

Desarrollo secuencial de formas de fondo en un régimen macromareal

*Salvador ALIOTTA¹, Enrique J. SCHNACK², Federico I. ISLA³ y
Guillermo O. LIZASOAIN¹*

1. CONICET-UNS, Instituto Argentino de Oceanografía, CC 804. 8000-Bahía Blanca.
2. CIC, Laboratorio de Oceanografía Costera, CC 45. 1900-La Plata.
3. CONICET, Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, CC. 722. 7600-Mar del Plata.

Resumen. En el extremo NO del golfo San Matías (sector exterior de la bahía de San Antonio) grandes bancos arenosos forman, hasta una profundidad de 14 m, un gran delta de marea, el cual constituye la característica morfológica general. La circulación del área es gobernada por un régimen semidiurno macromareal con amplitudes de sicigias de hasta 9 m. Por medio de métodos sísmico-acústicos (sonar de barrido lateral y ecosonda) y muestreo de sedimentos del fondo se analizaron rasgos morfológicos subácueos (ondas de arena y megaóndulas, lineaciones sedimentarias, marcas de cometa), conducentes a inferir las condiciones físicas ambientales referidas a su generación y a completar el conocimiento de la dinámica sedimentaria regional.

Ondas de arena de hasta 4 m de altura se presentan agrupadas en campos bien definidos o en cubetas sedimentarias delimitadas por material rocoso con una configuración tipo "barján". En general, el talud de las mismas se orienta hacia el sur-sureste. Sobre las rampas de las ondas de arena y en sectores de menor profundidad es común el desarrollo de megaóndulas. La composición de todas estas geoformas varía desde arena gruesa a fina (0,28 phi-2,31 phi). Las lineaciones sedimentarias se encuentran a partir de los 8 m de profundidad sobre la plataforma adyacente al delta de marea. Se agrupan en dos tipos: 1) franjas con espaciamiento del orden de los 10 m; 2) franjas con espaciamiento de 30-40 m. Estas acumulaciones arenosas, cuyo relieve no supera el metro, alcanzan los 200 m de longitud. Asociadas a las mismas se producen marcas de cometa ("comet marks"). La generación de ambas geoformas se relaciona a un sedimento arenoso movilizado sobre un sustrato gravoso.

La estrecha relación entre la dinámica sedimentaria y formas de fondo es evidente y refleja un transporte neto como carga de fondo hacia el exterior de la bahía de San Antonio. El análisis morfológico determina la coexistencia de las diferentes formas mencionadas, las que se ordenan en sucesión lateral según el siguiente patrón: 1) ondas de arena y megaóndulas, 2) lineaciones sedimentarias de pequeño espaciamiento y marcas de cometa, 3) lineaciones de gran espaciamiento. La disponibilidad de sedimento es el factor preponderante que define la generación secuencial de las diversas formas de fondo. Así, los sectores que reciben mayor aporte del interior de la bahía de San Antonio se caracterizan por el desarrollo de ondas de arena. En cambio en aquellas zonas intermedias con menor disponibilidad de sedimento, las lineaciones arenosas y marcas de cometa resultan el rasgo característico.

Palabras clave: Formas de fondo, Sedimentos, Golfo San Matías.

Key words: Bedforms, Sediments, San Matías Gulf.

EXTENDED ABSTRACT

In the north patagonian coast (NW corner of San Matías Gulf), at the inlet of San Antonio Bay, an extended tidal delta develops to depths of 14 m. A semidiurnal tidal regime, with spring ranges of about 9 m, is the main circulation factor. The more important morphological

features are the presence of intertidal banks attached to the main channel and the asymmetry of the ebb tidal delta resulting from the interactions of waves coming from the east and wind-driven currents from the west.

By means of seismo-acoustic methods (side-scan sonar and precision depth surveys) and sampling of bottom sediments, an analysis of the bedform sequence (sand

waves, megaripples, sand ribbons, comet marks) was carried out in order to recognize the environmental conditions responsible for their generation and to improve the knowledge of the regional sedimentary dynamics.

Sand waves develop at different sectors (Fig. 2). The larger ones, up to 4 m high, are found isolated at the deepest parts and have a "barchan type" configuration (Fig. 3). Asymmetrical sand waves up to 2 m high are also observed on depressions confined to rocky bottoms; their slopes are oriented to the south. Over the stoss sides, oblique megaripples run 30°-40° with respect to the sand wave crests (Fig. 4). On the outer platform, sand waves do not exceed 1.5 m in height and are grouped in well defined fields. They generally slope to the S-SE, although their crests pattern is variable (Fig. 2). Megaripples are found on the shallower areas. All these bedforms are composed of coarse to fine sands (mean size from 0.28 phi to 2.31 phi).

The sedimentary lineations are mostly sand ribbons, (according to Kenyon, 1970) and develop on the adjacent shallow shelf, at minimum depths of 8 m (Fig. 2). Their heights are less than 1 m, and can be grouped into two types, according to their spacing: 1) ribbons with spacing in the order of 10 m; and 2) ribbons with 30-40 m spacings (Fig. 5). Their lengths reach more than 200 m and their orientations vary between N140° and N170°, depending on location (Fig. 2). Sonographs also permitted to establish the presence of comet marks (Werner & Newton, 1975), mainly associated with sand-ribbon fields. Both bedforms are composed of sand moving over a reflective substrate mostly composed of gravels.

The asymmetrical sand waves developed on the bottom of the main channel, have straight or "barchan-like" crests, and indicate a net offshore sediment transport.

The detailed morphologic analysis of the shallow shelf adjacent to San Antonio Bay establishes the coexistence of different bedforms occupying contiguous sectors. The scheme of figure 10 shows the lateral sequence of the bedforms: 1) sand waves; 2) short-spaced sand ribbons; 3) long-spaced sand ribbons.

The mostly sharp, although slightly transitional in some places, boundaries between different bedforms suggest that these differences cannot be assigned to variations in flow intensity. On the other hand, the bedforms are not dependent upon depth, as within a few tens of meters they change without significant depth variations. Sediment availability is therefore the prime factor in the development of bedform types. The sectors with higher sediment availability are characterized by sand waves. The source material comes from the coastal system, from the inner environments of San Antonio Bay (Fig. 10). At intermediate zones, with less sediment input, sand ribbons occur. In sum,

sand waves develop in sectors having a thick sediment layer which allows their development; sand ribbons and comet marks are formed in areas with a thin bedload transport layer (Fig. 11).

INTRODUCCIÓN

Cuando una corriente actúa sobre un fondo compuesto por materiales inconsolidados, con una velocidad mayor que aquella de iniciación de movimiento de las partículas, se establece una interacción dinámica inestable entre el fluido y los sedimentos de fondo. Es por ello que las características físicas de las formas así generadas responden directamente a un modelo de flujo particular (Allen, 1968a). Son muy numerosos los trabajos realizados sobre diversas plataformas marinas donde las formas de fondo han resultado excelentes indicadores del transporte sedimentario dominante. Entre ellos pueden mencionarse: Ludwick (1972), Stride (1973), Bokuniewicz *et al.* (1977), Langhorne (1982), Harris (1988), Nelson *et al.* (1993), entre otros.

Al considerar las escasas investigaciones llevadas a cabo en el sector marítimo argentino, notamos que en su mayoría éstas sólo mencionan a ondas de arena como formas de fondo relevantes (Urien & Ewing, 1974; Mouzo & Garza, 1974; Aliotta, 1987; Achilli & Aliotta, 1992; Aliotta *et al.*, 1999). El empleo de sonar de barrido lateral en la prospección marina ha posibilitado definir una amplia variedad de geoformas. Siguiendo el criterio de Werner & Newton (1975) éstas se agrupan como formas transversales (megaóndulas y ondas de arena) y longitudinales (marcas de cometa y lineaciones sedimentarias). Estas últimas formas son estudiadas en sectores de la región marítima argentina en los trabajos de Isla & Aliotta (1999) y Aliotta *et al.* (2000).

