

GEOMORFOLOGÍA Y DINÁMICA DEL CANAL SAN BLAS, PROVINCIA DE BUENOS AIRES (ARGENTINA)

Diana G. CUADRADO^{1,2} y *Eduardo A. GÓMEZ*^{1,3}

¹ CONICET-IADO. CC804. 8000. Bahía Blanca. Argentina

² Dto de Geología. UNS. San Juan 670. 8000. Bahía Blanca. Argentina

³ UTN Regional Bahía Blanca. 11 de Abril 360. 8000. Bahía Blanca. Argentina
cuadrado@criba.edu.ar - gmgomez@criba.edu.ar

Resumen: Se estudió la geomorfología submarina y se efectuaron mediciones de corrientes de marea en el canal San Blas para determinar la dinámica sedimentaria actual. Se relevó un sector del fondo del canal con el sistema batimétrico GeoSwath para describir exhaustivamente la morfología de un campo de dunas. Su asimetría permite inferir un transporte residual del material del fondo hacia el interior de la Bahía Anegada sobre el veril NE del canal. Se realizó un estudio de la dinámica de las corrientes de marea, determinándose sus velocidades y direcciones durante un ciclo completo de marea en toda la columna de agua y a lo largo de un perfil transversal a la costa mediante un ADCP. A pesar que el ambiente corresponde a un régimen micromareal (rango de marea alrededor de 2 m), en el canal San Blas existen fuertes corrientes de marea que desde el sector medio transportan todo el material inconsolidado del fondo, formando un delta de reflujo en la boca externa del canal y un delta de flujo en la Bahía Anegada. Se reconocieron diferentes geoformas costeras que permiten inferir un transporte litoral hacia el exterior del canal sobre la costa sur del mismo. Basándose en sus características morfodinámicas, es posible definir el canal San Blas como una entrada de marea que conecta el mar abierto con la Bahía Anegada.

Palabras clave: entrada de marea, corrientes de marea, morfología submarina, dunas subácueas, dinámica sedimentaria.

EXTENDED ABSTRACT

The Bahía Anegada is the coastal zone of the southern part of Buenos Aires Province (Argentina), where several environments are recognized: islands, inlets, marshes, tidal plains and different types of beaches. The Bahía San Blas is located at the southern part of the Bahía Anegada, where the San Blas channel separates the mainland from an island (Fig. 1). The San Blas channel is 2.5 km wide and 12 km long. The study area has a tidal amplitude characterized by a mean of 1.62 m, being 2.20 and 0.58 m the high and low tide respectively. The present study shows the results of a bathymetric survey of

the San Blas channel and an analysis of the behavior of the tidal currents that affect sediment transport and promote the generation of different bedforms. The aim of this study was to analyze the submarine geomorphology related to the dynamic conditions in order to characterize in detail the sedimentary conditions in this area.

A detailed bathymetric study was conducted over a zone of 50 km², covering the San Blas channel, through a digital echosounder Bathy-500 positioned by DGPS operating in real time. Fifteen transversal tracks and three longitudinal tracks were made at the San Blas channel in order to obtain the necessary bathymetric profiles to make a bathymetric chart of

the area. Over a zone of 1.5 km², characterized by a field of subaqueous dunes, a Phase Measuring Bathymetric System (FMBS), called swath bathymetry system "GeoSwath Plus" from GeoAcoustics Lt. (UK), was employed in order to determine the detailed dune morphology. This survey yielded details and disposition of the bedforms present on the channel bed with centimetric precision.

Bottom sediment samples were collected and tidal currents were measured using an Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP) mounted on a ship. The tidal currents were measured during a whole tidal cycle, obtaining the distribution of velocity and direction over the water column, on a track carried out transversally to the channel. These values were computed with the associated WinRiver software. The entire field work (bathymetry, sampling, FMBS and ADCP) was performed with the 6.5 m long boat IADO IV.

The coastal features display geomorphological differences in response to a changing dynamic regimen along the channel (Fig. 2). Remarkable morphological and textural differences occur along the coast. Close to the mouth, a dissipative beach, with medium sand and a gentle slope is present. Mobile coastal dunes are common crowning the beach. Nearly the central part, the beach is steeper and composed of gravels developing then a reflective beach. Towards the north, in the inner part of the Bahía Anegada (north of Punta Ramirez), wave-cut platforms and marshes covered with *Spartina alterniflora* appear, sheltered by cliffs formed by deposits from the Río Negro Formation.

The bathymetric map allows distinguishing the existence of significant changes in the morphology throughout the San Blas channel. Based on these differences, the area was divided into 4 zones (Fig. 3), each one with distinctive profiles (Fig. 4). Zones I and II are characterized by a 28 m-depth flat bottom, free of unconsolidated sediments and with steep flanks. These features allow establishing an analogy with a tidal throat. A subaqueous dune field, covering an area of more than 1.5 km², was found in Zone III. Zone IV is a shallow area where sand bars are exposed during low tide.

The dune field was characterized by large dunes, with spacing between 40-80 m and heights of 2.5 m, identified at 21 m depth (Fig. 5). Higher dunes occur in deeper zones, reaching values of 4.5-5 m height at around 24 m depths. Most of the subaqueous dunes

located on the southern portion of the dune field exhibit a symmetrical cross section and are covered by smaller bedforms of 0.3-1 m high and 0.7 to 0.9 m of spacing. On the other hand, dunes located on the northern side of the field are asymmetrical, with the steeper side towards the inner part of the channel.

The mean grain size in the field dune is between medium and coarse sand (1.8 a 0.28 phi) that is in equilibrium with the strong velocities of tidal currents. The results obtained from the current measurements over a tidal cycle show that maximum velocities measured in the San Blas channel reached 2 m s⁻¹ during flood and 1.8 m s⁻¹ during ebb (Fig. 6). The maximum velocities of the flood currents were attained mainly on the northern flank and central part of the channel almost reaching the bottom. On the other hand, the maximum velocities of the ebb currents were found on the deepest site of the profile, on the southern flank, from mid-water up to the surface.

At both ends of the channel, sand accumulates due to the reduction in the carrying capacity which leads to the formation of an ebb and a flood tidal deltas. The sand bars exposed in low tide in the inward shallow part in the Anegada Bay is the tidal flood delta formed by the loss in the sediment transport capacity caused by the widening of the channel section. This unconsolidated granular sediment is available to be transported by the tidal currents. Towards the outer part of the channel, the bathymetric map shows shallower depths while nautical charts confirm the presence of submarine bars at the entrance of the San Blas channel (Fig. 7). These bars might be evidence of the occurrence of an ebb tidal delta.

The present study allowed concluding that the San Blas channel is a narrow strait between the mainland and an island, connecting the Anegada Bay with the outer sea and showing different submarine topography. Towards the mouth, the channel presents a flat bottom over 80% of its width, showing a U shape. The bottom is free of unconsolidated sediments due to the strong currents that wash away any loose material. The submarine topography of the San Blas channel corresponds very well with the tidal inlet significance.

Keywords: tidal inlet, tidal currents, submarine morphology, subaqueous dunes, sedimentary dynamics.

INTRODUCCIÓN

Las zonas costeras están caracterizadas por la presencia de diferentes formas de fondo a partir de las cuales se pueden inferir los procesos que allí se desarrollan. Los factores dinámicos predominantes son las olas y las mareas, por lo que la generación del tipo de las geoformas depende de la predominancia de uno u otro. Es así que en un ambiente donde la energía de las olas es dominante sobre la energía de las corrientes de marea, las formas asociadas en la costa podrán ser espigas o cordones de playa. En contraposición, en un ambiente donde predominan las corrientes de marea, se podrán formar bancos alargados como los bancos submarinos que forman los deltas de marea.

Dentro del conjunto de formas costeras que se presentan en la costa argentina, hay muy pocos ejemplos de entradas de marea (*tidal inlets*) (Isla y Bujalesky, 1995). Por el contrario, en las costas norteamericanas o europeas es común encontrar este tipo de geoformas asociadas a islas de barrera o en las bocas de estuarios y rías (Jelgersma *et al.*, 1995).

