UNIVERSIDAD DE BUENOS AIRES

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales

Departamento de Geología

# Geomorfología ambiental de la Primera Sección del delta del río Paraná: erosión (natural y antrópica) de los canales distributarios y manejo de sus márgenes

Tesis presentada para optar por el título de Doctor de la Universidad de Buenos Aires en el área de Ciencias Geológicas

**Agustín Quesada**

Directora de Tesis: Dra. Silvia C. Marcomini

Consejera de estudios: Dra. Silvia C. Marcomini

Lugar de trabajo: Departamento de Geología.

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales.

Universidad de Buenos Aires

Buenos Aires, 2019

Fecha de defensa: 23/9/19

## Geomorfología ambiental de la Primera Sección del delta del río Paraná: erosión (natural y antrópica) de los canales distributarios y manejo de sus márgenes

La navegación a motor en los canales distributarios del delta del río Paraná comenzó a fines del siglo XIX y se ha incrementado notoriamente durante el siglo XX. En este delta progradante, y con tendencia a la colmatación de sus canales, se observan múltiples problemas de inestabilidad en sus márgenes. Los objetivos de esta tesis son: estudiar la evolución morfológica de canales distributarios de la planicie deltaica de la Primera Sección, analizar los fenómenos erosivos asociados al uso náutico de los canales y proponer estrategias de manejo. A escala regional, la red de drenaje de la Primera Sección está conformada por un canal distributario troncal, el río Paraná de las Palmas; canales distributarios terminales, que desembocan en el río de la Plata; canales distributarios secundarios, canales de marea y canales artificiales. Se define como planicie deltaica inferior el sector de islas interdistributarias con canales de marea bien definidas ubicadas entre el río Capitán y el frente de avance delta subaéreo sobre el estuario.

Para establecer un modelo natural de evolución de los canales y determinar sus tasas máximas de erosión se realizó un análisis morfodinámico para un período comprendido entre 50 y 100 años, con imágenes satelitales y fotografías aéreas, en cinco sitios seleccionados, el cual permitió definir que la evolución de los canales tiene dos fases: una 1$^{er}$ fase de génesis de canales por depositación y adosamiento de bancos de desembocadura en el frente de avance, dominada por las crecidas del Paraná, las tormentas de la cuenca receptora y las mareas; y una 2$^{da}$ fase de evolución de los canales en la planicie deltaica con comportamientos tres típicos -reducción del ancho, migración lateral de tramos sinuosos y migración de embocaduras- dominados por la acción fluvial y la acreción de bancos laterales adosados a las márgenes. En el periodo analizado la erosión natural de márgenes se asocia con la migración lateral en las sinuosidades más pronunciadas de los canales que puede alcanzar tasas de hasta 0,5 m/año.

Para caracterizar las alteraciones antropogénicas a los canales se analizaron tres aspectos: efectos de un evento de dragado (1), impacto del oleaje náutico en el perfil de un canal (2) y se estimó el retroceso de márgenes en canales de la Primera Sección (3).

1) De relevamientos hidrográficos pre y pos dragado en el canal Rompani (2013) se estimó una extracción de sedimentos de 20 m$^3$/m los cuales se dispusieron sobre la planicie deltaica elevando 0,2 m cada margen. Un año y medio después, un volumen equivalente al 35% de los sedimentos extraídos se depositaron nuevamente en el lecho del canal. La configuración del perfil del canal, luego de la recuperación, muestra el cambio de pendiente producido por el material deslizado sobre el lecho activado por el dragado. 2) En el río Sarmiento, se realizó un monitoreo del oleaje náutico y se obtuvo que el tráfico de lanchas

colectivas y de mediano porte genera un oleaje erosivo, de altura mayor a 0,3 m. La frecuencia del tráfico aumenta de forma drástica los fines de semana de verano en alrededor de un 100% por mayor requerimiento turístico y recreativo. Se estimó que el río Sarmiento se incrementó su ancho un 150%, desde mediados del siglo XX, por efecto del oleaje náutico. La alteración del perfil del canal por oleaje náutico se deduce del retroceso de ambas márgenes y el aterrazamiento subácueo de los taludes del canal. 3) De una comparación de imágenes aéreas en 65 sitios distribuidos de forma sistemática en 19 canales de la Primera Sección se obtuvo que el 80% de los mismos presentó retrocesos de márgenes, y que en canales de intenso tráfico fluvial el incremento del ancho alcanzó tasas de hasta 1,9 m/año entre 1934 y 2019. Estos valores fueron categorizados para la confección de un mapa de zonificación de las tasas de erosión en donde se definen zonas de muy alta, alta y baja erosión. De la zonificación se extrae que los canales con mayores tasas erosivas coinciden con los canales más transitados de lo que se concluye que la actividad náutica es el factor erosivo dominante en las márgenes de las islas de la Primera Sección.

Para manejar la erosión los habitantes emplean más de 30 tipos de márgenes que se agruparon en 8 categorías: márgenes sin intervención, con tablestacados, con arbolados, con enrocados, con enramadas, playas artificiales, con terraplenes y otros tipos de márgenes. Los tablestacados son la medida más efectiva por su duración y la posibilidad que brindan de elevar las márgenes. Sin embargo, ante la falta de mantenimiento o diseño inapropiado los tablestacados se vuelcan o hunden y las márgenes con rellenos retroceden hasta 1 m/año. Los arbolados reducen en general el retroceso de márgenes, pero por el lavado del oleaje son inviables en canales altas tasas de erosión. Los enrocados presentan un alto impacto al paisaje y problemas de estabilidad asociados al deslizamiento de bloques hacia el canal y lavado de suelos por falta de colocación de membranas geotextiles en la base de estos. Las playas artificiales generan un espacio recreativo y el revestimiento de arena mitiga la erosión. A partir del seguimiento de perfiles de playa se recomienda una recarga cada 4 años y extracción de la vegetación que coloniza la playa. Finalmente, se implementó como propuestas, un piloto de remediación de márgenes con geobolsas para estabilizar márgenes con alto riesgo de erosión y boyas en el canal para reducir la velocidad de las lanchas y la generación de oleaje náutico.

## Environmental geomorphology in the First Section of the Paraná river delta: distributary channel erosion (natural and anthropogenic) and streambank management

Motor navigation on the distribution channels of the Paraná river delta began at the end of the 19th century, and has increased markedly during the 20th century. In this active delta, with natural tendency to fulfill channel with sediments, the streambanks are instable. The objectives of this thesis are to study the morphological evolution of delta distribution channels, analyze the erosive phenomena associated with nautical activity, and propose management strategies to minimize the bank retreat. The research area dreinage system is composed of a “trunk” distributary channel, the Paraná de las Palmas river, some terminal distributary channels, several secondary distributary channels, tidal channels and artificial channels. The sector of insterdistibutary island with active tidal channels emplazaded between Capitán river and the delta front is considered as the lower delta plain. A detailed analysis of aerial imagery since 1930 allowed to define an evolution distributary channels natural model of  of two phases: the 1st is a channel formation phase at the front delta by deposition and attachment of mouth bars dominated mainly by the fluvial action (Paraná floods), storms and tides from the receiving basin; the 2nd integration of channel to the deltaic plain phase, with three typical behaviors: width reduction, lateral migration of sinuous sections and bifurcations migration, dominated by fluvial discharge and side bars. In the analyzed period, the natural erosion of margins is associated with lateral migration in the most pronounced sinuosities of the channels that can reach rates up to 0.5 m / year.

To characterize the anthropogenic alterations to the channels form, three aspects were analyzed: effects of a dredging event (1), the impact of the ship´s wakes on the profile of a channel (2) and an overall calculation of the bank retreat in the channels of the First Section (3). 1) From pre and pos-dredged hydrographic surveys from the Rompani channel (2013). An extraction of 20 m3 sediment / m of channel was estimated, which were arranged over the delta plain, raising 0.2 m each streambank. A year and a half later, a volume equivalent to 35% of the sediments removed were deposited again in the bed of the canal. The channel section after recovery shows the change in slope produced by the material slid on the bed activated by dredging. 2) In the Sarmiento river, a photographic monitoring was carried out and showed that "collective" and medium-sized speed boat traffic generates erosive waves (H> 0.3 m) and also that the traffic increases during the summer weekends by around 100% due to a greater tourist and recreational requirements. It was estimated that the width of the Sarmiento river increased by 150% since the mid-twentieth century by the effect of nautical waves. The alteration of the channel section due to nautical waves is reflected in the retreat of both margins and in the sub-terracing of the slopes of the channel. 3) From the comparison

of historical images in 65 sites on 19 distributary channels it was obtained that 80% presented bank retreat process, and that on channels of intense boat traffic the increase in width reached rates of up to 1.9 m / year between 1934 and 2019. These values were categorized for the preparation of an erosion map where channels of low, high and very high erosion rate were determined.

To manage erosion, more than 30 types of margins are used by the land habitants, which were grouped into 8 categories: margins without intervention, with sheet piles, with trees, with trunk revetment, with demolition block revetment, with artificial beaches, with embankments and other types of margins. The sheet piles are the most effective measure, however, failure of the defense due to the lack of maintenance or inappropriate design, the soil contained by them can be eroded at rates of up to 1 m / year. The trees generally reduce the bank retreat, but due to the washing of the wake they are not viable in channels with high erosion rate. Revetments with demolition blocks proliferated because the bank stabilization requirements and the low cost of the blocks. This defense produces a great landscape impact and stability problems were observed due to de soil washing and the absence of geotextile membrane placed below the blocks. The artificial beaches generate a recreational space and the revetment of the bank with sand mitigates the erosion. By a profile beach monitoring, was stablish that a recharge every 4 years is needed in addition to vegetation extraction from the frontal beach. Finally, a pilot project with geobags revetment and a buoy installation in the channel to reduce the speed of the boats and the generation of nautical wave is designed and implemented to stabilize a bank with high erosion risk.

Páginas vi a vii eliminadas a pedido del autor.

# ÍNDICE

**1 INTRODUCCIÓN GENERAL ..... 18**
1.1 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN ..... 19
1.2 ZONA DE INVESTIGACIÓN ..... 20
1.3 HIPÓTESIS Y OBJETIVOS ..... 21
*Organización y contenidos de la tesis ..... 23*
1.4 REVISIÓN DE LA LITERATURA DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ ..... 23
**2 CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE ..... 25**
2.1 MARCO TEÓRICO DE LOS SISTEMAS DELTAICOS ..... 25
2.2 MARCO GEOLÓGICO Y GEOMORFOLÓGICO DE LA REGIÓN ..... 29
*La cuenca del Plata ..... 29*
*Geología y Geomorfología del río de la Plata ..... 31*
*Variaciones relativas del nivel del mar ..... 32*
*Estratigrafía del cuaternario ..... 33*
*Unidad Morfológica Río de la Plata ..... 35*
2.3 CARACTERIZACIÓN DE VARIABLES HIDROMETEOROLÓGICAS ACTUALES ..... 36
*Crecidas, caudal y competencia de los canales principales ..... 36*
*Mareas en la cuenca receptora ..... 41*
2.4 PLANICIE DELTAICA DE LA PRIMERA SECCIÓN Y SU RED DE DRENAJE ..... 46
*Planicie deltaica superior e inferior ..... 46*
*Diseño de drenaje de la Primera Sección ..... 49*
**3 MATERIALES Y MÉTODOS ..... 52**
3.1 TÉCNICAS DE ANÁLISIS MORFODINÁMICO DE LOS CANALES ..... 52
*Evolución morfológica de canales ..... 53*
3.2 TÉCNICAS DE ESTUDIO DE LOS PROCESOS EROSIVOS ANTROPOGÉNICOS ..... 53
*Perfiles de dragado del canal Rompani ..... 53*
*Monitoreo del oleaje náutico en el río Sarmiento (sitio TD) ..... 55*
*Cuantificación del retroceso de márgenes ..... 58*
3.3 TÉCNICAS DE EVALUACIÓN DE LAS MEDIDAS DE MANEJO ..... 60

*Retroceso de márgenes de relleno con tablestacados degradados (sitio TSC)* . 60
*Caracterización y seguimiento de un perfil de playa artificial (sitio TD)* ..... 61
*Reconocimiento de otros tipos de márgenes* ..... 64
*Piloto de remediación con geobolsas* ..... 64
**4 EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA NATURAL DE LOS CANALES ..... 65**
4.1 MODELO EVOLUTIVO DE CANALES EN EL FRENTE DE AVANCE ..... 66
*Descripción del frente de avance en el sector del canal del Este* ..... 66
*Adosamientos de bancos de desembocadura (caso canal del Este)* ..... 71
4.2 MODELO EVOLUTIVO DE CANALES EN LA PLANICIE DELTAICA ..... 73
*Reducción del ancho por acreción de bancos laterales (caso tramo medio del canal del Este)* ..... 73
*Migración de embocaduras* ..... 75
*Migración lateral en canales sinuosos (Vuelta Mala del río Capitán)* ..... 81
4.3 SÍNTESIS DE LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA NATURAL DE CANALES ..... 83
APÉNDICE FOTOGRÁFICO: MORFOLOGÍA NATURAL DE CANALES E ISLAS ..... 85
**5 EROSIÓN ANTROPOGÉNICA DE CANALES ..... 91**
5.1 INTRODUCCIÓN ..... 91
*Historia de la antropización de la Primera Sección* ..... 92
*Oleaje Náutico: marco teórico y conceptual* ..... 101
5.1 RELEVAMIENTOS HIDROGRÁFICOS DEL DRAGADO EN EL CANAL ROMPANI ..... 107
*Perfil transversal: volúmenes dragados y nuevos depósitos* ..... 107
*Perfil longitudinal: bancos en confluencias con distributarios* ..... 111
*Observaciones finales sobre los dragados* ..... 113
5.2 MONITOREO DEL OLEAJE NÁUTICO EN EL RÍO SARMIENTO ..... 114
*Clasificación de embarcaciones* ..... 114
*Conteo de embarcaciones en el río Sarmiento (2013/2014)* ..... 116
*Observaciones sobre la propagación del oleaje náutico hacia las márgenes* 122
5.3 ESTUDIOS DE RETROCESO DE MÁRGENES ..... 127
*Efecto morfológico del oleaje náutico en el río Sarmiento* ..... 127
*Cuantificación del retroceso de márgenes en la Primera Sección* ..... 131

5.4 MODELOS EVOLUTIVOS DE SÍNTESIS E INTEGRACIÓN DE RESULTADOS ..... 137
APÉNDICE FOTOGRÁFICO I: EVOLUCIÓN DE LA NAVEGACIÓN ..... 139
APÉNDICE FOTOGRÁFICO II: DRAGADO Y EROSIÓN EN LAS MÁRGENES ..... 147
APÉNDICE III: DATOS DE LA MEDICIÓN DE ANCHO DE CANALES ..... 152
**6 PROTECCIÓN DE MÁRGENES Y MEDIDAS DE MANEJO ..... 157**
6.1 LOS TABLESTACADOS ..... 159
*Seguimiento de una margen con relleno y tablestacado (sitio TSC) ..... 161*
6.2 LAS PLAYAS ARTIFICIALES ..... 169
*Caracterización sedimentológica y perfiles de playa en el (sitio TD) ..... 170*
6.3 OBSERVACIONES DE OTROS MANEJOS Y TIPOS DE MÁRGENES ..... 178
*Márgenes naturales sin intervención directa ..... 178*
*Moderación de la erosión con márgenes arboladas ..... 179*
*Moderación de la erosión con enramadas ..... 184*
*Acorazamiento de márgenes con bloques de demolición ..... 186*
*Transformación de márgenes con terraplenes ..... 191*
*Otras intervenciones para moderar la erosión ..... 193*
6.4 ENSAYO PILOTO DE REMEDIACIÓN DE MÁRGENES ..... 194
*Geobolsas: una protección para casos de emergencia ..... 194*
*Reducción del oleaje: prueba de boyado de canales ..... 197*
6.5 ESTRATEGIAS PARA EL MANEJO DE LA EROSIÓN ..... 199
*Reingeniería de la red de transporte fluvial ..... 199*
*Restricciones a la navegación en crecidas ..... 199*
*Cartelería de advertencia en puntos de erosión ..... 200*
**7 CAPÍTULO FINAL ..... 202**
7.1 DISCUSIONES ..... 202
*Morfología natural de los canales y planicie deltaica ..... 202*
*El retroceso márgenes ..... 205*
*Protecciones y estrategias de manejo ..... 208*
7.2 CONCLUSIONES ..... 211
**8 BIBLIOGRAFÍA ..... 215**

# LISTA DE TABLAS

TABLA 2.1: AFORO DE AFLUENTES DEL DELTA EN LA PARTE INFERIOR DE LA CUENCA DEL PLATA (SUBSECRETARÍA DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA NACIÓN 2000-2015 Y OTRAS PUBLICACIONES). EL SISTEMA FLUVIAL NORTE (SFN) TIENE UN CAUDAL MEDIO TOTAL CASI 5 VECES MAYOR QUE LA DESEMBOCADURA DE LA PRIMERA SECCIÓN, MIENTRAS QUE EL CAUDAL MÁXIMO REGISTRADO ES CASI 6 VECES MAYOR TAMBIÉN EN EL SFN. ..... 38

TABLA 3.1: CATEGORÍA DE DÍAS MONITOREADOS Y SUS CONDICIONES HIDROMETEOROLÓGICAS FAVORABLES PARA LAS ACTIVIDADES NÁUTICAS EN LA ZONA ..... 56

TABLA 4.1: REDUCCIÓN DEL ANCHO EN EL CANAL DEL ESTE Y ARROYO DESAGUADERO POR DESARROLLO DE BANCO ADOSADOS A LAS MÁRGENES ENTRE 1934 Y 2017. ..... 74

TABLA 5.1: SÍNTESIS DE LA HISTORIA DE ANTROPIZACIÓN DEL DELTA. TODAS LAS ETAPAS, EXCEPTO LA ÚLTIMA, SON ADAPTADAS DE BATISTA (1986). EN GRIS CLARO ETAPAS DE BAJA INTERVENCIÓN, EN GRIS OSCURO, ETAPAS DE INTERVENCIONES DIRECTAS E INDIRECTAS SOBRE LOS CANALES. ..... 93

TABLA 5.2: PARÁMETROS Y VOLÚMENES ESTIMADOS EN EL CANAL ROMPANI OBTENIDOS DE LA EVOLUCIÓN DEL PERFIL TRANSVERSAL LUEGO DEL DRAGADO. MBNM: METROS BAJO NIVEL MEDIO ..... 109

TABLA 5.3: CATEGORÍAS DE EMBARCACIONES, SUS CARACTERÍSTICAS Y PARÁMETRO DE ALTURA DE OLEAJE NÁUTICO EN EL RÍO SARMIENTO ..... 114

TABLA 5.4: CANTIDAD DE EMBARCACIONES A MOTOR QUE TRANSITARON EL SITIO RÍO SARMIENTO EN CADA UNO DE LOS CUATRO DÍAS ANALIZADOS. DATOS MEDIDOS EN 2013 Y 2014. ..... 118

TABLA 5.5: INCREMENTO MEDIO DEL ANCHO DE LOS CANALES ORDENADOS POR TASA DE INCREMENTO DEL ANCHO DECRECIENTE. UBICACIÓN DE LOS CANALES EN FIGURA 5.23 ..... 135

TABLA 5.6: BASE DE DATOS DEL ANCHO DE CANALES (EN METROS) ORDENANDOS ALFABÉTICAMENTE, UBICACIÓN GEOGRÁFICA DE CADA UNO Y ANCHO MEDIDO EN LA FOTOGRAFÍA AÉREA HISTÓRICA DEL AÑO 1934 O 1969 Y EN LA IMAGEN SATELITAL CORRESPONDE AL AÑO 2019. SEGÚN LA DIFERENCIA DE ANCHO HALLADA SE RESALTAN. ..... 152

TABLA 6.1: CLASIFICACIÓN DE MÁRGENES HALLADAS EN LA PRIMERA SECCIÓN. ..... 158

TABLA 6.2: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO. CLASIFICACIÓN Y PARÁMETROS ESTADÍSTICOS DE LAS MUESTRAS CALCULADOS POR EL MÉTODO FOLK Y WARD (1957). ..... 171

# LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1: UBICACIÓN DE LA ZONA DE INVESTIGACIÓN. (A) CUENCA DEL PLATA EN EL CONTEXTO DE SUDAMÉRICA. (B) DELTA SUBAÉREO DEL RÍO PARANÁ (PI: PARANÁ INFERIOR, PG: PARANÁ GUAZÚ, PP: PARANÁ DE LAS PALMAS). (C) PRIMERA SECCIÓN Y LOS SITIOS DE ESTUDIO TIGRE SAILING CLUB (TSC) Y TIMÓN DORADO (TD). ..... 22

FIGURA 2.1: TRIÁNGULO DE CLASIFICACIÓN MORFOLÓGICA DE GRANDES SISTEMAS DELTAICOS, MODIFICADO DE GALLOWAY (1975). ..... 26

FIGURA 2.2: ESQUEMA GENERAL DE LAS DELIMITACIONES DE AMBIENTES Y SUBAMBIENTES EN GRANDES SISTEMAS DELTAICOS MARINOS (MODIFICADO DE HORI Y SAÍTO 2002) ..... 27

FIGURA 2.3: A) DISEÑO DE CANALES DISTRIBUTARIOS DE LA PLANICIE DELTAICA SEGÚN COLEMAN Y WRIGHT (1975). I. DISEÑO BIFURCANTE (*BIFURCATING*), II. DISEÑO CONFLUYENTE (*REJOINING),* III. DISEÑO SOLITARIO (*SINGLE*). B) MODELO DE CANALES DISTRIBUTARIOS DOMINADOS POR LA ACCIÓN FLUVIAL EN EL DELTA DE MAHAKAM SEGÚN PAYENBERG Y LANG (2003). ..... 27

FIGURA 2.4: MODELO DIGITAL DE ELEVACIÓN DE LA CUENCA DEL PLATA. SUBCUENCAS 1. DEL RÍO PARANÁ; 2. DEL RÍO URUGUAY 3. DEL RÍO NEGRO Y 4. EL RÍO DE LA PLATA. ESCALA 1:15 000 000. ..... 29

FIGURA 2.5: MAPA GEOMORFOLÓGICO DE LA UNIDAD RÍO DE LA PLATA Y ZONA DE ESTUDIO (PRIMERA SECCIÓN) MARCADA CON UN RECTÁNGULO DE LÍNEAS PUNTEADAS (MODIFICADO DE CAVALLOTTO *ET AL.* 2002). ..... 32

FIGURA 2.6: CURVA DE VARIACIONES RELATIVAS DEL NIVEL DEL MAR DURANTE LOS ÚLTIMO 8600 AÑOS (MODIFICADO DE CAVALLOTTO *ET AL.* 1995). ..... 33

FIGURA 2.7: PERFIL GEOLÓGICO SIMPLIFICADO DE LA ZONA DE ESTUDIO. EL PERFIL SE ORIENTA SO - NE EN LA ZONA DE ESTUDIO (VER RECUADRO EN FIGURA 2.5) SE EMPLEA LA NOMENCLATURA ESTRATIGRÁFICA PROPUESTA EN CAVALLOTTO Y VIOLANTE (2005) CON DATOS DE PROFUNDIDADES DE LAS DISTINTAS UNIDADES OBTENIDAS EN RINALDI *ET AL.* (2006) ..... 34

FIGURA 2.8: PRINCIPALES AFLUENTES, CANALES DISTRIBUTARIOS Y CUENCA RECEPTORA DEL SISTEMA FLUVIO DELTAICO ESTUARINO DEL DELTA DEL RÍO PARANÁ. AFLUENTES: RPI: RÍO PARANÁ INFERIOR, RUR: RÍO URUGUAY, RRN: RÍO NEGRO, RRQ: RÍO RECONQUISTA, RLJ: RÍO LUJÁN; CANALES DISTRIBUTARIOS: RPG: RÍO PARANÁ GUAZÚ, RPP: RÍO PARANÁ DE LAS PALMAS, SFN: SISTEMA FLUVIAL NORTE. CUENCA RECEPTORA RDP: RÍO DE LA PLATA. SE SEÑALA TAMBIÉN EL AMBA: ÁREA METROPOLITANA DE BUENOS AIRES Y LA ZONA DE ESTUDIO 1°SC: PRIMERA SECCIÓN. LA IMAGEN BASE ES UNA FOTOGRAFÍA AÉREA OBLICUA DE LA ESTACIÓN ESPACIAL INTERNACIONAL DEL AÑO 2016. ..... 37

FIGURA 2.9: COMPARACIÓN DE NIVELES HIDROMÉTRICOS MEDIDOS CADA 12 H EN LIMNÍMETROS DE TRES ESTACIONES DE LA PNA. LA ESTACIÓN SAN PEDRO (RÍO PARANÁ INFERIOR, DOMINADA POR LA ACCIÓN FLUVIAL) REPRESENTA LA SITUACIÓN AGUAS ARRIBA DEL DELTA. GUAZUCITO (RÍO PARANÁ GUAZÚ) Y SAN FERNANDO (RÍO LUJÁN) REPRESENTAN LOS NIVELES EN LOS EXTREMOS NORTE Y SUR DE LA PLANICIE INFERIOR DELTAICA Y ESTÁN DOMINADOS POR LA ACCIÓN DE LAS MAREAS. ..... 39

FIGURA 2.10: ROSA DE LOS VIENTOS QUE INDICA LA PREDOMINANCIA DE LOS VIENTOS DEL ESE. EL PROMEDIO DE VELOCIDAD ES DE 8,3 KN. AEROPARQUE, PERÍODO 2007-2018. ELABORACIÓN PROPIA EN BASE A DATOS DEL SMN PROCESADOS EN WRPLOT VIEW – LAKES ENVIRONMENTAL SOFTWARE ..... 43

FIGURA 2.11: FRECUENCIA DEL NIVEL DE AGUA EN MAREÓGRAFO DE BUENOS AIRES (PALERMO) Y SAN FERNANDO (SF). EL RANGO DE MAREAS NORMALES SE INDICA CON EL NIVEL DE BAJAMAR DE SICIGIA (BS) DE 0,2 M Y DE PLEAMAR DE SICIGIA (PS) DE 1,6 M PARA LA ESTACIÓN SAN FERNANDO. ..... 45