La presente investigación es un análisis de rasgos morfológicos de fondo asociados a un régimen macromareal sobre la costa norte del golfo San Matías. El estudio de las geoformas presentes es conducente a inferir las condiciones físicas ambientales referidas a su generación y a completar el conocimiento de la dinámica sedimentaria regional.

El área de trabajo corresponde a la zona externa de la bahía de San Antonio (NO del golfo San Matías), provincia de Río Negro (Fig. 1). Allí se desarrolla un gran delta de marea, el que por sus características morfológicas responde al predominio de corrientes de reflujos (Schnack *et al.*, 1986). La orientación de grandes ondas de arena asimétricas confirma esta dinámica (Aliotta *et al.*, 1993; Schnack *et al.*, 1996). La zona estudiada cubre un sector marino que incluye el canal de reflujos (12 km de largo y 37

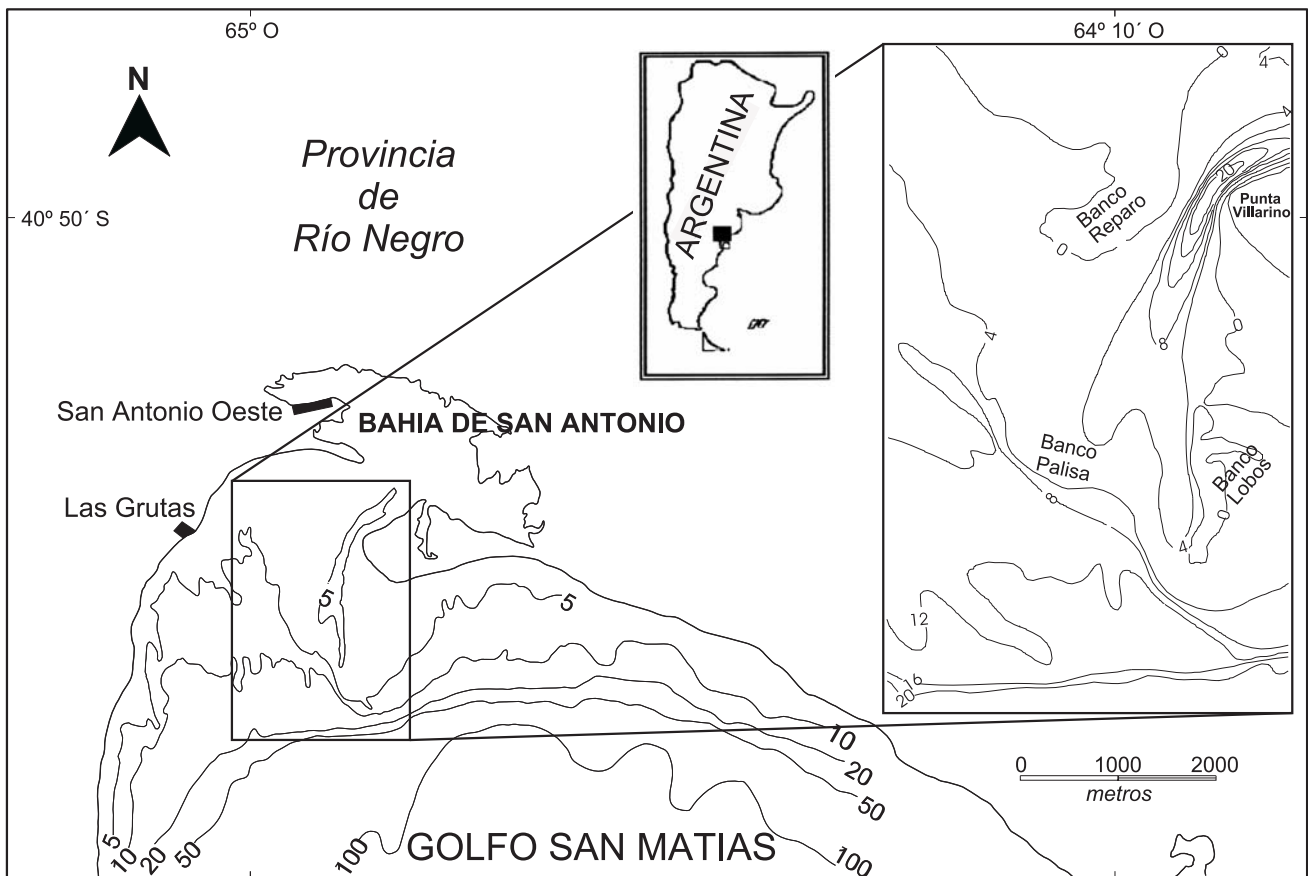


Figura 1. Área de estudio.
Figure 1. Study area.

m de profundidad) y la parte frontal del lóbulo terminal del delta hasta una profundidad de 14 m (Fig. 1). Las profundidades están referidas al plano de reducción (4,45 m debajo del nivel medio del mar).

El régimen hidráulico de la zona es establecido por una marea de carácter semidiurna, con amplitudes máximas de sicigias de hasta 9 m. Datos de corrientes de marea, solo se conocen los que mencionan las cartas del Servicio de Hidrografía Naval, que indican valores máximos del orden de 2 m/seg. Bajo estas condiciones de alta energía los bancos intermareales existentes (Reparó, Palisa y Lobos) están sujetos a una intensa morfodinámica (Isla *et al.*, 1995).

MÉTODOS DE TRABAJO

Se llevaron a cabo tres campañas oceanográficas de relevamiento geomorfológico y sedimentológico de fondo. Durante las mismas se empleó el sistema de posicionamiento de triangulación electrónica TRISPONDER DEL NORTE. Los datos morfológicos fueron obtenidos por

medio de prospección acústica en forma continua a través de ecosonda (RAYTHEON DE-719B, 208 kHz) y sonar de barrido lateral (EG & G SMS 960, 105 kHz). Los sonogramas obtenidos fueron corregidos con el objeto de eliminar deformaciones de escala.

La caracterización de los sedimentos de fondo se realizó a través de la obtención de 19 muestras superficiales (Fig. 2) con un extractor a mandíbulas (Snapper). Estas permitieron definir sedimentológicamente los diversos fondos diferenciados acústicamente con el sonar lateral. Para el análisis granulométrico se procedió al tamizado del material con un intervalo de 0,5 phi, siguiendo la metodología estándar de Folk (1974). El tamaño medio y la selección granulométrica se determinaron según las formulas de Folk & Ward (1957).

FORMAS DE FONDO

En el área considerada la conjunción entre los procesos erosivos y depositacionales, generados por las condiciones hidrodinámicas de fondo, ha llevado al desarrollo