Las entradas de marea juegan un rol muy importante dentro del sistema hidrodinámico en la vinculación entre el océano abierto y cuencas interiores, tanto desde el punto de vista geomorfológico como químico-biológico (Davis y Fitzgerald, 2004). Entre estos ambientes se produce un intercambio entre agua salina y dulce, transporte de sedimentos finos y gruesos, nutrientes, organismos planctónicos y contaminantes. Debido a que algunos de estos sistemas morfológicos son muy dinámicos, desde los años 70 el Cuerpo de Ingenieros de la Armada de Estados Unidos (U.S. ACE) se ha dedicado al estudio de los procesos físicos de estos ambientes enmarcados dentro del programa GITI (General Information of Tidal Inlets). A partir de estos análisis se determinó que los rasgos geomorfológicos como los deltas de marea y las gargantas son elementos cruciales del sistema y necesitan estudios de detalle (Van Goor *et al.*, 2003; Van Veen *et al.*, 2005). Las gargantas son las partes más profundas de las entradas de marea y normalmente se forman por un angostamiento del canal, que conduce a un incremento de la velocidad. Ello ocasiona además la remoción de los sedimentos, dejando sólo los más gruesos o directamente la exposición de la roca o sedimentos cohesivos (Davis y Fitzgerald, 2004).

El presente estudio se realizó en el Canal San

Blas, ubicado al sur de la provincia de Buenos Aires, que conecta a la plataforma argentina con la Bahía Anegada (Fig. 1). El objetivo del trabajo es presentar la caracterización de la geomorfología submarina en conjunto con la hidrodinámica asociada, con el fin de definir el ambiente. Para ello se presentan los resultados obtenidos de relevamientos del fondo del canal y el comportamiento de las corrientes de marea que determinan el transporte de sedimentos y formas de fondo.

ZONA DE ESTUDIO

La Bahía Anegada abarca la zona costera del sur de la provincia de Buenos Aires. La zona de Bahía San Blas se encuentra localizada al sur de Bahía Anegada (Fig. 1). Dicha zona comprende la denominada Isla Jabalí, separada del continente por dos canales de marea someros, los denominados arroyo Jabalí y arroyo del Guanaco. El primero es un canal funcional que recibe los efectos de la marea, bordeado por planicies de marea formadas por sedimentos finos y vegetadas mayormente por *Spartina alterniflora*. El denominado arroyo del Guanaco se encuentra actualmente obstruido en su desembocadura en el Océano Atlántico por cordones de arena.

La Isla Gama se encuentra frente a la costa de la localidad denominada Bahía San Blas, mientras que el canal que separa la parte continental de la Isla Gama, se denominará en este trabajo canal San Blas. Este canal tiene una longitud aproximada de 13 km y un ancho promedio de 2 km. La zona de Bahía San Blas presenta una marea mixta predominantemente semidiurna caracterizada por un rango medio de 1,62 m, (Servicio de Hidrografía Naval, 2009). Según la clasificación de Hayes (1979) este ambiente correspondería al límite del régimen micromareal-mesomareal. Los vientos fuertes que caracterizan el área de estudio modifican las alturas y horarios de las mareas (Beigt *et al.*, 2009) y por otro lado generan formas sobre la costa que permiten inferir la dirección de deriva litoral.

GEOLOGÍA LOCAL

Los primeros estudios sobre la geología local fueron realizados por Witte (1916), principalmente sobre los depósitos costeros emergidos de rodados, los cuales son la característica sobresaliente del área. Posteriormente, se llevaron a cabo diferentes

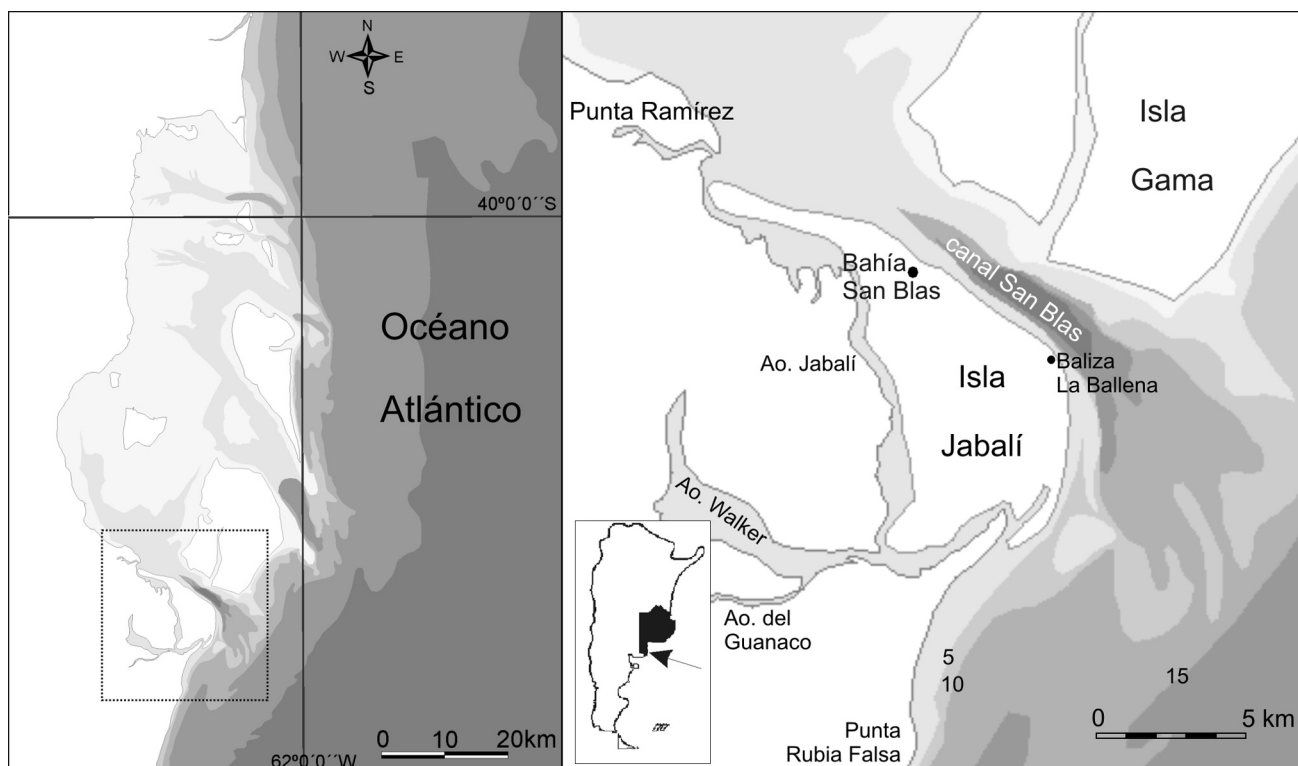


Figura 1. Localización de la zona de estudio dentro de Bahía Anegada, sur de la provincia de Buenos Aires.

Figure 1. Location of study zone in Anegada Bay, southern Buenos Aires province.

investigaciones más específicas sobre diferentes temas. Así, Angelelli y Chaar (1964) estudiaron las arenas de San Blas y sus minerales pesados; Angelelli *et al.* (1967) reexaminaron los depósitos de minerales pesados de la zona. Estudios sedimentológicos de las playas de la zona de San Blas fueron realizados por Cortezzi y Dillon (1974), mientras que Ambrosini (1984) describió la geomorfología de la Isla Jabalí.

La descripción de la geología de la zona de estudio se ha basado en la propuesta de Trebino (1987). Según este autor pueden distinguirse dos unidades geológicas, una de edad terciaria (areniscas) y una cubierta sedimentaria cuaternaria constituida por distintos tipos de depósitos marinos y continentales que fueron identificados fundamentalmente por su morfología.

Según Trebino (1987), en el área de estudio afloran depósitos continentales, de edad Pliocena, que fueron incluidos en la Formación Belén (Kaaschieter, 1965). Dentro del Cuaternario, los diferentes depósitos descritos por dicho autor como correspondientes al Pleistoceno son: a) depósitos de grava arenosa (antigua planicie aluvial), b) arenas edafizadas de antiguos médanos y c) rodados y gravas de cordones litorales pleistocenos. Los primeros depósitos mencionados

son los denominados “rodados patagónicos”, sobre los que se ubican depósitos de arenas edafizadas en las que no se ha podido observar estructuras debido al avanzado grado de edafización que presentan. Por último, Trebino (1987) indica que los depósitos de rodados y gravas están constituidos por clastos provenientes de rocas volcánicas (riolitas, andesitas y basaltos) y que el origen de estos depósitos resulta de la removilización y depositación por acción marina de material clástico preexistente.

La edad pleistocena fue propuesta según resultados de dataciones mediante C^{14} y evidencias visuales (posición altimétrica de los depósitos, estado de edafización y grado de conservación respecto de depósitos holocenos y cementación calcárea no reconocida en acumulaciones más modernas).