FIGURA 2.12: MAPA DE AMBIENTES GEOMORFOLÓGICOS Y DRENAJE DE LA PLANICIE DELTAICA ASOCIADA AL PARANÁ DE LA PALMAS Y COSTA BONAERENSE DE LOS PARTIDO DE SAN FERNANDO, TIGRE Y ESCOBAR). ESCALA 1:200 000. ELABORADO EN QGIS

sobre imágenes satelitales de alta resolución y mosaico de fotografías aéreas del año 1969 obtenido del Escuadrón Aeronaval Base Punta Indio. ..... 48
Figura 2.13: Modelo conceptual del diseño de la red de drenaje de la Primera Sección antes y después del siglo XVIII. La costa bonaerense se refiere a la planicie loessoide y la terraza de cordones holocena de los partidos de San Fernando, Tigre y Escobar. La línea de puntos N-S es una referencia aproximada de la zona en la que se ubicaba el frente deltaico en el siglo XVIII, basada en las reconstrucciones de Sarubbi (2007). LR: arroyo las Ranas, CP: Carapachay, CC: Cruz Colorada, Tor: Toro, ESP: Espera, CP: Capitán, CH: canal Honda, SA San Antonio, CE: canal del Este, VIB: Víboras, OdT: sudestadas. ..... 50
Figura 2.14: Relevamiento gráfico realizado por Muñiz a principios del siglo XIX (Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires, extraído de Cricelli *et al.* 2017). Se señala con una flecha doble el eje mayor de una isla alargada que el cartógrafo ubica entre los canales Antequera y Capitán y que habría sido una de las primeras depositadas con el diseño de drenaje tipo A, que caracteriza la planicie deltaica que se genera actualmente..... 51
Figura 3.1: Dispositivo de monitoreo fotográfico instalado en el río Sarmiento. Arriba, mapa de ubicación. En líneas punteadas la perspectiva de la cámara. En el centro, preparación del dispositivo fotográfico en un contenedor estanco e instalación del equipo. Abajo, ejemplo de imagen obtenida cada 10 s con el dispositivo del río Sarmiento (Nótese abajo playa artificial del sitio TD)..... 57
Figura 3.2: Distribución de los 65 sitios de monitoreo de incremento del ancho de los canales en fotografías aéreas e imágenes satelitales..... 59
Figura 3.3: Relevamiento batimétricos de los ríos Luján, Tigre y arroyo Gambado. Arriba Equipo de medición: embarcación tipo Kayak doble (A), transductor del ecosonda asegurado al casco (B); equipo de relevamiento: ecosonda, GPS, sonda de mano y batería montados sobre la cubierta (C). Abajo, grilla de puntos batimétricos sobre las piernas de navegación y puntos (en rojo) sobre las márgenes..... 62
Figura 4.1: Ubicación de modelos evolutivos (1 a 5). Se indican las direcciones de sudestadas (OdT) Los círculos grises indican la planicie deltaica inferior del delta subaéreo. Se indican los canales distributarios y su extensión en forma subácuea (flechas en las desembocaduras): RPP: río Paraná de las Palmas, BT: Bajos del Temor, VIB: arroyo Víboras, CE: canal del Este, RST: río San Antonio y RLJ: río Luján; los canales artificiales: HEMI: Hidrovía canal Emilio Mitre (labrado sobre el arroyo Víboras); CH: canal Honda y UR: río Urión; CP: Capitán, ..... 67
Figura 4.2: Imagen satelital e interpretación geomorfológica de la desembocadura del canal del Este y de las planicies de marea y planicie deltaica inferior adyacentes. Elaborado sobre imagen satelital en condiciones de bajante extraordinaria (13/11/2018) disponible en Google Earth. Escala aproximada del mapa 1:20.000 ..... 69
Figura 4.3: Depósito de sobrelavado al pie de una berma de tormenta en la costa del delta subaéreo al sur del canal del Este. Arriba, en condiciones de sudestada (10/12/2017). Abajo, una vez retirada la crecida se observan los depósitos de sobrelavado de junco y sedimentos (29/12/2017). Nótese el control morfológico del bañado y del canal de marea ubicado al pie de la berma. Imágenes disponibles en Google Earth (34°23'46.81"S; 58°29'24.64"O)..... 70
Figura 4.4: Evolución de la desembocadura del canal del Este entre 1969 y 2019. Escala aproximada 1:50.000..... 72
Figura 4.5: Crecimiento de banco lateral en el tramo medio del Canal del Este y consecuente reducción del ancho del arroyo Desaguadero..... 75

FIGURA 4.6: BIFURCACIÓN TIPO "Y" CON UN INCIPIENTE PROCESO DE MIGRACIÓN DE LA EMBOCADURA DEL CANAL HONDA EN LA MARGEN SUR DEL PARANÁ DE LAS PALMAS ENTRE 1969 Y 2018. ..... 77
FIGURA 4.7: BIFURCACIÓN TIPO "L" CON AVANZADO PROCESO DE MIGRACIÓN DE LA EMBOCADURA DEL RÍO CAPITÁN EN LA MARGEN SUR DEL PARANÁ DE LAS PALMAS ENTRE 1969 Y 2018. ..... 78
FIGURA 4.8: MAPA HISTÓRICO DE LAS ISLAS Y CANALES EN LA 1RA Y 2DA SECCIÓN DE ISLAS. SE SEÑALA CON FLECHAS LA BIFURCACIÓN TIPO "Y" DEL RÍO CAPITÁN EN LA DÉCADA DE 1930 (COMISIÓN ADMINISTRADORA DEL RÍO DE LA PLATA, TOMADO DEL PORTAL WWW.ALESTUARIO.COM.AR) ..... 80
FIGURA 4.9: MIGRACIÓN LATERAL DE LA CURVA CERRADA DEL RÍO CAPITÁN DENOMINADA VUELTA MALA. ESTA SINUOSIDAD MIGRA LATERALMENTE A UNA TASA DE ENTRE 0,2 - 0,5 M/AÑO Y FORMACIÓN DE BANCOS LATERALES QUE REDUCEN EL ANCHO DEL CAUCE ..... 82
FIGURA 4.10: EVOLUCIÓN ESQUEMÁTICA DE UN CANAL DISTRIBUTARIO DE LA PRIMERA SECCIÓN, E INTEGRACIÓN ESPACIAL DE LOS DISTINTOS PROCESOS DE EVOLUCIÓN HALLADOS EN EL MODELO NATURAL ..... 84
FIGURA 5.1: RECONSTRUCCIÓN REGIONAL DE LOS RÍOS PARANÁ, LUJÁN Y DE LAS CONCHAS (RECONQUISTA) Y EL REPARTO DE LAS TIERRAS DE LA PLANICIE LOESSOIDE EN TIEMPOS DE LA CONQUISTA Y COLONIZACIÓN (PRIMERA MITAD DEL SIGLO XVII), SEGÚN MOLINA (1956). NÓTESE EL FRENTE DEL DELTA SUBAÉREO QUE EL AUTOR RECONSTRUYE DE DOCUMENTACIÓN DE LA ÉPOCA COLONIAL A LA ALTURA DEL RINCÓN DE RIGLOS, DENOMINADO MÁS ADELANTE «ALTO ESCOBAR» EN EL MAPA GEOMORFOLÓGICO REGIONAL (FIGURA 2.12). ..... 94
FIGURA 5.2: SUPERFICIE CONSTRUÍDA EN CADA UNA DE LAS PEQUEÑAS PARCELAS DEL TERRITORIO DE LA PRIMERA SECCIÓN (MUNICIPALIDAD DE TIGRE 2012). ..... 100
FIGURA 5.3: CRITERIOS GEOMORFOLÓGICOS PARA DETERMINAR EL EFECTO DEL OLEAJE NÁUTICO COMO CAUSA PREDOMINANTE DEL RETROCESO DE MÁRGENES. A. EL OLEAJE NÁUTICO EROSIONA EN AMBAS MÁRGENES EN TRAMOS RECTOS Y EN LA PARTE INTERIOR SOBRE CURVAS (EXTRAÍDO DE HTTP://DPIPWE.TAS.GOV.AU/DOCUMENTS/GUIDE-TO-LOW-WAVE-WAKE-BOATING.PDF). B. EN LAS MÁRGENES SE FORMA UN PERFIL ATERRAZADO CON PLAYA DE CANAL NAVEGABLE (MODIFICADO DE VERHEIJ (2000)), DONDE $H_0$ ES LA ALTURA DE LA OLA, $H_{(Y)}$ ES LA OLA ATENUADA POR REFRACCIÓN. LA ALTURA DE PLAYA (H) ESTÁ EN RELACIÓN A LA ALTURA DE LA OLA. $H_0$ SE REFIERE A LA MÁXIMA PROFUNDIDAD DE LA PLAYA, $D_Y$ ES EL RETROCESO DE LA MARGEN EN UN DETERMINADO PERÍODO DE TIEMPO (DT) ..... 103
FIGURA 5.4: OLAS SECUNDARIAS GENERADAS POR EL PASAJE DE UNA EMBARCACIÓN (ADAPTADO DE SORENSEN 1973) ..... 104
FIGURA 5.5: TIPOS DE OLAS SECUNDARIAS Y POTENCIAL EROSIVO EN LANCHAS. I. ALTURA DE OLA (POTENCIAL EROSIVO) SEGÚN VELOCIDAD DE LA LANCHA (ADAPTADO DE MAYNORD 2001). II. TIPO DE OLEAJE SECUNDARIO PREDOMINANTE SEGÚN VELOCIDAD QUE DESARROLLE LA LANCHA (IMÁGENES DEL SIMULADOR DE OLAS *MICHLET),* SIENDO A: BAJA VELOCIDAD, B: ACELERACIÓN Y C: VELOCIDAD DE PLANEO. ..... 106
FIGURA 5.6: PERFILES TRANSVERSAL "SECCIÓN SHEREZADE" ANTES, RECIÉN DRAGADO Y LUEGO DEL DRAGADO EN EL CANAL ROMPANI. PROFUNDIDADES REFERIDAS AL NIVEL MEDIO DE MAREAS, EXAGERACIÓN VERTICAL 5:1. ..... 108
FIGURA 5.7: MODELO ESQUEMÁTICO PARA LA PRIMERA SECCIÓN ELABORADO A PARTIR DEL CASO TIPO EN EL CANAL ROMPANI. A. MODIFICACIÓN DEL PERFIL DEL CANAL DURANTE OPERACIONES DE DRAGADO. B. EN CRECIDAS LOS TERRAPLENES ELEVADOS POR SUCESIVOS DRAGADOS DEPOSITADOS SOBRE LAS MÁRGENES CON RELLENO ELEVAN LA COTA DE DESBORDE DEL CANAL INCREMENTANDO LA POTENCIA DE LA CORRIENTE. ..... 110
FIGURA 5.8: PERFIL DEL CANAL ROMPANI INMEDIATAMENTE DESPUÉS DEL DRAGADO Y LUEGO DE 18 MESES. SE DISTINGUEN DOS TIPOS DE DEPÓSITO POSDRAGADO: UN BANCO DE FONDO O LATERAL Y DEPÓSITOS ASOCIADOS A EVENTOS GRAVITACIONALES COMO DESLIZAMIENTOS DE LAS MÁRGENES ..... 111

FIGURA 5.9: RELEVAMIENTO BATIMÉTRICO A LO LARGO DEL CANAL ROMPANI 6 MESES DESPUÉS DE LA FINALIZACIÓN DE SU DRAGADO (MAYO 2014). NÓTESE LA FORMACIÓN DE BARRAS DE 1 M DE ALTURA CON RESPECTO AL FONDO Y DE 200 M DE LARGO EN AMBAS DESEMBOCADURAS DEL CANAL. EXAGERACIÓN VERTICAL DE LA REPRESENTACIÓN 100:1. ..... 112
FIGURA 5.10: NÚMERO DE CADA TIPO DE EMBARCACIONES QUE PASÓ POR EL RÍO SARMIENTO MEDIDO EN CUATRO DÍAS DISTINTOS CON EL SISTEMA DE MONITOREO REMOTO. EN TEMPORADA Y FINES DE SEMANA OCURREN LOS DÍAS DE MAYOR TRÁNSITO. ..... 116
FIGURA 5.11: NÚMERO DE EMBARCACIONES A MOTOR QUE TRANSITAN POR EL RÍO SARMIENTO SEGÚN LA HORA DE UN DÍA TÍPICO DE TEMPORADA ALTA, TANTO PARA UN DÍA DE SEMANA COMO UNO DE FIN DE SEMANA. SE INDICA CON UNA LA LÍNEA DE BASE LAS 40 EMBARCACIONES/H QUE EN GENERAL TRANSITAN EL CANAL EN HORARIOS DIURNOS. ..... 117
FIGURA 5.12: FOTOGRAFÍAS DEL OLEAJE DE LANCHAS COLECTIVAS Y DE MEDIANO PORTE EN LA PRIMERA SECCIÓN. A. OLEAJE DE UNA LANCHA MEDIANA A VELOCIDAD DE TRANSICIÓN QUE IMPACTA DE FORMA OBLICUA SOBRE UN CANAL ESTRECHO (ARROYO ESPERITA). B. LANCHA MEDIANA A VELOCIDAD DE PLANEO, SE OBSERVA UN OLEAJE MÁS BAJO PERO ORIENTADO DIRECTAMENTE A LAS MÁRGENES. C. LANCHA COLECTIVA A BAJA VELOCIDAD SOBRE EL RÍO LUJÁN. D. OLEAJE NÁUTICO DE PROA Y DE POPA DE UNA LANCHA COLECTIVA A VELOCIDAD DE TRANSICIÓN. ..... 119
FIGURA 5.13: NÚMERO DE LANCHAS COLECTIVAS Y MEDIANAS MEDIDAS EN CUATRO DÍAS REPRESENTATIVOS DE TEMPORADA ALTA Y BAJA EN DÍAS DE FIN DE SEMANA Y ENTRE SEMANA, RESPECTIVAMENTE. SOLO SE CONSIDERAN LANCHAS COLECTIVAS Y MEDIANAS, QUE SON LAS QUE USUALMENTE A VELOCIDAD DE TRANSICIÓN Y PLANEO PRODUCEN OLEAJE NÁUTICO EROSIVO (H > 0,3M). ..... 120
FIGURA 5.14: PICO DE TRÁFICO FLUVIAL EN HORARIO VESPERTINO DE FIN DE SEMANA. IMÁGENES DEL SISTEMA DE MONITOREO FOTOGRÁFICO REMOTO INSTALADO EN EL RÍO SARMIENTO DEL DÍA DOMINGO 9/1/2013 ENTRE LAS 18 Y 19 H. ..... 121
FIGURA 5.15: GENERACIÓN DE LA OLA ANALIZADA ($T_0$) EN EL CASO DE UNA BAJANTE SOBRE EL RÍO SARMIENTO. NÓTESE EL MUELLE EN SECO SOBRE LA PLAYA. ..... 123
FIGURA 5.16: TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE DE UNA LANCHA COLECTIVA SOBRE LA CARA DE PLAYA DEL RÍO SARMIENTO CON UN NIVEL DE AGUA MUY BAJO (0,1 M SHN). SECUENCIA DE FOTOGRAFÍAS A INTERVALOS DE 10 S. ..... 124
FIGURA 5.17: TRANSFORMACIÓN DEL OLEAJE CON EL CANAL A NIVEL DE DESBORDE POR EFECTO DE UNA SUDESTADA (1,93 M EN EL MAREÓGRAFO SHN DE SAN FERNANDO). SECUENCIA FOTOGRÁFICA DE 100 S DE DURACIÓN A INTERVALOS DE 10 S. ..... 126
FIGURA 5.18: COMPARACIÓN ENTRE MIGRACIÓN DE LA CURVA PRONUNCIADA VUELTA MALA Y LA EROSIÓN EN MÁRGENES SIN PROTECCIONES EN "RECULADA DEL SARMIENTO" (ANTES LLAMADO "ABRA NUEVA") INDUCIDA POR EL OLEAJE NÁUTICO. EN COLOR VERDE (CON TRANSPARENCIA), ISLAS MAPEADAS SOBRE IMÁGENES SATELITALES DE ALTA RESOLUCIÓN (2016) SUPERPUESTAS A FOTOGRAFÍA AÉREA DEL AÑO 1934 GEORREFERENCIADAS. ..... 129
FIGURA 5.19: EVOLUCIÓN DEL ANCHO DEL RÍO SARMIENTO EN DOS IMÁGENES AÉREAS DE 1934 Y 2016 EN EL SITIO TD. ABAJO, PERFIL BATIMÉTRICO DEL RÍO SARMIENTO RELEVADO EN EL AÑO 2014. PROFUNDIDAD REFERIDA AL NIVEL MEDIO DE MAREAS Y RECONSTRUCCIÓN DEL PERFIL TRANSVERSAL DEL RÍO SARMIENTO PARA EL AÑO 1934. EL ANCHO DEL RÍO SARMIENTO EN EL SECTOR ANALIZADO EN EL PERFIL AB SE INCREMENTÓ 60 ± 5 M. ..... 130
FIGURA 5.20: PERFIL TRANSVERSAL ESQUEMÁTICO DE CANALES NAVEGABLES DE LA PRIMERA SECCIÓN CON TALUDES ATERRAZADOS EN AMBAS MÁRGENES POR EL EFECTO EROSIVO DEL OLEAJE NÁUTICO, ELABORADO A PARTIR DEL CASO TIPO TD. ..... 131
FIGURA 5.21: INCREMENTO DEL ANCHO DE LOS CANALES EN 65 PUNTOS MEDIDOS SOBRE FOTOGRAFÍAS AÉREAS HISTÓRICAS DE MEDIADOS DEL SIGLO XX E IMAGEN SATELITAL DEL AÑO 2019. LA BASE DE DATOS COMPLETA SE ANEXA EN TABLA 5.5 (APÉNDICES). ..... 133
FIGURA 5.22: RELACIÓN ENTRE ANCHO DE LOS CANALES EN 2019 Y EL INCREMENTO DEL ANCHO EN LOS SITIOS DE MEDICIÓN (EXCEPTO LOS SITIOS DEL CANAL DISTRIBUTARIO TRONCAL PARANÁ). LA DISTRIBUCIÓN ESPACIAL CORRESPONDE A LOS SITIOS DEL MAPA (FIGURA 5.19). ..... 134

FIGURA 5.23: ZONIFICACIÓN DE LAS TASAS DE EROSIÓN DE LAS MÁRGENES DE LOS CANALES ( DE ANCHO > 20 M) DE LA PRIMERA SECCIÓN.....136
FIGURA 5.24: PERFILES TRANSVERSALES ESQUEMÁTICOS DE LOS PROCESOS NATURALES E INDUCIDOS POR EL HOMBRE, Y LA EVOLUCIÓN MORFOLÓGICA QUE PRODUCEN, EN CANALES DISTRIBUTARIOS DE LA PLANICIE DELTAICA DE LA PRIMERA SECCIÓN. .....138
FIGURA 6.1: TIPOS DE TABLESTACADOS Y SU PROCESO CONSTRUCTIVO.....160
FIGURA 6.2: MAPA DE MORFOLOGÍA SUBÁCUEA DE LA INTERSECCIÓN DE LOS RÍOS LUJÁN, TIGRE Y ARROYO GAMBADO. RELEVAMIENTO HIDROGRÁFICO REALIZADO EN DICIEMBRE DE 2011. PROFUNDIDADES REFERIDAS AL PLANO DE REDUCCIÓN DE SONDAJES UBICADO 0,79 M POR DEBAJO DEL NIVEL MEDIO DE MAREAS. ESCALA DEL MAPA 1:2500. ESCALA DE LOS PERFILES DE CANALES 1:1000 CON UNA EXAGERACIÓN VERTICAL 3:1.....162
FIGURA 6.3: RETROCESO (R) DE LAS ESCARPAS DE EROSIÓN EN EL SITIO TSC SOBRE EL FRENTE DEL RÍO LUJÁN. ARRIBA IMÁGENES (GOOGLE EARTH) DE LOS AÑOS 2014 Y 2018 CON LA EVOLUCIÓN DE LAS CÁRCAVAS. PARA OBTENER RETROCESO EN UN PERÍODO DE 12 AÑOS SE MIDIÓ (D) EN 19 IMÁGENES SATELITALES. ABAJO, REGRESIÓN LINEAL DE LAS 19 MEDICIONES REALIZADAS EN UN PERÍODO DE 12 AÑOS (2004-2016). EN RECUADRO NARANJA SE UBICA EL RELEVAMIENTO TOPOGRÁFICO DE LA FIGURA SIGUIENTE. SE INDICA CON UNA ESTRELLA NARANJA EL PUNTO DESDE DONDE SE FOTOGRAFÍAN LAS IMÁGENES DE LA FIGURA 6.5.....163
FIGURA 6.4: MAPA TOPOGRÁFICO EN LA CONFLUENCIA DEL RÍO LUJÁN Y ARROYO GAMBADO (2014) SUPERPUESTO SOBRE IMAGEN SATELITAL DEL AÑO 2018 (GOOGLE EARTH) PARA PODER OBSERVAR LA EVOLUCIÓN DE LAS ESCARPAS EROSIVAS. LAS DIRECCIONES VARIABLES DEL OLEAJE NÁUTICO OCURREN POR EL TRÁNSITO EN DISTINTAS DIRECCIONES QUE OCURRE EN ESTA CONFLUENCIA DE VÍAS NAVEGABLES.....164
FIGURA 6.5: RETROCESO DE MÁRGENES EN EL RÍO LUJÁN ENTRE 2013 Y 2016. DETALLES (A, B, C, D, E) EN EL TEXTO. .....165
FIGURA 6.6: MODELO ESQUEMÁTICO DE REMOCIÓN EN MASA EN SUELOS DE RELLENO. ELABORADO A PARTIR DEL CASO TIPO DEL SITIO TSC. .....166
FIGURA 6.7: REFLEXIÓN DEL OLEAJE. A LA IZQUIERDA ESQUEMA ILUSTRATIVO DEL FENÓMENO. A LA DERECHA, PATRÓN DE OLAS EN EL RÍO CARAPACHAY Y ARROYO ANGOSTURA (IMAGEN DEL DÍA 18/12/2015, GOOGLE EARTH, INTERSECCIÓN DE CANALES EN PUNTO 34°23'7.78"S; 58°35'48.52"O) .....167
FIGURA 6.8: ESQUEMA ILUSTRATIVO DE LA ELEVACIÓN DEL NIVEL DE AGUA SOBRE EL LADO EXTERNO DE CURVAS Y PROCESOS DE EROSIÓN AL PIE DE TABLESTACADOS. POR LA MENOR RUGOSIDAD EN EL BORDE SE ACELERA EL FLUJO Y SE PROFUNDIZA EL LECHO DEL CANAL LO QUE PUEDE DESESTABILIZAR LAS PROTECCIONES (COMO SE OBSERVA EN EL CASO DE LA FIGURA 6.9) 168
FIGURA 6.9: COLAPSO POR EROSIÓN AL PIE Y SOCAVAMIENTO EN LA BASE DEL TABLESTACADO Y FORMACIÓN SOBRE EL SUELO DE LA MARGEN, DE UNA ESCARPA DE DESLIZAMIENTO PARALELA A LA COSTA EN EL RÍO CARAPACHAY.....168
FIGURA 6.10: PLAYAS ARTIFICIALES .....169
FIGURA 6.11: AMBIENTE DE LA PLAYA ARTIFICIAL TIMÓN DORADO EN EL RÍO SARMIENTO EN DONDE SE RELEVÓ EL PERFIL TD Y SE EXTRAJERON MUESTRAS DE ARENA PARA ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO. .....170
FIGURA 6.12: ANÁLISIS GRANULOMÉTRICO DE LA MUESTRAS DE ARENA DE LA PLAYA ARTIFICIAL TIMÓN DORADO. HISTOGRAMAS DE FRECUENCIA (%) VS. INTERVALOS DE CLASE GRANULOMÉTRICA (CADA ¼ DE ϕ). OTROS PARÁMETROS GRANULOMÉTRICOS EN TABLA 5.1 Y UBICACIÓN DE LAS MUESTRAS EN FIGURA 6.11. .....172
FIGURA 6.13: EVOLUCIÓN MORFODINÁMICA DE LA PLAYA ARTIFICIAL ENTRE SEPTIEMBRE DE 2013 Y MARZO DE 2014. SELECCIÓN DE IMÁGENES DEL DISPOSITIVO DE FOTOGRAFÍA REMOTO. TODAS LAS FOTOS CORRESPONDEN A LAS 16 H. EN DOS DE LAS IMÁGENES SE MARCAN LA BERMA ESTABLE (BE) Y LA BERMA TEMPORAL (BT) QUE INCREMENTA SU ESTABILIZACIÓN CON VEGETACIÓN.....173

FIGURA 6.14: PERFILES DE PLAYA ARTIFICIAL DEL SITIO TD. SE MARCAN LAS INCLINACIONES OBTENIDAS PARA LOS DISTINTOS SUBAMBIENTES DE PLAYA. NAM: NIVEL DE ALTA MAREA, NMM: NIVEL MEDIO DE MAREA, NBM: NIVEL DE BAJA MAREA. . 176
FIGURA 6.15: FOTOGRAFÍAS EN EL SITIO TD. A) PLAYA FRONTAL CON ONDULITAS EN LA ZONA DE ROMPIENTE DEL OLEAJE NÁUTICO. B) ACUMULACIÓN DE ARENA SOBRE LA PLANICIE DELTAICA. ..... 177
FIGURA 6.16: MÁRGENES SIN INTERVENCIONES. ..... 178
FIGURA 6.17: MÁRGENES ARBOLADAS. A) ESTABILIZACIÓN DEL BORDE COSTERO CON VARAS DE SAUCE (*S. BABYLONICA* Y *S. HUMBOLDTIANA*) COLOCADOS EN HILERA CON INDIVIDUOS CADA 40 CM (DESEMBOCADURA DEL CANAL DEL ESTE). B) BOSQUE SECUNDARIO TIPO "SAUZAL" SOBRE LA MARGEN. LA EROSIÓN AL PIE DE LA MARGEN PRODUCE LA INCLINACIÓN DE LA VEGETACIÓN LEÑOSA (RÍO CRUZ COLORADA). ..... 180
FIGURA 6.18: MÁRGENES DE RELLENO ARBOLADAS ..... 182
FIGURA 6.19: FOTO HISTÓRICA DE PRINCIPIOS DE SIGLO XX EN LA QUE SE OBSERVAN FORESTACIONES DE ÁLAMOS EN EL RÍO CHANÁ. ALGUNOS SAUCES EN LA RIBERA IZQUIERDA (FOTOGRAFÍA DE FEDERICO KOHLMANN, AÑO DESCONOCIDO, GENTILEZA DEL ARCHIVO DE LA BIBLIOTECA NACIONAL). ..... 183
FIGURA 6.20: REVESTIMIENTOS DE MODERACIÓN DE LA EROSIÓN Y PROTECCIONES VERTICALES DE ACORAZAMIENTO CON RAMAS Y TRONCOS. ..... 185
FIGURA 6.21: ENROCADOS ..... 187
FIGURA 6.22: DISTRIBUCIÓN DE LAS 140 PROTECCIONES DE MÁRGENES ENROCADAS HALLADAS EN EL RÍO CARAPACHAY Y ESPERA, SEGÚN DISTANCIA EN METROS AL RÍO LUJÁN. ..... 188
FIGURA 6.23: CHATA CON BRAZO HIDRÁULICO REPONIENDO SUELOS QUE SE LAVARON EN LA PARTE POSTERIOR DE ENROCADOS COLOCADOS SIN FILTRO SOBRE EL RÍO LUJÁN ..... 190
FIGURA 6.24: DESLIZAMIENTO DE ROCAS VERIFICADO MEDIANTE UN SONDAJE DE BARRIDO LATERAL EN EL RÍO SAN ANTONIO (ISLA 2009) ..... 190
FIGURA 6.25: MÁRGENES CON TERRAPLENES DE CONSTRUCCIÓN RECIENTE VINCULADAS A EMPRENDIMIENTOS INMOBILIARIOS REALIZADOS EN LA PLANICIE DELTAICA A PARTIR DE LA DÉCADA DEL 1990. ..... 192
FIGURA 6.26: OTRAS PROTECCIONES Y MEDIDAS. ..... 193
FIGURA 6.27: PROTECCIÓN CON GEOBOLSAS DISEÑADA PARA ESTABILIZAR MÁRGENES ANTE EL RIESGO DE CAÍDA DE INFRAESTRUCTURA. ..... 194
FIGURA 6.28: IMPLEMENTACIÓN DE DEFENSA CON GEOBOLSAS EN UN TRAMO DEL ARROYO GAMBADO (TSC). EN OCTUBRE DE 2015, PRIMERA ETAPA DE LA OBRA SE COLOCARON LAS ESTACAS CON NEUMÁTICOS. EN JULIO DE 2016 SE COLOCARON HILERAS DE GEOBOLSAS CUBRIENDO LA CÁRCAVA. EN MARZO DE 2018 LA CÁRCAVA SE ESTABILIZÓ Y COMENZÓ A CRECER VEGETACIÓN. ..... 196
FIGURA 6.29: FOTOGRAFÍA DURANTE LA PRUEBA PILOTO DE BOYADO (FLECHAS NEGRAS). DEL ARROYO GAMBADO, SEGÚN CÓDIGO IALA. LA REDUCCIÓN DEL ESPACIO FÍSICO NAVEGABLE DISMINUYE LA VELOCIDAD DE LANCHAS A MOTOR Y MITIGA LA EROSIÓN GENERADA POR EL OLEAJE DE NAVEGACIÓN. ..... 198
FIGURA 6.30: SEÑALIZACIÓN SIMPLE PARA LIMITACIÓN DE LA VELOCIDAD Y LA GENERACIÓN DE OLEAJE NÁUTICO. ..... 200

# 1 INTRODUCCIÓN GENERAL

En el siglo XXI el humano es igual en importancia a cualquier otro factor geomorfológico (Szabó 2010). La intensidad con la que la sociedad modifica los paisajes es proporcional al tamaño de la población humana, a sus requerimientos sobre el medio ambiente y al nivel de progreso tecnológico alcanzado para satisfacer sus crecientes demandas (Lóczy y Süto 2011). En los canales navegables, antes del uso de motores a vapor y diésel, las embarcaciones se movían a bajas velocidades con un impacto despreciable. Con el aumento de la velocidad de las embarcaciones, comenzaron los problemas de erosión en las márgenes de los canales y surgió el requerimiento de un mantenimiento permanente para prevenir erosiones catastróficas (Dávid *et al.* 2010).