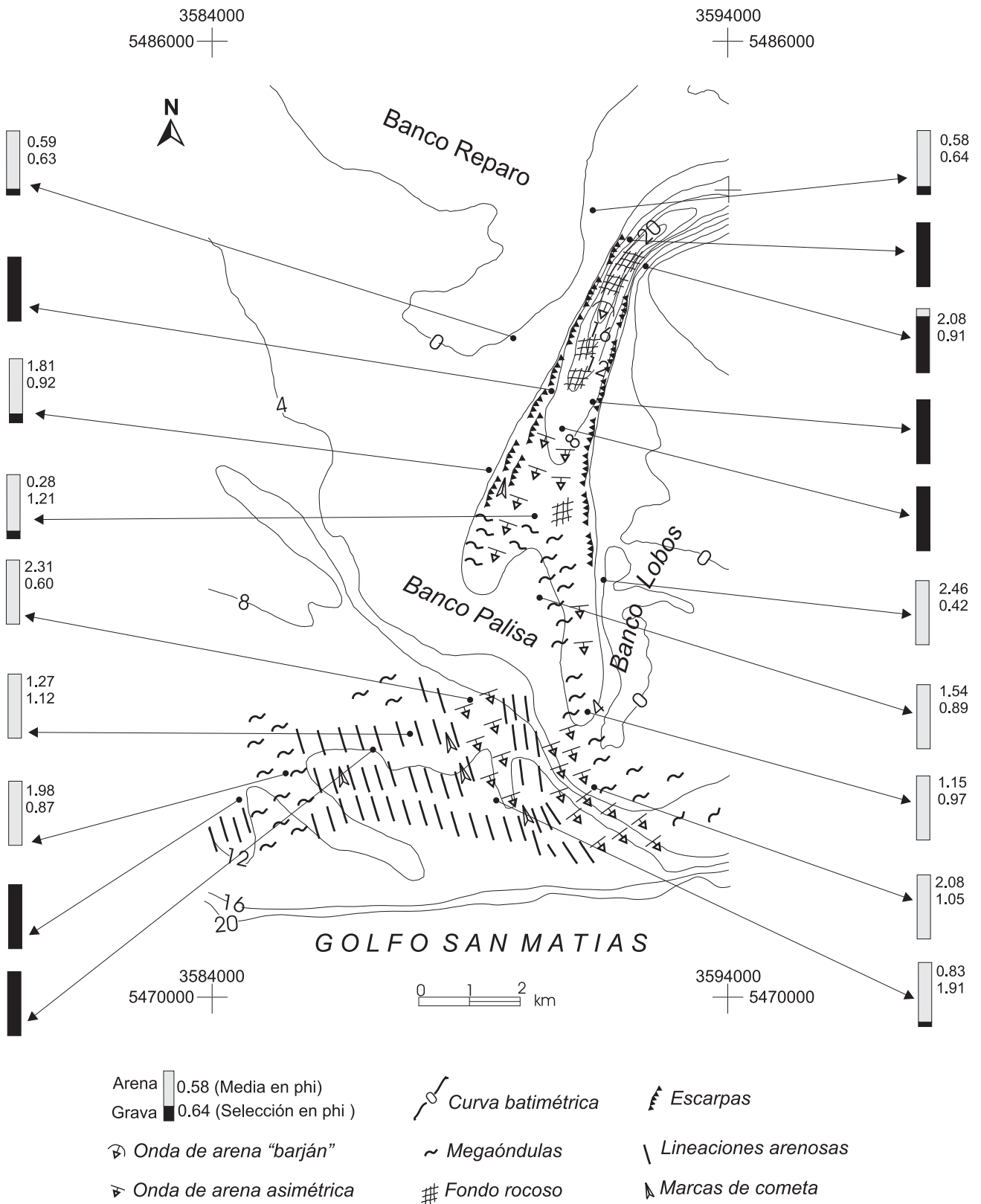


Figura 2. Distribución de formas de fondo y muestras sedimentológicas.
 Figure 2. Bedforms and sedimentological samples distribution.

Desarrollo secuencial de formas de fondo en un régimen macromareal

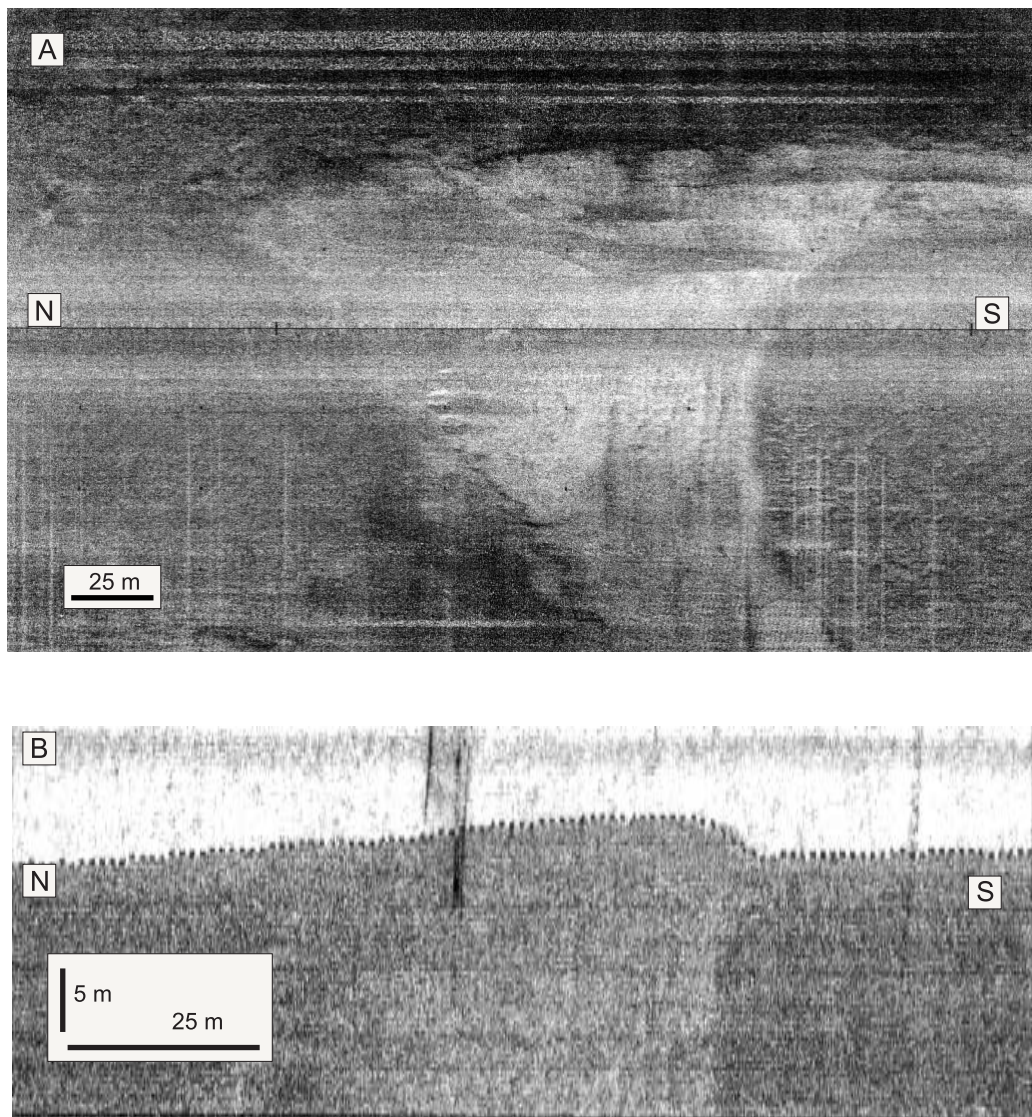
de diversos tipos de formas. Estas poseen características morfológicas y sedimentológicas particulares cuya evaluación solamente resulta posible con los sistemas acústicos empleados.

Ondas de arena

Las ondas de arena se presentan en diversos sectores del área, en forma aislada o agrupadas en campos. En el canal que conecta la bahía de San Antonio con la plataforma adyacente sus alturas varían entre 4 y 0,5 m. Las más elevadas se desarrollan aisladas en el sector de mayor profundidad (Fig. 2) y tienen la particularidad que sus crestas poseen configuración barjanóide (Fig. 3), con extremos curvos y orientados hacia el sur o sector externo.

Al norte y al este del banco Palisa (Fig. 2), en cubetas sedimentarias cuyos límites son establecidos por material rocoso (Fig. 4), se observaron ondas de hasta 2 m de alto, con un perfil marcadamente asimétrico y talud orientado hacia el sur. Sus crestas tienen un elevado paralelismo y sobre las rampas se generan megaóndulas levemente arqueadas, y dispuestas oblicuamente ($30^\circ - 40^\circ$) con respecto a la cresta de las ondas de arena (Fig. 4).

La configuración de este tipo de geoformas sobre la plataforma externa del delta de reflujo adquiere características sensiblemente diferentes a las mencionadas. Aquí, las ondas no superan 1,5 m de altura y se agrupan en campos bien definidos. La asimetría de su perfil topográfico es leve, con su talud hacia el sur-sureste. En planta las crestas son sinuosas y con un elevado grado de paralelismo. Su



**Figura 3. Sonograma con onda de arena tipo "barján." a) planta, b) perfil.
Figure 3. Sonogram with "barchan-type" sand wave. A) Plan, B) Profile.**

orientación o disposición es cambiante en relación al sector considerado (Fig. 2).