Dentro del Holoceno Trebino (1987) distinguió los siguientes depósitos: 1) rodados y gravas de cordones litorales, 2) depósitos de salinas y salitrales, 3) arenas de playa, 4) arenas de médanos modernos y 5) depósitos limo arcillosos de canales y planicies de marea. Los depósitos de rodados y gravas de los cordones holocenos fueron señalados por Trebino (1987) como constituyentes del cuerpo principal de la Isla Jabalí, mientras que el fondo de

las depresiones cerradas que ocurren en el área están conformados por los depósitos de salinas y salitrales. Por otra parte, Rutter *et al.* (1989) consideran que los cordones de playa elevados que conformen la Isla Jabalí fueron depositados durante niveles altos del mar del Pleistoceno y Holoceno.

Hacia la boca del canal San Blas y hacia el sur de la baliza La Ballena, las playas están formadas por arena fina-media. Las arenas de médanos modernos tienen su origen en la removilización por acción del viento de las arenas mencionadas anteriormente (Trebino, 1987). Por último, los depósitos limo arcillosos se encuentran en los canales de marea (arroyos Walker, del Guanaco y Jabalí) y sus respectivas planicies de marea, incluidas las alcanzadas excepcionalmente por el mar.

Si bien es abundante la información sobre la morfología, estratigrafía y sedimentología de la región costera comprendida entre los ríos Colorado y Negro, son escasos los que hacen referencia a la Bahía Anegada (Codignotto y Weiler, 1980; Weiler, 1983, 1996; Nicolás *et al.*, 1986). Álvarez y Ríos (1988) realizaron estudios en el ambiente subacuático, midiendo variables oceanográficas y obtuvieron resultados de batimetría, aunque el registro de datos no fue permanente ni sistemático. En dicho estudio, las mediciones son puntuales, ya que las corrientes de marea se obtuvieron mediante un correntómetro y un correntógrafo fondeados a una profundidad fija en la columna de agua. Por lo tanto, el presente estudio es el primero llevado a cabo en el ambiente subacuático que involucra estudios geomorfológicos submarinos e hidrodinámicos de detalle, identificando variaciones espaciales y temporales utilizando equipamiento de alta precisión. Hacia el norte de la localidad de San Blas, en cercanía de Los Pocitos, existen afloramientos de la Formación Río Negro (Andreis, 1966). Se componen de una arenisca de grano fino, de color gris claro algo azulado, de escasa coherencia y, por lo común, de textura entrecruzada.

METODOLOGÍA

Para determinar la batimetría de la zona se relevó el canal con una sonda ecoica Bathy500 MF posicionada con DGPS, cubriéndose una superficie de 50 km². Se obtuvieron 15 perfiles transversales al canal y 3 longitudinales. En un área de 1,5 km² caracterizada por un campo de dunas, se relevó con el sistema batimétrico por medición de fase (SBMF)

denominado GeoSwath Plus de GeoAcoustics Lt. Con este sistema se efectuó un relevamiento batimétrico por fajas, que permitió visualizar cambios en la textura del fondo (p.e. sedimentos cohesivos) y detalles morfológicos con precisión submétrica. Se efectuaron ocho líneas de barrido con una superposición del 50%, abarcando un total de 700 m de ancho y 4 km de largo.

Se recogieron 9 muestras de sedimento en la zona del campo de dunas, utilizando para ello una draga van Veen. Como todas las muestras correspondían al tamaño arena, se tamizaron siguiendo el método propuesto por Folk y Ward (1957) y luego se determinaron los parámetros estadísticos para su análisis. Para estudiar la dinámica de la zona se midieron las corrientes durante un ciclo completo de mareas (13 hs) con un ADCP (Acoustic Doppler Current Profiler) de 600 kHz sobre una transecta perpendicular al canal San Blas. Los registros obtenidos permiten visualizar las velocidades y direcciones de las corrientes sobre un corte transversal al canal, en toda la columna de agua, por cuanto se pueden determinar variaciones espaciales como temporales. Se utilizó el software asociado WinRiver que permite visualizar los resultados obtenidos de las corrientes. Todas las tareas de campo fueron efectuadas con la lancha IADO IV de 6,5 m de eslora, perteneciente al Instituto Argentino de Oceanografía.

RESULTADOS

Geomorfología Costera

Desde la boca del canal San Blas y hacia el interior de Bahía Anegada la costa presenta marcadas diferencias geomorfológicas. Cerca de la boca, la costa se caracteriza por presentar amplias playas disipativas (formadas por arena media y escasa pendiente), las cuales se encuentran coronadas por médanos vivos (Fig. 2a, b). Hacia el interior, a la altura de Bahía San Blas, la playa está compuesta por rodados y presenta gran pendiente, formando así una playa reflectiva (Fig. 2a-c). Continuando hacia el NO, la costa está caracterizada por rodados en la playa alta y arena gruesa en la playa baja, ensanchándose la zona intermareal. Como límite de la playa alta se encuentra una escarpa erosiva de 1,5-2,0 m de altura, compuesta por playas elevadas que aportan clastos de grava (Fig. 2d). Hacia el norte de Punta

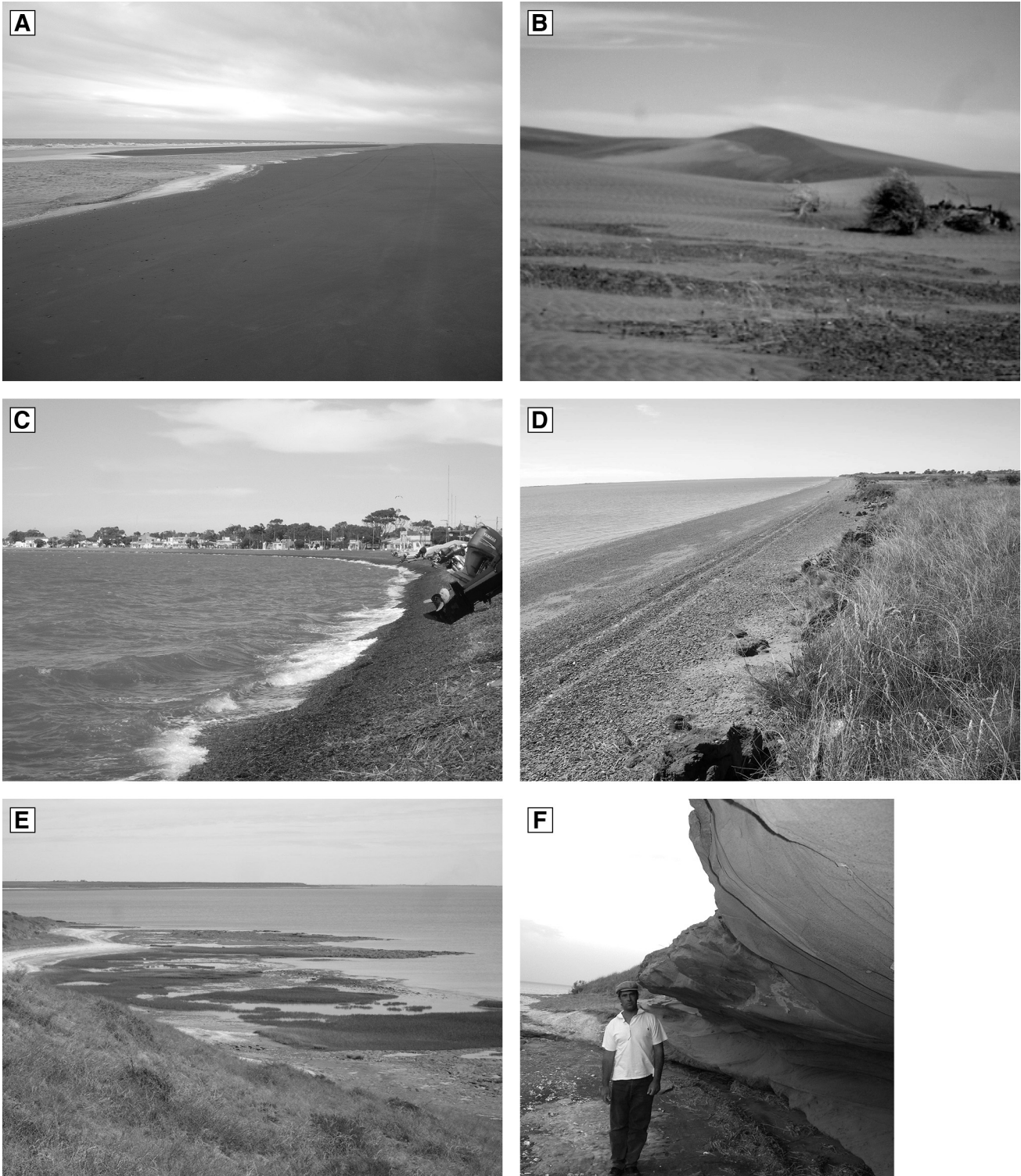


Figura 2. Diferencias geomorfológicas en la zona costera del canal San Blas. a) Playas disipativas cerca de la boca del canal San Blas formadas por arena media. b) Médanos costeros móviles cerca de la boca. c) Playa reflectiva de rodados en la localidad de Bahía San Blas. d) Escarpa afectando una playa fósil de rodados al norte de Bahía San Blas. e) Marismas entre plataformas de abrasión al norte de Punta Ramírez. f) Acantilados de la Formación Río Negro en Los Pocitos (al norte de Punta Ramírez).