En el delta del río Paraná, la Ley de Tierra del año 1888 puede señalarse como el hito de inicio de la gran transformación económica y social del delta (Galafassi 2005). A partir de este momento, comienza el aprovechamiento de tipo ganadero, frutihortícola, forestal, recreativo e inmobiliario que incluyó la construcción de nuevos canales, rellenos de las márgenes, endicamientos y construcción de tablestacados, entre otras modificaciones. La navegación que acompañó la transformación económica y social del delta evolucionó desde embarcaciones a vela y a vapor a los grandes buques mercantes y lanchas rápidas deportivas.

La geomorfología ambiental involucra el monitoreo de los procesos que forman el paisaje y la evaluación de los cambios producido por la acción del hombre (Hails 1977). En esta tesis se investiga, desde el campo de la geomorfología ambiental, el sistema de canales de la Primera Sección de islas del delta del río Paraná, en adelante Primera Sección, y los procesos antropogénicos asociados al transporte fluvial (dragado y oleaje náutico) que producen erosión de márgenes.

## 1.1 Justificación de la investigación

Son muy pocos los estudios que relacionan mediciones del oleaje náutico y de erosión de márgenes en la zona de estudio. Groeber (1961) fue el primero que mencionó brevemente, en un ensayo sobre estratigrafía y estructura en la región del delta del río Paraná, algunos efectos erosivos del oleaje náutico sobre las márgenes de las islas. Existen en la literatura de la zona referencias más genéricas de impactos antropogénicos en los canales. Prat y Salomon (1998) mencionan el dragado del canal Honda como el factor causal de un incremento del ancho en dicho canal de 20 m, lo cual constituye un primer antecedente sobre el impacto de los dragados. Marcomini y López (2014) mencionan que las actividades de mayor impacto en el medio físico del delta del río Paraná son el dragado de canales, la elevación de albardones artificiales, y el tránsito de embarcaciones.

Recientemente Mangini *et al.* (2018) relacionan oleaje náutico y erosión en el Paraná Medio que, a diferencia de la zona de estudio, tiene márgenes arenosas poco consolidadas. Obtienen un retroceso promedio de 0,26 m en una hora de pasaje continuo de ida y vuelta a 10 kn (nudos) de velocidad de una lancha a 20 m de la costa. Den Bieman *et al.* (2010) aplican un modelo de erosión de márgenes para el Paraná de las Palmas, en el partido de Escobar. Descartan la influencia de las crecidas y la erosión por flujo y concluyen que el oleaje de los buques mercante es el mayor factor erosivo que generó un retroceso promedio de 0,7 m / año en cada margen. Sin embargo, cabe destacar que el Paraná de las Palmas es un canal ancho, donde navegan grandes buques mercantes cuya frecuencia de pasaje es relativamente baja. A diferencia de la Primera

Sección donde los canales son estrechos y predominan lanchas rápidas con una relativamente alta frecuencia de pasaje.

Desde finales del siglo XX, la construcción de tablestacados de hormigón, playas de arena artificiales y de nuevas protecciones como los enrocados de escombros volcados directamente sobre los bancos de las márgenes, generan depósitos que están reconfigurando el paisaje ribereño en la Primera Sección. La gobernación local convocó a la confección de un plan de manejo de la Primera Sección (Municipalidad de Tigre 2012). El plan se materializó en ordenanzas locales (Municipalidad de Tigre 2013) que entre otros puntos prohíbe la colocación de protecciones verticales, como los tablestacados, por los problemas de erosión y reflexión del oleaje que generan. Por su parte, la Prefectura Naval Argentina (PNA 2015) emitió una regulación que ordena navegar a velocidad reducida para no generar oleaje. Las regulaciones mencionadas no parecieran tener una aplicación práctica rigurosa en el territorio.

## 1.2 Zona de investigación

El delta del río Paraná ubicado en la parte más austral de la cuenca del Plata, tiene su ápice en la divergencia de aguas del río Paraná Inferior en los canales distributarios Paraná Guazú y Paraná de las Palmas, a la altura de la localidad de Ibicuy, al sur de la provincia de Entre Ríos (Figura 1.1 B). Este delta representa la última expresión del cortejo regresivo de la "Unidad Geomorfológica Río de la Plata" definida en Cavallotto (1995). La "Primera Sección de Islas del Delta", en adelante Primera Sección, es la denominación jurisdiccional que recibe un sector de delta subaéreo ubicada en la parte más sudoriental de su frente de avance (Figura 1.1 A). Está conformada por islas de la planicie deltaica asociada al Paraná de la Palmas y se encuentra entre la cabecera del río de la Plata, el canal artificial Gobernador Arias, el río Paraná de las Palmas y el río Luján (Figura 1.1 C). En la literatura científica puede encontrarse referida esta zona de investigación como parte del "Delta del Paraná Inferior" (Burkart 1957; Iriondo 1980) o "Bajo Delta del Paraná" (Bonfils 1962; Malvárez 1997). La Primera Sección se asigna para su gobierno municipal al partido de Tigre (provincia de Buenos Aires, Argentina) por lo que se también se refiere de manera informal a la zona de investigación como

«Delta de Tigre». La única forma de acceder a la zona es por vía fluvial. Parte de las investigaciones se focalizan en dos sitios dentro de la Primera Sección ubicados en puntos estratégicos de alto tránsito náutico: el sitio de estudio Tigre Sailing Club (en adelante TSC), ubicado en la esquina del río Luján y arroyo Fulminante, frente a la salida del río Tigre, donde se encuentra la Estación fluvial de lanchas colectivas. Y el sitio de estudio Timón Dorado (TD), localizado sobre el río Sarmiento a la altura del canal Rompani, el cual es una vía principal de navegación entre la ciudad de Tigre y el interior de las islas (Figura 1.1 C).

## 1.3 Hipótesis y objetivos

La hipótesis central de investigación es que los agentes geomorfológicos antropogénicos asociados al transporte fluvial (dragado y oleaje náutico) aceleran la erosión de márgenes de los canales. El objetivo general es estudiar la geomorfología de los canales distributarios de la Primera Sección y sus problemas de erosión. La estrategia que se adopta para abordar la complejidad de la temática es dividir el objeto de estudio en tres preguntas de investigación:

¿Cómo evolucionan los canales distributarios de la planicie deltaica por procesos naturales?

¿Cómo son los procesos de erosión antropogénicos en los canales y que efectos producen sobre las márgenes?

¿Qué tipo de medidas se utilizan para estabilizar las márgenes y como puede mitigarse la erosión?

Los objetivos específicos de investigación son:

1) Generar un modelo de evolución natural de los canales distributarios (Capítulo 4).
2) Analizar los efectos del dragado y oleaje náutico en la morfología de los canales y cuantificar el retroceso de márgenes que ha ocurrido en la zona (Capítulo 5).
3) Identificar los tipos de protecciones de márgenes que se adoptan en la Primera Sección y proponer medidas de mitigación apropiadas (Capítulo 6).

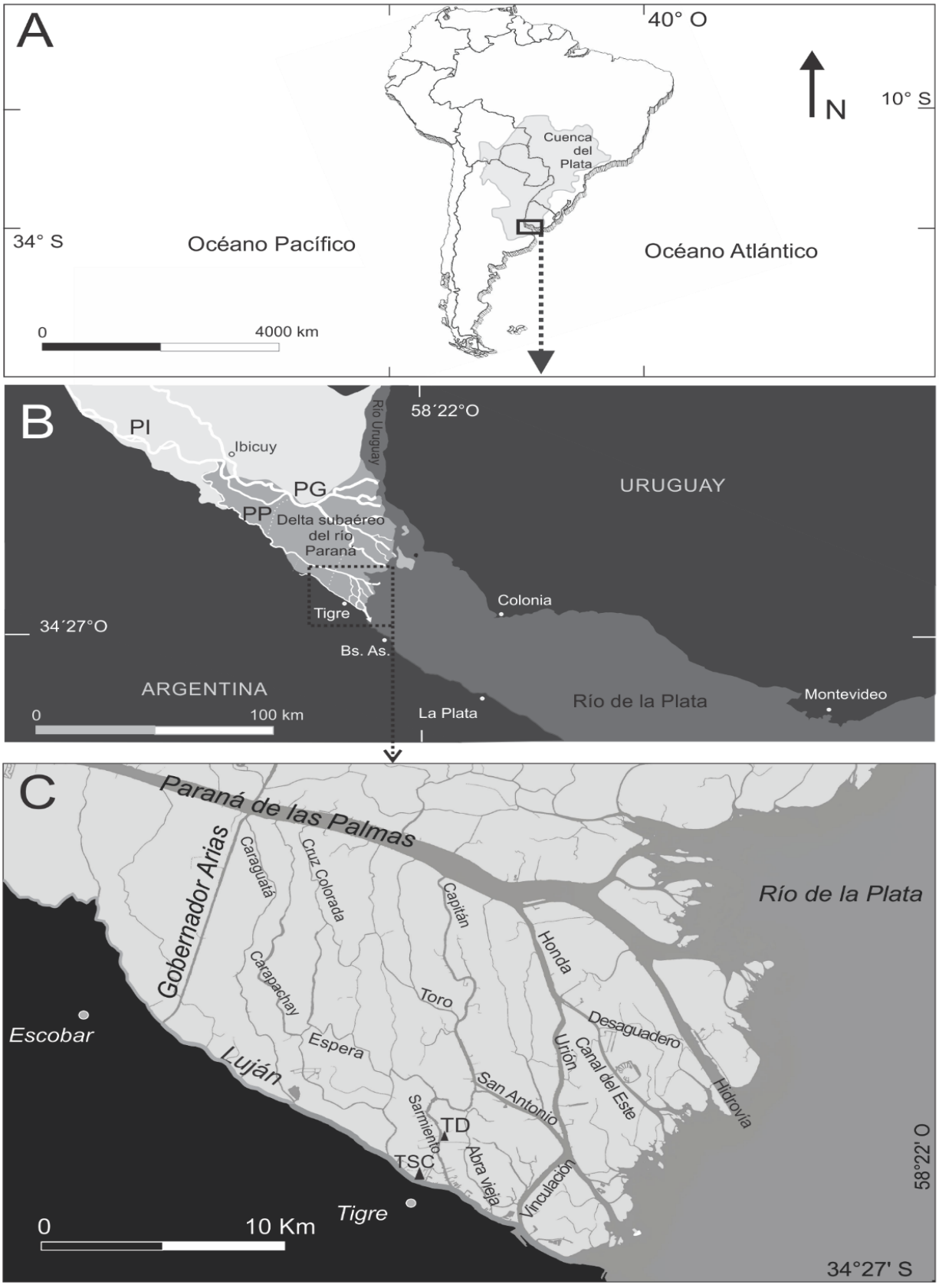


**Figura 1.1: Ubicación de la zona de investigación. (A) Cuenca del Plata en el contexto de Sudamérica. (B) Delta subaéreo del río Paraná (PI: Paraná Inferior, PG: Paraná Guazú, PP: Paraná de las Palmas). (C) Primera Sección y los sitios de estudio Tigre Sailing Club (TSC) y Timón Dorado (TD).**

**Organización y contenidos de la tesis**

Para cumplir con los objetivos se presenta, en el Capítulo 2: una caracterización del ambiente que incluye marco teórico sobre deltas y un marco geológico y geomorfológico de la región y de la zona de estudio. En el Capítulo 3: se explican los materiales y métodos de investigación. En el Capítulo 4: se presenta el primer apartado de resultados con un análisis morfoevolutivo de distintos sectores que conforma el modelo de evolución y erosión natural en canales de la Primera Sección. En el Capítulo 5: se estudian las alteraciones antropogénicas a los canales con un seguimiento del caso de dragado del canal Rompani y el monitoreo del oleaje náutico en el río Sarmiento. Además, con fotografías aéreas históricas e imágenes satelitales se estima el incremento del ancho de los canales navegables de la Primera Sección con el que se elabora un mapa de tasas de erosión de los canales de la Primera Sección mayores a 20 m de ancho en el que se podrá observar la distribución de los canales en los que se registró mayores retrocesos de márgenes. En el Capítulo 6: se presenta un breve informe de cada uno de los tipos de márgenes que se identificaron en navegaciones de reconocimiento por los canales Carapachay, Cruz Colorada y Espera, entre otros. Se observan sus problemas erosivos, y con mayor énfasis, se estudia la evolución de un perfil de playa artificial en el sitio TD (río Sarmiento) y la erosión de suelos de rellenos por la degradación de un tablestacado en el sitio TSC (río Luján). Finalmente, se proponen medidas de manejo, algunas de las cuales fueron ensayadas a escala piloto en el arroyo Gambado. En el Capítulo 7: se discuten los resultados y se ofrecen las conclusiones sobre los principales hallazgos de cada uno de los objetivos específicos de la investigación.

## 1.4 Revisión de la literatura del delta del río Paraná

Las investigaciones geomorfológicas y ambientales de esta tesis se apoyan en una vasta cantidad de publicaciones sobre diversos temas del delta del río Paraná. La geología, geomorfología regional y evolución holocena del delta han sido tratadas por Groeber (1961), Iriondo (1999, 2004, 2010), Parker (1990), Marcolini y Parker (1992), Prat *et al*. (1998), Cavallotto (2002), Cavallotto y Violante (2005), Cavallotto *et al.*, (2005), Silva Busso *et al.*, (2004), Rinaldi *et al.* (2006), Manassero *et al.* (2008), Milana

y Kröhling (2015) y Marcomini *et al.* (2018). Los patrones de distribución de la vegetación boscosa, de pastizales y de plantas acuáticas asociada a la morfología del delta y sus islas, han sido objeto de numerosas investigaciones que se iniciaron con los aportes de Burkart (1957) y Bonfils (1962) y que luego continuaron más recientemente con los trabajos de Kalesnik y Malvárez (1996), Malvárez (1997), Kalesnik (2000), Kandus y Malváres (2004), Biondini y Kandus (2006) y Sirolli (2018), entre otros. Los estudios de evolución de la línea de costa del frente deltaico y la estimación de las tasas de avance del delta subaéreo mediante recopilación de imágenes aéreas y cartografía histórica de los últimos tres siglos fue objeto de estudio por Soldano (1947), Codignotto y Marcomini (1993), Sarubbi (2007), UBANEX (2011), Medina y Codignotto (2013) y Marcomini *et al.* (2018). La morfología y dinámica sedimentaria del frente deltaico y prodelta sumergidos en el río de la Plata ha sido abordada por Urien (1966), Halcrow (1969), Cavallotto (1987, 1988), Parker *et al.* (1987), Marcolini y Parker (1992), Ríos (1996), Fossati (2005) y más recientemente por el proyecto FREPLATA (Simionato *et al.* 2011), Menéndez *et al.* (2017) y Schuerch *et al.* (2016). Aspectos hidrológicos y oceanográficos de interés sobre el comportamiento del río de la Plata y sus tributarios se encuentran en Balay (1961), Bombardelli *et al*. (1995). Junod (1996), Vieira y Lanfredi (1996), Guerrero *et al*. (1997), Mianzan *et al.* (2001), D'Onofrio *et al.* (2008), Sepúlveda *et al.* (2004), Escobar *et al.* (2004), Simionato *et al.* (2004), Dragani y Romero (2004), Reyna *et al*. (2007), y Re *et al.* (2009). Además, se tuvieron en cuenta estudios de contaminación y calidad de aguas en la Primera Sección, presentados en O´Farrell *et al.* (2002) y Lombardo *et al.* (2010). Sobre la historia social del delta, las publicaciones de Sarmiento (1859) y Sastre (1858) retratan los paisajes naturales del delta y mencionan el potencial de la zona para las actividades agropecuarias y recreativas. En Bautista (1986), Gentile y Natenzon (1998), Galafassi (2004, 2005) se encuentran valiosas investigaciones sobre la historia y actualidad social y ambiental del delta. Algunas referencias sobre la historia de apertura de canales en la Primera Sección y del transporte fluvial se encuentra en Cricelli *et al*. (2017), Pereyra (2009) y memorias de empresarios ligados al transporte fluvial como Dodero (1961) y Luciano (1993).

# 2 CARACTERIZACIÓN DEL AMBIENTE

El ambiente de la Primera Sección, dada su cercanía al frente deltaico y a la región metropolitana de Buenos Aires, presenta una compleja interacción entre los procesos naturales del sistema (descargas fluviales, carga sedimentaria, olas, mareas y tormentas) y modificaciones antropogénicas que han ocurrido a lo largo de su historia. En este capítulo se recopilan antecedentes téoricos de interés sobre deltas, se realiza una caracterización geológica de la zona y analizan datos públicos hidrológicos, hidrométricos y meteorológicos de interés para caracterizar la relación entre las descargas fluviales (río Paraná) y forzantes de la cuenca receptora (río de la Plata) que tienen lugar en la planicie deltaica de la Primera Sección.

## 2.1 Marco teórico de los sistemas deltaicos

La morfología de una planicie deltaica refleja las interacciones entre los aportes de la cuenca de drenaje y la forma y procesos litorales de la cuenca receptora (Coleman y Huh 2004) y suele clasificarse según el dominio de los forzantes de aporte fluvial de la cuenca de drenaje, y del oleaje y las mareas en la desembocadura (Galloway 1975) (Figura 2.1). Esta aproximación a los sistemas deltaicos, aunque excesivamente simple, es aún utilizada para clasificar y caracterizar los procesos dominantes en las desembocaduras y su correspondiente morfología (Payenberg y Lang 2003).

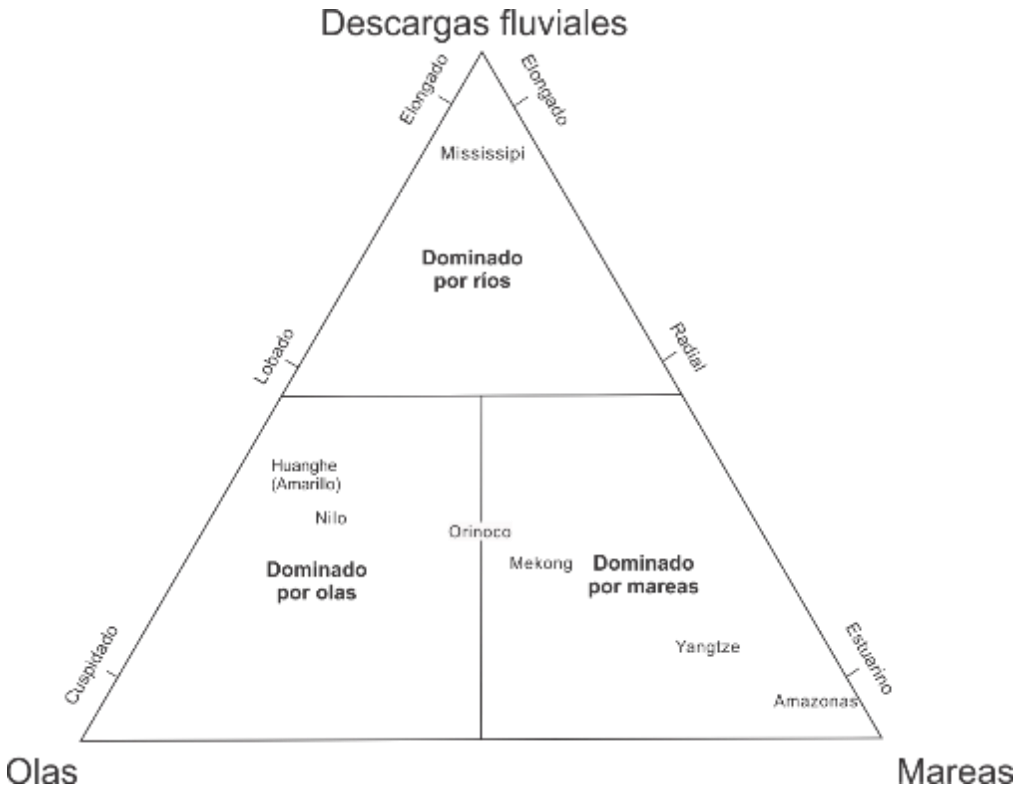


**Figura 2.1: Triángulo de clasificación morfológica de grandes sistemas deltaicos, modificado de Galloway (1975).**

Un sistema deltaico se compone del delta subaéreo y del delta subácueo (Figura 2.2). El delta subaéreo puede zonificarse en los subambientes de planicie deltaica superior e inferior. La planicie deltaica superior es un subambiente netamente fluvial condicionado por las variables de su cuenca hidrográfica. La planicie deltaica inferior está dominada o influenciada por los forzantes de la cuenca receptora tales como el oleaje, mareas, tormentas, corrientes litorales, entre otros. Por otro lado, el delta subácueo contiene al frente deltaico y al prodelta (Coleman y Wright 1975; Coleman y Prior 1980; Suter 1994).

La planicie deltaica tiene dos morfología básicas: los canales distributarios y las islas interdistributarias (Hiatt y Passalacqua 2015). Coleman y Wright (1975) definen tres tipos básicos de diseño de canales distributarios (Figura 2.3 A): diseño bifurcante (*bifurcating*), en el que los canales se bifurcan subsecuentemente y arriban al frente deltaico un gran número de canales distributarios terminales (*terminal distributary channel*, Olariu y Bhattacharya 2006); el diseño confluyente (*rejoining*), es un diseño

más complejo en el que los canales se bifurcan y confluyen y al frente arriban pocos canales distributarios terminales y por último, el diseño solitario (*single*) en el que únicamente hay bifurcaciones cerca del el ápice del delta, pero estos canales no presentan prácticamente nuevas bifurcaciones aguas abajo.

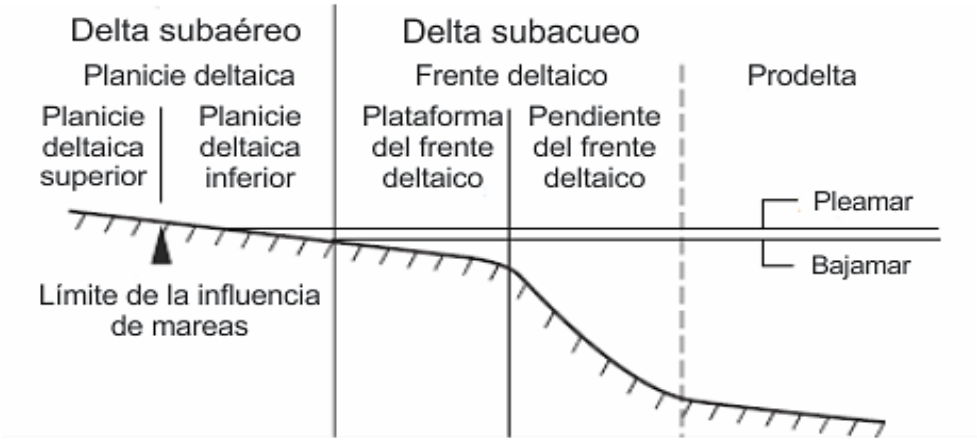


**Figura 2.2: Esquema general de las delimitaciones de ambientes y subambientes en grandes sistemas deltaicos marinos (modificado de Hori y Saíto 2002).**

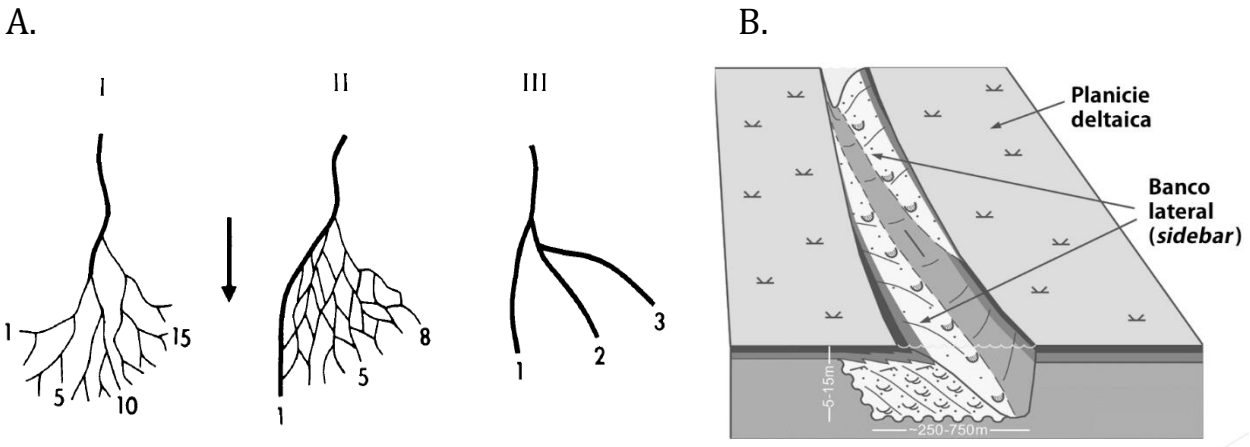


**Figura 2.3: A) Diseño de canales distributarios de la planicie deltaica según Coleman y Wright (1975). I. Diseño bifurcante (*bifurcating*), II. Diseño confluyente (*rejoining),* III. Diseño solitario (*single*). B) modelo de canales distributarios dominados por la acción fluvial en el delta de Mahakam según Payenberg y Lang (2003).**

Dentro de un mismo delta, la morfología puede variar tanto espacial como temporalmente (Hart 1995; Restrepo y Kjerfve 2002; Bhattacharya y Giosan 2003). El delta del río San Juan (Colombia) está influenciado diferencialmente por la descarga del

río y la acción de las olas y las mareas en sus diversas desembocaduras (Restrepo y Kjerfve 2002). La parte sur del delta del río Danubio (Rumania) es un sistema dominado por las olas, mientras que la parte norte está dominada por la descarga fluvial (Bhattacharya y Giosan 2003). En el delta de Mahakam (Borneo), se pueden reconocer desembocaduras dominadas por el aporte fluvial y planicies deltaicas dominadas por las mareas, mientras que otras desembocaduras muestran efectos combinados (Allen *et al*. 1979 en Hart 1995). Algunos deltas con morfologías dominadas por mareas muestran canales distributarios que son estables por cientos de años, como en el delta del Mekong (Ta *et al.* 2002; Tamura *et al.* 2012).

