and can be used to determine sediment sorting (0.0 = perfect sorting; 1.0 = poor sorting).

Entropy procedures were applied to the grain size distribution data from a litoral zone of the northern Colombian coast: the so called Ciénaga Platform. The values obtained, for well sorted sediments, may be grouped into three zones, with different degrees of sorting. The differences among these groups may be explained as the product of transport and sedimentation processes, due to: local currents, wave direction, exchange of water masses between the Ciénaga Grande

and the sea, and influence of fresh water currents that flow into the area.

INTRODUCCION

En Geología el grado de selección ("sorting") de sedimentos, según el tamaño del grano, ha sido usado como una herramienta para deducir procesos de sedimentación (ver, p.e., FOLK 1965, pg. 4) y se ha definido como la medida de dispersión de la función de distribución del tamaño de grano alrededor de la media.

Para su cuantificación se ha tomado en cuenta el Tamaño Medio de Grano y el Coeficiente de Desviación Estándar. El cálculo de tales coeficientes se ha obtenido por métodos gráficos (ver, entre otros, a TRASK 1932; OTTO 1939; INMAN 1952; FOLK & WARD 1957; McCAMMON 1962) y métodos matemáticos (Medida del Segundo Momento: para el tratamiento seguido, ver GRIFFITHS 1967, pg. 87.).

Para aplicar estos métodos se parte del supuesto de que la función de distribución del tamaño de grano presenta un comportamiento normal, es decir, una única población, lo cual ha sido puesto en duda por varios autores (p.e., VISHER 1969; MIDDLETON 1976; FULL *et al.* 1984), quienes observan que la muestra puede contener dos o más subpoblaciones; en el caso de una sola población (distribución unimodal) la función es casi siempre asimétrica, ya sea hacia las partículas finas o hacia las gruesas.

El concepto termodinámico de la entropía es el de una medida de orden dentro de un sistema; la entropía como medida de la uniformidad u orden puede aplicarse al análisis de sedimentos en lugar del coeficiente de desviación estándar.

Esta medida de selección en sedimentos es conveniente cuando se desea determinar la manera en que estos son distribuidos por procesos físicos sobre una región determinada, como se verá en el caso que se presenta en este trabajo.

El método del análisis de la entropía ha sido usado en análisis multivariado, para clasificar sedimentos (FORREST