Figure 2. Geomorphological differences along the coast of San Blas channel. a) Dissipative beaches near the mouth of the San Blas channel formed by medium sand. b) Mobile coastal dunes near the mouth. c) Reflective beach formed by gravels at Bahía San Blas. d) Active cliff crowning a fossil gravel beach north of Bahía San Blas. e) Abrasion platform in marshes, north of Punta Ramirez. f) Cliffs showing the Río Negro Formation in Los Pocitos (north of Punta Ramirez).

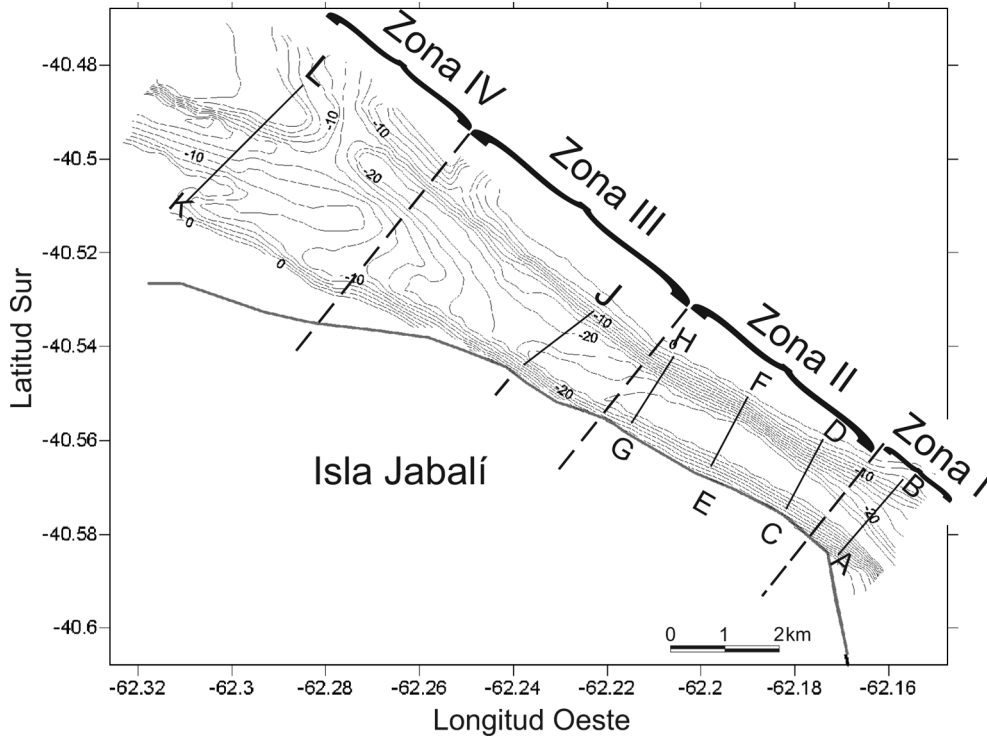


Figura 3. Mapa batimétrico del canal San Blas mostrando la ubicación de los perfiles de la figura 4.

Figure 3. Bathymetric map of San Blas channel showing the profiles presented in figure 4.

Ramírez, dentro de la Bahía Anegada, se observa la presencia de marismas vegetadas, entre otras, por *Spartina alterniflora*. Ocasionalmente se encuentran plataformas de abrasión formadas por sedimentos cohesivos de la Formación Río Negro (Andreis, 1966) (Fig. 2e), como así también acantilados labrados en sedimentitas de la misma formación (Fig. 2f).

Geomorfología Submarina

El mapa batimétrico obtenido permitió distinguir la existencia de importantes diferencias en la morfología costera en toda la extensión del canal San Blas. En base a estas diferencias se reconocieron cuatro Zonas (Fig. 3).

La Zona I es la más externa y está ubicada cerca de la boca del canal San Blas. El perfil transversal al canal dentro de esta Zona (Fig. 4a) tiene forma de V simétrica sobre el veril SO, alcanzando una profundidad de 30 m. Hacia la costa NE (Isla Gama) el fondo es plano y mantiene una profundidad constante de 20 m por una extensión de 900 m aproximadamente. Se identifica una diferencia entre los dos veriles del canal, siendo el veril SO más abrupto que el veril NE, gradientes 6.5% y 2.9%, respectivamente.

La Zona II se ubica hacia el interior del canal y se identifica con los perfiles C-D, E-F y G-H (Fig. 4b-d).

Estos muestran un contorno totalmente diferente al anterior ya que presentan un perfil transversal en U de fondo plano, el cual entre los dos veriles tiene una extensión de 700 m y una profundidad constante de 28 m. Se conserva el contraste entre los dos veriles, manteniéndose el gradiente de la costa SO en 6.5%, mientras que en la costa NE es de 3.25%. A una profundidad de 20 m aproximadamente se observa una pequeña terraza sobre el veril SO (perfiles E-F y G-H).

La Zona III comprende la localidad de Bahía San Blas. El perfil IJ muestra que las mayores profundidades se encuentran sobre el veril SO, alcanzando valores de hasta 26 m (Fig. 4e). En sentido transversal al canal y hacia la Isla Gama, las profundidades se reducen a 22-24 m. Sobre estas profundidades el fondo presenta irregularidades, identificándose un campo de dunas submarinas que se detalla más adelante. En el resto de la zona hacia el NO las máximas profundidades no exceden los 20 m.

La Zona IV corresponde al interior de Bahía Anegada, donde el canal se ensancha y la profundidad máxima se reduce a 10-16 m. El perfil transversal al canal presenta grandes irregularidades debido a la presencia de bancos submarinos, en ocasiones tapizados por formas de fondo menores (Fig. 4f). Los bancos de mayor magnitud quedan expuestos y se

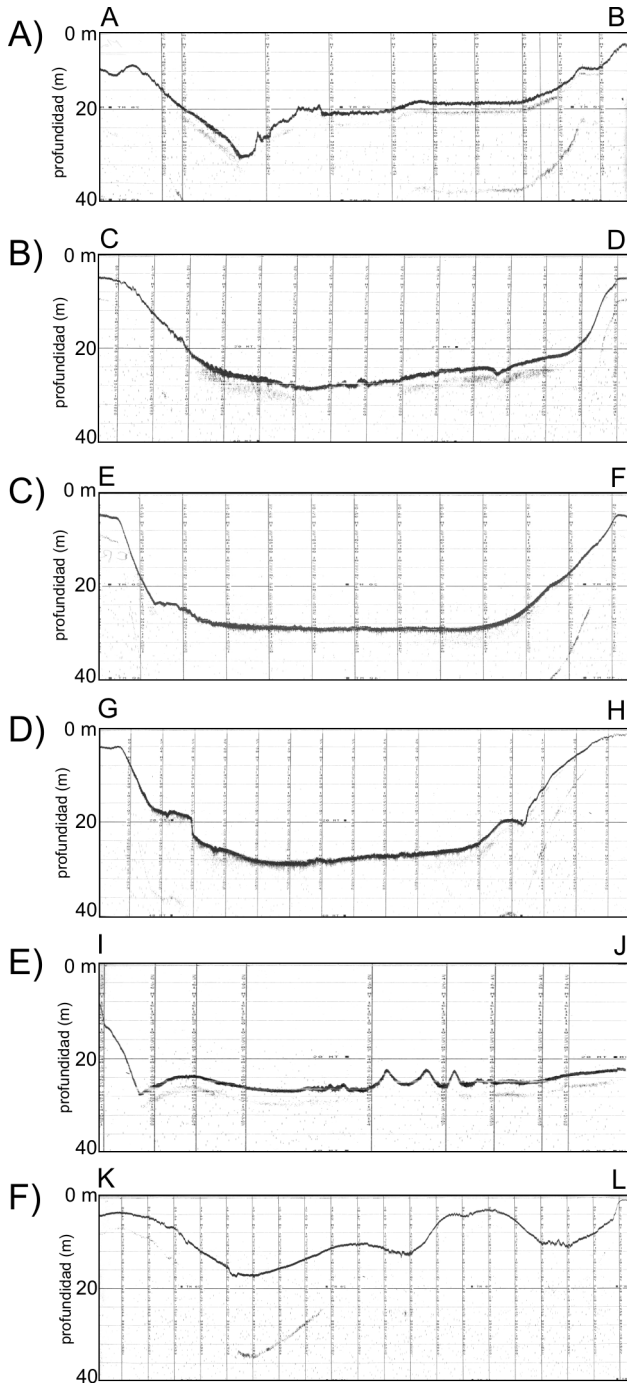


Figura 4. Registros de ecosonda mostrando los perfiles transversales al canal San Blas. Para su ubicación véase figura 3.
Figure 4. Echosounder records showing the transverse profiles to the San Blas channel. The location is shown in figure 3.