Edmonds y Salingerland (2008) y Canestrellí *et al*. (2014) realizaron modelos numéricos en el programa Delft 3D que muestran la complejidad de los factores que influyen en la morfología de las desembocaduras. Mencionan que las bifurcaciones ubicadas en las planicies deltaicas indican la posición de los antiguos bancos de desembocadura del frente deltaico. Olariu y Bhattchyara (2006) describen la depositación de bancos de desembocadura en el frente deltaico en un ciclo de tres fases: 1) formación de nuevos bancos de desembocadura y canales distributarios terminales; 2) migración del banco de desembocadura y extensión de los canales terminales y; 3) relleno y abandono de los canales distributarios terminales.

Payenberg y Lang (2003) estudiaron los bancos laterales (*side bar*) y el relleno de los canales distributarios en el delta de Mahakam, Indonesia (Figura 2.3 B). Los bancos laterales, adosados a las márgenes, pueden tener variada morfología, tal como bancos laterales en punta o bancos semilunares. Su formación se ha asociado a los canales con *thalwegs* sinuosos (Coleman 1969) y a la caída de la velocidad de flujo por particularidades topográficas (Santos y Stevaux 2000).

## 2.2 Marco geológico y geomorfológico de la región

### La cuenca del Plata

La cuenca hidrográfica del Plata, con un área de 3,1 millones de km$^2$, es la segunda más grande de Sudamérica. Su superficie equivale de forma estimada a 10 veces el tamaño de la provincia de Buenos Aires. La cuenca abarca territorios de Argentina, Bolivia, Paraguay, Brasil y Uruguay y está compuesta por seis grandes regiones geológicas (Iriondo y Paira 2007). Sus ríos principales son el Paraná, con un área de captación que supera el 80% del área total de la cuenca, el río Uruguay y en menor medida el río Negro. Las aguas de estos afluentes principales drenan al océano Atlántico sudoccidental a través del estuario del Plata, que incluye al tramo inferior del río Uruguay y al río de la Plata (Figura 2.4).

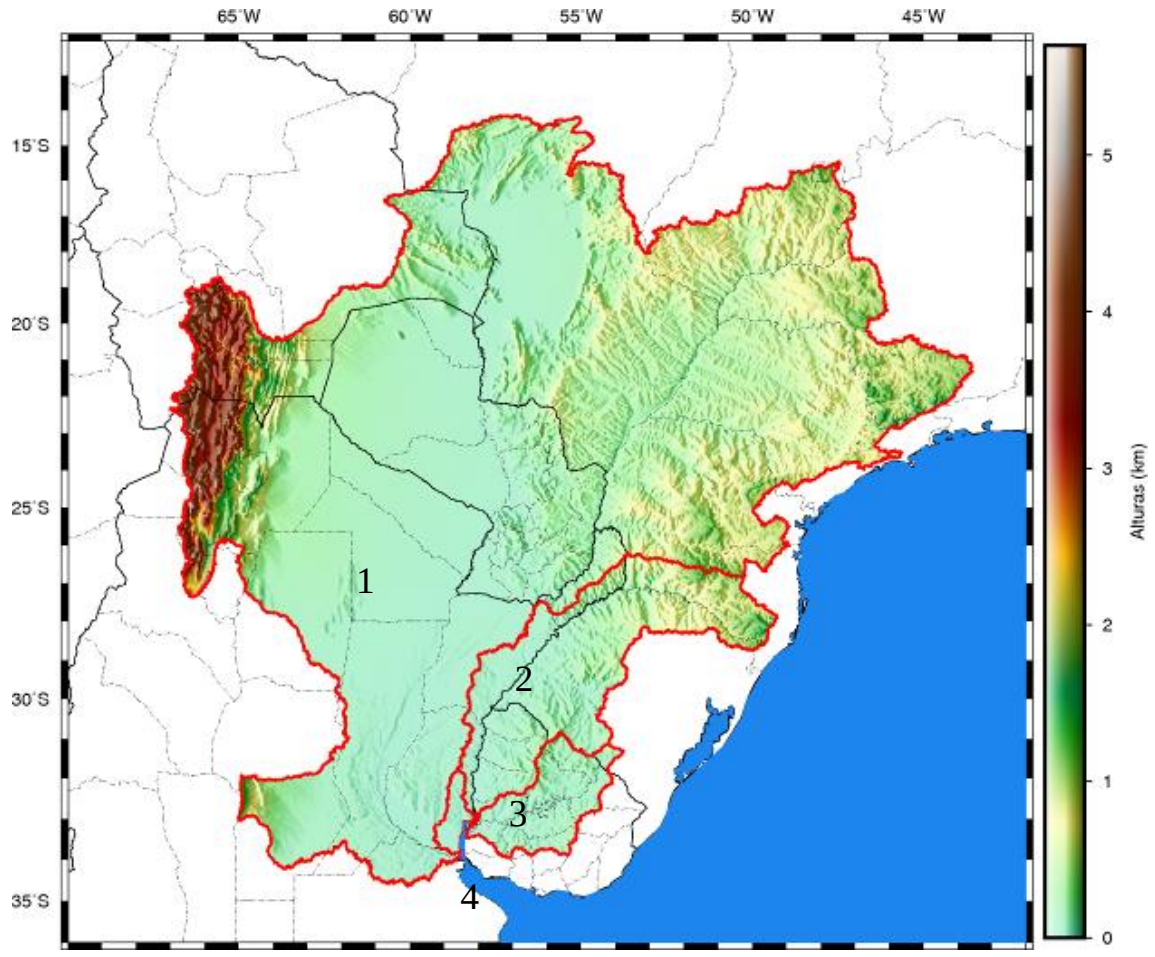


**Figura 2.4: Modelo digital de elevación de la cuenca del Plata. Subcuencas 1. del río Paraná; 2. del río Uruguay 3. del río Negro y 4. el río de la Plata. Escala 1:15 000 000.**

Dos regiones de topografías distintivas se destacan al oriente y occidente de la cuenca alta del Plata. En estas regiones se sitúan forzantes hidrosedimentológicas claves en la arquitectura del delta. De la zona oriental de la cuenca – región tropical del Brasil - proviene el 60% de la descarga total anual de agua que arriba al río Paraná Inferior. En esta parte alta de la cuenca los afluentes del río Paraná atraviesan el escudo brasileño, compuesto de afloramientos de basamento proterozoico. Luego confluyen en el río Paraná Superior, que atraviesa una región Jurásico-Cretácica de basaltos y areniscas cubiertas por loess tropical. Estas regiones nororientales de la cuenca hidrográfica, según, aportan además de la mayor parte de agua, las fracciones de sedimentos arenosos y la arcilla (Iriondo y Paira 2007; Manassero *et al.* 2008).

En la región occidental de la cuenca del Plata, la cordillera de los Andes levanta a más de 3000 metros sobre el nivel del mar (msnm) rocas de cuencas sedimentarias mesozoicas y terciarias de las que proviene la mayor parte de los sedimentos limosos transportados como carga de lavado al sistema deltaico. Un 50 a 70% del total de sedimentos que arriban al delta proviene de esta región (Depetris *et al.* 2003). Otras regiones de la cuenca del Plata son la Llanura Chaco-pampeana, que contribuye con sales disueltas y limos, y las Planicies Orientales, que comprenden gran parte de la Mesopotamia y del sur de Paraguay. Estas últimas, junto con el pantanal del Mato Grosso; están formadas por sedimentos cuaternarios que proveen montmorillonita y arena cuarzosa al Paraná (Iriondo y Paira 2007).

Por el río Paraná arriban al delta un total de 160 millones de ton/año de sedimentos, de los cuales 90 millones ton/año son limos (56%); 45 millones de ton/año son arcillas (28%) y 25 millones ton/año son arenas (16%). Solo una parte se transporta como carga de fondo, mientras que más del 80% de estos sedimentos se transportan en la columna de agua como carga de lavado (Amsler y Drago 2009). En cuanto a la variación anual de los caudales de descarga de los ríos Paraná y Uruguay, ambos alcanzan su máximo en otoño, y mientras que el río Paraná tiene su mínimo en primavera, el Uruguay lo tiene en verano. Se ha registrado, a fines de la década del ´70, un aumento del caudal promedio de los ríos Paraná y Uruguay. El caudal promedio del río Paraná (estación de

medición de Rosario) aumentó de 14.600 m³/s (1884-1975) a 18.400 m³/s (1975-1994). A su vez, el caudal promedio del río Uruguay (estación de medición Hervidero) aumentó de 4.400 m³/s (1916-1975) a 5.600 m³/s (1975-1991) (Laborde y Nagy 1999). Dichos incrementos se han asociado a factores como: (a) la deforestación de las cuencas altas y, en consecuencia, la reducción de la capacidad de retención de agua, (b) el desarrollo de un período hidrológico de humedad excesiva que produce una mayor fuga y (c) el fenómeno de El Niño (Nagy *et al.* 1996).

Tres de los afluentes principales del sistema deltaico tienen sistemas de represas en las partes altas de la cuenca. No así el Bermejo que, como se ha mencionado, aporta la mayor cantidad de sedimentos. En el río Paraná superior, existía hasta el año 1970 una relación definida entre carga de sedimentos y caudal. Pero luego el aporte medio de carga de lavado del Paraná Superior bajó sustancialmente a la quinta parte del suministro que se registraba en la década de 1960 Re *et al.* (2009). Amsler (2006) identificó como posibles causas de esta disminución el efecto de "atrape" de los grandes embalses construidos en la alta cuenca desde fines de esa década (Itaipú, Yaciretá), y los cambios en el uso del suelo.

## Geología y Geomorfología del río de la Plata

La región del río de la Plata forma parte del borde norte de la Provincia Geológica denominada Cuenca del Salado cuyo registro estratigráfico está integrado por un basamento premesozoico - representado por rocas metamórficas plutónicas ácidas - y efusivas - equivalente al Basalto de Serra Geral -, sobre el que se superponen sedimentos cretácicos y terciarios de origen continental y marino. Estos últimos no superan los 450 m de espesor. El registro sedimentario culmina con una sucesión de sedimentos transgresivos-regresivos de edad plio-cuaternaria. El delta del Paraná y ámbitos vecinos ubicados en las cabeceras del río de la Plata representan estos ambientes afectados por la transgresión posglacial ocurrida durante el Pleistoceno superior-Holoceno que ingresó a través del río (Figura 2.5). Como tal, su evolución fue el resultado del efecto combinado del ascenso y descenso relativo del nivel del mar, la dinámica costera en

esos primitivos ambientes litorales, los cambios climáticos y las características morfológicas del sustrato (Cavallotto *et al*. 2005).

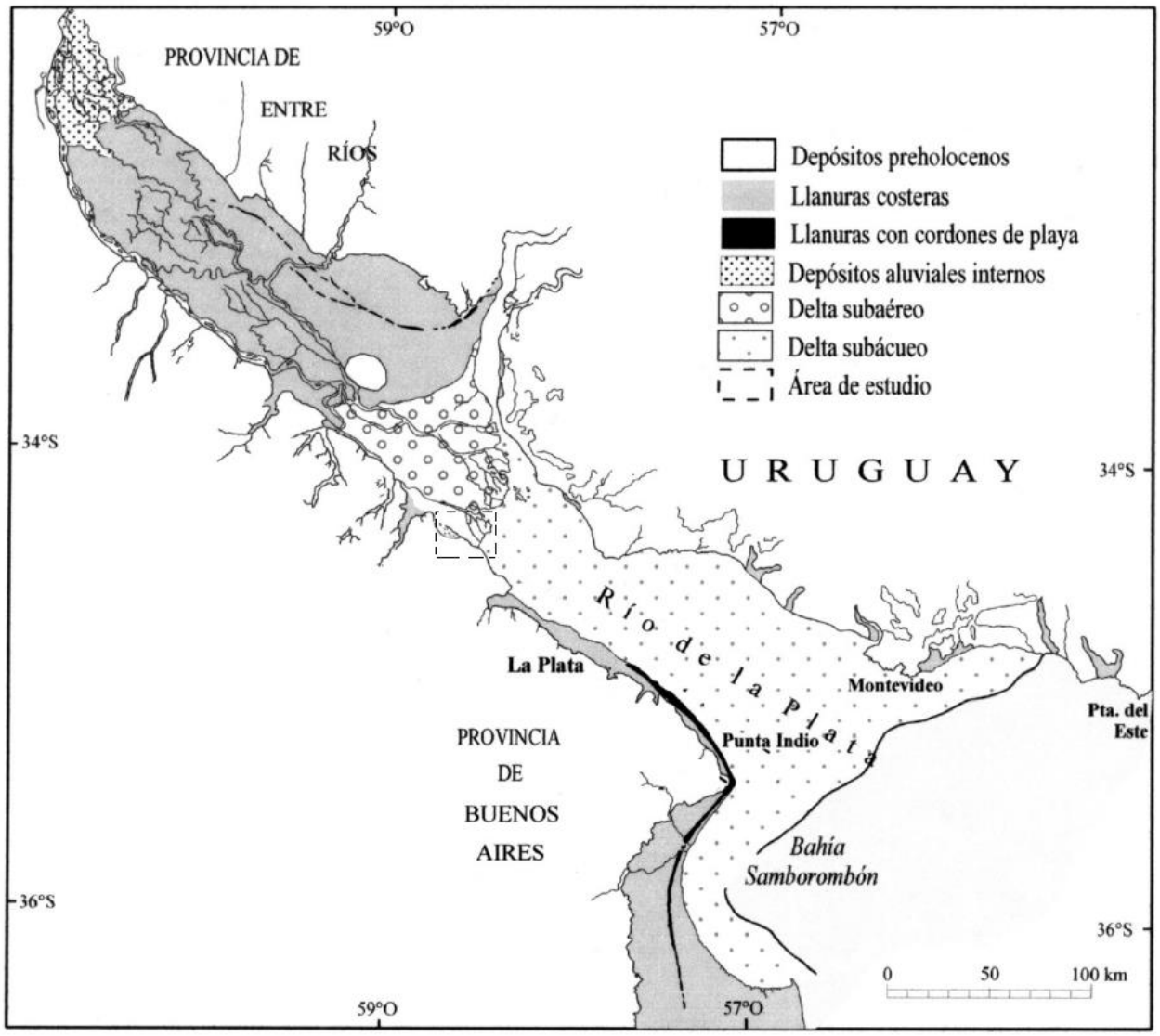


**Figura 2.5: Mapa Geomorfológico de la Unidad Río de la Plata y zona de estudio (Primera Sección) marcada con un rectángulo de líneas punteadas (Modificado de Cavallotto *et al.* 2002).**

## Variaciones relativas del nivel del mar

Las fluctuaciones relativas del nivel del mar fueron el principal condicionante de la evolución de la región a través de su historia geológica durante el Cuaternario. A los 18/20.000 años AP (antes del presente) el nivel del mar se estableció en su posición más baja (-105 m), de donde comenzó a ascender nuevamente durante la transgresión holocena. Ese ascenso fue rápido al principio para, a partir de los 8600 años AP,

disminuir la velocidad de ascenso. En su ascenso el nivel del mar pasó por una posición semejante a la actual a los 7.000 año AP y alcanzó el máximo transgresivo a los 6.000 años AP. El evento regresivo fue discontinuo y se puede sintetizar en varias etapas: un primer descenso hasta los +5 m en 1.000 años, luego un período de estabilidad entre los 5.000 y 3.500 años, y un nuevo descenso hasta los +2.5 m en los siguiente 600 años (Figura 2.6) (Cavallotto y Violante 2005).

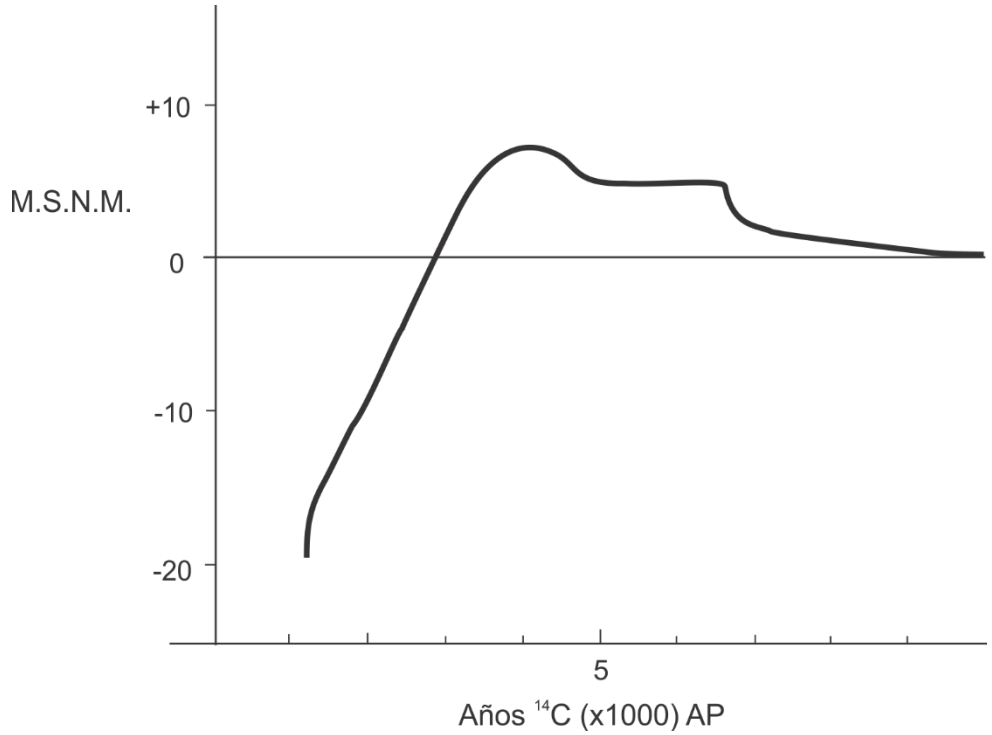


**Figura 2.6: Curva de variaciones relativas del nivel del mar durante los último 8600 años (Modificado de Cavallotto *et al.* 1995).**

## Estratigrafía del cuaternario

Se considera aquí el registro sedimentario depositado en el río del Plata a partir del momento previo a la instalación del delta del Paraná, es decir desde el Plio-pleistoceno (Figura 2.7). Las secuencias del relleno se establecen siguiendo según el esquema de estratigrafía secuencial que proponen para la zona Cavallotto (2002).

### *Secuencia depositacional Puelches*

Depósito de ambiente continental relacionado genéticamente con sistemas fluviales superpuestos de posible diseño anastomosado, cuyos depósitos conformaron un extenso manto formado durante el Plioceno. Está compuesto por arenas maduras de colores

amarillentos grisáceos a blanquecinos, con intercalaciones de gravas y rodados en sus niveles inferiores. Se apoya en relación de discordancia sobre la Formación Paraná (Cavallotto y Violante 2005).

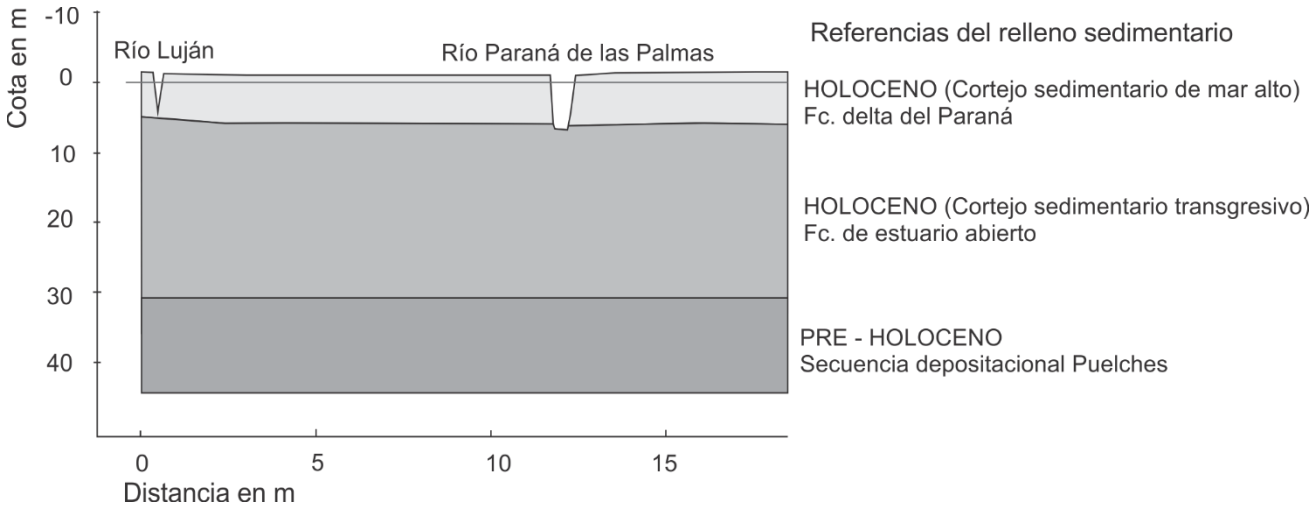


**Figura 2.7: Perfil geológico simplificado de la zona de estudio. El perfil se orienta SO - NE en la zona de estudio (ver recuadro en Figura 2.5) Se emplea la nomenclatura estratigráfica propuesta en Cavallotto y Violante (2005) con datos de profundidades de las distintas unidades obtenidas en Rinaldi *et al.* (2006).**

### *Sistema Deposicional Estuárico*

Comprende los sedimentos depositados durante el ascenso del nivel del mar (cortejo sedimentario transgresivo). Se trata de arcillas a arcillas limosas verde oliva, con intercalaciones de capas delgadas de arena muy fina del mismo color y con conchillas diseminadas o concentradas en capas intercaladas en el sedimento. Su base, en el interior del río, fue datada en 8.620 ± 120 AP aunque por su génesis se interpreta que comenzó a formarse hace 20.000 AP. Su piso en el interior del río se ajusta al relieve del sustrato y en la zona de estudio se encuentra a los 30 m de profundidad. Se corresponde con la ingresión “Querandinense” y la Formación Atalaya (Cavallotto y Violante 2005).

### *Sistema Depositacional Deltaico*

Este sistema que se relaciona con la depositación de los sedimentos limo arenosos aportados fundamentalmente por el río Paraná comprende las facies subaérea y subácuea del delta. Estas facies se apoyan sobre los depósitos del Sistema Depositacional

Estuario. Dataciones radiocarbónicas obtenidas en el borde interno de esta unidad, que no supera los 12 m de espesor, arrojan una datación de entre 1.902 y 1770 ± 40 AP. La facies subácuea está compuesta por los depósitos aluviales que cubren todo el lecho actual del río de la Plata, los cuales en adyacencia del frente de avance del delta subaéreo, velan durante bajamar. Ambas facies en conjunto constituyen la Formación Playa Honda (Parker 1990). Este sistema corresponde a un delta activo que prograda sobre la plataforma continental.

**Unidad Morfológica Río de la Plata**

La Unidad Geomorfológica Río de la Plata comprende tanto las geoformas emergidas como sumergidas (Figura 2.5) se reúnen aquí las principales características extraídas de Cavallotto y Violante (2005).

*Llanura costera del margen sur del Río de la Plata*: abarca la franja que se extiende entre la cota de 5 m y el nivel actual del mar desde la Ciudad de Buenos Aires a la bahía Samborombón. Se destaca la presencia de cordones de conchilla y bañados.

*Llanuras costeras entrerriana*: Se desarrolla en el sur de la provincia de Entre Ríos. Está compuesta por una sucesión de geoformas desarrolladas en cotas que van desde los 11 a los 2 m y el nivel del mar, las cuales están integradas por: llanuras de mareas, cordones litorales asociados a cordones de médanos, y playas.

*Delta Subaéreo*: Se trata de un conjunto de islas y numerosos cursos fluviales de diseño anastomosado correspondientes al sistema fluvial del río Paraná. Se encuentra en cotas que van de los 2 m y el nivel del mar y está sujeto tanto a las forzantes tanto de la cuenca de drenaje como de la cuenca receptora. El delta subaéreo prograda sobre el frente deltaico a tasas de entre 100 y 30 m/año según el sector de estudio (Soldano 1947, Medina y Codignotto 2013, Sarubbi 2007). El delta subaéreo puede dividirse en una planicie deltaica inferior –con afectación de mareas astronómicas- y una superior –sin afectación del ciclo de mareas, zonificación que se propone más adelante para la zona de estudio, la cual corresponde al más sector sudoriental de esta subunidad.

*Delta subácueo*: está compuesto por bancos y canales que se extienden desde el frente del delta subaéreo hasta el prodelta.

*Plataforma interior*: El sector exterior del Río de la Plata ubicado aguas afuera de la Barra del Indio (prodelta) en realidad corresponde, por sus características evolutivas y sedimentológicas, a la plataforma interior. Contiene tanto geoformas sumergidas recientes relacionadas a la erosión y acumulación sobre la plataforma como otras relacionadas con afloramientos pleistocenos –en el sector más cercano a la costa argentina- como del proterozoico inferior -en inmediaciones de la costa uruguaya.

## 2.3 Caracterización de variables hidrometeorológicas actuales

### Crecidas, caudal y competencia de los canales principales

El río Paraná inferior diverge en dos canales distributarios troncales: el río Paraná Guazú y el río Paraná de las Palmas (Figura 2.8). Bombardelli *et al*. (1995) estimaron que el río Paraná Guazú transporta en promedio el 76% del caudal del río Paraná inferior; mientras que el Paraná de las Palmas el restante 24%. El Paraná Guazú confluye en su desembocadura con el río Uruguay y el río Negro, conformando el Sistema Fluvial Norte (Cavallotto 1988). En la margen derecha de su desembocadura, el menos caudaloso río Paraná de las Palmas forma el sector de planicie deltaica de la Primera Sección. Este sector recibe mínimos aportes de ríos autóctonos, como el Luján y el Reconquista, que drenan desde la planicie loessoide bonaerense.

El caudal que transporta cada sistema de drenaje puede explicar las diferencias en la morfología del frente del delta subaéreo y de sus diseños de drenaje. El Sistema Fluvial Norte transporta en total, según datos de aforo del período 2000 – 2015, más de 20.000 $m^3/s$, mientras que al frente de la Primera Sección arriban en promedio menos de 5000 $m^3/s$. La diferencia es aún mayor cuando se consideran las máximas descargas registradas (Tabla 2.1). El contraste entre los drenajes de los sistemas del Paraná es mencionado por Iriondo (2010), y diferencias en las tasas de progradación de los subfrentes de estos distributario son notadas en Sarubbi (2007). El Paraná Guazú se bifurca hacia el NE, E y SE hasta siete veces con ángulos de entre 55 y 110°, típico de

deltas dominados por la acción fluvial. El Paraná de las Palmas se mantiene como un único canal distributario troncal hasta la zona de su desembocadura, en donde presenta divergencias.