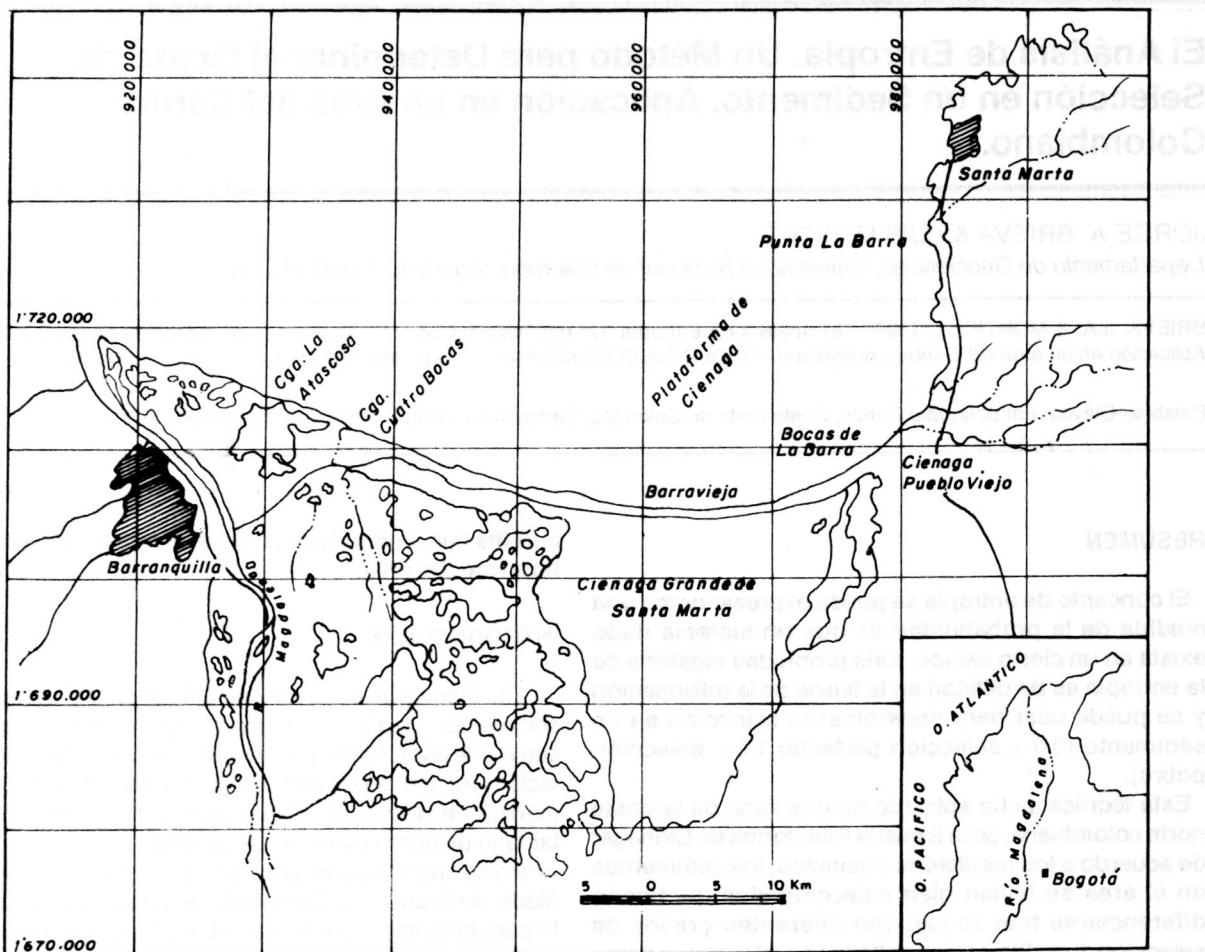


Fig. 1. Localización de la costa colombiana en el Mar Caribe, entre la desembocadura del río Magdalena (Bocas de Ceniza) y Santa Marta, con la Plataforma de Ciénaga.

& CLARK 1989).

FUNDAMENTO TEÓRICO

El concepto de entropía fue planteado por SHANNON (1948a y 1948b), como una medida de la información en un sistema, o entropía de la información.

Existe una analogía muy estrecha entre entropía y probabilidad y, en general, la entropía es una medida de la probabilidad de que un sistema dado exista en un cierto estado. Esta propiedad aleatoria de la entropía es útil para su aplicación en la teoría de la información.

Si un sistema posee N clases de eventos distintos, susceptibles de ocurrir, y si la probabilidad de que suceda un evento perteneciente a la i -clase es P_i , entonces la entropía del sistema es:

$$E = - \sum_{i=1}^{i=N} P_i \cdot \ln (P_i) \quad (1)$$

en donde:

P_i = probabilidad de ocurrir un evento de la i -clase;

\ln = logaritmo natural;

N = número total de clases

La probabilidad P_i , de que ocurra un evento perteneciente a la i -clase es el cociente entre el número de eventos que ocurren en la i -clase, y el total de eventos que se suceden en todo el sistema.