En sectores de menores profundidades, especialmente los adyacentes a los bancos Palisa y Lobos, se observaron megaóndulas como formas representativas. Sus alturas son inferiores a 0,5 m y su longitud de onda es del orden de los 5 m. Su perfil no posee una asimetría muy marcada, aunque en general se orientan con su talud hacia el sur.

Las muestras de fondo han determinado que las ondas como las megaóndulas se hallan constituidas por sedimento granulométricamente muy dispar, variando desde arena gruesa a fina (los valores de media oscilan entre 0,28 phi y 2,31 phi, Fig. 2).

Lineaciones sedimentarias

Los sonogramas permiten visualizar sobre el fondo marino acumulaciones arenosas elongadas, poco reflectivas

(tonalidades claras en la registración), sobre un basamento duro y altamente reflectivo (tonos oscuros). Las lineaciones sedimentarias halladas se encuadran genéricamente dentro de la definición de "sand ribbons" (Kenyon, 1970). Se desarrollan a partir de los 8 m de profundidad en la plataforma marina adyacente al delta de marea (Fig. 2). Si bien las características físicas de estos rasgos morfosedimentológicos resultan sumamente cambiantes, las alturas de estos depósitos no superan el metro y constituyen una topografía ondulante.

En función del espaciamiento que presentan las franjas sedimentarias se han agrupado en dos tipos: 1) franjas con un espaciamiento de 30-40 m (Fig. 5, A); y 2) franjas con espaciamiento del orden de los 10 m (Fig. 5, B). Estas acumulaciones arenosas se diferencian acústicamente, dado que en el primer caso se presentan con sus límites netos, bien definidos; mientras que en las de mayor espaciamiento una menor concentración de sedimento produce un depósito con características acústicas más difusas en los

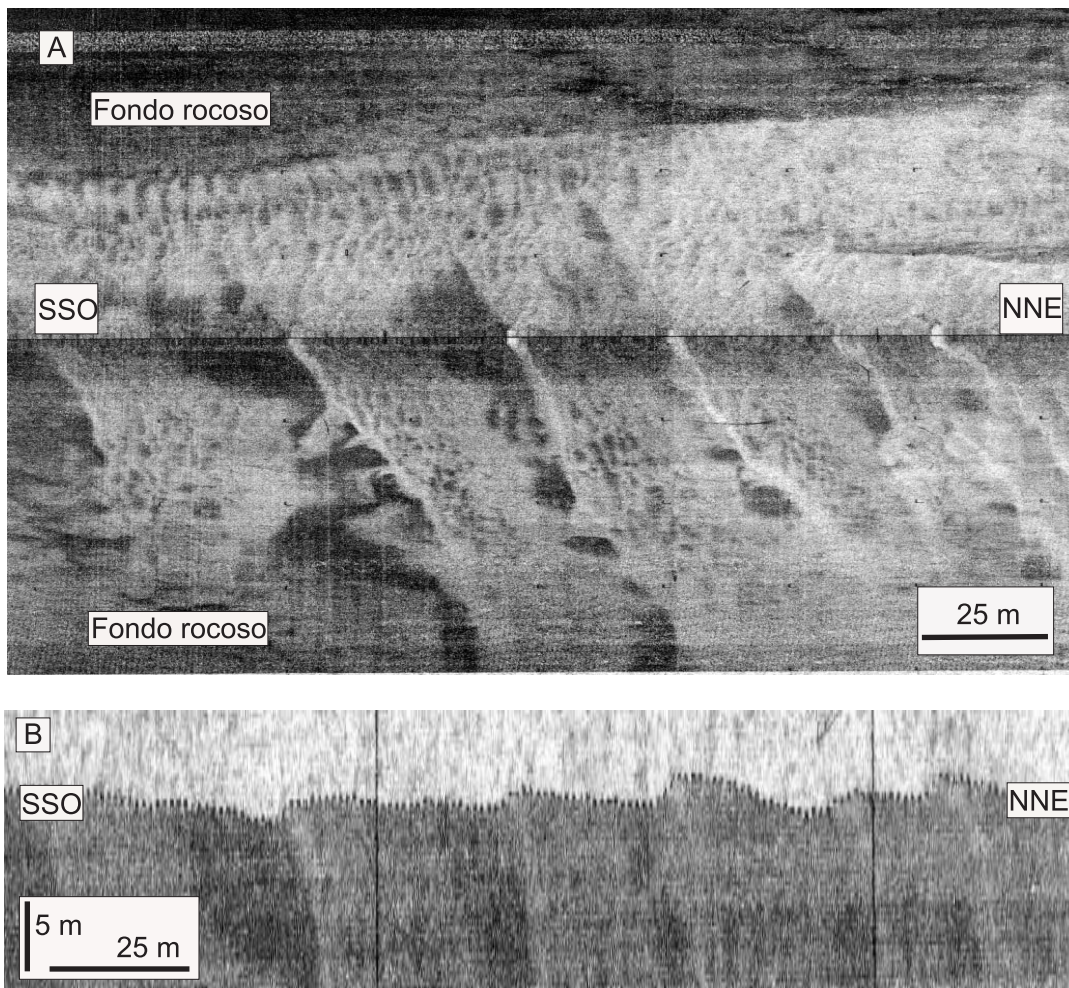


Figura 4. Sonograma de ondas de arena con megaóndulas. A) Planta, B) Perfil.
Figure 4. Sonogram of sand waves with megaripples. A) Plan, B) Profile.

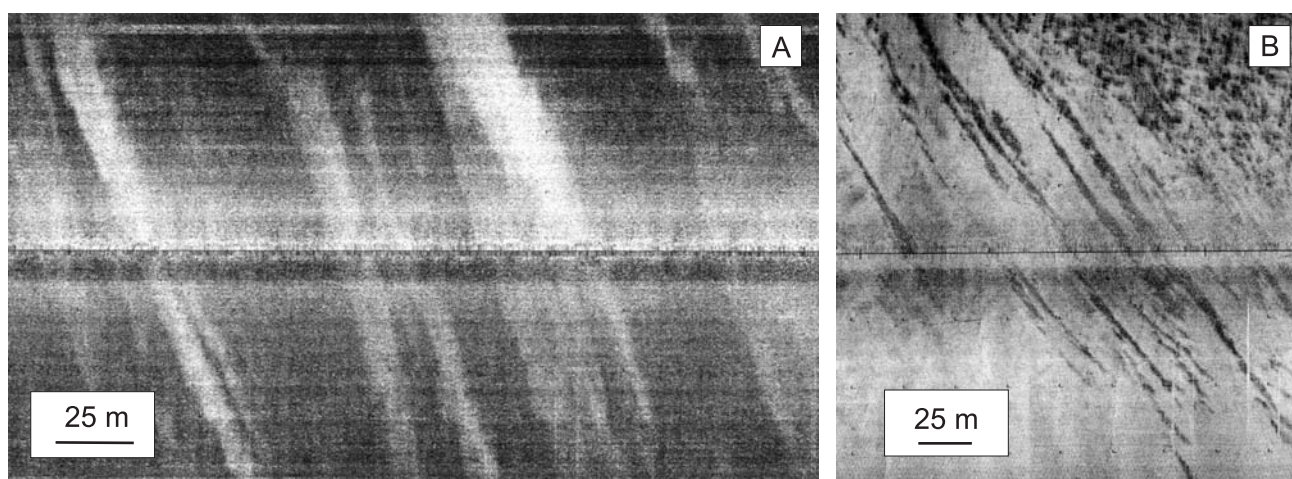


Figura 5. Sonograma con lineaciones sedimentarias. A) de gran espaciamiento, B) de pequeño espaciamiento.
Figure 5. Sonogram with sand ribbons. A) of great spacing, B) of small spacing.

sonogramas (Fig. 5).

Con respecto a la longitud, estas geoformas superan los 200 m (ancho de barrido de los sonogramas), observándose a través de la correlación de algunos registros una continuidad de hasta 1 km. El azimut de las lineaciones es variable entre N140° y N170°, dependiendo de su localización (Fig. 2). En el sector sureste se dan los menores valores azimutales.