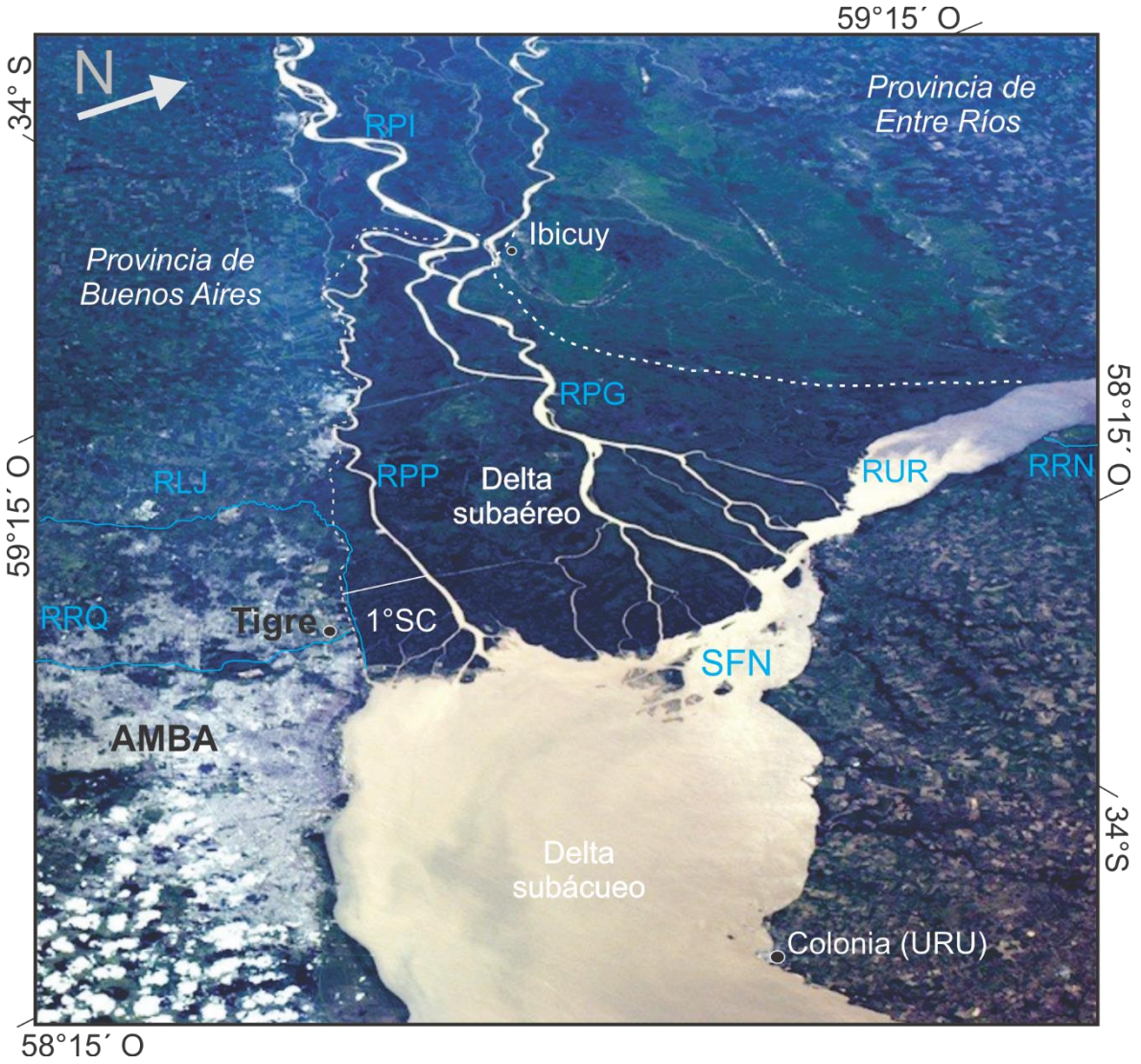


**Figura 2.8: Principales afluentes, canales distributarios y cuenca receptora del sistema fluvio deltaico estuarino del delta del río Paraná. Afluentes: RPI: río Paraná Inferior, RUR: río Uruguay, RRN: río Negro, RRQ: río Reconquista, RLJ: río Luján; canales distributarios: RPG: río Paraná Guazú, RPP: río Paraná de las Palmas, SFN: Sistema Fluvial Norte. Cuenca receptora RDP: río de la Plata. Se señala también el AMBA: Área Metropolitana de Buenos Aires y la zona de estudio 1°SC: Primera Sección. La imagen base es una fotografía aérea oblicua de la Estación Espacial Internacional del año 2016.**

Asociado a esta diferencia en el diseño de drenaje y volumen de las descargas fluviales de los canales distributarios troncales, la sedimentología del frente deltaico

(delta subácueo, Figura 2.8) puede zonificarse en una franja sobre la costa argentina influenciada por la sedimentación limosa del Paraná de las Palmas y una franja sobre la costa uruguaya, de sedimentología más arenosa asociada al transporte de los ríos Paraná Guazú y Uruguay (Parker *et al.* 1987; Simionato *et al.* 2011).

**Tabla 2.1: Aforo de Afluentes del delta en la parte inferior de la cuenca del Plata (Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación 2000-2015 y otras publicaciones). El Sistema Fluvial Norte (SFN) tiene un caudal medio total casi 5 veces mayor que la desembocadura de la Primera Sección, mientras que el caudal máximo registrado es casi 6 veces mayor también en el SFN.**

| Desembocadura | Afluentes | Lugar de aforo | Caudal medio ($m^3/s$) | Caudal Máx. ($m^3/s$) |
|---|---|---|---|---|
| Sistema Fluvial Norte | RPG | Estación Brazo Largo (33º 52' 59,30" S; 58º 54' 00,40" O; ) | 14.700 | 22.400 |
| | RUR | Concepción (32º 28' 39,70"S, 58º 13' 14,80"O) | 6.200 | 22.300 |
| | RNG | Mercedes (URU) (MVOTMA 2016) | 1.300 | 3.900 |
| Descarga total de los distributarios del Sistema Fluvial Norte | | | 22.200 | 48.600 |
| Primera Sección | RPP | Zárate (34º 05' 25,00" S; 59º 00' 00,00"O) | 4.600 | 8.000 |
| | RLJ | Ciudad de Luján, (Reyna *et al.* 2007) | 15 | 250 |
| | RRQ | Tigre, (Fernández 2002) | 3 | 290 |
| Descarga total de los distributarios de la Primera Sección | | | 4.618 | 8.540 |

### *Niveles hidrométricos en el delta (2016-2017)*

En la Figura 2.9 se grafica un año de datos de niveles hidrométricos, medidos cada 12 h proveniente de las estaciones de PNA San Pedro (río Paraná Inferior), Guazucito (aledaño al río Paraná Guazú) y San Fernando (válido para la situación en la Primera Sección). Las curvas de niveles hidrométricos muestran una respuesta de alta frecuencia debido a las forzantes de mareas astronómicas y picos de las ondas de tormenta que se trasladan aguas arriba por los canales del delta desde la cuenca receptora. La influencia de las mareas es bien marcada en la estación San Fernando y disminuye en Guazucito y San Pedro. Las ondas de crecida fluviales son manifiestas en San Pedro y muestran una influencia decreciente en Guazucito y San Fernando.

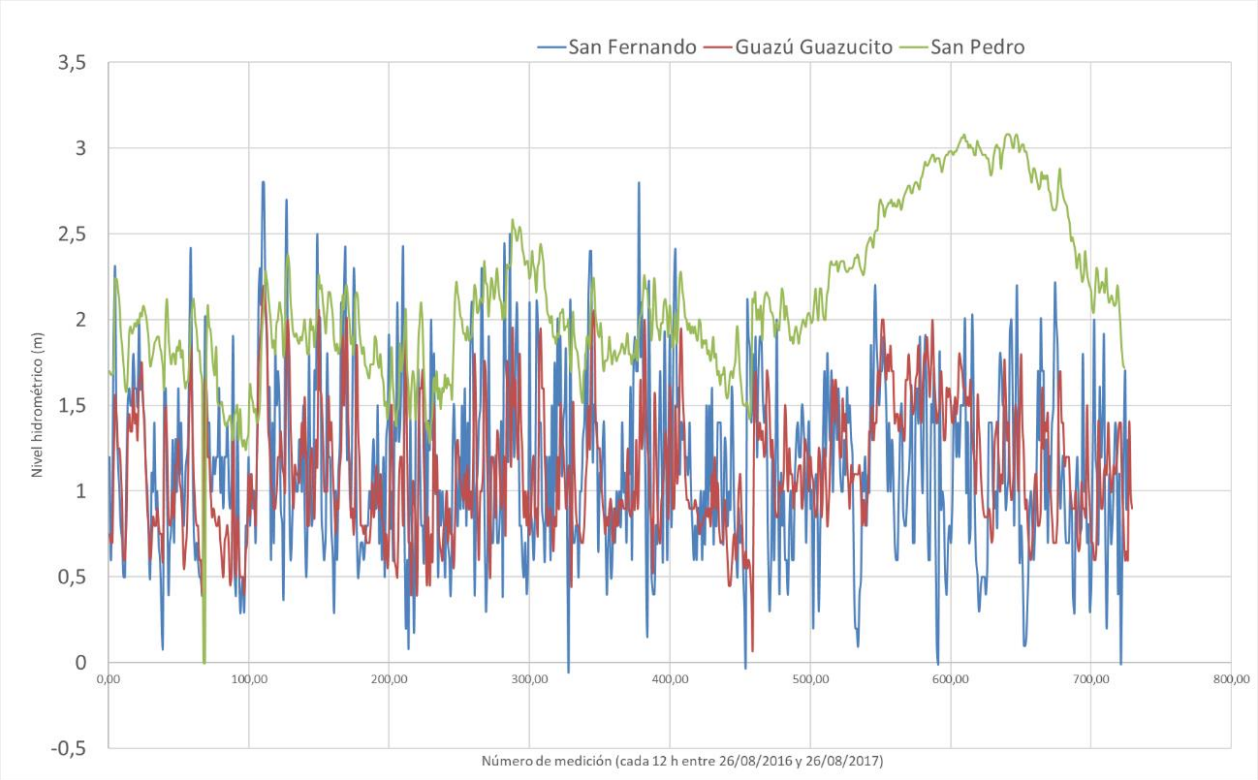


**Figura 2.9: Comparación de niveles hidrométricos medidos cada 12 h en limnímetros de tres estaciones de la PNA. La estación San Pedro (río Paraná inferior, dominada por la acción fluvial) representa la situación aguas arriba del delta. Guazucito (río Paraná Guazú) y San Fernando (río Luján) representan los niveles en los extremos norte y sur de la planicie inferior deltaica y están dominados por la acción de las mareas.**

En la estación San Fernando las variaciones de marea son de alrededor de 1 m, y en ocasiones, supera los 2 m de amplitud por efectos meteorológicos. La estación

Guazucito muestra una influencia algo menor a estos fenómenos, con una amplitud diaria ~ 0,5 m que en ocasiones, es mayor a 1 m. La estación San Pedro presenta variaciones de marea atenuadas por su distancia al estuario, en las que solo ocasionalmente se supera la amplitud diaria de 0,2 m. Junod (1996) encuentra que el efecto mareal es apreciable hasta las localidades de Campana y San Pedro y varía su intensidad de acuerdo a las descargas del río Paraná, las tormentas en el río de la Plata y la amplitud de la marea.

A partir del 12 de diciembre 2016 (medición número 500 en el gráfico 2.3) se registró una onda de crecida de 100 días de duración que eleva más de 1 m el nivel de la estación San Pedro. Se registraron simultáneamente durante esta crecida precipitaciones en la cuenca alta asociadas a un evento de El Niño de fuerte intensidad (Menendez *et al.* 2017). La detección de la onda de crecida del Paraná arriba a la desembocadura del delta diez días después de su detección en la estación San Pedro. Mientras en San Pedro, como se mencionó el pico fue de 1 m, la elevación en la zona de la desembocadura (estaciones Guazucito y San Fernando) alcanzó una elevación de solo 0,5 m. Luego los niveles bajan (entorno a la medición número 550) mientras que perdura la crecida en San Pedro. A pesar de la gran escorrentía recibida por el Río de la Plata, el nivel de agua en las estaciones mareográficas de Buenos Aires no suele verse afectado por el caudal de descarga de los ríos Paraná y Uruguay. La contribución de las ondas de tormenta ciclónicas (OdT) es más relevante en lo que respecta a las anomalías medias del nivel del agua en el estuario. Solo para descargas máximas anuales de los ríos superiores a 64.000 m³/s y las descargas medias anuales de los ríos superiores a 41000 $m^3$/s las anomalías medias anuales del nivel del agua observadas pueden ser del orden de 0,15 m. Estas dos condiciones se cumplieron solo durante los eventos El Niño de los años 1983 y 1998 (D'Onofrio y Fiore 2002).

Algunas observaciones sobre las crecidas del Paraná fueron obtenidas en la Primera Sección. En la crecida ocurrida durante el verano 2016/2017 se midieron sobre el *thalweg* del río Paraná de las Palmas velocidades de corriente mayores a 3 m/s (6 kn), con un nivel de agua ubicado 1 m por encima del nivel medio de mareas (14 de enero

de 2017). Según el diagrama de Hjulström (1935) esta velocidad de flujo es suficiente para erosionar y transportar todos los sedimentos arenosos y limoarcillosos del lecho. Solo las márgenes naturales de los canales de la planicie deltaica fuertemente cohesivas presentan una resistencia al corte que tolera estas velocidades de flujo. Fue notorio en este evento de crecida el arribazón de islas de camalotes que saturó los canales con un manto de vegetación acuática. La vegetación dominante en los camalotales es *Eichhornia crassipes*. Las raíces de los camalotales retienen sedimentos en cantidades de hasta 1,3 kg/m2 (Poi de Neiff 2016). Los camalotales o «aguapé» en voz guaraní, se originan principalmente en la región chaqueña sobre los meandros abandonados del río Paraguay (Dodero 1961; Schulz 1961). Eventualmente, adquieren mayor desarrollo en su lugar de origen formando histosoles denominados suelos «embalsados», los cuales forman islas de mayor capacidad de soporte mecánico en los que pueden crecer inclusive plantas leñosas (Neiff 1982). Los camalotales y suelos embalsados arriban al delta en crecidas del Paraná con fauna proveniente de menores latitudes (Fracassi *et al.* 2010) y pueden ocasionar serios problemas a la navegación de los canales.

**Mareas en la cuenca receptora**

El río de la Plata se caracteriza por su escasa profundidad, baja estacionalidad en la descarga fluvial y alta susceptibilidad a los forzantes meteorológicos (Balay 1961; Vieira y Lanfredi 1996; Guerrero *et al.* 1997; Mianzan *et al.* 2001). Si bien presenta un régimen micromareal, tiene una gran variabilidad en el nivel de aguas por forzantes meteorológicas, alterando las condiciones hidrodinámicas y, en consecuencia, el transporte de sedimentos en el frente deltaico (Sepúlveda *et al.* 2004). Las ondas de marea oceánicas llegan al río de la Plata con una velocidad aproximada de 200 km/h. Se propagan en su interior con una velocidad media de 30 km/h, demorando aproximadamente 12 horas en recorrerlo. El régimen de marea es semidiurno con una amplitud promedio de 1,15 m. El nivel medio se ubica en el 0,92 m de la Estación Palermo del Servicio de Hidrografía Naval (SHN). Los niveles medios mensuales indican una estacionalidad levemente marcada con valores menores en invierno, y mayores en verano, con una amplitud de 0,20 m entre unos y otros. El nivel hidrométrico

medio anual se encuentra en aumento con valores de entre 1,6 y 1,7 mm/año (Lanfredi *et al.* 1998, Cavallotto *et al*. 2004, D´Onofrio *et al*. 2008). Estos fenómenos de estacionalidad en los niveles del estuario y la ligera elevación de la media anual del nivel del estuario se deben a variaciones en la recurrencia de ondas de tormenta (D´Onofrio *et al*. 2008).

***Ondas de tormenta***

Los eventos de mareas meteorológicas son frecuentes en la cuenca receptora. Las ondas de tormenta negativas ocurren cuando soplan vientos fuertes de direcciones del NNO, N y NNE (Balay, 1961; Simionato *et al*. 2004) y generan bajantes extraordinarias. El 29 de mayo de 1984 se midió el mínimo nivel histórico del nivel del río de la Plata a una cota de -3,66 (D'Onofrio *et al,* 2002). Ondas de tormenta positivas son generados por vientos del sur-suroeste que soplan sobre la plataforma continental (D´Onofrio *et al*. 2008). Estas anomalías positivas, denominadas comúnmente, y en adelante, sudestadas, se producen durante todo el año con un mínimo de ocurrencia en invierno (Escobar *et al.* 2004; Pousa *et al.* 2013). Estos temporales se caracterizan por un incremento en la velocidad del viento del SE-SSE acompañado por un cielo completamente cubierto de nimbostratos y persistentes precipitaciones (SHN, 1999). La sudestada dura comúnmente de 1 a 3 días, pudiendo extenderse, en casos excepcionales, a los 6 días. Aparece cada vez que los vientos emitidos por un centro de alta presión ubicado sobre la Patagonia o Sur de la Provincia de Buenos Aires, convergen hacia una zona de baja presión ubicada en el Litoral o sobre el Uruguay (Celemin 1984, Simionato *et al*. 2004).

En un estudio que contempla niveles de marea del año 1951 al 2000, Escobar *et al.* (2004) observaron que la máxima frecuencia de sudestadas se observa durante el verano y al inicio de la primavera y del otoño. En una rosa de los vientos elaborada con datos de 2007 a 2018 de intensidad y dirección de los vientos de la estación Aeroparque del Servicio Meteorológico Nacional (SMN) se aprecia como los vientos más fuertes provienen del cuadrante sudeste (Figura 2.10). Las sudestadas, como se apreciará en el Capítulo 5, son un activo agente modelador del frente de avance.

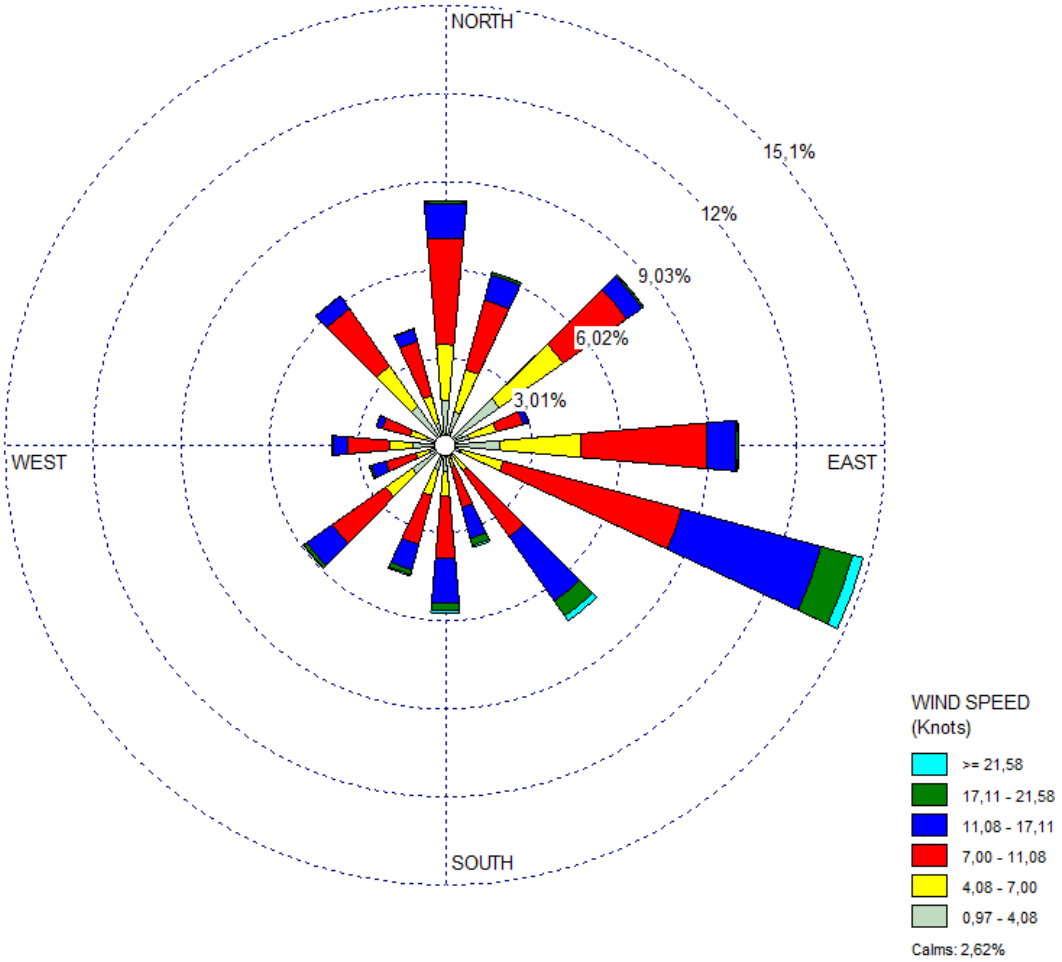


**Figura 2.10: Rosa de los Vientos que indica la predominancia de los vientos del ESE. El promedio de velocidad es de 8,3 kn. Aeroparque, período 2007-2018. Elaboración propia en base a datos del SMN procesados en WRPLOT View – Lakes Environmental Software**

### *Oleaje en el estuario*

No existe documentación sobre la de altura de ola en la zona de la desembocadura de los canales distributarios. Algunos datos provenientes de otras zonas de la cuenca receptora indican que el oleaje puede ser mayor a un metro de altura en ciertas condiciones. La consultora Halcrow (1969) determinó que la altura de ola promedio en el río de la Plata es 0,31 m. Según Colombo *et al.* (2015) el río de la Plata Superior tiene una ola media (provenientes del SE) que generalmente no superan los 0,4 m de altura. Las olas en costanera sur comúnmente alcanzan 0,2 a 0,4 m de altura con períodos de 3 y 4 s, siendo poco probables oleajes mayores a 1,5 m y períodos mayores a 7 s

(FREPLATA 2011). Dragani y Romero (2004), determinan que el oleaje más significativo es un oleaje de tipo costero dado por ráfagas y vientos locales.

### *Análisis de la variabilidad del nivel del estuario en estaciones mareográficas de Palermo y del río Luján en estación San Fernando (2012-2014)*

El nivel de agua en los canales es un factor determinante en los procesos de erosión de márgenes. Por ello es de interés comprender la recurrencia de estos eventos en la zona de estudio. Con una serie de datos mareográficos horarios de 16 meses, de noviembre del año 2012 a marzo del 2014 provenientes de las estaciones San Fernando y Palermo, estaciones SHN San Fernando (río Luján) y Palermo (río de la Plata, muelle de Pescadores de la Ciudad autónoma de Buenos Aires) se elaboró un análisis de frecuencia de los niveles del agua para poder determinar la recurrencia estadística de eventos de crecida y bajante. Los años analizados corresponden a años normales con respecto a las oscilaciones climáticas Niño-Niña, según el monitoreo histórico del Centro de Predicciones Climáticas de la NOAA (2017) y todas las alturas están referidas al plano de reducción de sondajes de la zona que coincide con el cero del Riachuelo.

En la serie analizada, ocurrieron 18 eventos de crecida cuyos picos positivos superan los valores de 2,40 m para ambas estaciones. Entre agosto y septiembre de 2013 la estación de Palermo registró los valores mínimos de la serie, con niveles inferiores a -0,5 m en tres eventos, mientras que el nivel en la estación San Fernando mostró valores ligeramente por debajo del 0 en estas mismas bajantes pronunciadas. El histograma de frecuencia de niveles de marea (Figura 2.11) muestra una distribución en forma de campana. Se advierte que en los niveles de bajante extraordinario, por debajo del nivel de bajamar de sicigia, la estación Palermo registra una mayor frecuencia de mediciones. Esto se explicaría por una mayor influencia de los vientos del norte en el estuario, lo cual produce bajantes más pronunciadas que en San Fernando. Por el contrario, en los niveles por encima de la pleamar de sicigia la estación San Fernando muestra mayor frecuencia, lo que indicaría una mayor duración del efecto de las crecidas en los canales interiores del delta.

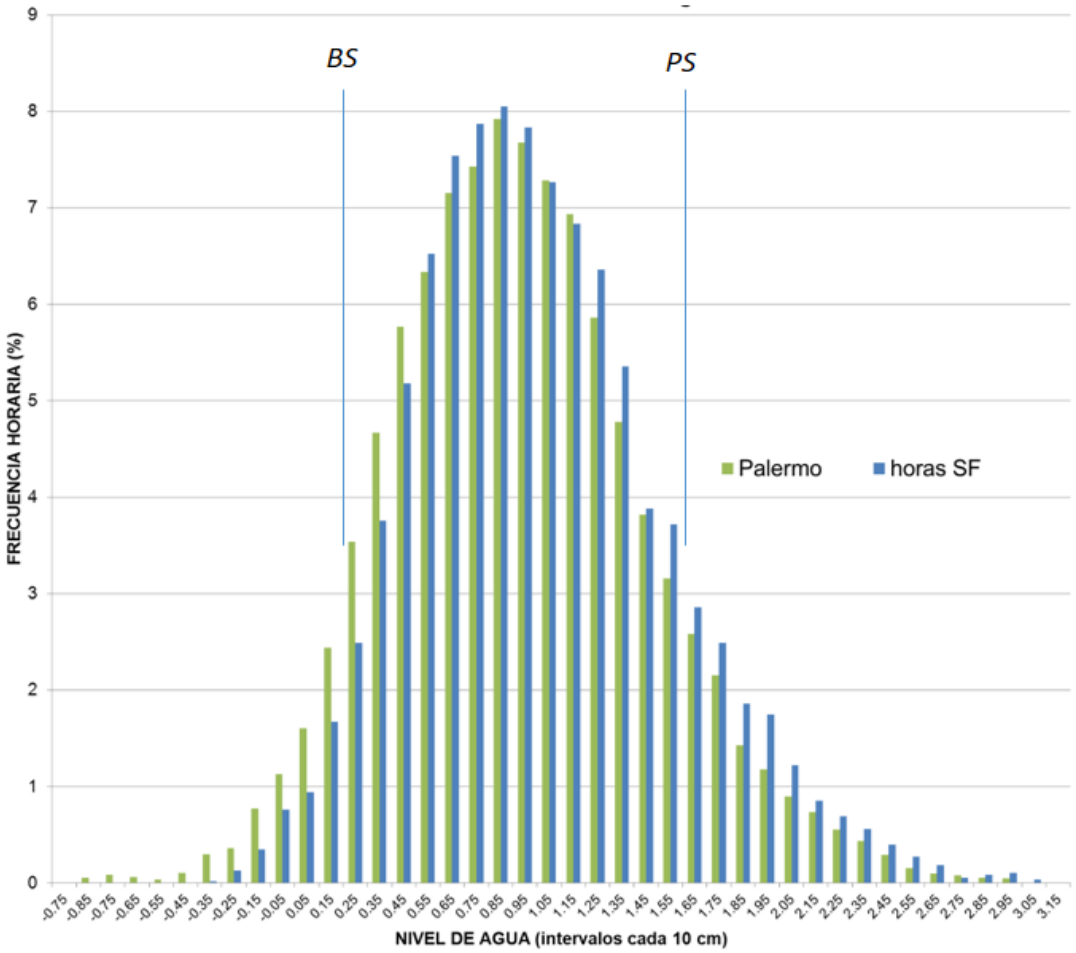


**Figura 2.11: Frecuencia del nivel de agua en mareógrafo de Buenos Aires (Palermo) y San Fernando (SF). El rango de mareas normales se indica con el nivel de bajamar de sicigia (BS) de 0,2 m y de pleamar de sicigia (PS) de 1,6 m para la estación San Fernando.**

Para la estación de San Fernando la moda de la distribución se ubica entre 0,8 y 0,9 m. Para la serie de 16 meses analizada, el 85% de los datos se encuentra dentro del rango de mareas astronómicas. El nivel de pleamar máximo informado por SHN en tablas (1,5 m) se superó aproximadamente en el 10% de los datos horarios mientras que aproximadamente un 5% de los datos horarios resultaron inferior a la bajamar de sicigia (0,2 m).