Para contar con una medida normalizada, se utiliza en su lugar la entropía relativa, la cual se define como el cociente de la entropía del sistema y la máxima entropía posible. Esta última se obtiene cuando todos los componentes tienen el mismo valor, una constante igual a 1 sobre el número de clases. A partir de la ecuación 1, y cuando $P_i = 1/N = k$, se tiene:

$$E_{\max} = - \sum k \cdot \ln (k) = -(1/N) \cdot \ln (1/N) = \ln (N) \quad (2)$$

En conclusión, la entropía, relativa a su valor máximo, es:

$$E_r = \frac{E}{E_{max}} = -\frac{1}{\ln(N)} \sum_{i=1}^{i=N} P_i \cdot \ln(P_i) \quad (3)$$

ANALISIS DE LA ENTROPIA

El rango de valores de la entropía relativa parte de 0.0 para una selección perfecta (todos los eventos tienen lugar en una sola clase) hasta 1.0 que es una selección pobre (todas las clases poseen la misma frecuencia), siendo estos valores adimensionales.

En una muestra de sedimentos, esta se descompone en clases según el tamaño de grano, creándose intervalos que identifican una clase. La probabilidad P_i , asociada a esa clase, se determina (en el análisis efectuado por tamizaje) como el peso de esa clase dividido por el peso total de la muestra. El concepto de entropía como medida de orden es útil para cartografiar sistemas de múltiples componentes, puesto que las zonas de alta entropía (carentes de información), formarían barreras naturales entre regiones ambientales donde la información disponible es alta; es decir, entre dos áreas ambientalmente definidas por sus poblaciones respectivas (áreas de baja entropía), existe una zona intermedia en la cual debe existir una mezcla de tales poblaciones (área de alta entropía). Las zonas de alta entropía corresponden a aquellas donde los componentes se representan en proporciones comparativamente iguales, o sea, aquellas donde todas las clases de sedimentos

existen en igual o casi igual proporción. El contenido de información es mayor cuando la frecuencia de uno de los componentes se maximiza, o sea cuando una clase de sedimento tiene una mayor proporción en la muestra.

APLICACION DE LA TECNICA: PLATAFORMA DE CIENAGA, MAR CARIBE COLOMBIANO

Con el objetivo de verificar la validez de la aplicación de la técnica de entropía, y su viabilidad para determinar la uniformidad del tamaño del sedimento con sus implicaciones ambientales, se seleccionó una zona de la costa norte colombiana, entre la desembocadura del río Magdalena (Bocas de Ceniza) y la ciudad de Santa Marta; esta zona comprende la llamada Plataforma de Ciénaga, donde confluyen no solamente la acción misma de los mecanismos de transporte de sedimentos propios de la plataforma, sino también la influencia del canal de comunicación entre la Ciénaga Grande y el Mar Caribe (Boca de la Barra) y las corrientes locales (ríos Toribio y Córdoba, entre otros) que desembocan al norte de la población de Ciénaga (Fig. 1).

En esta zona el Ministerio de Obras Públicas (Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, L.E.H.) realizó una recolección de muestras de sedimentos superficiales de la plataforma (Fig. 2). Las muestras fueron separadas por tamaños (clases) por métodos de tamizaje, dando como resultado el peso de todas y cada una de las clases presentes en las muestras (LORIN *et al.* 1973).

El área corresponde a una porción de la Plataforma

TABLA 1

Clase-i	Peso	Pi(%)	Pi.Ln(Pi)
1	0.0000	0.000000	0.000000
2	0.0000	0.000000	0.000000
3	0.0006	0.000058	0.000566
4	0.0011	0.000106	0.000974
5	0.0041	0.000397	0.003108
6	0.0360	0.003484	0.019720
7	0.2649	0.025639	0.093933
8	0.7101	0.068730	0.184029
9	2.4384	0.236009	0.340770
10	4.0958	0.396427	0.366799
11	1.8768	0.181653	0.309838
12	0.6797	0.065787	0.179029
13	0.1771	0.017141	0.069701
14	0.0472	0.004568	0.024617
15	0.0212	0.002052	0.012699
16	0.0000	0.000000	0.000000
		1.000000	1.605783