Por medio de la información obtenida con sonar lateral fue posible la correcta correlación entre las muestras obtenidas y las formas de fondo (Fig. 2). De tal manera se determinó inequívocamente que la franja de baja reflectividad acústica (tonos claros en los sonogramas) corresponde a una arena mediana, pobremente seleccionada (media estadística: 1,27 phi; desviación estándar: 1,12 phi). La base de estos depósitos, altamente reflectiva, se compone principalmente de material gravoso constituido por rodados de 1 a 3 cm y abundantes restos biogénicos con elevado índice de fragmentación.

Marcas de cometa

Las marcas de cometa son rasgos erosivos elongados, en los cuales queda expuesto un fondo duro o con sedimento grueso entre áreas con material arenoso móvil (Werner & Newton, 1975). Un obstáculo sobre el fondo genera un proceso turbulento orientado según la corriente dominante que erosiona y moviliza el sedimento más fino. El sector afectado adquiere una configuración de cola de cometa.

Estas geoformas se encuentran saltuariamente sobre toda el área estudiada, aunque su aparición es más frecuente en la plataforma (Fig. 2). El largo de la "cola", iden-

tificable en los sonogramas por su alta reflectividad, es del orden de 50-80 m, siendo su anchura aproximadamente 1/4 -1/5 de su longitud (Fig. 6). Su composición es material gravoso, de igual característica que aquel de la base de las lineaciones sedimentarias.

DISCUSIÓN Y CONCLUSIÓN

La relación entre dinámica sedimentaria y formas de fondo es estrecha. A través de las mismas, ya sea por el análisis de geoformas aisladas, en grupo o secuencia de ellas es posible inferir las condiciones hidrodinámicas y sedimentológicas ambientales. En la evaluación de la distribución de los diversos tipos de formas halladas son tres los factores que deben ser considerados: velocidad de corriente, profundidad de agua y disponibilidad de sedimento.

Las formas de fondo en general, y las ondas de arena en particular, son excelentes indicadores de la dirección predominante del transporte de sedimento como carga de fondo. Su asimetría y la presencia de megaóndulas sobre su rampa señalan el sentido de migración de la estructura (Ludwick, 1972; Boothroyd & Hubbard, 1975; Bouma *et al.*, 1977; Aliotta & Perillo, 1987). En el sector de estudio, ondas marcadamente asimétricas con crestas dispuestas en forma paralela o en barján definen hidráulicamente como un gran canal de refluo aquel que une la bahía de San Antonio y su plataforma adyacente. Así, el dominio de las corrientes de bajante establecen un transporte neto de material hacia el exterior de la bahía.

Las ondas de arena que se desarrollan sobre la plataforma exterior, de menor altitud que las mencionadas, se

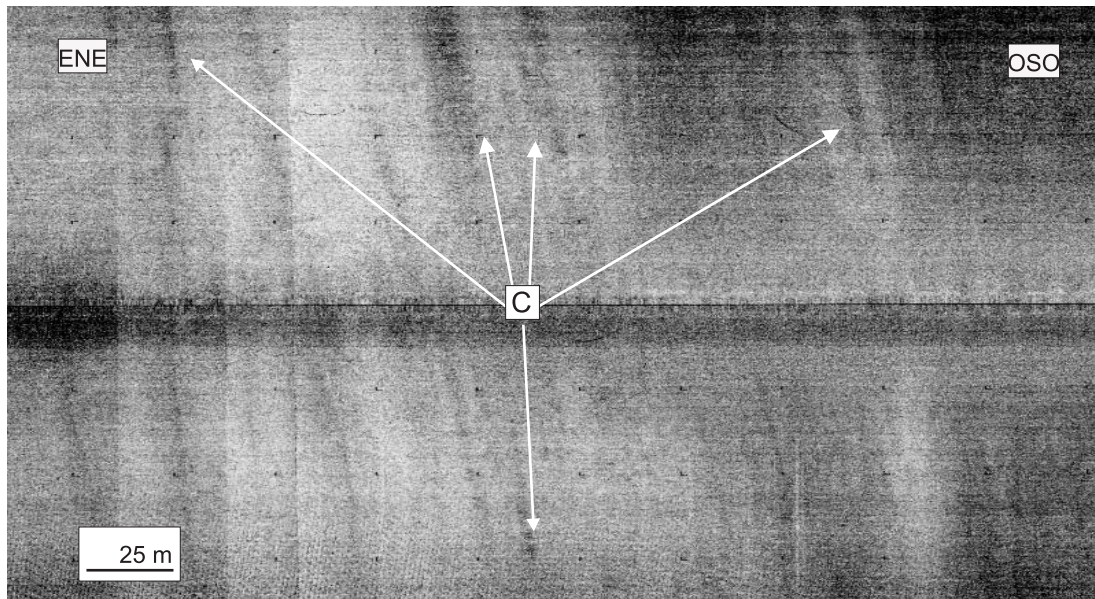


Figura 6. Registro de sonar lateral con marcas de cometa (C).
Figure 6. Side scan sonar record with comet marks (C).

agrupan en campos (Fig. 2) formando una sucesión continua. Para la formación de ondas de arena se pueden definir ciertos límites dentro de un rango de profundidad, velocidad de corriente y tamaño de sedimento. De estos tres parámetros, la profundidad es la que mejor controla la altura de la geoforma (Rubin & Mc Culloch, 1980). La figura 7 muestra la relación empírica establecida por Allen (1970) y los datos de los diversos tipos de ondas de arena encontradas en el área. Se observa que aquéllas que se desarrollan dentro del canal de reflujo se ajustan medianamente bien a la ecuación planteada. En cambio los datos correspondientes a las ondas de la plataforma no guardan relación con la ecuación. Su distribución es de carácter similar a las halladas por Bokuniewicz *et al.* (1977) y por Aliotta (1987), en donde la ecuación mencionada sólo representa el límite máximo de la altura de las ondas. Así, el desarrollo de las formas de menor altitud sobre la plataforma resultan independientes de la profundidad y se asocian a corriente con velocidades inferiores de las del canal de reflujo.

El escaso volumen sedimentario que es movilizad por el canal de reflujo produce que las ondas de arena se desarrollen en cubetas o sectores muy restringidos, cuyos límites son claramente definidos por afloramientos rocosos (Fig. 4). Por otro lado, la configuración de las crestas de las ondas resulta indicativa de la intensidad de la corriente. Sobre la base de la secuencia experimental establecida por Allen (1968a) se infiere que en el sector norte, con ondas arqueadas y mayor profundidad, se producen

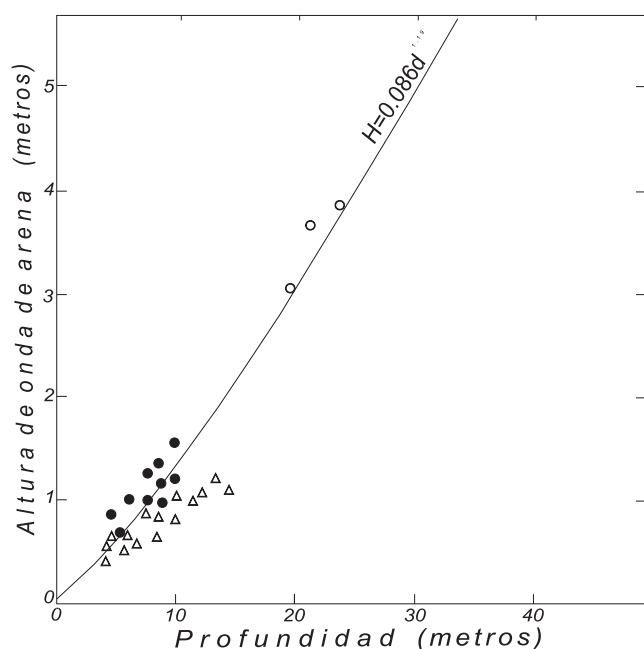
las mayores velocidades de corriente.