## 2.4 Planicie deltaica de la Primera Sección y su red de drenaje

### Planicie deltaica superior e inferior

La planicie deltaica de la Primera Sección asociada al canal distributario troncal río Paraná de las Palmas limita al sur con el río Luján y este su vez con una paleobahía rellena con una terraza de cordones y un paleocantilado de cota 5 msnm labrado sobre depósitos de planicie loessoide (Frenguelli 1955) de la Formación Pampeana formados en el Holoceno Tardío durante la última ingresión marina posglacial (MIS 1) y su fase regresiva posterior. El paleocantilado forma una bahía irregular y dos paleopuntas: al sudeste en la desembocadura del río reconquista, en adelante «Punta Tigre» y al noroeste, un alto en donde se ubica la localidad de Escobar, en adelante «Alto Escobar». La terraza de cordones se correlaciona con las terrazas de Yrigoyen (1993) y la Formación Campana (Fuks y De Francesco 2003 en Fucks y Deschamps 2008). Estas unidades son ambientes someros equivalentes a la última parte del Sistema Depositacional de Estuárico previamente mencionado (Figura 2.12). En esta terraza marina, de suave pendiente regional hacia el delta, los cordones litorales se acumularon con una orientación general NO-SE. Entre los cordones y la Punta Tigre se encuentra el cauce original del río Reconquista ligeramente derivado hacia el norte. Los *sets* de cordones tienen formas asimétricas, paralelos en la parte cercana a la Punta Tigre y luego se curvados hacia el norte en la parte más cercana al Alto de Escobar. De este relleno asimétrico de la planicie estuárica y de la deriva del cauce original del río Reconquista, se infiere la influencia de las sudestadas durante la regresión del estuario.

El río Luján tiene su cuenca superior en la planicie loessoide. En su tramo medio e inferior constituye el límite natural entre esta planicie estuárica de cordones y el delta subaéreo. Presenta un hábito de curvas angulosas alrededor del «Alto Escobar», lo que sugiere un control morfológico de su cauce causado por los cordones. El tramo inferior del río Luján incrementa su ancho de manera notable a partir de los aportes que recibe de los canales distributarios del Paraná de las Palmas.

El río Paraná de las Palmas discurre con un cauce prácticamente recto rumbo ESE. Se aprecia un incremento de su ancho desde uno 400 m a la altura de Escobar, hasta

algo más de 900 m en la zona de su desembocadura. En la margen sur del Paraná de las Palmas se producen bifurcaciones al sudeste de donde nacen los canales distributarios de la Primera Sección. Se definió una zonificación de los subambientes de la planicie deltaica para el área abarcada en el mapa geomorfológico (Figura 4.12). Se zonifica como planicie deltaica inferior de la Primera Sección el sector ubicado al este del río Capitán. En este sector las islas interdistributarias son alargadas, orientadas al sudeste y tienen aproximadamente 9 km de largo y 3 km de ancho. La parte interior de las islas interdistributarias de la planicie deltaica inferior conserva canales de marea con diseños dendríticos lo que indica que los procesos de la cuenca receptora (mareas y sudestadas) regulan parcialmente morfología de este sector. Otras morfologías que se pueden apreciar en las islas de la planicie deltaica inferior son las paleocostas formadas por escarpas de erosión y bermas de tormenta en el frente de avance.

Por otro lado, las islas interdistributarias de la Primera Sección al oeste del río Capitán se zonificaron como la planicie deltaica superior. En este sector se desintegra el drenaje dendrítico de los canales de marea y los canales distributarios secundarios tienen hábitos más sinuosos. Se incluyen sobre la planicie deltaica superior las paleocostas o antiguas posiciones del frente de avance de la planicie deltaica de los años 1778 y 1850, reconstruidos por Sarubbi (2007), y Medina y Codignotto (2013) respectivamente, a partir de la georreferenciación e interpretación de cartografías históricas. Se aprecia en estos antiguos frente del delta una desembocadura del Paraná de las Palmas en forma de V que se ha ido rectificando desde entonces lo que podría sugerir un incremento en la depositación y en las descargas fluviales. En la zona de la Primera Sección, el frente deltaico del delta subácueo presenta una planicie somera de limo arenosa fina que recibe la denominación de bancos de la Playa Honda. El frente deltaico, a medida que avanza pasa a formar parte de la planicie deltaica inferior. Se denominará como frente de avance a la franja costera que limita el delta subaéreo y el subácueo.

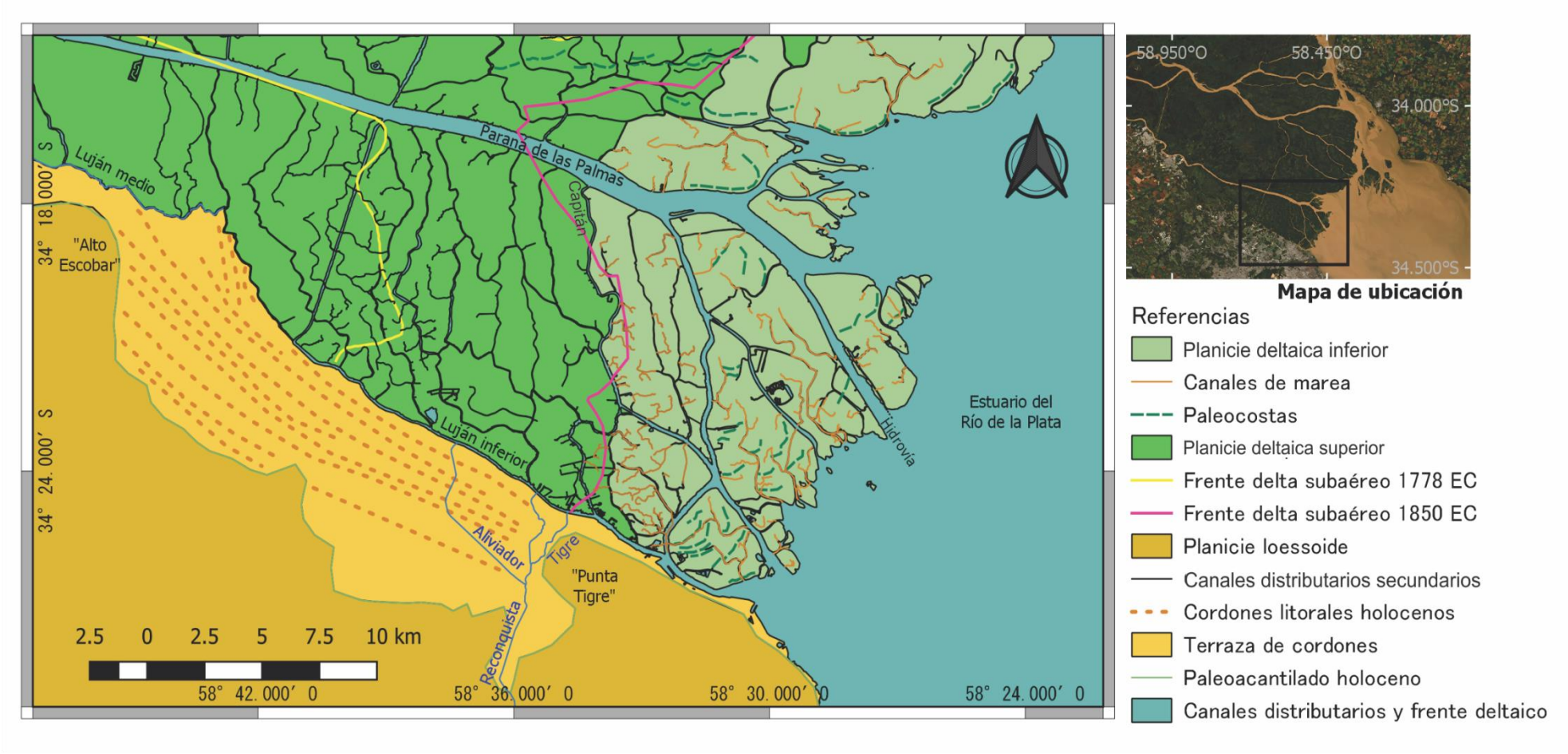


**Figura 2.12: Mapa de ambientes geomorfológicos y drenaje de la planicie deltaica asociada al Paraná de la Palmas y costa bonaerense de los partido de San Fernando, Tigre y Escobar). Escala 1:200 000. Elaborado en Qgis sobre imágenes satelitales de alta resolución y mosaico de fotografías aéreas del año 1969 obtenido del Escuadrón Aeronaval Base Punta Indio.**

**Diseño de drenaje de la Primera Sección**

La red de drenaje de la Primera Sección se compone de: (a) el río Paraná de las Palmas, canal distributario troncal del sistema; de oeste a este (b) los canales distributarios secundarios que se bifurcan del troncal hacia el sur en la planicie deltaica superior, y (c) los canales distributarios terminales de la planicie deltaica inferior, más anchos y en general de mayor profundidad, que alcanzan el frente deltaico y forman los bancos de desembocadura en el frente de avance. El río Luján, ya mencionado, constituye en su tramo inferior otro canal distributario terminal por la influencia de los canales distributarios secundarios y artificiales que confluyen aguas arriba de su desembocadura. Completan la red, (d) los canales distributarios menores, canales de marea y cárcavas que se ubican dentro de las islas interdistributarias.

Se identificó una transformación en el diseño de drenaje distributario de la planicie deltaica de la Primera Sección que puede ubicarse a partir de la paleocosta del año 1778 trazada por Sarubbi 2007 (Figura 2.12). Para simplificar la descripción se emplean los diseños distributarios básicos propuesto por Coleman y Wright (1975) (Figura 2.13). La planicie deltaica ubicada al oeste de la paleocosta del año 1778, tiene un diseño de canales distributarios solitarios y subparalelos entre sí (Diseño B, sin bifurcaciones). La planicie deltaica ubicada al este se generó con un diseño de canales distributarios confluyentes (Diseño A, con bifurcaciones y confluencias). Una simplificación de esta transformación del drenaje y la ubicación de estos dos tipos de diseño se ilustra en la Figura 2.13.

La inluencia del evento climático frío global que ocurrió entre 1350 y 1850 conocido como La Pequeña Edad del Hielo o LIA (*Little Ice Age*), ya ha sido informado para la región Pampeana (Laprida *et al.* 2009). De los escritos de viajeros que transitaron esta región se ha inferido que este evento climático de mayor aridez condicionó las precipitaciones en la cuenca y las descargas fluviales del Paraná (Iriondo 1999). En el sector de diseño de drenaje B los canales Carapachay, Las Rosas y otros dispuestos subparalelos entre sí y orientados al sur y sudeste sugieren una mayor influencia del oleaje hasta el siglo XVIII consistentes con las condiciones ambientales LIA. En el sector con diseño de drenaje A, los canales se bifurcan y confluyen entre islas alargadas

orientadas al sudeste las cuales habrían comenzado a depositarse con esta forma después del siglo XVIII (Figura 2.14).

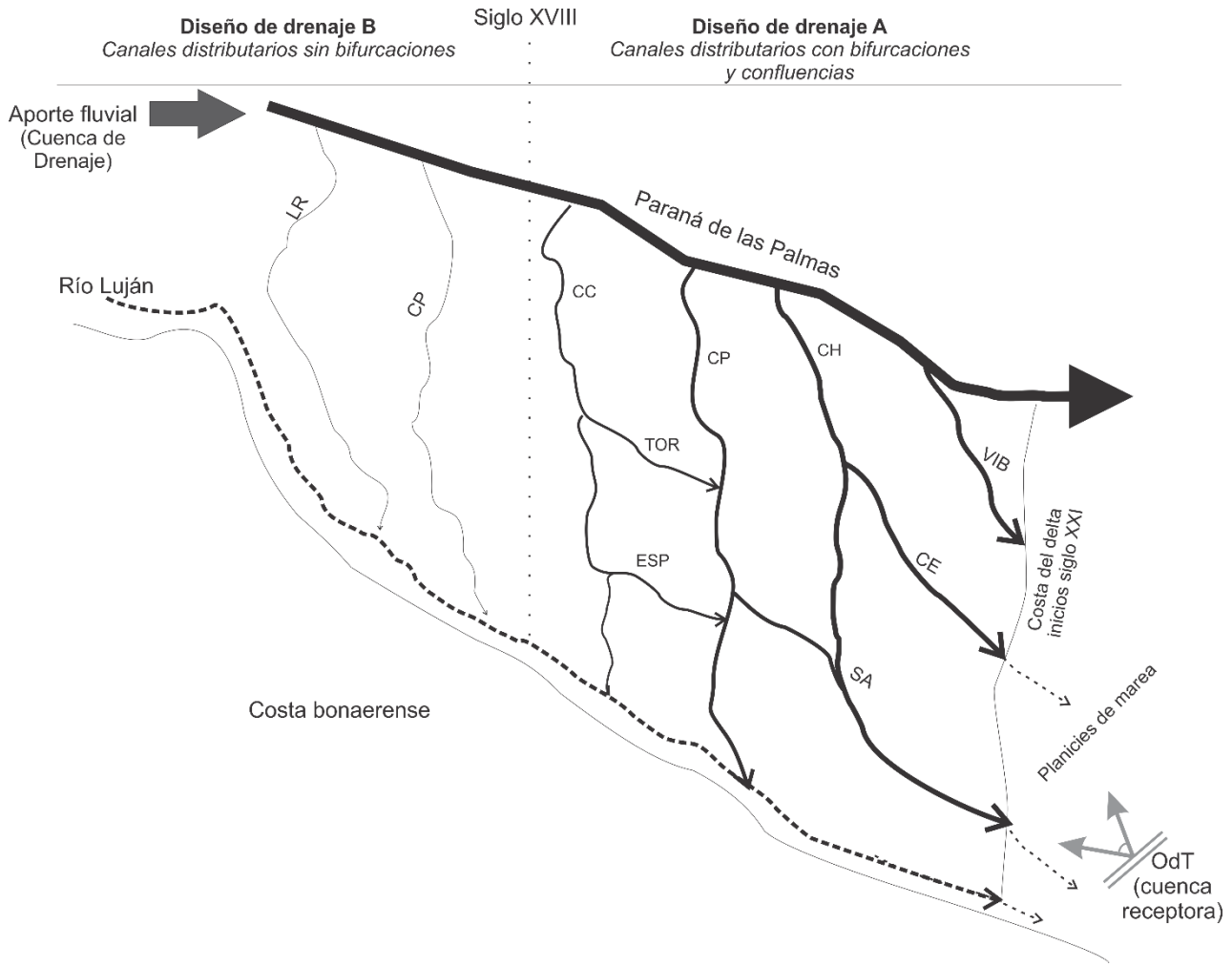


**Figura 2.13: Modelo conceptual del diseño de la red de drenaje de la Primera Sección antes y después del siglo XVIII. La costa bonaerense se refiere a la planicie loessoide y la terraza de cordones holocena de los partidos de San Fernando, Tigre y Escobar. La línea de puntos N-S es una referencia aproximada de la zona en la que se ubicaba el frente deltaico en el siglo XVIII, basada en las reconstrucciones de Sarubbi (2007). LR: arroyo las Ranas, CP: Carapachay, CC: Cruz Colorada, Tor: Toro, ESP: Espera, CP: Capitán, CH: canal Honda, SA San Antonio, CE: canal del Este, VIB: Víboras, OdT: sudestadas.**

**Figura 2.14: Relevamiento gráfico realizado por Muñiz a principios del siglo XIX (Ministerio de Infraestructura y Servicios Públicos de la Provincia de Buenos Aires, extraído de Cricelli *et al.* 2017). Se señala con una flecha doble el eje mayor de una isla alargada que el cartógrafo ubica entre los canales Antequera y Capitán y que habría sido una de las primeras depositadas con el diseño de drenaje tipo A, que caracteriza la planicie deltaica que se genera actualmente.**

Según el fechado que permite la reconstrucción de la paleocosta de Sarubbi (2007) incluye la planicie deltaica inferior actual y una parte de la planicie deltaica superior entre el río Capitán y el arroyo Cruz Colorada. El diseño con bancos alargados sugiere mayores tasas de depositación, lo que sería consistente con mayores descargas fluviales posterior a la finalización de la Pequeña Edad del Hielo. La forma y disposición espacial de los canales Toro y Espera permite deducir que estos canales habrían sido antiguos canales distributarios terminales semejantes a los actuales canales del Este y río San Antonio.

# 3 MATERIALES Y MÉTODOS

## 3.1 Técnicas de análisis morfodinámico de los canales

El uso de fotografías aéreas históricas e imágenes satelitales tiene una larga tradición como metodología de estudio en la geomorfología fluvial para estudiar la evolución de ríos (Gurnell *et al.* 1994). El estudio geomorfológico y evolutivo de la Primera Sección se basó en técnicas de fotointerpretación de imágenes aéreas que provinieron de distintas fuentes. Del Departamento de fotografía de la Escuadrilla Aeronaval de Vigilancia Marítima de la Armada (Base Aeronaval Punta Indio, provincia de Buenos Aires) se obtuvieron las siguientes imágenes:

Fotomosaico del año 1934, escala 1:20.000, que cubre gran parte de la zona de investigación entre el frente de avance de la época y el río Capitán, y desde la planicie estuárica loessoide y estuárica de la costa bonaerense hasta inmediaciones de la margen sur del río Paraná de las Palmas (Figura 1.1)

Fotomosaico del año 1969, escala 1:50.000, que cubre toda la zona de investigación.

Ambos fotomosaicos se digitalizaron con escáner rotativos de alta resolución disponible en el Departamento de Geología (FCEyN-UBA) y se georreferenciaron y ortorrectificaron. Para ellos se emplearon sistemas de información geográfica e imágenes satelitales georreferenciadas de alta resolución disponibles en repositorios de público acceso. Tanto en los fotomosaicos como en las imágenes satelitales se colocaron

puntos de control en la intersección de canales y otros rasgos notables de la costa de Tigre y San Fernando.

**Evolución morfológica de canales**

Para generar un modelo de cómo evolucionan naturalmente los canales se analizó, a una escala local (1:2.000), la bifurcación de los canales distributarios terminales, la evolución de bancos de desembocadura, los albardones subácueos, las planicies de marea y marismas de agua dulce, los canales de marea y los patrones de vegetación en el lapso de 50 a 80 años representado por el repositorio de imágenes satelitales disponibles y los fotomosaicos. Luego de una exploración visual del material fotográfico georreferenciado, se seleccionaron cinco casos de estudio en donde los cambios en las morfologías son más claros, evidentes y representativos de distintos procesos del frente de avance y de la planicie deltaica. Los sitios reflejan la evolución natural, ya que se seleccionaron con la mayor distancia posible a los canales más urbanizados y con condiciones de nula o baja antropización.

Se definió que la evolución tiene dos fases. Una representativa de la génesis de los canales y sus márgenes en el frente de avance para lo cual se seleccionó el sitio desembocadura del canal del Este; y otra representativa de la evolución de los canales en la planicie deltaica para lo cual se seleccionaron el tramo medio de canal del Este, la embocadura del canal Honda, la embocadura del río Capitán y la migración lateral de los canales sinuosos en el tramo medio del río Capitán (Figura 4.1). El análisis morfoevolutivo de cada sitio se ofrece en los mapas y representaciones de las Figuras 4.2 a 4.9. En la Figura 4.10 se presenta de forma conceptual y sintética el modelo evolutivo en el que se integra, en un canal esquemático, los distintos sitios analizados.

## 3.2 Técnicas de estudio de los procesos erosivos antropogénicos

**Perfiles de dragado del canal Rompani**

Los canales navegables suelen requerir dragado y limpieza, lo cual cambia la geometría hidráulica de los cauces y, por lo tanto, la velocidad de flujo. A partir del año

2011 - y luego de más de cuatro décadas sin acciones estatales en el mantenimiento de canales - el gobierno de la provincia de Buenos Aires y del partido de Tigre, adquirieron y licitaron trabajos de dragados para profundizar cursos de agua en la Primera Sección del delta que se encontraban total o parcialmente colmatados. Esta iniciativa de dragado de canales en la Primera Sección brindó la oportunidad de estudiar la evolución del perfil en el canal Rompani antes y después del dragado del año 2013.

Las obras de los canales interiores suelen ser lentas y presentar interrupciones y en general se realizan de a un canal a la vez. En este sentido, el Rompani presentó la oportunidad de medición al ser el canal con operaciones de dragado durante las tareas de campo de las investigaciones y por su ubicación cercana al sitio TD en donde ya se estaban efectuando monitoreo de perfiles.

Los relevamientos constaron del seguimiento de una sección transversal al eje del canal (sección Sherezade) y de una sección longitudinal al eje del canal. La sección transversal Sherezade (Figura 5.6), denominada de tal forma por el nombre de la vivienda más cercana, fue medida con estación total entre los puntos 34°23´54,56 S; 58°34´07,31´´O y 34°23´55,90 S; 58°34´07,24´´O antes del dragado (noviembre 2013), inmediatamente después del paso de las dragas (diciembre 2013) y 18 meses después (mayo 2015).

El perfil longitudinal al eje del curso (Figura 5.9) fue relevado 6 meses después del evento de dragado (mayo 2014), con el equipo batimétrico descripto más adelante. Con los relevamientos del dragado del canal Rompani pre y posdragado se pudo cuanti y cualificar como la modificación del perfil del canal influye en la estabilidad de las márgenes y cómo evoluciona naturalmente el cauce luego del dragado. Además, se observó el modo en que se disponen los sedimentos excavados sobre las islas y se estimó el volumen de material extraído y las tasas a las que se recuperó la sección del canal luego del dragado (Tabla 5.1).

**Monitoreo del oleaje náutico en el río Sarmiento (sitio TD)**

Se monitoreó el oleaje náutico para analizar la frecuencia en el pasaje y oleaje que genera cada tipo de embarcación. Para ello se instaló un dispositivo fotográfico remoto con un nodo *router* MODEM-Antena WIFI con la colaboración técnica de la red DeltaLibre (Boletín Isleño, 2013). Este dispositivo se instaló en una torre de 30 m de altura (Figura 3.1) del sitio TD con vista al río Sarmiento (34°23´52´´S; 58°34´20´´O), vía náutica principal de lanchas rápidas. La utilidad de este tipo de sistemas de visualización remota tiene un antecedente de uso en  para el estudio del oleaje en zonas costeras (Brignone *et al.* 2012).

Una vez lograda la comunicación con el equipo instalado se le ordenó adquirir una fotografía a su máxima resolución (2 Mpx) cada 10 s. Este intervalo resultó adecuado para registrar el pasaje de todas las lanchas. Cada imagen adquirida tuvo un tamaño de 94 kB fue rotulada y transmitida de forma inalámbrica y almacenada en un servidor de la red. El sistema estuvo activo entre los meses de marzo de 2013 y 2014 y alcanzando a almacenar de forma autónoma más de 300 GB en imágenes. Las imágenes obtenidas se clasificaron en directorios según hora, días y mes del año para su posterior visualización.

Se realizó un estudio de tránsito visualizando las imágenes consecutivas (cada 10 s) adquiridas por el sistema de monitoreo fotográfico remoto. Se tomó para esto una muestra de cuatro días (Tabla 3.1). Dos días de muestra de temporada baja: 1 de septiembre de 2013, 2 de septiembre de 2013 (domingo y lunes respectivamente). Y dos días de muestra de temporada alta: 5 de enero de 2014 y 6 de enero de 2014 (domingo y lunes respectivamente). Se estableció como un criterio la división entre días laborales (día de semana) o no laborales (fin de semana), así también como si son de temporada alta (verano) o de temporada baja (invierno). Todos los días monitoreados se seleccionaron con condiciones hidrometeorológicas favorables para la navegación y las actividades recreativas.

Se estimó finalmente el tránsito total que genera oleaje potencialmente erosivo por año en el río Sarmiento. Para ello, el conteo de embarcaciones de los días laborables de

entresemana se extrapoló a todos los días de la semana. De igual modo, el conteo de un día de fin de semana se extrapoló a los días de fin de semana y feriados. Este tipo de muestreo es idéntico al que se emplea para estudios de tránsito en rutas nacionales o provinciales de uso turístico (*comm. pers.* enero de 2014 Leandro García Insúa, Ministerio de Transporte de la Nación).

**Tabla 3.1: Categoría de días monitoreados y sus condiciones hidrometeorológicas favorables para las actividades náuticas en la zona.**

| Categoría de día monitoreado | Fecha | Bajamar/pleamar del día en mareógrafo San Fernando (m) | T amb. Máx. (°C) | Viento/ lluvias |
|---|---|---|---|---|
| Temporada baja / fin de semana (domingo) | 1/9/2013 | 1 a 0,5 | 21 | Leves, sin pp. |
| Temporada baja / entre semana (lunes) | 2/9/2013 | 0,7 a 1,2 | 20 | Sin viento ni pp. |
| Temporada alta/ fin de semana (domingo) | 5/1/2014 | 0,65 a 1,4 | 30 | Leves NE, sin pp. |
| Temporada alta / entre semana (lunes) | 6/1/2014 | 0,5 a 1,4 | 30 | Leves del NE, sin PP. |

***Monitoreo del oleaje en creciente y bajante***

Se observó que el oleaje producido por las embarcaciones alcanza las márgenes de distinta forma según el nivel de agua de los canales. Por lo tanto los datos del sistema de monitoreo fotográficos se vincularon con la base de datos de mareas de la estación mareológica San Fernando para analizar fenómenos de generación, propagación y transformación en dos escenarios extremos: (a) propagación del oleaje durante una bajante extraordinaria de 0,1 m de altura (mareógrafo SHN San Fernando), es decir, 0,7 m por debajo del nivel medio de marea, el día 2 de octubre de 2013 a las 10 am; y (b) propagación del oleaje en crecida extraordinaria correspondiente a la sudestada, el 16 de septiembre de 2013. Durante este evento se registró un nivel de marea de 1,93 m (mareógrafo SHN San Fernando) a las 8:30 am con una intensidad del viento de 22 km/h proveniente del sur, y se registró durante esa hora 30 mm de precipitaciones (datos SMN).