$$Er = 1.605783/\ln(16) = 0.579164$$

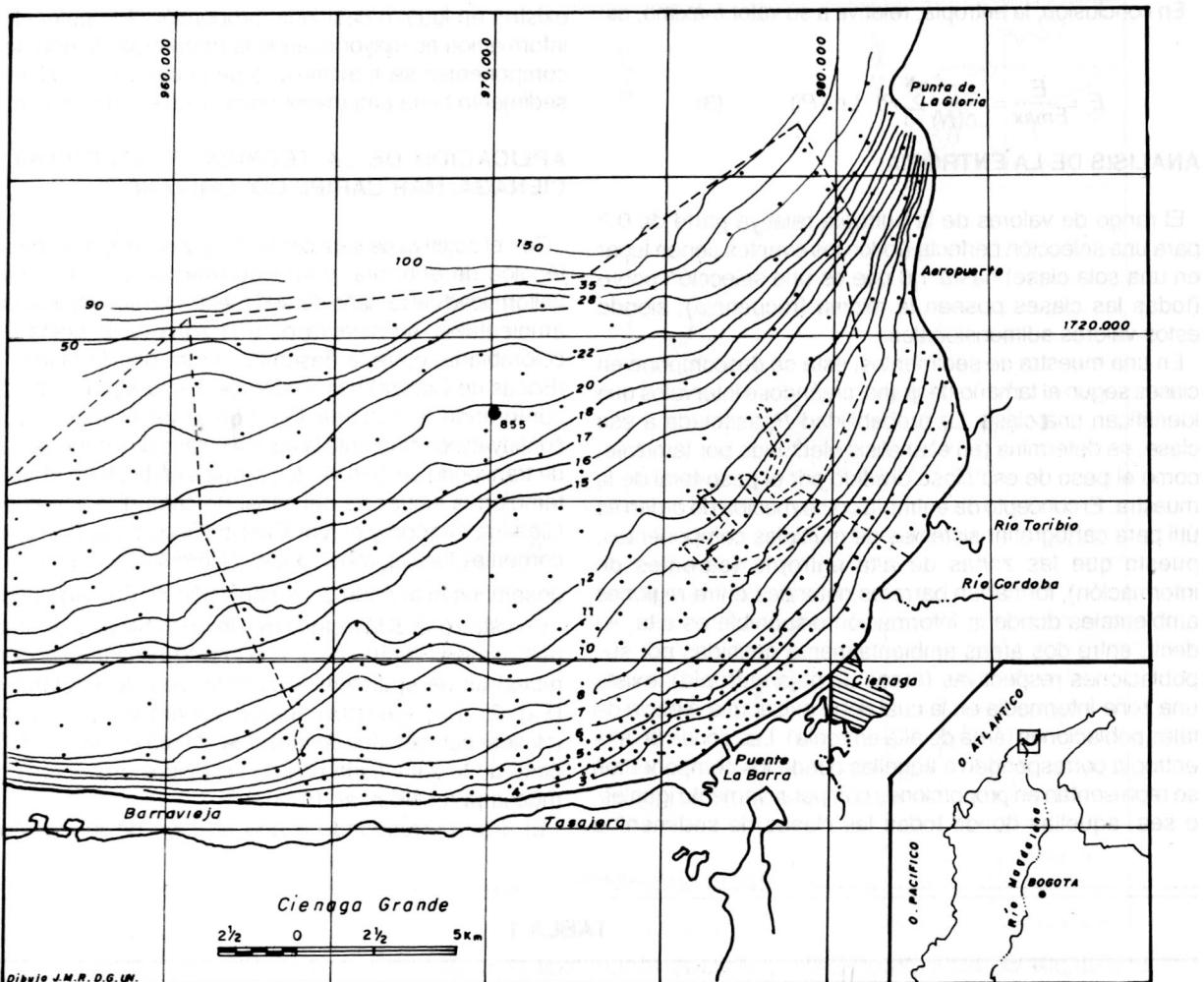


Fig. 2. Batimetría y localización de las muestras en la Plataforma de Ciénaga (Batimetría y muestras según Lorin et al. 1973).