pueden identificar en condiciones de marea baja en las imágenes satelitales. Las trayectorias transversales realizadas dentro de este sector no pudieron alcanzar la costa SO debido a la presencia de un banco submarino paralelo a la costa a profundidades de alrededor de 2 m, lo que impidió avanzar con la

embarcación. Este banco alargado es la continuación de la espiga costera ubicada en Punta Ramírez que indica una dirección de transporte hacia el exterior del canal.

El campo de dunas encontrado en la Zona III (Fig. 5) se relevó en detalle con el sistema SBMF, encontrándose una diferencia en la magnitud de las dunas según la profundidad relevada. Hacia el NO del campo, se reconocieron dunas grandes, siguiendo la clasificación de Ashley (1990), con espaciamentos entre 40 y 80 m y alturas de 2,5 m a una profundidad de 21 m, mientras que hacia el SE, a profundidades del orden de 24 m, se hallaron dunas muy grandes. Estas últimas alcanzan 4,5-5 m de altura, con un espaciamento entre 100 y 120 m. En general, todas las grandes dunas aparecen tapizadas por dunas pequeñas que presentan espaciamentos entre 0,70 y 0,90 m y alturas desde 1 a 0,30 m.

La simetría que exhiben las dunas tampoco es homogénea en todo el campo. Las grandes dunas localizadas en la porción SE, exhiben perfiles simétricos, mientras que las ubicadas en el sector NO del campo presentan perfiles asimétricos con el talud hacia el interior de Bahía Anegada (ver perfiles C-D y E-F en Fig. 4).

Con respecto a la caracterización granulométrica de sedimentos sobre el campo de dunas, la mayoría de las muestras presentan una distribución bimodal con las mayores frecuencias en -2,5 phi y en 1,5 phi. El tamaño medio del sedimento se encuentra entre 1,8 y 0,28 phi, correspondiendo a arenas medianas y gruesas. La mediana (D_{50}) varía entre 1,81 y 1,24 phi (arena mediana), siendo éste el parámetro con el cual se infiere la energía de la corriente y que es utilizado en ingeniería costera en la mayoría de los cálculos matemáticos para estimar el transporte de sedimentos. Se destaca que el sedimento más grueso, correspondiente a arena gruesa, fue extraído del límite NE del campo de dunas.

Hidrodinámica del canal San Blas

Para analizar la hidrodinámica del canal San Blas se midieron las corrientes durante un ciclo completo de marea sobre un perfil perpendicular al canal ubicado en la Zona III, frente a la localidad de Bahía San Blas. El equipo utilizado para medir corrientes de marea (ADCP) permite obtener la velocidad y dirección de las mismas en toda la columna de agua a medida que la embarcación recorre el perfil

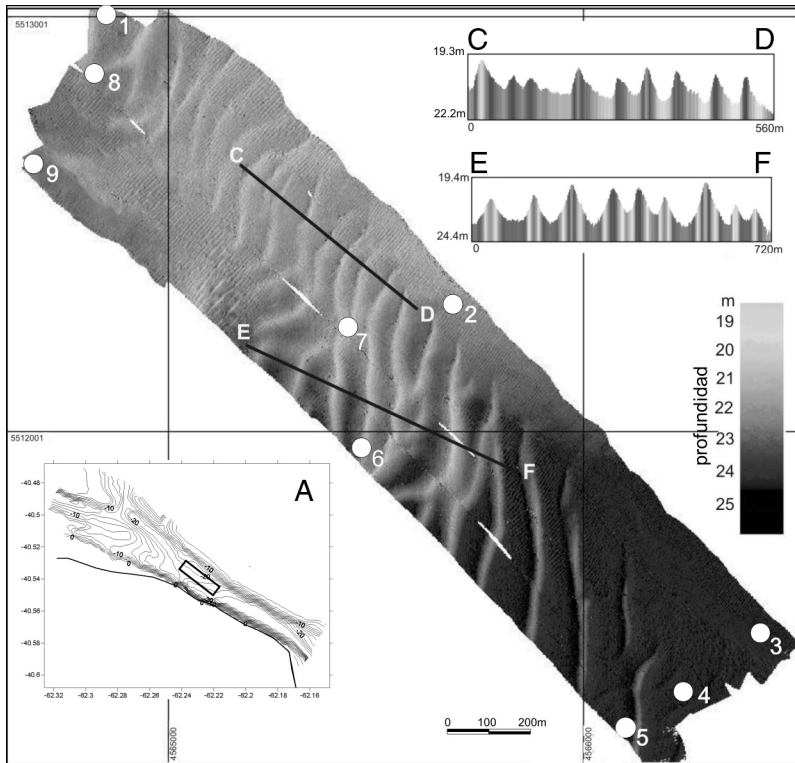


Figura 5. Mapa morfológico submarino mostrando las dunas presentes en el fondo del canal y la ubicación de las muestras de sedimento. a) Ubicación del campo de dunas dentro del canal San Blas.

Figure 5. Submarine morphological map showing the subaqueous dunes at the bottom of the channel and the sediment samples location. a) location of the dune field in the San Blas channel.

planificado. Con lo cual se obtienen perfiles que permiten conocer las características de las corrientes en un determinado tiempo de la marea, posibilitando identificar variaciones a lo largo de la marea.

Los resultados de las mediciones de las corrientes indican que existe una diferencia en la magnitud entre el flujo y el reflujo (Fig. 6). Las máximas corrientes de flujo alcanzaron valores de 2 m s^{-1} , mientras que las máximas corrientes de reflujo lograron una velocidad de $1,8 \text{ m s}^{-1}$. Ambas corrientes presentaron sentidos opuestos y longitudinales al canal.

En sentido espacial también se registraron diferencias entre los dos estados de marea. Las corrientes de flujo presentan su máxima velocidad en el veril NE, cercano al límite NE del campo de dunas. Estas altas velocidades se registraron desde la superficie hasta la mitad de la columna de agua (10 m) llegando en algunos casos hasta cerca del fondo. Velocidades de flujo de menor intensidad (cerca de $1,7 \text{ m s}^{-1}$) se registraron simultáneamente cerca de la costa SO, donde la profundidad llega a 26 m, y también cerca de la mitad del canal, donde la profundidad se reduce a 18 m. En estos dos últimos casos las mayores velocidades se registraron desde la superficie hasta los 15 m de profundidad. Por otra parte, las mayores velocidades de las corrientes de reflujo se registraron en las mayores profundidades,

hacia la costa SO, desde la superficie hasta los 18 m, aproximadamente.

DISCUSIÓN

La interpretación de la historia geológica del área de estudio aún presenta discrepancias. Ambrosini (1984) propone bajo el esquema evolutivo de la zona, que la antigua línea de costa coincide con el llamado arroyo Jabalí y arroyo del Guanaco hasta la Punta Rubia Falsa, lo que delimitaría por el oeste la actual llamada Isla Jabalí. Según este autor, una fuerte deriva litoral Sur-Norte desarrolló un sistema de barras y espigas hacia el norte, las cuales fueron erosionadas por importantes cambios de energía. Trebino (1987) por su parte, discrepa en algunos aspectos con dicha afirmación, ya que plantea que la erosión y truncamiento de cordones responden a una hidrodinámica marina diferente.