Características morfodinámicas dignas de mención son las megaóndulas emplazadas oblicuamente sobre las rampas de ondas de arena. Se observó que en aquellas que se encuentran oblicuas al eje del canal se forman megaóndulas dispuestas en ángulo con respecto a la cresta de la geoforma mayor (Fig. 4). Esta angularidad demuestra que la corriente de marea alcanza valores de velocidad suficientemente elevados como para producir separación del flujo y generación de una corriente de fondo paralela a la cresta (Allen, 1968a).

Hacia el sur, sobre el lóbulo terminal del delta de reflujo, se originan lineaciones sedimentarias paralelas a la corriente de fondo dominante. Sobre un sustrato constituido por material gravoso, y cuyo origen se relaciona a antiguos procesos transgresivos cuaternarios (Angulo *et al.*, 1978), se moviliza una arena mediana agrupada en franjas de anchos y densidades variables (característica acústicamente observable). Estas geoformas resultan un rasgo común en plataformas marinas con elevados regímenes de flujo (Kenyon, 1970; Amos & King, 1984), con velocidades de corriente máximas del orden de 1 m/seg.

A partir del espaciamiento entre las lineaciones arenosas halladas se pueden diferenciar dos tipos: 1) Las que presentan una separación pequeña de no más de 10 m y 2) las lineaciones sedimentarias con gran espaciamiento, cuyo valor medio es del orden de los 35 m. Las primeras son comparables a los "sand streamers" enunciados por Fleming (1980) y Belderson *et al.*, (1982). En el mar Báltico tam-

Desarrollo secuencial de formas de fondo en un régimen macromareal



| Ondas de Arena | | |
|--------------------------|------------------------------|---------------------|
| Característica en planta | | Ubicación |
| ○ | Barján (aislada) | Canal de refluo |
| ● | Cresta recta (en sucesión) | Canal de refluo |
| △ | Cresta sinuosa (en sucesión) | Plataforma exterior |

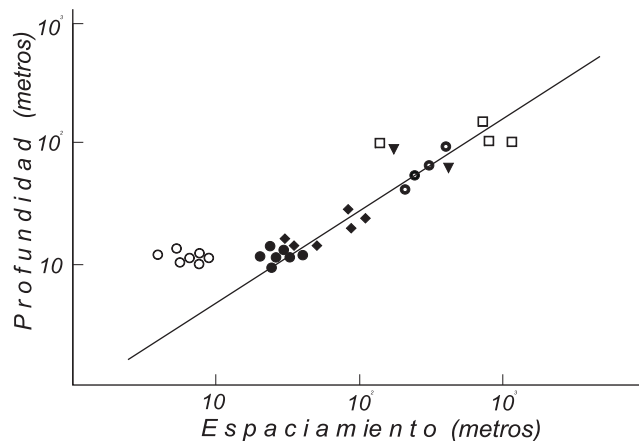
Figura 7. Relación profundidad - altura de onda de arena.
Figure 7. Depth-sand wave height relationship.

bién fueron observadas lineaciones sedimentarias con espaciamentos variables (Werner & Newton, 1975; Kuijpers *et al.*, 1993).

Diversos autores plantean que el espaciamento entre las lineaciones es una variable que se halla en función de la profundidad de agua. Datos experimentales de laboratorio determinan que el espaciado entre las geoformas será de 2 a 3 veces la profundidad de flujo (Mc Lean, 1981). Valores de espaciamento determinados a lo largo de la plataforma estudiada fueron incluidos en la relación establecida por Allen (1968b) con información de campo de otros autores (Fig. 8). Mientras las lineaciones con espaciamentos mayores resultan coincidentes con la recta de regresión definida, los datos correspondientes a las de pequeño espaciamento se alejan notablemente de la misma. Esto sugiere la independencia de estas formas con respecto a la profundidad de agua o al menos una relación con la profundidad diferente que aquella establecida para las lineaciones con gran espaciamento.

En la generación de las lineaciones sedimentarias interviene un proceso turbulento conformado por un flujo de estructura helicoidal (Allen, 1966, 1968a; Wilson, 1972), con corrientes de fondo localmente transversales a la componente principal del flujo. Mc Lean (1981) define que las diferencias en la rugosidad del fondo entre las acumulaciones arenosas y las franjas gravosas producen y tienden a mantener dicho modelo circulatorio. Al respecto, Werner & Newton (1975) plantean la hipótesis que la diferencia de espaciado en las lineaciones sedimentarias se vincula a la amplitud del vórtice helicoidal. Así, espaciamentos grandes serán generados por una estructura de flujo que afecta toda la columna de agua, en tanto flujos helicoidales sólo en la parte inferior generarían espaciamentos menores.

Una evaluación de la distribución de las diversas geoformas presentes sobre la plataforma estudiada permite definir un modelo secuencial referido al desarrollo de las mismas. Es así como las franjas arenosas con espaciamento pequeño siempre se disponen en un sector contiguo a los campos de megaóndulas y ondas de arena (Fig. 9). De tal manera es posible establecer una secuencia de transformación lateral de las formas de fondo: 1) ondas de arena y megaóndulas, 2) lineaciones sedimentarias de



| REFERENCIAS | |
|-------------|------------------------|
| ○ | espaciamento pequeño |
| ● | espaciamento grande |
| ◆ | Werner y Newton (1975) |
| ● | Allen (1968b) |
| ▼ | Kenyon (1970) |
| □ | Kenyon y Stride (1970) |

Figura 8. Relación espaciamento de lineación sedimentaria - profundidad.

Figure 8. Sand ribbon spacing - depth relationship.

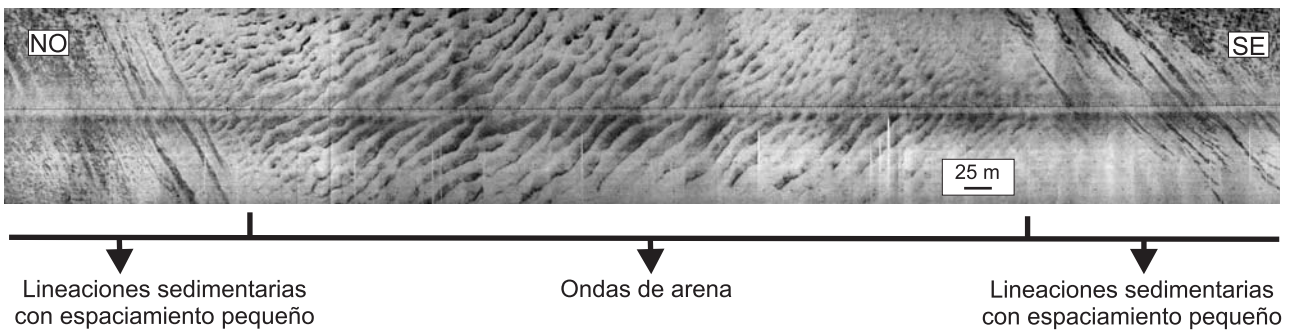


Figura 9. Sonograma con campo de ondas de arena limitado por lineaciones sedimentarias de espaciamento pequeño.

Figure 9. Sonogram with a sand wave field limited by small-spacing sand ribbons

pequeño espaciamento y marcas de cometa, 3) lineaciones sedimentarias de gran espaciamento.

Sobre la base de la información acústica de fondo se realizó la esquematización de detalle que muestra la distribución secuencial a lo largo de todo el sector de plataforma estudiado (Fig. 10). La disponibilidad sedimentaria resulta el factor principal que define la generación de los diversos tipos de formas de fondo. La variación de las geoformas en sentido lateral a la dirección de corriente predominante resulta congruente con ensayos de laboratorio (Mc Lean, 1981) y estudios realizados sobre ambien-

tes naturales macromareales (Kenyon, 1970; Werner & Newton, 1975; Kuijpers *et al.*, 1993). En nuestro caso, dentro de la secuencia de geoformas halladas, los sectores que reciben mayor aporte sedimentario se caracterizan por el desarrollo de ondas de arena. El material generador de las mismas proviene del sistema costero (interior de la bahía de San Antonio), como carga de fondo aportada por corrientes de reflujo (Fig. 10). En cambio, en aquellas zonas intermedias, con aporte sedimentario relativamente menor, las lineaciones arenosas resultan el rasgo de fondo característico.