Caribe colombiana, definida por las coordenadas siguientes: 1'705.000 N, 1'722.000 N; 960.000 E y 982.000 E. La costa desde el sitio de Barra Vieja hasta el caserío de Tasajera sigue una dirección E-W, con una ligera concavidad hacia el norte; desde allí cambia gradualmente en dirección norte hasta Punta Gloria, unos 3 km al sur de la Bahía del Rodadero.

La batimetría de la zona indica una suave pendiente en dirección del talud; aquí, el límite entre la plataforma y el talud se encuentra aproximadamente a unos 30 m de profundidad (MOLINA 1993), con una amplitud que varía entre los 13 y 17 km, correspondiente a la Plataforma de Ciénaga. El régimen de corrientes en el área (Fig. 3) se halla bajo la influencia del oleaje procedente del NE, producido por los vientos alisios durante la estación seca (diciembre-abril) y por la contracorriente de Panamá o del Darién, durante la época húmeda. En la zona, esta dirección general se halla modificada por varios factores: en primer lugar, por la corriente generada en la Boca de la Barr (comunicación entre la Ciénaga Grande y el mar), la cual

cambia de sentido alternadamente, ya se trate de estaciones secas (del mar hacia la ciénaga) o húmedas (sentido contrario); un segundo factor que eventualmente puede influenciar el movimiento de las masas de agua es la posible presencia de corrientes de desgarre ("rip currents") en la zona litoral; estas corrientes se han detectado hacia el oeste, en cercanías de Bocas de Ceniza, pero podrían estar presentes en la zona de estudio (LORIN et al. 1973).

TRATAMIENTO DE LOS DATOS

Para cada muestra se determinó el porcentaje que representa cada clase de tamaño, como el cociente entre el peso de la clase y el peso total de la muestra (Tabla 1).

La máxima entropía esperada en las muestras es $\ln(16)$ (Ecuación 2).

Se calculó la sumatoria del producto del porcentaje de cada clase por el logaritmo natural de ese porcentaje, dividiendo dicha suma entre el valor negativo de la máxima entropía (Ecuación 3).