Datos morfológicos modernos y dinámicos de la provincia de Buenos Aires indican que la deriva es de sur a norte (Schnack *et al.*, 1982). Este mismo sentido se infiere en la deriva litoral localizada en el sector externo de la boca del canal San Blas, desde Punta Rubia Falsa hasta Baliza La Ballena. Por otro lado, se observa en el interior de Bahía Anegada, a la altura de la boca del denominado arroyo Jabalí,

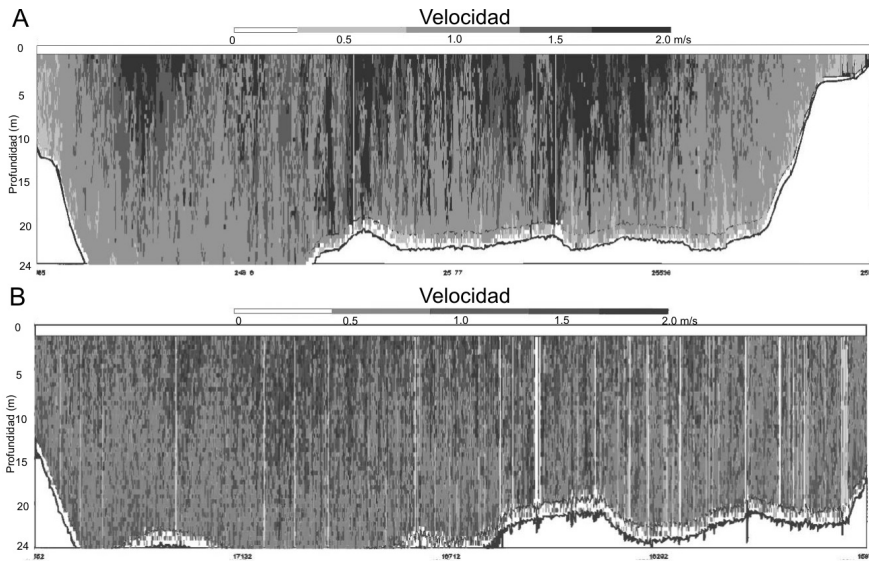


Figura 6. Perfil de máxima velocidad de corriente de marea correspondiente a una trayectoria perpendicular al canal San Blas. a) estado de marea creciente. b) estado de marea bajante.

Figure 6. Profile showing the maximum tidal flow velocity over a track perpendicular to the canal San Blas. a) flood tide. b) ebb tide.

un transporte litoral con una dirección de avance hacia el exterior de la bahía. De esta manera se forma un banco sumergido a 2 m de profundidad como extensión de la espiga de Punta Ramírez, hecho que también se evidencia por la presencia de una segunda rompiente en condiciones de bajamar. Esta geoforma se genera por el transporte litoral de sedimentos como respuesta a la acción de las olas que atacan la costa en forma oblicua, las que obedecen a los vientos más frecuentes de la zona que provienen del sector N y NNE (Beigt *et al.*, 2008). Esta espiga, de formación actual, tiene una dirección de avance opuesta a las espigas y cordones de grava que originaron la Isla Jabalí. Ello puede suceder porque el transporte actual responde a una dinámica de menor escala sobre la costa sur del canal San Blas, reforzado por un transporte diferencial entre ambas costas que se explica más adelante.

En base a la comparación de antiguos mapas, Isla y Espinosa (2005) manifiestan que el abundante material transportado por la deriva litoral sobre la costa exterior afectó la desembocadura del arroyo Walker y El Guanaco, provocando su cierre y la erosión del antiguo delta de reflujo. También indican que la erosión costera transforma estas islas en bancos. La presencia de dichos bancos es confirmada en la carta náutica H260 donde es posible observar varios de ellos en la boca del canal San Blas (Fig. 7). Estos bancos se encuentran diseñados por las fuertes corrientes de reflujo que desde el canal San Blas ingresan a la zona costera exterior. El diseño general del delta de reflujo presenta un desplazamiento hacia el sur. Ello estaría indicando una célula de

circulación con sentido ciclónico que reforzaría la deriva litoral costera. Esta circulación coincidiría con los resultados de modelos numéricos realizados en las bocas de marea (Wells y van Heijst, 2003; Kalponai y Werner, 1996), los cuales revelan que en general el flujo se separa en forma simétrica en dipolos. En relación a ello, Chao (1988; 1990) ha estudiado la influencia del viento y las modificaciones que estas corrientes pueden sufrir bajo su efecto. Mediciones realizadas en la localidad de Bahía San Blas indican una gran frecuencia de fuertes vientos provenientes del NNE (Alvarez, comunicación personal) que podrían afectar esta circulación en la zona exterior de la boca estrechándola hacia el sur. Por lo expuesto precedentemente, la geomorfología en la costa oriental de la Isla Jabalí sería la resultante entre las fuerzas de la deriva litoral hacia el norte con las fuertes corrientes de reflujo que salen del canal San Blas hacia el sur.

El canal San Blas es un ambiente con una intensa dinámica que es reflejada por las fuertes corrientes de marea medidas en la Zona III, las que presentan tanto diferencias temporales como espaciales. Las máximas corrientes de reflujo se midieron sobre la costa SO donde se encuentran las mayores profundidades (26 m), mientras que las máximas corrientes de flujo se desarrollan sobre el veril NE. Por otro lado, las velocidades de las corrientes de flujo (2 m s^{-1}) son mayores que las de reflujo (1.8 m s^{-1}). Ello podría indicar una divergencia del reflujo, donde una parte lo haría bordeando la Isla Gamma por el norte en vez de ingresar en su totalidad al canal San Blas. Esta suposición se podrá confirmar con un

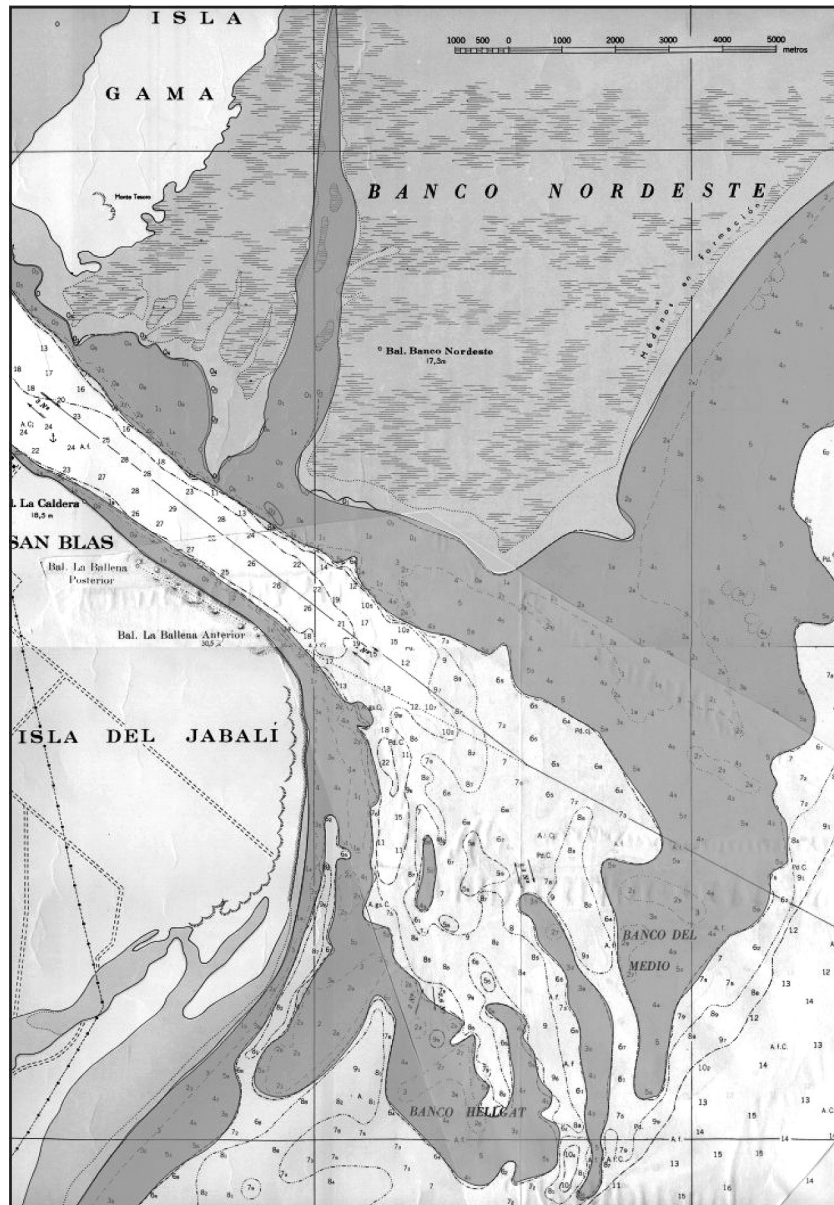


Figura 7. Sector extraído de la Carta náutica H260 “Puerto San Blas” (SHN) donde se puede observar el delta de reflujos.
Figure 7. Sector extracted from Nautical chart H260 “Puerto San Blas” (SHN) showing the ebb tidal delta.

modelo hidrodinámico que está siendo ajustado.