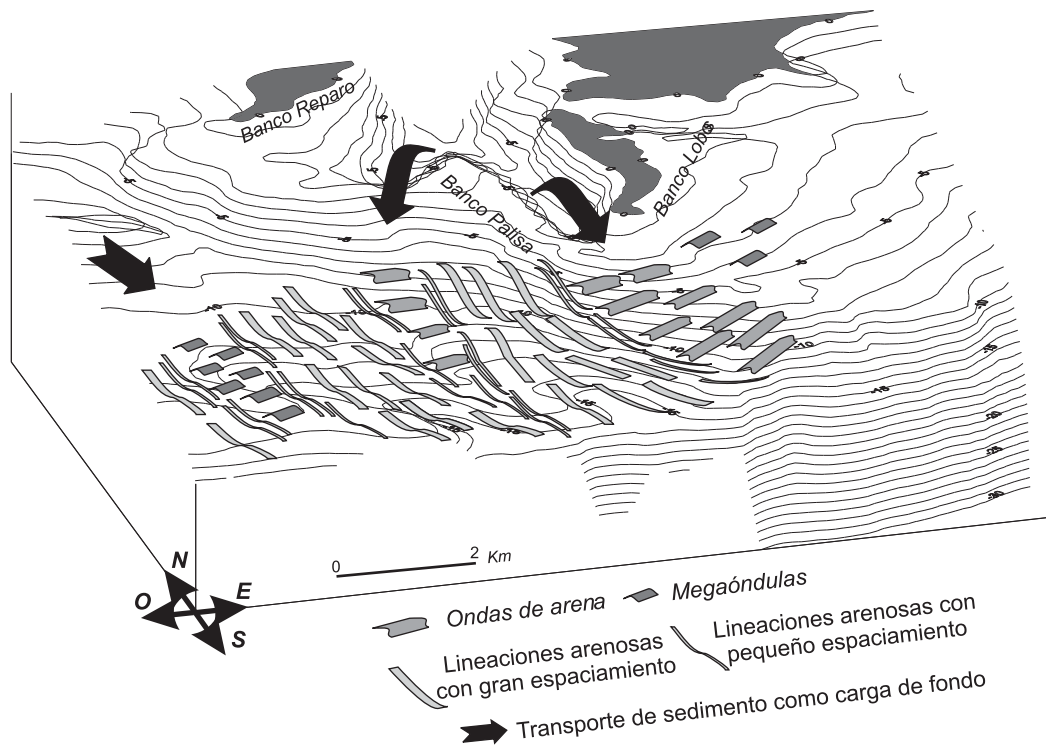


Figura 10. Diagrama 3D de la distribución secuencial de formas de fondo sobre la plataforma.

Figure 10. 3D Diagram of the sequential distribution of bedforms on the shelf.

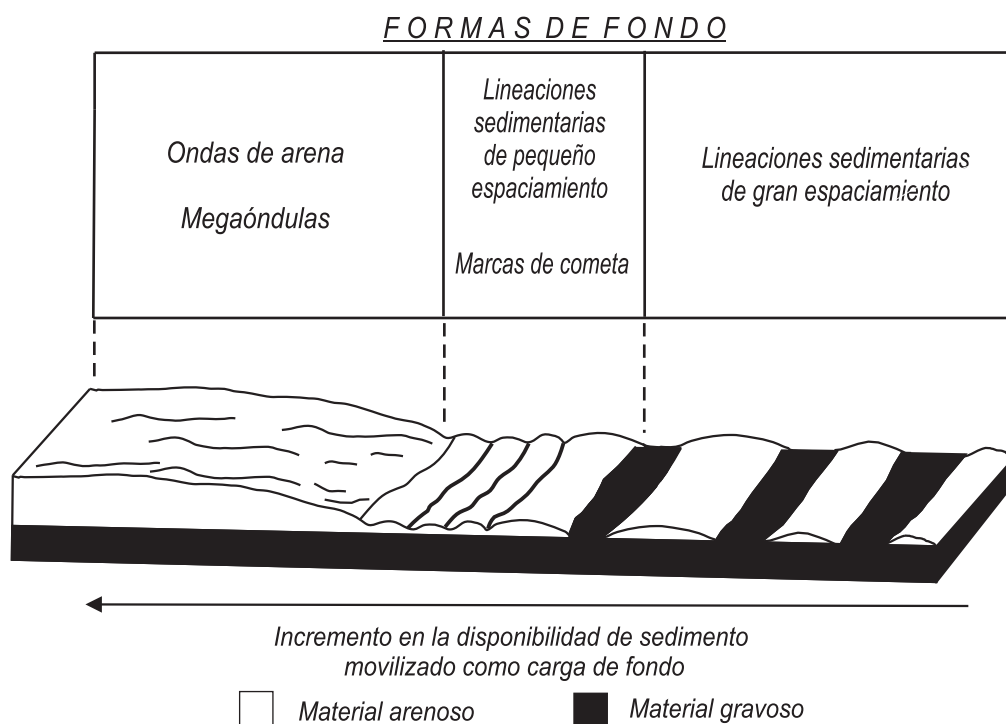


Figura 11. Relación esquemática entre tipo de formas de fondo y disponibilidad sedimentaria.
 Figure 11. Schematic relationship between bedform and sediment availability, sedimentary readiness.

Sobre la plataforma estudiada las ondas de arena y lineaciones arenosas se disponen según la corriente de marea dominante. Las marcas de cometa, si bien son rasgos erosivos que aparecen exclusivamente en los sectores con escasa cubierta arenosa, coexisten principalmente con lineaciones sedimentarias de pequeño espaciamiento. Resultan también formas diagnósticas de las condiciones físicas del medio. No sólo se asocian a velocidades de corriente mayores a 60 cm/seg (Kuijpers *et al.*, 1993), sino que también son indicadoras de la dirección del transporte de sedimento como carga de fondo. Por otro lado, de la observación analítica de la distribución de las geoformas (Fig. 2 y 10), se concluye que todo el arreglo secuencial en su conjunto tiende a orientarse hacia el sureste, evidenciando la dinámica sedimentaria regional.

Por último, realizando una evaluación genérica de las geoformas, se considera que la disponibilidad de material arenoso movilizado como carga de fondo resulta el factor determinativo, aunque no el único, para la generación secuencial de los diversos tipos de formas desarrolladas. A medida que se incrementa la disponibilidad sedimentaria se establece una sucesión compuesta por: lineaciones sedimentarias con gran espaciamiento - lineaciones sedimentarias con espaciamiento pequeño y marcas de cometa - ondas de arena y megaóndulas (Fig. 11).

Agradecimientos. Al Dr. H. Vacas, Dr. E. Zampatti y personal del IBMP "Alte. Storni" por su colaboración en distintas fases organizativas y operativas del proyecto. A la Prefectura Naval Argentina por su apoyo en las campañas. Al Téc. R. Zibecchi por su valiosa asistencia en las tareas de campo y al Téc. H. Pellegrini por el procesamiento sedimentológico de las muestras. A los revisores Dr. L. Spalletti, Dr. O. Orfeo y Dr. G. Perillo. La fase inicial y relevamientos de campo de este trabajo se realizó mediante un subsidio PID-CONICET (1989-92), bajo la responsabilidad del Dr. E. Schnack.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- ACHILLI, S. M. & S. ALIOTTA, 1992. Características morfológicas de ondas de arena en la Plataforma Continental Argentina al sur de la Pcia. de Buenos Aires, Argentina. *Terceras Jornadas Geológicas Bonaerenses*, Actas: 207-212. La Plata.
- ALIOTTA, S., 1987. Estudio de la geomorfología y de la dinámica sedimentaria del Estuario de Bahía Blanca entre Pto. Rosales y Fondeadero. Tesis Doctoral. *Departamento de Geología, Universidad Nacional del Sur*. 180 pp. (inédito)
- ALIOTTA, S. & G. M. E. PERILLO, 1987. A sand wave field in the entrance to Bahía Blanca Estuary, Argentina.