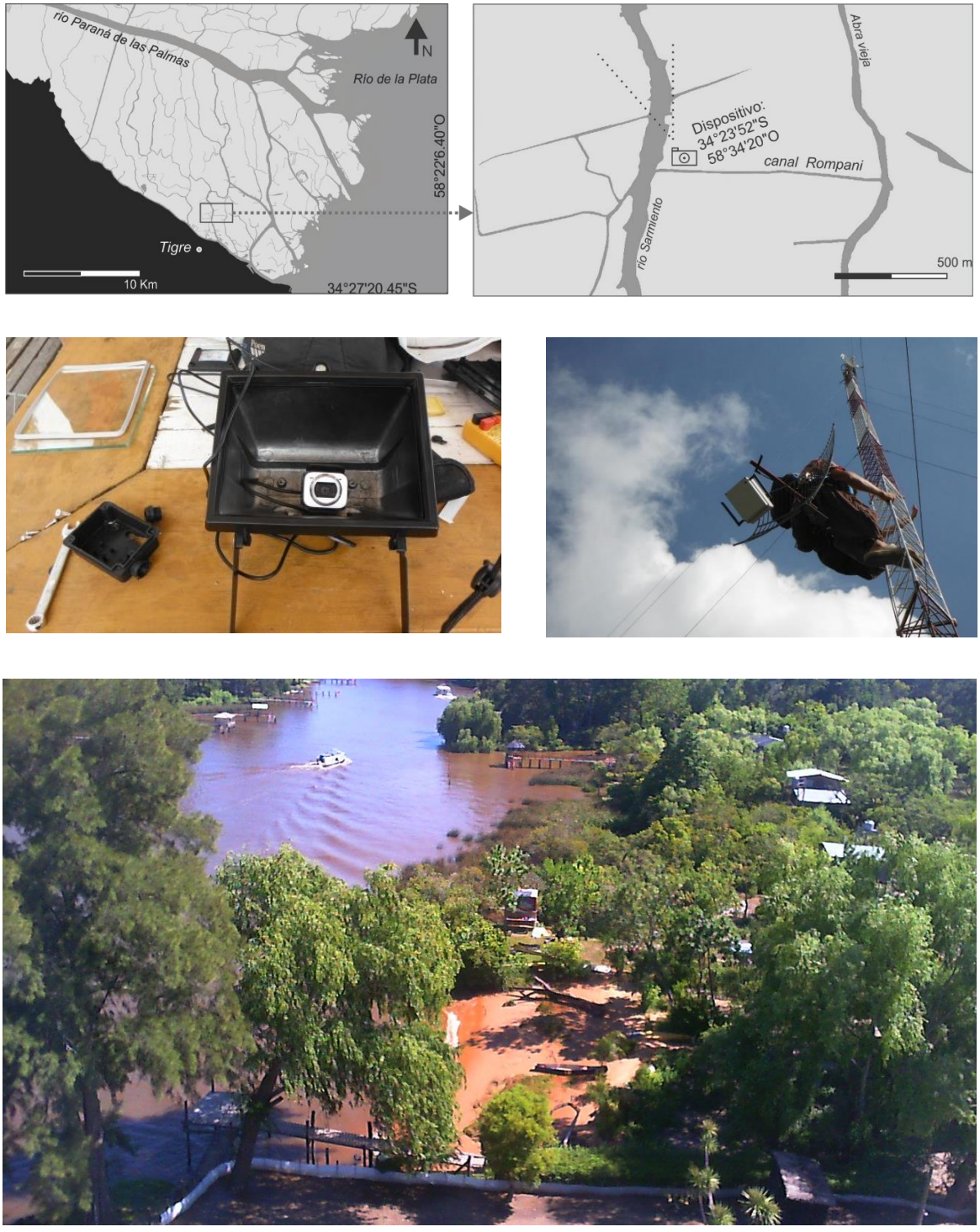


**Figura 3.1: Dispositivo de monitoreo fotográfico instalado en el río Sarmiento. Arriba, mapa de ubicación. En líneas punteadas la perspectiva de la cámara. En el centro, preparación del dispositivo fotográfico en un contenedor estanco e instalación del equipo. Abajo, ejemplo de imagen obtenida cada 10 s con el dispositivo del río Sarmiento (Nótese abajo playa artificial del sitio TD).**

## Cuantificación del retroceso de márgenes

### *Sitio TD*

Los efectos morfológicos del oleaje náutico en el río Sarmiento se estudiaron geomorfológicamente de dos maneras: (a) se comparó la evolución morfológica de las márgenes en imágenes aéreas de dos zonas de canales con sinuosidades similares: Vuelta Mala del río Capitán, (sitio erosivo por procesos fluviales), y la reculada del río Sarmiento (sitio con alta intensidad de tránsito fluvial); y (b) se realizó un perfil transversal del río Sarmiento, desde el sitio TD, para evaluar la geometría de este canal.

### *Estimación del retroceso de márgenes de la Primera Sección*

Luego de comprender los efectos morfológicos del oleaje en el perfil del río Sarmiento se amplió el estudio al resto de los canales distributarios de la Primera Sección. Para ello, se utilizó nuevamente el repositorio de fotomosaicos ortorrectificados e imágenes satelitales, previamente descriptos. La cuantificación de perdida de suelo mediante imágenes satelitales fue previamente utilizada por Den Bieman *et al.* (2010) en sus estudios de efectos del oleaje náutico en el Paraná de las Palmas, a la altura del partido de Escobar. La medición sobre imágenes históricas permitió realizar un diagnóstico del retroceso de márgenes en múltiples sitios de la Primera Sección desde de mediados del siglo XX. Para estimar el retroceso se monitoreó el incremento del ancho de los principales canales navegables en otros 65 sitios seleccionados. El monitoreo se realizó con la medición de la distancia entre márgenes (perpendicular al canal) tanto en el fotomosaico del año 1934 o en su defecto en la del año 1969, en caso de no comprender el primero la zona de interés, como en la imagen satelital del año 2019. Por la resolución de las imágenes, se descartó medir sobre canales de ancho menor a 20 m y asignó una incerteza a cada medición del ancho del canal según el tipo de imagen aérea, a saber:

±2 m en las mediciones sobre la imagen satelital de alta resolución del año 2019,

± 5 m en el fotomosaico escala 1:50.000 del año 1969 y de,

± 4 m al fotomosaico escala 1:20.000 del año 1934.

Los 65 sitios de monitoreo (Figura 3.2) se distribuyeron de forma sistemática a lo largo de 19 canales de la Primera Sección en los puntos de intersección de los canales distributarios con diez transectas trazadas de este a oeste distanciadas y un minuto de latitud (~1850 m) entre los 24°25´ y 24°16´ de latitud sur. Se descartaron los puntos cercanos a la desembocadura de los canales distributarios en donde con mayor probabilidad, la dinámica del frente oblitera las alteraciones antropogénicas. La ubicación final de los sitios se ajustó según los siguientes criterios: (a) que el sitio tuviese al menos uno de los bordes de islas sin protección de márgenes (tablestacado, arbolado, u otra defensa) para poder apreciar el incremento del ancho; y (b) que dichos sitios sin protecciones estuvieran ubicados a menos de 200 m de la intersección con las transectas. Las mediciones se incluyen completas en el Apéndice II del capítulo 5.

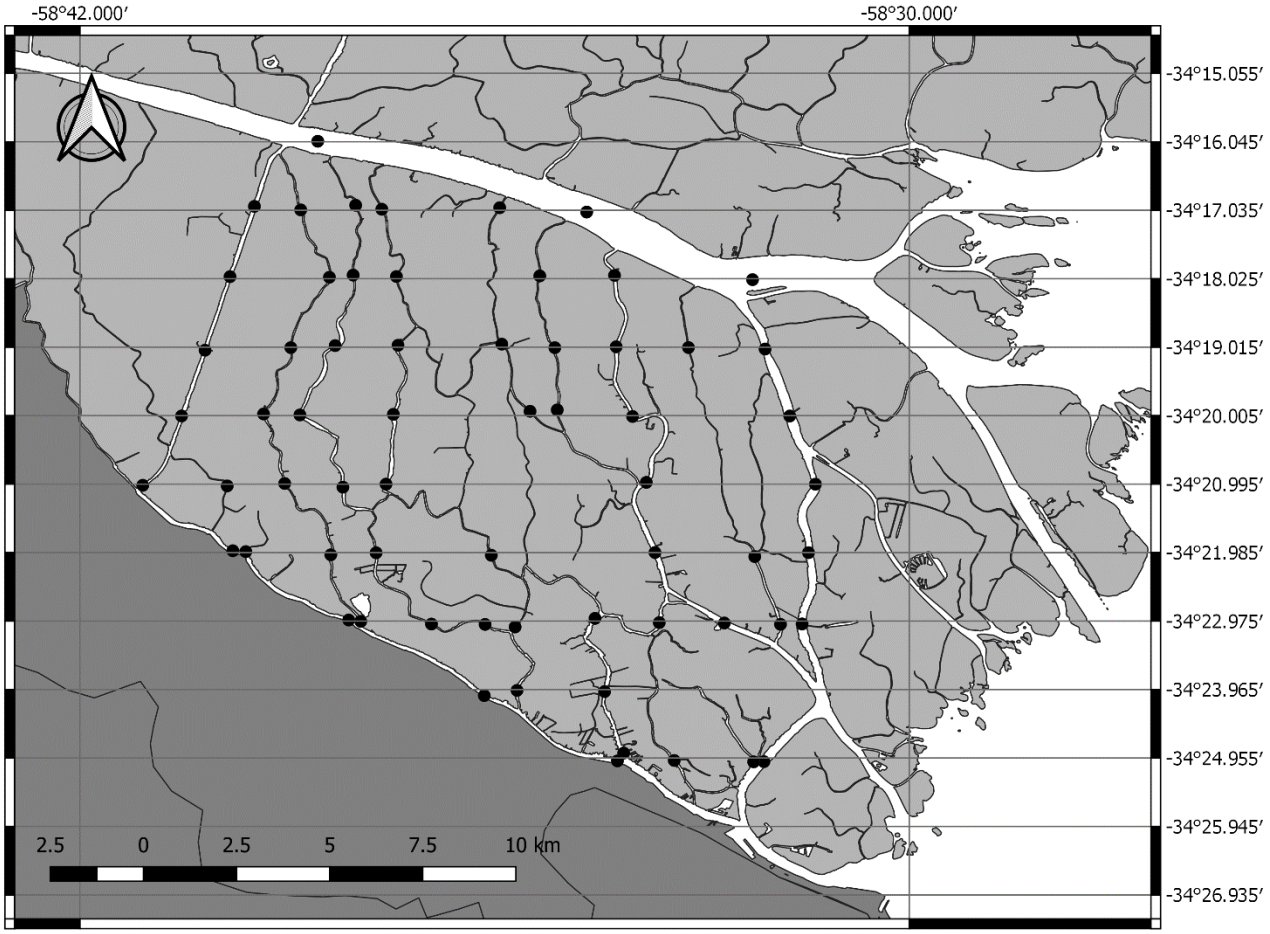


**Figura 3.2: Distribución de los 65 sitios de monitoreo de incremento del ancho de los canales en fotografías aéreas e imágenes satelitales.**

## 3.3 Técnicas de evaluación de las medidas de manejo

Los pobladores de las islas, sin mayores restricciones que sus posibilidades económicas, toman distintas medidas para controlar la erosión y estabilizar las márgenes. Se realizaron estudios sobre protecciones de márgenes de uso tradicional con tablestacados y sobre playas artificiales con recarga de arena, un tipo de márgenes que comenzó a utilizarse a fines del siglo XX, y prolifera cada vez con mayor frecuencia. A estos estudios se agrega la observación de distintos tipos de márgenes que se reconocieron en un recorrido náutico y el ensayo de propuestas para manejar la erosión.

**Retroceso de márgenes de relleno con tablestacados degradados (sitio TSC)**

En las operaciones de dragado de canales de la planicie deltaica el material extraído del fondo suele disponerse sobre las márgenes. Los rellenos son limos con menor grado de consolidación que incrementa la altura de las márgenes y, que se apoyan sobre las márgenes naturales más resistentes clasificadas como suelos limosos de baja plasticidad (Den Bieman *et al*. 2010), de acuerdo al estándar de la *Unified Soil Classification System*. Las márgenes tablestacados permiten el relleno de las márgenes. Los tablestacados envejecen y ante la falta de mantenimiento, los suelos de relleno se erosionan con facilidad.

Para comprender los mecanismos del retroceso de márgenes con rellenos altos se realizó un seguimiento de las márgenes del sitio TSC (34°24'52.17"S; 58°34'45.30"O) ubicado en las confluencias de los ríos Luján y arroyo Gambado (también denominado Fulminante). El sitio reúne condiciones de alta vulnerabilidad a la erosión dada por cuatro factores: (a) protecciones de márgenes (tablestacados) con un alto grado de deterioro, (b) márgenes elevadas con rellenos antrópicos de 1 m de altura por sobre el nivel natural, (c) tráfico náutico muy intenso por la cercanía de la estación fluvial y de guarderías náuticas de embarcaciones tipo crucero y, (d) la hidrodinámica del tramo inferior del río Luján.

Los estudios contemplaron varias instancias. En primer lugar, para caracterizar el sitio y descartar que la erosión estuviese relacionada al efecto del flujo del canal, se

realizó un relevamiento batimétrico aguas arriba y aguas abajo del sitio TSC. Los relevamientos se realizaron en diciembre de 2012 con un equipo batimétrico monohaz montado sobre un kayak de 5,4 m de eslora y 0,2 m de calado (Figura 3.3 A). La ecosonda (Fishfinder 160c GARMIN) se conectó mediante interfase a un GPS (GPSmap 76 GARMIN). Dentro del kayak se instalaron las baterías de alimentación de los equipos y una barra para poder visualizar constantemente el instrumental durante la navegación (Figura 3.3 C). Otros trabajos han empleado este tipo de equipos en el ámbito de la investigación (Johnston, 2003). Hampson *et al.* (2011) describe el uso de GPS y ecosonda, instalados en una embarcación tipo kayak y determina que los resultados son comparables a otros métodos más tradicionales y costosos de adquisición de datos batimétricos. El relevamiento se efectuó en diciembre de 2012. Se adquirieron más de 10.000 puntos batimétricos tomados cada 1 s en piernas de navegación espaciadas 50 m. Como parte del procesamiento, se corrigieron por el nivel de mareas para llevar los valores al plano de reducción de sondaje. Luego se digitalizaron puntos acotados en las márgenes y planicie deltaica y se armó una grilla (Figura 3.3). Empleando el método de interpolación *krigging* se arribó al mapa batimétrico final (Figura 6.2).

En segundo lugar, se realizó en el año 2014 un relevamiento topográfico de 83 puntos con nivel óptico sobre las escarpas erosivas en la confluencia del río Luján y arroyo Gambado. El mapa topográfico resultante se superpuso sobre una imagen satelital de alta resolución del año 2018 para observar los cambios morfológicos en el lapso de 4 años (Figura 6.4). Se complementaron estos relevamientos con el seguimiento *in situ* de las escarpas sobre suelos de relleno y de los movimientos gravitaciones de la margen. Finalmente se integraron los resultados obtenidos en un modelo esquemático de rotura de tablestacados y colapso de los suelos de relleno (Figura 6.6). Se agregan a los estudios de tablestacado, observaciones de otros impactos y problemas erosivos de estas protecciones detectados en otras márgenes de la Primera Sección.

**Caracterización y seguimiento de un perfil de playa artificial (sitio TD)**

La playas de recarga *(beach nourishment*) es una metodología de remediación de playa común en sistemas marinos y por ello han sido implementadas y estudiadas en

distintos países del mundo desde el año 1970 (CERC 1984). Bird y Lewis (2015) proponen el termino playas artificiales para los casos en los que no haya existido previamente una playa natural. Un caso de referencia son las playas artificiales en las márgenes del río Elbe, en Hamburgo (Jackson *et al.* 2010).

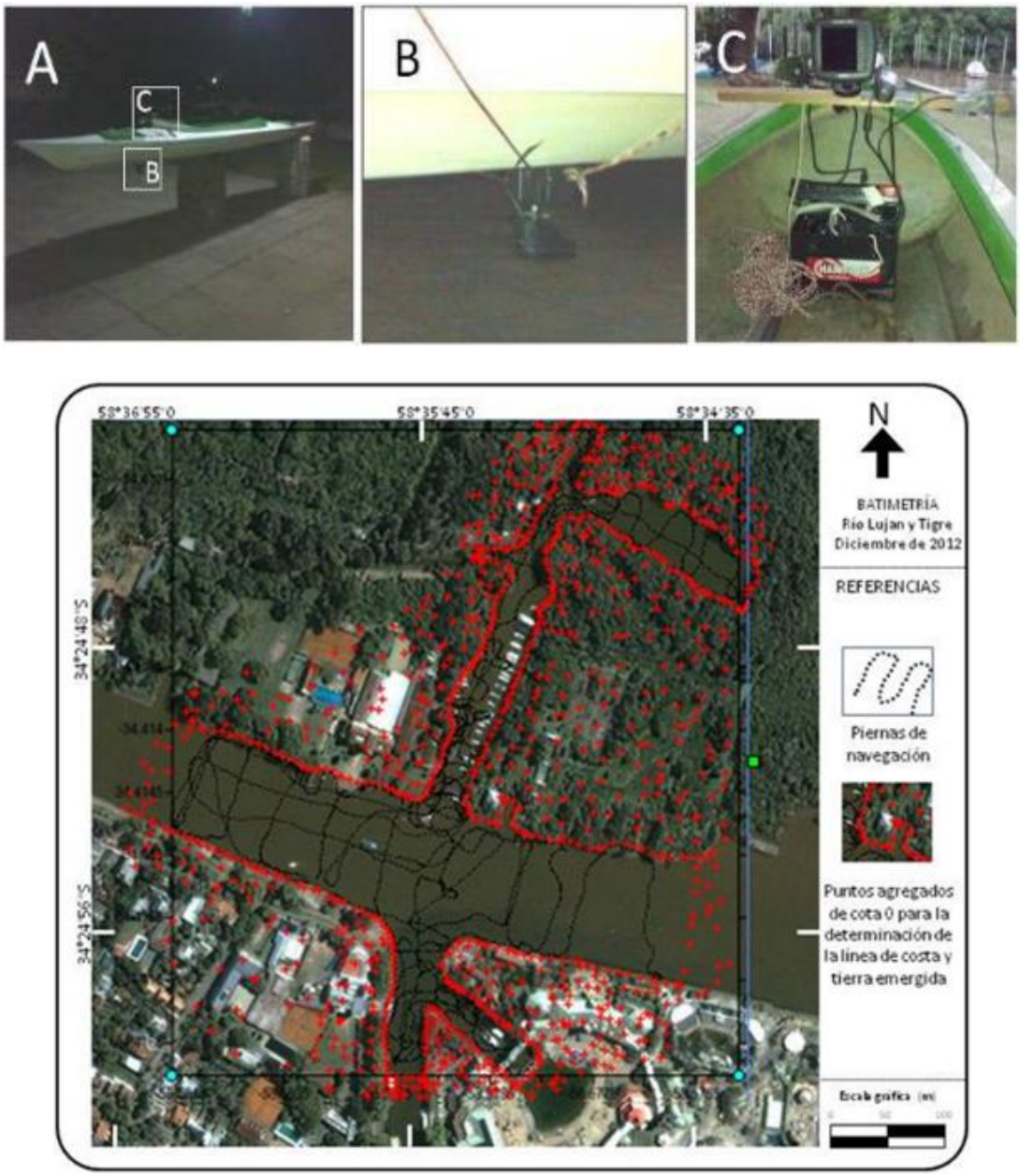


**Figura 3.3: Relevamiento batimétricos de los ríos Luján, Tigre y arroyo Gambado. Arriba Equipo de medición: embarcación tipo Kayak doble (A), transductor del ecosonda asegurado al casco (B); equipo de relevamiento: ecosonda, GPS, sonda de mano y batería montados sobre la cubierta (C). Abajo, grilla de puntos batimétricos sobre las piernas de navegación y puntos (en rojo) sobre las márgenes.**

En los últimos años, la construcción de playas artificiales se ha convertido en una práctica común en el ámbito del delta del río Paraná, ya que incrementa el espacio de recreación, el acceso al agua y protege indirectamente la costa. Las obras de recarga tienen una determinada durabilidad que en ambientes marinos es de 2 a 5 años (Marcomini y López 2006). Sin embargo, su durabilidad no ha sido evaluada en este tipo de ambiente. Por tal motivo para comprender este tipo de manejo de márgenes se reconocieron distintos tipos de playas que se han construido en los canales distributarios de la Primera Sección y se estudió y monitoreó la playa artificial del sitio TD.

El monitoreo de la playa artificial comenzó en septiembre de 2013 con la instalación del dispositivo fotográfico remoto. Con el dispositivo además de obtener imágenes sobre el tráfico y el oleaje en el río Sarmiento se obtuvieron fotografías diarias de la playa en forma oblicua hasta marzo de 2014. Se seleccionaron 6 fotogramas que ilustran las variaciones morfológicas de la playa artificial entre septiembre de 2013 y marzo de 2014 (Figura 6.13). En dicho período ocurrieron niveles de bajante y creciente extraordinarios que permiten documentar la morfodinámica del perfil

En octubre de 2013, se tomaron 4 muestras de arena con las que se realizó una caracterización sedimentológica del perfil. Los puntos de muestreo son: playa distal (1) (pie de la berma estable), playa frontal (2) (niveles de marea alta normal), playa frontal sumergida (3) a (0,4 m por debajo del nivel de agua), talud aterrazado del canal (4) a la altura del plano de reducción de sondajes (nivel 0 de mareas). Las muestras se tamizaron en laboratorio de sedimentología en máquina *ro-tap* con pilas de tamices según intervalos de ¼ de φ. La distribución granulométrica se procesó en planilla de cálculo por el método de Folk y Ward (1957) para obtener los parámetros estadísticos de las muestras. Se graficaron los histogramas granulométricos de cada muestra. Además del muestreo de arena, en octubre de 2013 se realizó un perfil de playa con estación total. Para estudiar la duración de la recarga este perfil se repitió en marzo de 2015 (Figura 6.14). Se obtuvieron variaciones en el perfil y volúmenes de arena movilizados de un ambiente a otro de lo que surgen recomendaciones para el manejo de playas artificiales.

Páginas 64 a 201 eliminadas a pedido del autor.

# 7 CAPÍTULO FINAL

## 7.1 Discusiones

**Morfología natural de los canales y planicie deltaica**

La planicie deltaica de la Primera Sección, en términos de la clasificación morfológica de deltas (Galloway 1975), no se ajusta ni a un modelo de delta fluvial tipo Mississippi (Coleman *et al.* 1998), ni a un delta dominado por mareas tipo delta del Ganges-Brahmaputra (Kuehl *et al.* 2005), ni a un modelo de delta dominado por ola tipo delta Sao Francisco (Anthony 2015). Estos sistemas de clasificación parece válidos cuando hay un proceso gradual y dominante que modela constantemente el frente deltaico y no son siempre representativos para todos los deltas e inclusive han llevado a distintas interpretaciones, como en el caso del delta de río Burdekin, en el norte de Australia, que contiene morfologías de oleaje y mareas en el frente, por lo que fue clasificado como un delta mixto (Coleman y Wright 1975). Fielding *et al.* (2011) reinterpreta esta clasificación y propone que, dada la variabilidad en el caudal de río Burdekin en el que los sedimentos arriban tan solo unos días al año en momentos de intensas descargas, el delta debe reinterpretarse como un sistema depositación controlado por las crecidas.

En la Primera Sección del delta del río Paraná los canales distributarios transportan grandes cantidades de sedimentos a diario. La carga de fondo decanta en las bancos de desembocadura o en el delta subácueo en forma semejante al modelo friccional (Wright 1977) reconocido en el caso de la desembocadura del canal del Este (Figura

4.5). La información sobre la carga de fondo en el frente es todavía un campo inexplorado en el delta del río Paraná. Sin embargo, las mayores tasas de progradación del frente de avance se producirían luego de picos de crecida (Sarubbi *et al.* 2006). Evidencias de ello son las mayores tasas de sedimentación registradas en un testigo sedimentario a partir de 1970, década a partir de la cual aumentaron las descargas fluviales del Paraná (Schuerch *et al.* 2016). También puede mencionarse la reciente crecida extraordinaria del año 2016 que generó un incremento en la sedimentación en los canales recientemente dragados en el delta subácueo (Menéndez *et al. 2017)*. Menciones del jefe de la zona Tigre de la Dirección Provincial de Saneamiento y Obras Hidráulicas sobre que: "*La duración de los dragados en el Tigre está directamente vinculada con la cantidad de crecidas del Paraná*" (*comm. pers.* Ing. Héctor C. Arévalo, año 2014), también sugieren que las crecidas son un factor de primer orden en la sedimentación. Se propone entonces que el sistema de la planicie deltaica de la Primera Sección está gobernado por procesos eventuales: dominado por las crecidas del Paraná (eventos de baja recurrencia) y controlado morfológicamente por el retrabajo de las sudestadas (eventos de mayor recurrencia). En ausencia de los eventos de crecidas del Paraná y las sudestadas, procesos más uniformes como las descargas fluviales ordinarias, el oleaje, las mareas normales y la colonización de la vegetación producen cambios más locales, tales como estructuras sedimentarias en los bancos submareales, estabilización del frente con marismas, colmatación de canales de marea y acreción en los bajos de las islas interdistributarias.

Es reconocido que, en sistemas deltaicos grandes, sectores del frente pueden tener distintas relaciones entre las forzantes de la cuenca de drenaje y la cuenca receptora que hacen variar la morfología de la planicie dentro de un mismo delta (Bhattacharya y Giosan 2003). En este sentido, el diseño distributario entre subparalelo y confluyente identificado para la planicie deltaica de la Primera Sección contrasta con el diseño bifurcante (Coleman y Wright 1975) de la planicie deltaica asociada al Paraná Guazú (Figura 2.2). En este sector norte del frente, los eventos de sudestadas ejercerían un control menor en relación a descargas fluviales más significativas.

Milana y Kröhling (2015) infieren una posible vinculación entre las condiciones ambientales del evento climático LIA y la formación de un reducido set de cordones litorales aislados al sur de la planicie de Entre Ríos. Contrariamente, a partir del análisis de los diseños de drenaje, en este trabajo se sugiere que el frente de avance al final del evento LIA se ubicaría en el río Carapachay, correspondiente aproximadamente con la paleocosta del año 1780 reconstruida de materiales cartográficos históricos (Sarubbi 2007). Por tanto, las morfologías vinculadas a la finalización del LIA se encuentran más cercanas al frente de avance en la planicie deltaica asociada al Paraná de las Palmas, en relación de lo que infieren aquellos autores -sin dataciones- como ubicación del LIA.

Hart (1995) menciona que los deltas dominados por crecidas tienden a formar canales anchos, someros y entrelazados y sugiere que la migración lateral de estos canales es más frecuente que la formación de albardones. Algunas de estas características son representativas del sistema de la Primera Sección. Por caso, se encontró que la evolución de los canales en la planicie deltaica está gobernada por la migración y reducción del ancho que produce la acreción de bancos adosados a las márgenes. En el futuro, la disponibilidad de imágenes de alta resolución espacial y temporal permitirá establecer si la generación de bancos laterales es gradual o, como se presume, ligada a los eventos de crecida. La tasa de migración de curvas pronunciadas, que puede ser tomada como la máxima tasa de migración de un canal, resultó entre 0,2 y 0,5 m/año para la Vuelta Mala del río Capitán, en un tramo de canal de ~80 m de ancho. Esta tasa es similar a la de 0,3 m/año de la “Vuelta del Tordillo” (Den Bieman *et al.* 2010) en un tramo del Paraná de las Palmas de ~400 m de ancho, lo que sugiere que la velocidad de estos procesos naturales es independiente de la escala de los canales.