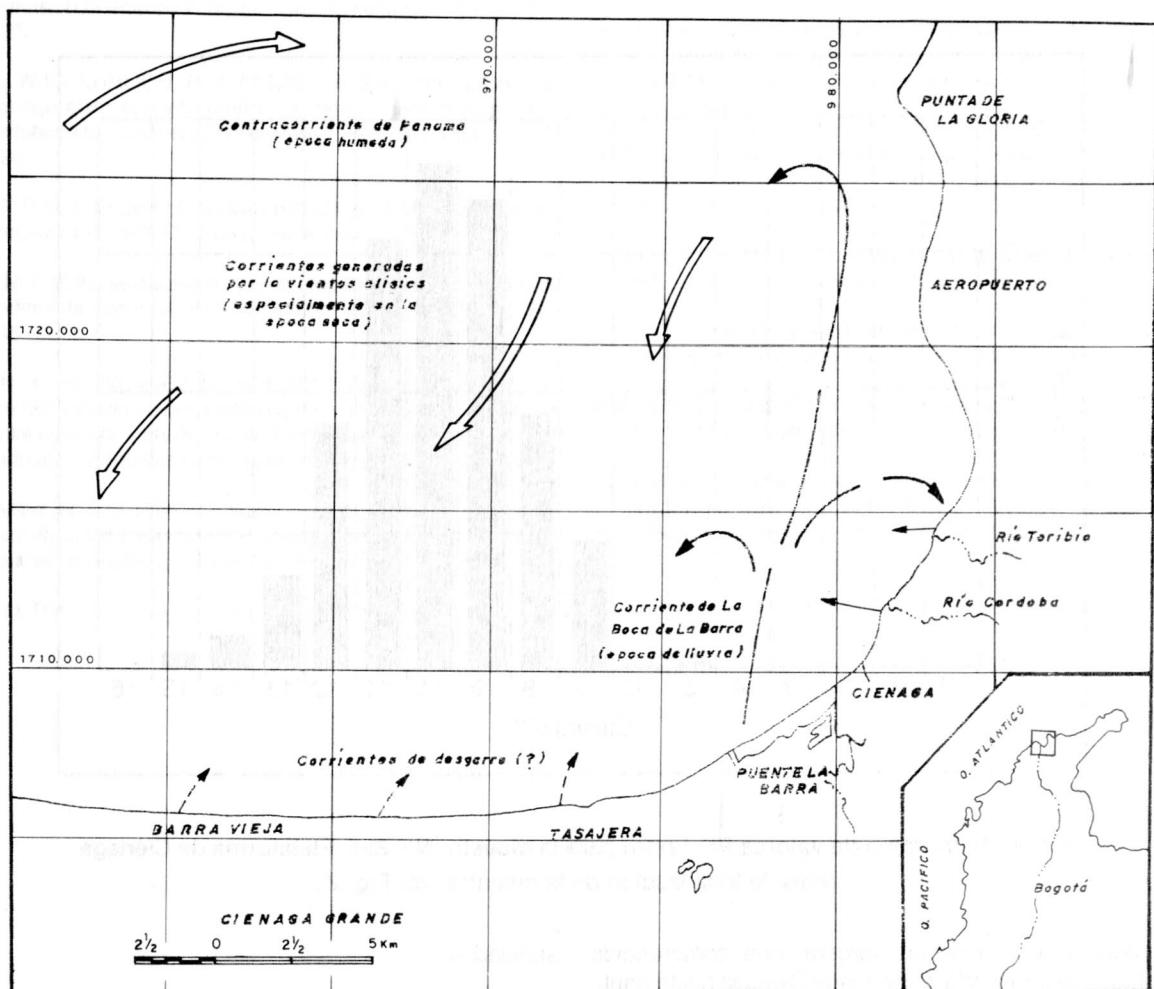


Fig. 3. Régimen de corrientes en el área. Los vientos alisios producen corrientes del NE, especialmente durante la temporada seca (Diciembre - Abril...). La corriente procedente de la Boca de la Barra se presenta durante la temporada de lluvias (Octubre - Noviembre...).

La Tabla 1 muestra los valores obtenidos con una de las muestras analizadas (Muestra #855) (ver Fig. 2).

El valor de entropía relativa de la muestra #855 es 0.5791164. La Fig. 4 presenta el histograma de los valores de entropía para la misma muestra.

DISCUSIÓN DE RESULTADOS

De acuerdo al mapa de entropía (Fig. 5), el área se encuentra cubierta de sedimentos muy bien seleccionados; el valor de la entropía en la zona fluctúa entre un valor mínimo de 0.40 y un valor máximo de 0.61.

En la Fig. 5 se pueden diferenciar 3 zonas: la primera, una de cuyas ramas se extiende hacia el norte, desde la salida de la desembocadura de la Ciénaga Grande (Boca de la Barra) hasta el límite de la plataforma (aproximadamente a 80 m de profundidad), en dirección paralela a la costa entre Ciénaga y Punta de La Gloria y a una distancia aproximada de 3 km de ella. Allí, la entropía predominante tiene un valor

máximo de 0.48, lo que indica un mayor grado de selección, en contraste con el resto del área, y coincide con la zona de influencia de la corriente que irrumpie de la Ciénaga (Fig. 3). Desde la Boca de la Barra, se observa la otra rama de esta zona de baja entropía, con una dirección NO, la cual puede deberse a la influencia del oleaje, por efecto de los vientos alisios. Esta mejor selección puede explicarse por la mayor energía de la corriente procedente de la Ciénaga, que arrastraría hacia el fondo los sedimentos más finos, dejando atrás la arena mejor seleccionada, con ayuda del oleaje procedente del NO. El resultado neto es un lavado casi total de los sedimentos arenosos.