Marine Geology 76: 1-14.

ALIOTTA, S.; F. ISLA & E. SCHNACK, 1993. Rasgos morfológicos de fondo en el canal de acceso a la Bahía de San Antonio, Pcia. de Río Negro. *Jornadas Nacionales de Ciencias del Mar '93*, Resúmenes: 178. Pto. Madryn. Chubut.

ALIOTTA, S.; E. SCHNACK; F. ISLA & G. O. LIZASOAIN, 2000. Desarrollo secuencial de formas de fondo en un régimen macromareal. *Segundo Congreso Latinoamericano de Sedimentología*, Resúmenes: 28-29. Mar del Plata.

ALIOTTA, S.; J. SPAGNUOLO; S. GINSBERG & E. GELOS, 1999. Sedimentos de fondo-subfondo y aspectos geomorfológicos de la plataforma continental entre el estuario de Bahía Blanca y bahía Anegada, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 6, 1-2: 19-35.

ALLEN, J. R. L., 1966. On bed forms and palaeocurrents. *Sedimentology* 6:153-190.

ALLEN, J. R. L., 1968 a. Current Ripples: Their relation to patterns of water and sediment motion. *North-Holland Publishing*, Amsterdam. 433 pp.

ALLEN, J. R. L., 1968 b. The nature and origin of bed form hierarchies. *Sedimentology* 10: 161-182.

ALLEN, J. R. L., 1970. Physical Processes of Sedimentation. *American Elsevier*. New York. 248 pp.

AMOS, C. L. & E. L. KING, 1984. Bedforms of the Canadian eastern seaboard: a comparison with global occurrences. *Marine Geology* 57:167-208.

ANGULO, R.; F. FIDALGO; M. GOMEZ PERAL & E. SCHNACK, 1978. Las ingresiones marinas cuaternarias en la Bahía de San Antonio y zonas adyacentes, provincia de Río Negro. *Séptimo Congreso Geológico Argentino*, AGA, Actas: 271-283. Neuquén.

BELDERSON, R. H.; M. A. JOHNSON & N. H. KENYON, 1982. Bedforms. In: A. H. Stride (Editor), *Offshore Tidal Sands; Processes and Deposits*. Chapman & Hall. 27-57 pp. London.

BOKUNIEWICZ, H. I.; R. B. GORDON & K. A. KASTEUS, 1977. Form and migration of sand waves in a large estuary, Long Island Sound. *Marine Geology* 24:185-199.

BOOTHROYD, J. C. & D. K. HUBBARD, 1975. Genesis of bedforms in mesotidal estuaries. In Cronin, L. E. (Eds.). *Estuarine Research*, Vol. 2, Geology and Engineering. Academic Press, 217-234 pp. New York.

BOUMA, A. H.; M. A. HAMPTON & R. C. ORLANDO, 1977. Sand waves and other bedforms in lower Cook Inlet, Alaska. *Marine Geotechnology* 2: 291-308.

FLEMMING, B. W., 1980. Sediment transport and bedform patterns on the continental shelf between Durban and Port Elizabeth (South-east African continental margin).

Sedimentary Geology 26:179-205.

FOLK, R. L., 1974. Petrology of sedimentary rock. *Hemphill Pub. Co.*, Austin, Texas. 182 pp.

FOLK, R. L. & W. WARD, 1957. Brazos River Bar. A study in the significance of grain-size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27:3-27.

HARRIS, P. T., 1988. Sediments, bedforms and bedload transport pathways on the continental shelf adjacent to Torres Strait, Australia - Papua New Guinea. *Continental Shelf Research* 8(8):979-1003.

ISLA, F. & S. ALIOTTA, 1999. Storm dispersal of volcanogenic sands from Buenos Aires, Where heavy-metal concentrations are heavy-mineral segregations. *Marine Georesources & Geotechnology* 17:357-370.

ISLA, F.; E. SCHNACK & S. ALIOTTA, 1995. Evolution and sedimentary dynamics of San Antonio Bay, Río Negro, Argentina. *Quinto Congreso de la Asociación Brasileira de Estudos del Cuaternario - XI Symposium on Coastal Sedimentology*, ABEQUA, Anales: 6 pp. Río de Janeiro.

KENYON, N. H., 1970. Sand ribbons of European tidal seas. *Marine Geology* 9: 25-39.

KUIJPERS, A.; F. WERNER & J. RUMOHR, 1993. Sandwaves and other large-scale bedforms as indicators of non-tidal surge currents in the Skagerrak off northern Denmark. In: C. Liebezeit, T. C. E. Van Weering & J. Rumohr (Eds), *Holocene Sedimentation in the Skagerrak*. *Marine Geology* 111: 209-221.

LANGHORNE, D. N., 1982. A study of the dynamic of a marine sandwave. *Sedimentology* 29:571-594.

LUDWICK, J. C., 1972. Migration of tidal sand waves in Chesapeake Bay entrance. In D. J. P. Swift, D. B. Duane, & O. H. Pilkey, (Eds), *Shelf Sediment Transport: Process and Pattern*. Stroudsburg, Pa.: Dowden, Hutchinson & Ross, 337-410 pp.

MCLEAN, S. R., 1981. The role of non-uniform roughness in the formation of sand ribbons. *Marine Geology* 42: 49-74.

MOUZO, F. H. & M. L. GARZA, 1974. Contribución al conocimiento del substrato en un sector de la plataforma continental Argentina entre Mar del Plata y Bahía Blanca. *Contribución Científica Instituto Argentino de Oceanografía* 12: 16 pp.

NELSON, C. H.; J. BARAZA & A. MALDONADO, 1993. Mediterranean undercurrent sandy contourites, Gulf of Cadiz, Spain. *Sedimentary Geology* 82:103-131.

RUBIN, D. M. & D. S. MCCULLOCH, 1980. Single and superimposed bedforms: a synthesis of San Francisco Bay and flume observations. *Sedimentary Geology* 26:207-231.

SCHNACK, E. J.; S. ALIOTTA; F. I. ISLA & G. O. LIZASOAIN, 1996. Formas de fondo asociadas a un delta de reflujó macromareal, San Antonio Oeste, provincia de

Desarrollo secuencial de formas de fondo en un régimen macromareal

Río Negro, Argentina. *Revista de Ciencias del Mar Thalassas* 12:121-135.

SCHNACK, E. J.; J. L. DEL RIO & F. I. ISLA, 1986. Formas y dinámica del delta de reflujo de la Bahía de San Antonio, Río Negro. *Primera Reunión Argentina de Sedimentología*, Resúmenes expandidos 60-63, La Plata.

STRIDE, A. H., 1973. Sediment transport by the North Sea. *North Sea science*, MIT Press, 101-103.

URIEN, C. M. & M. EWING, 1974. Recent sediments and environments of Southern Brazil, Uruguay, Buenos Aires and Río Negro continental shelf. In: C. A. Burke & C. L. Drake (Eds), *The Geology of Continental Margins*, Springer Verlag, 157-177. New York.

WERNER, F. & R. NEWTON, 1975. The pattern of large-scale bed forms in the Langeland Belt (Baltic Sea). *Marine Geology* 19: 29-59.

WILSON, I. G., 1972. Aeolian bedforms - their development and origins. *Sedimentology* 19:173-210.

Salvador ALIOTTA
Guillermo O. LIZASOAIN
Instituto Argentino de Oceanografía (CONICET-UNS)
CC 804
8000 Bahía Blanca
República Argentina
Tel. (0291) 4861112
gmaliott@criba.edu.ar

Enrique J. SCHNACK
Laboratorio de Oceanografía Costera (CIC)
CC 45
1900 La Plata
República Argentina

Federico I. ISLA
Centro de Geología de Costas y del Cuaternario (CONICET)
CC 722
7600 Mar del Plata
República Argentina

Recibido: 31 de agosto de 2000.

Aceptado: 23 de diciembre de 2000.