En el mapa batimétrico obtenido se observa la reducción de las profundidades sobre la costa NE en la Zona I, cerca del límite exterior (Fig. 3). Una profundidad constante de 20 m abarca la mayor parte del perfil. Sólo un estrecho canal volcado hacia la costa SO presenta 30 m de profundidad. Ello está indicando una depositación de sedimentos en la boca del canal, fundamentalmente sobre la costa NE, a causa de la pérdida de capacidad de transporte debido a un aumento de la sección, lo que da lugar a la formación de un delta de reflujos. Davis y Fitzgerald (2004) hacen referencia a la directa asociación entre

deltas de marea con los canales de marea, ya que estos depósitos se desarrollan en los extremos de los canales de marea como respuesta a los procesos que allí tienen lugar. En particular, el ensanchamiento de la sección del canal conduce a una pérdida de competencia en el transporte de sedimentos, produciéndose la depositación del mismo.

Desde la boca hacia el interior del canal San Blas, la topografía submarina está caracterizada por un amplio fondo plano de 700 m de extensión entre los flancos del canal con profundidades del orden de los 28 m (Zona II, ver Fig. 4b-d). El fondo en esta zona se encuentra exento de geofomas, como consecuencia

de las intensas corrientes de marea de flujo y reflujo que transportan el sedimento inconsolidado hacia el interior y exterior del canal. La ausencia de sedimento indica que las corrientes en la Zona II son mayores a las medidas en la Zona III. El fondo plano se extiende por una longitud de 4 km desde la boca hasta la mitad del canal. Asimismo, los veriles presentan pendientes muy abruptas, 3,25% sobre la costa NE y 6,5% sobre la costa SO (Fig. 4c, d). Por otra parte, sobre dicha costa, entre los 20 y 24 m de profundidad, se observa un resalto topográfico en los perfiles E-F y G-H (Fig. 4), probablemente dado por capas de material más resistentes a la erosión y que podrían corresponderse con antiguas planicies de abrasión o remanentes topográficos de playas altas consolidadas como las de San Blas. Estos canales profundos con fondo plano, exentos de sedimento inconsolidado y fuertes pendientes en los veriles son característicos de las gargantas de las entradas de marea.

En contraste, hacia el interior del canal se forma un campo de dunas que se extiende desde el centro del canal hacia el veril norte (Fig. 5). El campo de dunas está formado por sedimento cuya granulometría, (D_{50}), corresponde a tamaños de arena mediana, lo que está en equilibrio con las fuertes corrientes que lo transportan. La mayor granulometría del sedimento de fondo se encuentra sobre el límite NE del campo de dunas donde las velocidades de flujo son máximas (hasta 2 m s^{-1}). Cabe señalar que las dunas formadas en el estuario de Bahía Blanca (Cuadrado *et al.*, 2003) poseen un tamaño de sedimento de menor granulometría. En ese caso, la mediana de los sedimentos presenta valores de arena fina. Esta diferencia con la presente área de estudio puede deberse a las corrientes de marea a que está sometido el ambiente. En el caso del estuario de Bahía Blanca, las velocidades máximas en el campo de dunas alcanzan los $0,5 \text{ m s}^{-1}$ a 1 m del fondo, mientras que en el canal San Blas son entre dos y tres veces mayores.

Las dimensiones de las dunas (entre 4 y 5 m de altura) están relacionadas con las fuertes velocidades de las corrientes de marea que existen en el lugar. Las dunas muy grandes (clasificación según Ashley, 1990) ubicadas sobre el límite NO del campo de dunas son asimétricas hacia el interior del canal, lo cual concuerda con la dirección de las máximas corrientes de flujo. La formación de estas dunas, por su magnitud y asimetría, responde a un transporte

residual en ese sentido. Por el contrario, las grandes dunas del centro del canal San Blas son simétricas, por lo que se infiere que en este sector las corrientes de flujo y reflujo se encuentran equilibradas. Esto se contrapone a la afirmación de Dalrymple y Rhodes (1995), quienes sostienen que las dunas de grandes dimensiones generalmente son asimétricas. La diferencia en la simetría de las dunas evidencia un transporte diferencial en sectores contiguos del canal. Todas estas dunas de gran magnitud se encuentran tapizadas por dunas pequeñas (según la clasificación de Ashley, 1990), las que pueden variar su simetría según la corriente de flujo o reflujo a la que se encuentran afectadas en el momento del registro.

Hacia la zona de Bahía Anegada (Zona IV, Fig. 3f) se forman bancos submarinos. El material arenoso que es transportado por las corrientes de flujo es depositado por la disminución en la capacidad de transporte de las corrientes al ensancharse al canal. Se forma de esta manera un delta de flujo de manera similar a lo que ocurren en la boca exterior. Las corrientes tanto de flujo como reflujo le imprimen el diseño alargado a los bancos, que en ocasiones de bajamar quedan expuestos.

Según Van Leeuwen y de Swart (2002), un sistema de entrada de marea consiste en una cuenca interna, conectada con el mar mediante un canal angosto. En general, el ambiente donde se genera es micro o mesomareal, donde la geomorfología puede sufrir cambios en períodos prolongados, como centurias, o en días debido a la acción de una tormenta. Las gargantas se caracterizan por presentar fuertes corrientes de marea, mayores a 1 m s^{-1} y transportar grandes cantidades de sedimentos que son depositados en el exterior de la garganta formando los denominados deltas de reflujo.

El canal San Blas conecta la Bahía Anegada con el mar abierto entre la denominada Isla Jabalí y la Isla Gama, formando una entrada de marea. El sector inmediatamente interno a la boca presenta una topografía submarina caracterizada por un fondo plano, exento de material inconsolidado, fuertes pendientes en los veriles y una dinámica de corrientes muy fuerte que corroboran un gran transporte de sedimentos. Dichas características permiten definir a este sector como la garganta de marea.

Con respecto a la zona costera, se han reconocido diferencias a lo largo del canal que se deben fundamentalmente a la granulometría del

material preexistente. Aquellos sectores donde hay disponibilidad de rodados, desarrollan playas reflectivas (Fig. 2c), mientras que donde la disponibilidad es principalmente de arena se generan playas disipativas (Fig. 2a). En el interior de Bahía Anegada se forman marismas entre plataformas de abrasión por una disminución en la energía del ambiente (Fig. 2e).

CONCLUSIONES

La geomorfología del canal San Blas presenta grandes diferencias morfológicas a lo largo de sus 13 km de longitud reconociéndose diversos tipos de fondo. En la zona adyacente a la boca, a una profundidad de 28 m, se reconoce un fondo plano de 700 m de ancho con pendientes abruptas y con su mayor gradiente sobre la costa SO. El fondo carece de sedimento inconsolidado debido a las fuertes corrientes de marea que se originan por el angostamiento de la sección en la entrada de marea. Este sector forma la garganta dentro del canal de marea y su extensión es de 4 km.

Hacia el interior del canal, a la altura de la localidad de Bahía San Blas, se ha identificado un campo de dunas grandes y muy grandes. Las dunas grandes se presentan sobre el sector NO del campo a una profundidad de 21 m. Presentan alturas de 2.5 m, espaciamientos entre 40 y 80 m y son asimétricas hacia el interior del estuario. En el sector SE del campo a 25 m profundidad se reconocieron dunas muy grandes, simétricas, con alturas entre 4 y 5 m y espaciamientos entre 100 y 120 m. Todas las geoformas mayores tienen sobreimpuestas dunas de menor magnitud que responden al régimen instantáneo de las corrientes de marea.

Hacia el interior de Bahía Anegada, se forma un delta de flujo con bancos alargados que pueden quedar expuestos en bajamar, producto de la depositación de sedimentos por pérdida de capacidad de transporte de las corrientes de marea al ensancharse la sección del canal. También se forma un delta de refluo a la salida del canal, en el dominio oceánico.