Una segunda zona, situada al oeste de la primera, y que se extiende desde la playa hasta el límite del talud, presenta una entropía mayor que la primera, con un valor promedio de 0.51, indicando un menor grado de selección, producido tanto por el oleaje sobre el sedimento del fondo, como por las eventuales corrientes de desgarre presentes (LORIN et al. 1973).

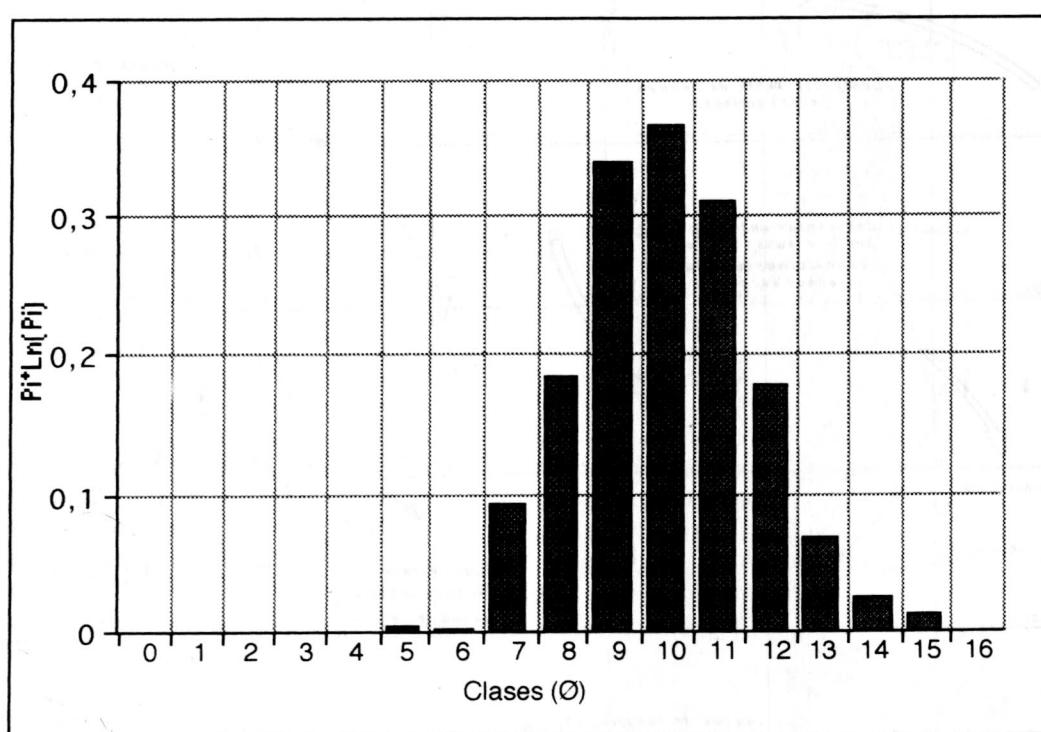


Fig. 4. Histograma de valores $\Pi_i \cdot \ln(\Pi_i)$ para la muestra No. 855, Plataforma de Ciénaga
(Para la localización de la muestra, ver Fig. 2).

Finalmente, se observa una tercera zona, comprendida entre la primera zona y la costa desde Ciénaga hasta Santa Marta. En ella se manifiesta de una manera más local la influencia de las corrientes menores (ríos Toribío y Córdoba); a pesar de que predomina un valor de 0.51, se observa en la parte sur de esta zona, valores de entropía que varían entre 0.45 y 0.42, cerca a la desembocadura de las dos corrientes nombradas.

En la zona de estudio, los materiales detriticos se hallan comprendidos en un rango entre limo de tamaño medio y arena media; la energía que actúa sobre estos sedimentos (oleaje, diversos tipos de corrientes), trabaja sobre espesores delgados del material, lo cual dará una buena entropía ("selección"). Debido a estos diversos tipos de energía presentes, es difícil delimitar con exactitud áreas de mezcla de poblaciones (alta entropía); una situación distinta se presentaría en el caso en que un gran volumen de sedimentos fuera traído al área y depositado, formando, probablemente, capas cruzadas, y enterrado rápidamente por más sedimento.