Con respecto a la dinámica de la zona del canal San Blas, se midieron corrientes de flujo que alcanzan los 2 m s^{-1} , que se registran fundamentalmente sobre el veril NE del canal generando un transporte residual en esa dirección, coincidente con la dirección del talud de las grandes dunas asimétricas. Las máximas corrientes de refluo medidas fueron de

$1,8 \text{ m s}^{-1}$, desarrolladas en las partes más profundas del canal, sobre el veril SO. Existe una dominancia diferencial de las corrientes de marea, ya que el flujo ingresa por la costa NE, mientras que el refluo predomina sobre la costa SO. Las características aquí observadas resultan coincidentes con aquellas de las entradas de marea.

Agradecimientos

Los autores desean agradecer a Carlos Galán, Ernesto Alberdi y Eduardo Fernández por su apoyo en las tareas de campo. Asimismo a la tripulación del lado IV, Alberto Conte y Enio Redondo. Se reconoce también el valioso aporte de los evaluadores del manuscrito Dres. E. Schnack e I. Isla. El presente trabajo fue financiado por PAE N°22666/04 y parcialmente por PICT N° 109 de ANPCyT y PGI 24/ZH15 de SCyT UNS.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alvarez, J. y F. Ríos, 1988. Estudios litorales en las bahías San Blas y San Antonio Oeste. I. Caracterización oceanográfica preliminar de la zona interior de la Bahía San Blas, provincia de Buenos Aires. CONICET- U.N.M.P.- Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Departamento de Ciencias Marinas. 39 pp.
- Ambrosini, G.L., 1984. Geomorfología de la Isla Jabalí, departamento de Patagones, provincia de Buenos Aires. *IX Congreso Geológico Argentino*, Actas:513-519, San Carlos de Bariloche.
- Andreis, R., 1966. Petrografía y paleocorrientes de la Formación Río Negro. *Rev. Mus. La Plata. Nueva Serie* 36:230-245.
- Angelelli, V. y E. Chaar, 1964. Las arenas de la Bahía San Blas, su investigación por minerales de hierro, titanio y zirconio (partido de Carmen de Patagones, provincia de Buenos Aires). Comisión Nacional de Energía Atómica, Informe N° 122, Buenos Aires.
- Angelelli, V., J. Villa y J.M. Suriano, 1967. Los depósitos de titanio-magnetita ilmenita y circón de Bahía San Blas (tramo baliza La Ballena-Faro Segunda Barranca), partido de Carmen de Patagones, provincia de Buenos Aires. Comisión Nacional de Energía Atómica, Informe N°210, Buenos Aires.
- Ashley, G.M., 1990. Classification of large scale subaqueous bedforms: a new look at an old problem. *Journal of Sedimentary Petrology* 60:160-172.
- Beigt, D., D.G. Cuadrado y M.C. Piccolo, 2008. Preliminary results of geomorphologic characterization in Bahía San Blas (Argentina). *Estuarine Coastal and Science Association 44 Symposium*, Abstracts en CD, Bahía Blanca.
- Beigt, D., D.G. Cuadrado y M.C. Piccolo, 2009. Resultados preliminares del efecto del viento en la marea de Bahía San Blas. XXIV Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, Resúmenes:287-288, Mendoza.
- Chao, S., 1988. Wind-driven motion near inner shelf fronts. *Journal of Physical Oceanography* 18:1144-1166.
- Chao, S., 1990. Tidal modulation of estuarine plumes. *Journal of Physical Oceanography* 20:1115-1123.

- Codignotto, J.O** y **N.E. Weiler**, 1980. Evolución morfodinámica del sector comprendido entre Punta Laberinto e Isla Olga, provincia de Buenos Aires. *Simposio sobre Problemas Geológicos del Litoral Atlántico Bonaerense*, Resúmenes:36-43. Mar del Plata.
- Cortelezzi, C.R.** y **A. Dillon**, 1974. Estudio de las variaciones morfológicas y sedimentológicas en las playas de la zona de San Blas, partido de Carmen de Patagones, provincia de Buenos Aires. *An. Lemit*, 2, serie II, N° 263:73-79, La Plata.
- Cuadrado, D.G., E.A. Gómez** y **S.S. Ginsberg**, 2003. Large transverse bedforms in a mesotidal estuary. *Revista Asociación Argentina de Sedimentología* 10(2):163-172.
- Dalrymple, R.W.** y **R.N. Rhodes**, 1995. Estuarine dunes and bars. En G.M.E. Perillo (Ed.), *Developments in Sedimentology. Geomorphology and Sedimentology of Estuaries*. Developments in Sedimentology 53:359-422. Elsevier, Amsterdam.
- Davis, Jr. R.** y **D. Fitzgerald**, 2004. *Beaches and Coasts*. Blackwell Science Ltd., United Kingdom, 405 pp.
- Folk, P.L.** y **W.C. Ward**, 1957. Brazos river bar – a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Petrology* 27:3-26.
- Hayes, M.O.**, 1979, Barrier island morphology as a function of wave and tide regime. En Leatherman, S. P. (Ed.), *Barrier islands from the Gulf of St. Lawrence to the Gulf of Mexico*. Academic Press, pp 1-29. New York, NY.
- Isla, F.** y **G. Bujalesky**, 1995. Tendencias evolutivas y disponibilidad de sedimentos en la interpretación de formas costeras: casos de estudio de la costa argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 2(1-2):75-89.
- Isla, F.** y **M. Espinosa**, 2005. Holocene and historical evolution of fan estuarine complex: the gravel spot of the Walter creek, southern Buenos Aires. *XVI Congreso Geológico Argentino*, Actas 149-154, La Plata.
- Jelgersma, S., M.J.F. Stive** and **L. Van der Valk**, 1995 Holocene storm surge signatures in the coastal dunes of the western Netherlands. *Marine Geology* 125:95-110.
- Kaaschieter, J.P.**, 1965. Geología de la Cuenca del Colorado. *II Jornadas Geológicas Argentinas*, Actas III:251-269, Buenos Aires.
- Kalponai, A.** y **F. Werner**, 1996. Circulation, mixing and exchange processes in the vicinity of tidal inlets: a numerical study. *Journal of Geophysical Research* 101:14253-14268.
- Nicolás, R., J. Kostadinoff** y **R. Schillizi**, 1986. Correlación entre geoformas superficiales y observaciones geofísicas en la Bahía Anegada, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 41(3-4):245-255.
- Rutter, N., E.J. Schnack, J. del Rio, J.L. Fasano, E.I. Isla** y **U. Radtke**, 1989. Correlation and dating of Quaternary littoral zones along the Patagonian coast, Argentina. *Quaternary Science Reviews* 8:213-234.
- Schnack, E., J. Fasano** y **F. Isla**, 1982. The evolution of Mar Chiquita lagoon, Province of Buenos Aires, Argentina. En Colquhoun D. (Ed.), *Holocene Sea-Level fluctuations: Magnitudes and Causes*. IGCP 61:143-155. University of South Carolina, Columbia, SC.
- Servicio de Hidrografía Naval**, 2009. Tablas de marea. http://www.hidro.gov.ar/oceanografia/Tmareas/Form_Tmareas.asp.
- Trebino, L.G.**, 1987. Geomorfología y evolución de la costa en los alrededores del pueblo de San Blas, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 42(1-2):9-22.
- Van Goor, M.A., T.J. Zitman, Z.B. Wang** y **M.J.F. Stive**, 2003. Impact of sea-level rise on the morphological equilibrium state of tidal inlets. *Marine Geology* 202:211-227.
- Van Leeuwen, S.M.** y **H.E. de Swart**, 2002. Intermediate modelling of tidal inlet systems: spatial asymmetries in flow and mean sediment transport. *Continental Shelf Research* 22(11-13): 795-1810.
- Van Veen, J., A.J.F. Van der Spek, M.J.F. Stive** y **T.J. Zitman**, 2005. Ebb and flood channel systems in the Netherlands tidal waters. *Journal of Coastal Research*, 21(6):1107-1120.
- Weiler, N.**, 1983. Rasgos morfológicos evolutivos del sector costanero comprendido entre Bahía Verde e Isla Gaviota, provincia de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 38(3-4):392-404.
- Weiler, N.**, 1996. Depósitos litorales del Pleistoceno tardío y Holoceno en el balneario Los Pocitos, provincia de Buenos Aires. *VI Reunión Argentina de Sedimentología*, Actas:120-134. Bahía Blanca.
- Wells, M.** y **G. van Heijst**, 2003. A model of tidal flushing of an estuary by dipole formation. *Dynamics of Atmospheres and Ocean* 37:223-244.
- Witte, L.**, 1916. Estudios geológicos de la región de San Blas (Pdo. De Patagones). *Revista del Museo de La Plata XXIV* (2° Serie, XII), La Plata.