El valor de la entropía refleja, igualmente, el carácter relativamente constante de las corrientes en el área; aún en el caso de la corriente de la Boca de la Barra, con sus variaciones estacionales de dirección, el rango de estas variaciones se debe hallar dentro de ciertos límites, con el fin de producir un sedimento con los valores de entropía

señalados.

CONCLUSIONES

Del estudio del caso anterior, se deduce que la entropía se puede presentar como una alternativa apropiada para determinar la selección de un sedimento. Más aún, se puede afirmar que el análisis de la entropía en un área de sedimentación determinada, permite distinguir zonas sometidas a procesos diferentes de transporte y sedimentación, y por consiguiente, puede ser útil para la determinación de condiciones ambientales actuales. Es interesante dilucidar, por medio de modelos comparativos, la utilidad de las medidas de entropía en sedimentos antiguos, lo cual permitiría una medida más clara de la selección de la roca.

REFERENCIAS

- FOLK, R.L. (1965): Petrology of Sedimentary Rocks.- Hemphill's Book Store, 182 p., Austin, Texas.
- FOLK, R.L. & WARD, W.C. (1957): Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters.- Journal of Sedimentary Petrology, v.27, p. 3-26.
- FORREST, J. & CLARK, N.R. (1989): Characterizing grain size dis-

- tributions: evaluation of a new approach using a multivariate extension of entropy analysis.- *Sedimentology*, v. 36, p. 711-722.
- FULL, W.E.; EHRLICH, R. & KENNEDY, S.K. (1984): Optimal configuration and information content of sets of frequency distributions.- *Journal of Sedimentary Petrology*, v.54, p. 117-126.
- GRIFFITHS, J.C. (1967): Scientific method in analysis of sediments.- McGraw-Hill Book Co, 508 p., New York.
- INMAN, (1952): Measures for describing the size distribution of sediments.- *Journal of Sedimentary Petrology*, v.22, p. 125-145.
- LORIN, J.; HERNANDEZ, C.; ROUAULT, A. & BOTTAGISIO, J. (1973): Estudio sedimentológico de la plataforma continental entre Bocas de Ceniza y Santa Marta.- Laboratorio de Ensayos Hidráulicos, Ministerio de Obras Públicas, 42 pgs., Bogotá.
- McCAMMON, R.B. (1962): Efficiency of percentile measures for describing the mean size and sorting of sedimentary particles.- *Journal of Geology*, v.70, p. 453-465.
- MIDDLETON, G.V. (1976): Hydraulic interpretation of sand size distributions.- *Journal of Geology*, v.84, p. 405-426.
- MOLINA, A. (1993): Estudio sedimentológico y morfológico de la plataforma continental caribe entre el sector de Santa Marta y Punta Morro Hermoso.- *Boletín Científico C.I.O.H.*, n. 14, p. 67-77, Cartagena.
- OTTO, G.H. (1939): A modified logarithmic probability graph for the interpretation of mechanical analyses of sediments.- *Journal of Sedimentary Petrology*, v.9, p. 285-292.
- SHANNON, C.E. (1948a): A mathematical theory of communication.- *Bell System Tech. Journal*, v.27, p. 379-423.
- _____. (1948b): A mathematical theory of communication.- *Bell System Tech. Journal*, v.27, p. 623-656.
- TRASK, P.D. (1932): Origin and environment of source sediments of petroleum.- *Gulf Publ. Co.*, p. 67, Houston.
- VISHER, G.S. (1969): Grain size distributions and depositional processes.- *Journal of Sedimentary Petrology*, v.39, p. 1074-1106.

Manuscrito recibido, mayo de 1994