Otro aspecto de interés en relación a los bancos laterales es la evolución de sus márgenes vegetadas. En los casos del tramo medio del canal del Este y de las bifurcaciones del canal Honda y del río Capitán sobre el Paraná de las Palmas, se observaron arbolados naturales que colonizaron nuevos sectores de márgenes

generadas por la acreción y estabilización de bancos laterales. En este sentido, muchas referencias a ceibales en los "albardones" en publicaciones del delta (Kandus y Malvárez 2004; Biondini y Kandus 2006) deberán ser reinterpretados en sentido geomorfológico como ceibales de bancos laterales.

Los bancos laterales merecen estudios más detallados para enriquecer los modelos naturales y sus aplicaciones al manejo de canales en los sistemas deltaicos. En el seguimiento del dragado del canal Rompani se identificaron embancamientos en las confluencias con canales distributarios más caudalosos, los cuales se interpretaron como bancos laterales desarrollados sobre la embocadura y desembocadura del canal artificial Rompani, de menor energía. Estos bancos laterales de un metro de altura se formaron en menos de un año, por lo que el reconocimiento de bancos laterales y nuevos estudios sobre sus dinámicas, pueden tener impacto en el manejo de dragado de canales.

**El retroceso márgenes**

En algunos estudios sobre erosión del oleaje náutico en canales fluviales en dónde se realizan cálculos de la energía del oleaje y seguimiento de las márgenes a lo largo de uno o dos años no pueden separar los efectos del oleaje de los efectos erosivos de las crecidas (Laderoute y Bauer 2013). Un ambiente deltaico como el de la Primera Sección, brindó la posibilidad de aplicar criterios geomorfológicos y estudiar distintos canales y grados de alteración.

En el río Sarmiento, el oleaje náutico monitoreado (capítulo 5) supera el umbral aceptable (Patterson Britton & Partners 2001) y se cumplen con dos criterios geomorfológicos característicos del fenómeno erosivo del oleaje náutico: la erosión en ambas márgenes (Dorava y Moore 1997) y el aterrazamiento de taludes por debajo del nivel de base de la ola (Verheij 2000). Las tasas de retroceso obtenidas para este canal, que se encuentra bajo el efecto de cientos de lanchas rápidas por día, son similares a las que se obtuvieron en el Paraná de las Palmas por efecto de la navegación de decenas de buques mercantes por día (Den Bieman *et al.* 2010).

El tipo de embarcaciones monitoreado en el río Sarmiento y el oleaje que cada una produce se estima válido para caracterizar la navegación en los canales distributarios secundarios de la Primera Sección, aunque lógicamente variará la intensidad del tráfico fluvial en cada curso. Por su parte, en el río Luján y en el canal artificial Gobernador Arias, hay una componente de transporte fluvial mercante, particularmente de barcos areneros, que no se representó en el monitoreo del río Sarmiento. No obstante, en el eje de los canales Honda–Urión–Vinculación de la planicie deltaica inferior, se encontraron tasas de incremento del ancho extraordinarias y el transporte tiene otros componentes que no se encuentran en el resto de los canales distributarios de la Primera Sección. En estos canales, escasamente urbanizados en sus márgenes, se ha observado que, en lugar de lanchas colectivas y medianas, circulan catamaranes de alta velocidad que cubren la ruta a Martín García y a puertos cercanos de la República Oriental del Uruguay, y embarcaciones deportivas y recreativas tipo crucero vinculados a clubes náuticos que se ubican, en general, sobre la costa del río Luján (partidos de San Fernando y San Isidro), de población con elevados recursos económicos. La navegación recreativa y deportiva con estos cruceros de mediano y gran porte se concentra durante los fines de semana, al igual que en el río Sarmiento. Sin embargo, dado el mayor ancho y profundidad que ofrece estos canales, la navegación se realiza a gran velocidad. Por lo tanto, la velocidad (y la altura de ola asociada) y el carácter de uso recreativo y deportivo predominante de estos canales durante los fines de semana, pueden ser factores determinantes de estas mayores tasas de erosión. A su vez la apertura del canal artificial Vinculación y su posterior dragado en 2008 (UBANEX 2001) puede haber generado un efecto erosivo propio aguas arriba (Mmom y Chukwu-Okeah 2012).

Un elemento crucial de la estabilidad de márgenes en canales distributarios es la vegetación arbórea de selva en galería, que le brinda mayor rugosidad a los bordes en crecida (Hession y Curran 2013). Iniciada la erosión de márgenes por efectos antropogénicos, con la pérdida de la vegetación ribereña y dado que este eje de canales tiene una conexión amplia con el Paraná de las Palmas, con una embocadura tipo “Y”

del canal Honda (capítulo 4), no debe despreciarse un efecto erosivo de las corrientes inducidas por las alteraciones antrópicas previas. Repetir perfiles batimétricos como el que se realizó en el río Sarmiento en los ríos de este eje de canales permitiría establecer si existe, además, la formación de taludes aterrazados. Por último, se puede establecer que las tasas excepcionales en el caso de los canales Honda – Urión – Vinculación están asociadas al efecto de alteraciones por dragados (desestabilización de pendientes, aumento de la velocidad de la corrientes y erosión aguas arriba) pero, fundamentalmente, al fenómeno erosivo del oleaje producido por embarcaciones de mayor desplazamiento y velocidad que las monitoreadas en el río Sarmiento.

El mapa de zonificación de la erosión obtenido (Figura 5.20) indica que los canales con baja erosión son los canales Sábalos, Antequera, un tramo del Toro, un tramo del Carapachay, tramos del Caraguatá y Guaycurú. En general, estos canales o tramos de canales son estrechos, poco profundos y espacialmente se ubican alejados del sector más transitado del partido de Tigre, desde donde zarpan la mayoría de las lanchas que recorren la Primera Sección. Esta zonificación refuerza una evidente correlación entre actividad náutica de los canales y las mayores tasas de erosión. Establecida esta zonificación regional, en los canales más urbanizados como el Carapachay, Espera y Toro, en donde inclusive bajas tasas de erosión ponen en riesgo la infraestructura, será pertinente profundizar los estudios realizando campañas de medición del retroceso de las márgenes *in situ* con un método más tradicional como el de las estacas de erosión (*erosion pins,* Lawler *et al.* 1997). Futuras investigaciones con este tipo de técnicas se deberán sembrar estacas a una a una equidistancia de 25 cm cómo máximo para detectas cambios de forma interanual.

En esta escala de análisis más detallada, la altura de las márgenes puede ser un factor que determina la ocurrencia de grietas en el suelo y procesos de remoción en masa (Thorne 2002). El seguimiento de los deslizamientos en márgenes con rellenos en la Primera Sección (sitio TSC, capitulo 6) con tasas de retroceso de entre 0,5 y 1 m/año sugiere que, en los canales más urbanizados, además del oleaje y los efectos directos del dragado, deben considerarse las alteraciones inducidas por sucesivos

dragados en los canales de mayor historia urbana en donde se han elevado la cota de las márgenes. En este sentido futuras investigaciones en los canales más antropizados y urbanizados de la Primera Sección podrían incorporar el abordaje desde la sociogeomorfología que Ashmore (2015) propone. Este autor sostiene que, en ríos urbanizados, las geoformas fluviales son coproducidas por factores naturales y antrópicos de modo que los eventos sociales culturales y políticos y las contingencias locales ya no son separables de los procesos naturales., y que, para el diseño de medidas restauración debe contemplarse este punto de vista holístico.

**Protecciones y estrategias de manejo**

Entre los tipos de márgenes hallados se observó que hay: (a) estrategias heredadas del siglo XX, como la de moderar la erosión con márgenes arboladas, que si bien retardan el retroceso son inviables en canales con altas tasas de erosión; (b) estrategias de moderación que se usaban antes y se continúan utilizando, como las enramadas; (c) estrategias que se utilizaban antes y se continúan utilizando con algún cambio tecnológico, como el caso de los tablestacados de madera cuyo uso se ha reemplazado mayoritariamente por tablestacados de hormigón armado, y d) nuevas estrategias como el acorazamiento con enrocados, que se vinculan a la necesidad de estabilizar las márgenes frente a las tasas de retroceso existentes y su bajo costo por la disponibilidad de bloques de demolición de centros urbanos cercanos. Otras nuevas estrategias se asocian a nuevos requerimientos de confort como la transformación de márgenes con playas artificiales o la elevación y endicamientos de márgenes con terraplenes que anulan el riesgo de inundación. Ninguna de las alternativas de protección es completamente satisfactoria en las condiciones de oleaje náutico de los canales con alta y muy alta tasa de erosión: ya sea por la escasa estabilidad que brindan o por los impactos que genera.

El Plan de Manejo y sus ordenanzas asociadas indican la prohibición de construir nuevos tablestacados y defensas verticales por la reflexión del oleaje que producen (Municipalidad de Tigre 2013). Sin embargo, la ya mencionada tablestacada, de aplicación tradicional, es la solución más eficiente de las existentes y se considera

preferible a los enrocados con bloques de demolición que generan un impacto paisajístico mayor e inconvenientes para la navegación de los canales (deslizamiento de bloques). La búsqueda de protecciones amigables con el ambiente, de un costo razonable como para ser implementados de forma extensa o estrategias para afrontar la erosión de márgenes, es un problema generalizado en deltas con actividad antrópica (Marchand *et al.* 2012)

Entre las alternativas al acorazamiento de las márgenes se han propuesto, en el delta de Mekong (Vietnam), defensas rompeolas con estructuras de cañizos de bambú (Schmitt y Albers 2014) y estabilización de las márgenes con hileras de la planta gramínea Vetiver (Dung *et al.* 2003). Den Bieman (2010) proponen esos mismos sistemas en sus estudios de la erosión en el Paraná de las Palmas. Mientras que generar estructuras rompeolas perpendiculares a las márgenes puede ser viable en el eje Urión – Honda – Vinculación, serían inviables de aplicar en canales más estrechos y habitados. Si bien algunos proyectos de implantación de bambú han comenzado a aplicarse en la Primera Sección (Peña y Tokatlian 2013) tratándose en ambas propuestas de plantas exóticas, sus aplicaciones a la defensa de márgenes debería realizarse en ensayos controlados, documentando tantos los beneficios como los perjuicios que ocasionen. Tal como propone Marchand *et al.* (2012) para los problemas erosivos de los deltas asiáticos (2012), se deben priorizar las experiencias piloto y generar y aprovechar el saber local antes que la soluciones de diseño.

Torne (1993) al tratar el problema del oleaje náutico en el río Mississippi evalúa que, cuando el origen de la erosión es antropogénico, es más económico atenuar o eliminar la causa de la erosión antes que acorazar decenas o centenas de kilómetros de márgenes. Los niveles de oleaje náutico medidos indican que este problema requiere un abordaje múltiple de manejo de la navegación. Las medidas restrictivas a la navegación han intentado ser aplicadas a un sector de la Primera Sección. Dado que el cumplimiento de medidas restrictivas a la navegación requiere un gran esfuerzo de control, por la extensión de la zona, se sugiere que este esfuerzo se concentre en disminuir la velocidad en momentos de alta frecuencia en los turnos vespertinos de

fin de semana y días de crecida. Controlar estos momentos puede ser un paso más alcanzable que una restricción absoluta de velocidad y puede generar un efecto significativo en la mitigación de erosión que deberá ser monitoreado.

El manejo de la navegación requiere, no obstante, de nuevas medidas. Reemplazar la cartelería existente que indica disminuir la velocidad, por las señalizaciones simples propuestas en la Figura 6.30, puede tener un impacto positivo si se aplica en conjunto con otras medidas. La claridad del mensaje es importante en la promoción de objetivos ambientales porque las personas tienen una capacidad de atención limitada, por lo que la información debe ser tan clara y sencilla como sea posible (Sunstein 2014; Cooper 2017). Por otro lado, se recomienda ampliar a nuevos ensayos de mayor escala el sistema de boyado de canales ensayado a escala piloto, que puede ser visto como una intervención en el medio físico que induzca, al reducir el espacio de navegación, a disminuir la velocidad y el impacto de la navegación sobre las márgenes.

## 7.2 Conclusiones

**Evolución natural de los canales**

A escala regional, se identificó un cambio en el diseño de drenaje en la planicie deltaica de la Primera Sección a partir de línea de paleocosta del año 1780 definida por Sarubbi (2007) la cual coincide con la finalización de la Pequeña Edad del Hielo (LIA). El diseño de drenaje distributario con bifurcaciones y confluencias generado a partir de ese momento, es consistente con un aumento en las descargas fluviales luego de la finalización de dicho evento climático global (Iriondo 1999).

A escala local, se generó un modelo de evolución natural de canales distributarios en el que se identificaron dos fases: una correspondiente a la morfogénesis de canales en el frente de avance y otra a la integración de los canales distributarios en la planicie deltaica. El proceso de adosamiento de bancos de desembocadura es la primera fase de evolución del modelo y se resume en tres etapas: 1) los canales terminales se bifurcan a partir de nuevos bancos de desembocadura que se depositan en el frente deltaico. 2) se produce acreción en estos bancos y bermas de tormenta que constituyen las de línea de costa y, 3) relleno parcial de uno de los canales, el cual se preserva en la planicie deltaica como distributario secundario, mientras que el banco de desembocadura pasa a formar parte de las márgenes del canal distributario terminal. Se estimó que el ciclo de adosamiento de un banco tiene una duración de 30 años. En la segunda fase, la evolución de los canales en la planicie deltaica está dominada por la acción fluvial y la acreción de bancos laterales adosados a las márgenes. Se distinguen tres comportamientos típicos: reducción del ancho del canal, migración y colmatación de embocaduras, y migración lateral de canales sinuosos.

Del modelo evolutivo se concluye que, por lo general, los canales tienden a la colmatación y que fenómenos de erosión en sistemas naturales están localizados en ciertos sectores de los canales asociados a la migración lateral de canales y embocaduras. Los eventos de crecida del río Paraná y de tormenta tipo sudestada dominan la evolución geomorfológica de la planicie deltaica de la Primera Sección.

## Alteraciones antropogénicas de los canales

Las alteraciones morfológicas de los canales y sus márgenes producidas por la acción antrópica son los dragados, el oleaje náutico, los rellenos y las protecciones de márgenes.

Del seguimiento del canal Rompani se concluye que los dragados en canales estrechos pueden desestabilizar las márgenes, a la vez que un único evento de dragado aislado es ineficiente por la rápida formación de bancos en la embocadura y desembocadura. En cuanto a volúmenes, se movilizaron $20 m^3/m$ los cuales se colocaron sobre las márgenes produciendo una elevación de la cota de 0,2 m en cada una. En cuanto a la recuperación del perfil se obtuvo que un 35% de los sedimentos se depositaron nuevamente en los primeros dos años posdragado.

El oleaje náutico erosivo (H > 0,3 m) en el río Sarmiento es producido por la navegación de lanchas rápidas colectivas y lanchas de mediano porte con motores de alta potencia. El aumento de tránsito y oleaje es muy significativo en fines de semana y meses de temporada alta, por lo que el impacto de retroceso puede asignarse de forma predominante al uso turístico y recreativo de la zona. En el Sarmiento se estimó un pasaje de 81.000 lanchas que producen oleaje erosivo para el año 2013. En el sitio de medición del oleaje, el incremento del ancho del Sarmiento fue de un 150% a partir del año 1934. La alteración morfológica de los canales por efecto del oleaje está caracterizada por un aumento de la rugosidad del borde de las islas, por el retroceso de ambas márgenes y, en cuanto al perfil transversal, se observó un aterrazamiento de los taludes del canal por debajo del nivel de base de la ola. Se monitoreó el incremento del ancho en otros 65 sitios distribuidos en 19 canales y el 80% de los sitios de medición presentó retroceso de márgenes. Diez canales, en general más estrechos y de menor requerimiento náutico, incrementaron su ancho a razón de 0,1 a 0,4 m/año. El Luján, Sarmiento, Honda, Urión, Vinculación, Paraná de las Palmas y San Antonio, de mayor requerimiento náutico, arrojaron tasas de incremento del ancho de 0,5 a 1,9 m/año. La máxima erosión se midió en el Urión, que en 1934 tenía un ancho medio de 75 m y prácticamente triplicó su ancho para el año 2019.

Se verifica la hipótesis planteada inicialmente *que los agentes geomorfológicos antropogénicos asociados al transporte fluvial aceleran la erosión de márgenes de los canales* al contrastar la evolución natural -en donde las tasas de erosión por factores naturales alcanzan como máximo 0,5 m/año, en la margen cóncava de sinuosidades- con las morfologías alteradas por dragado y oleaje y los incrementos del ancho registrados en prácticamente todos los canales y que alcanzan tasas de hasta 1,9 m/año. Se concluye que la actividad náutica acelera la erosión y que el retroceso de márgenes no protegidas es un fenómeno generalizado en la Primera Sección potenciado de forma esporádica por los eventos de dragado.

**Manejo de márgenes**

En la Primera Sección existen más de 30 tipos de márgenes los cuales se clasificaron en ocho categorías: márgenes sin intervención, con tablestacados, con arbolados, con enrocados, con playas artificiales, con terraplenes y otros tipos de intervenciones. Las principales observaciones y recomendaciones que surgen de los relevamientos para las categorías más comúnmente utilizadas son que:

- Los tablestacados son el tipo de protección más efectivo y tradicional. Las cárcavas que eventualmente se generan en la parte superior del tablestacado, se deben tapar con suelos compactados y vegetación gramínea para evitar que márgenes de relleno queden expuestas al oleaje y las crecidas. En canales estrechos, la solución de implementar un tablestacado debería ser parte de una estrategia conjunta entre parcelas vecinas para evitar que la reflexión del oleaje del tablestacado de unos perjudique a los otros.
- Los enrocados con bloques de demolición degradan el valor paisajístico, recreativo y natural de las márgenes. En caso de implementarse, se colocan con filtro geotextil y bloques pequeños por encima. Los bloques grandes se deben ubicar de forma tal que queden trabados por otros bloques para evitar deslizamientos.
- Las enramadas son una medida de emergencia. Se optimizan si se prevé el armado de paquetes compactos de varas y ramas para rellenar las cárcavas y

si se reemplazan o agregan nuevos paquetes cada año a medida que se degrade el material vegetal. En caso de riesgo de colapso de infraestructura, en lugar de enramadas, se sugiere implementar una defensa con geobolsas.

- Los arbolados, en general, disminuyen la erosión. Sin embargo, debe preverse la necesidad de implementar protecciones al pie de los arbolados en canales de altas tasas de erosión o la poda de aquellos ejemplares que pierdan la verticalidad por el lavado y socavamiento basal que genera el oleaje náutico.
- Las playas generan un espacio para recreación y acceso al agua a la vez que la arena constituye un revestimiento para las márgenes naturales que la protegen de los efectos del oleaje. Para mantener sus cualidades se recomienda prever el mantenimiento del volumen de arena con una recarga cada 4 años y la extracción de la vegetación que comience a estabilizar la playa frontal una vez por año, antes del inicio de cada temporada estival.

El problema erosivo requiere múltiples acciones de gobierno con (a) medidas de manejo de la navegación con restricciones a la navegación en crecidas y de velocidad los fines de semana y señalización con cartelería y boyado de canales y (b) medidas de manejo de las márgenes, entre las que se recomienda implementar, como primer paso, la identificación de sitios con alto riego de erosión y el registro y mantenimiento de protecciones ya existentes y monitoreo bianual de perfiles de canales para planificar los eventos de dragado.

.

# 8 BIBLIOGRAFÍA


Aage, C., Bell, A., Bergdahl, L., Blume, A., Bolt, E., Eusterbarkey, H., Hiraishi, T., Kofoed-Hansen, H., Maly, D., Single, M., Rytkönen, J., Whitakker, T., y Elsäber, B. 2003. Guidelines for managing wake wash. Brussels. 32 pp.

Amsler, M. L. 2006. Evolución de la carga de lavado en el alto Paraná (1968–2004). Incidencia sobre las sedimentaciones en la planicie aluvial del Paraná Medio. En Actas III Congreso Iberoamericano sobre Control de la Erosión y los Sedimentos, Buenos Aires, Argentina.

Amsler, M. L., y Drago, E. C. 2009. A review of the suspended sediment budget at the confluence of the Paraná and Paraguay Rivers. Hydrological Processes: An International Journal, 23: 3230-3235. Wiley Online Library.

Anthony, E. J. 2015. Wave influence in the construction, shaping and destruction of river deltas: A review. Marine Geology, 361: 53-78. Elsevier B.V.

Ashmore, P. 2015. Towards a sociogeomorphology of rivers. Geomorphology, 251: 149-156. Elsevier B.V.

Balay, M. A. 1961. El Río de la Plata entre la atmósfera y el mar. Servicio de Hidrografía Naval, Buenos Aires, 153 pp.

Bauer, B. O., Lorang, M. S., y Sherman, D. J. 2002. Estimating boat-wake-induced levee erosion using sediment suspension measurements. Journal of Waterway Port Coastal and Ocean Engineering, 128: 152-162.

Bautista, G. 1986. Esquema general para abordar la revisión de la problemática geográfica argentina. Un caso de estudio: El delta del río Paraná. Universidad de Buenos Aires. 147 pp.

Bhattacharya, J. P., y Giosan, L. 2003. Wave Influenced Delta: Geomorphological implications for facies reconstruction. Sedimentology, 50(1): 187-210.

Biondini, M., y Kandus, P. 2006. Transition matrix analysis of land-cover change in the accretion area of the Lower Delta of the Paraná River (Argentina) reveals two succession pathways. Wetlands, 26: 981-991.

Bird, E., y Lewis, N. 2015. Introduction to Beach Renourishment. En Beach Renourishment, pp. 1-5. Ed. E. Bird y N. Lewis. Springer International Publishing, Cham.

Bombardelli, F. A., Menéndez, A. N., Brea, J. D., Lapetina, M. R., y Uriburu Quirno, M. 1995. Estudio hidrodinámico del Delta del río Paraná mediante modelación matemática. 103-137 pp.

Bonfils, C. G. 1962. Los suelos del Delta del Río Paraná. Factores generadores, clasificación y uso. Revista de Investigaciones Agrícolas, 16: 257-370.

Bonomo, M., Politis, G., y Gianotti, C. 2011. Montículos, jerarquía social y horticultura en las sociedades indígenas del Delta Del Río Paraná (Argentina). Latin American Antiquity, 22: 297-333.

Brignone, M., Schiaffino, C. F., Isla, F. I., y Ferrari, M. 2012. A system for beach video-monitoring: Beachkeeper plus. Computers and Geosciences, 49: 53-61. Elsevier.

Brown, W. D. 1994. Design of sheet pile walls. US Army Corps of Engineers, Washington, 76 pp.

Burkart, A. 1957. Ojeada sinóptica sobre: La vegetación del Delta del Río Paraná. Darwiniana, 11: 457-561. JSTOR.

Caballé, M., Ganuza, D., Coriale, N., y Bravo Almonacid, M. 2005. Recursos areneros en el Delta del Paraná y Litoral Atlántico. En Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata, Ed. R. E. de Barrio, R. O. Etcheverry, M. F. Caballé, y E. J. Llambías. Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, pp: 435-440.

Canestrelli, A., Nardin, W., Edmonds, D., Fagherazzi, S., y Slingerland, R. 2014. Importance of frictional effects and jet instability on the morphodynamics of river mouth bars and levees, 119: 509-522.

Cavallotto, J. L. 1987. Morfología y dinámica sedimentaria del Río de la Plata. Informe final de Beca de Estudio (inédito). CIC-SHN. Buenos Aires. 87pp.

Cavallotto, J. L. 1988. Interpretación morfológica del Río de la Plata. En Simposio Internacional sobre el Holoceno en América del Sur. Resúmenes expandidos, pp. 65-68. Paraná, Entre Ríos.

Cavallotto, J. L. 1995. Evolución geomorfológica de la llanura costera ubicada en el margen sur del Río de la Plata. Facultad de Ciencias Naturales y Museo. Tesis Docotral (inédita). Universidad Nacional de la Plata, 237 pp.

Cavallotto, J. L. 2002. Evolución holocena de la llanura costera del margen sur del Río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 57: 376-388.

Cavallotto, J. L., y Violante, R. A. 2005. Geología y Geomorfología del Río de la Plata. En Geología y recursos minerales de la Provincia de Buenos Aires. Relatorio XVI Congreso Geológico Argentino, La Plata., Ed. R. E. de Barrio, R. O. Etcheverry, M. F. Caballé, y E. J. Llambías. Asociación Geológica Argentina, Buenos Aires, pp: 237-253.

Cavallotto, J. L., Violante, R. A., y Colombo, F. 2005. Evolución y cambios ambientales de la llanura costera de la cabecera del Río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 60: 353-367.

CERC. 1984. Shore protection manual, Volume I. U.S. Army Engineer Waterways Experiment Station Coastal Engineering Research Center, Vicksburg, 337 pp.

Cerrillo, T., Alvarez, J. A., Alvarez, J. L., Battistella, A., Braccini, C., Casaubón, E., Ceballos, D., Cortizo, S., Fernadez Tschider, E., Fernandez, P., Faustino, L. I., Fracassi, N., García Cortés, M., González, A., L., G., Hemming, A., Landi, L., Mangieri, V., Mema, V., Monteverde, S., Mujica, G., y Olemberg, D. 2015. La forestación de Salicáceas como aporte al desarrollo sustentable del Delta del Paraná. En actas del XXIX Jornadas Forestales de Entre Ríos, edición digital 8 p. Concordia, Entre Ríos.

Codignotto, J. O., y Marcomini, S. C. 1993. Argentine deltas morphology. En Eighth Symposium on Coastal and Ocean Management, pp. 323-336. New Orleans, Lousiana.

Coleman, J. M. 1969. Brahmaputra River: channel processes and sedimentation. Sedimentary geology, 3: 129-239. Elsevier.

Coleman, J. M., y Huh, O. K. 2004. Major deltas of the world: A perspective from space. Coastal Studies Institute, Louisiana State University: Baton Rouge, LA, USA, 74 pp.

Coleman, J. M., y Prior, D. B. 1980. Deltaic Sand Bodies. American Association of Petroleum Geologists. 171 pp.

Coleman, J. M., Roberts, H. H., y Stone, G. W. 1998. Mississippi River delta: An overview. Journal of Coastal Research, 14: 698-716. Coastal Education & Research Foundation, Inc.

Coleman, J. M., y Wright, L. D. 1975. Modern river deltas: variability of processes and sand bodies: 99-149. Houston Geological Society.

Contesse, B. 2006. Casuarina. Revista Chile Forestal. 2 pp.

Cooper, E. J. 2017. To nudge or not to nudge: promoting environmentally beneficial behaviors. Bard College. 50 pp.

Cricelli, S., Galcerán, V., y Obregón, R. L. 2017. Canales de navegación: proyectos en el delta del río Paraná. En actas (versión digital) del XVI Congreso de Historia de los Pueblos de la Provincia de Buenos Aires.

D'Onofrio, E. E., y Fiore, M. M. E. 2002. Influencia de los caudales aportados por los ríos Paraná y Uruguay en el nivel medio del puerto de Buenos Aires. Report for the project: Assessment of Impacts and Adaptations to Climate Change. A Global Environment Facility project implemented by the United Nations Environment Program. Buenos Aires, Departamento Oceanografía. Servicio de Hidrografía Naval, 7p.

D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M. E., y Pousa, J. L. 2008. Changes in the Regime of Storm Surges at Buenos Aires, Argentina. Journal of Coastal Research, 1: 260-265.

Dávid, L., Ilyés, Z., y Baros, Z. 2010. Transportation and Industry. En Anthropogenic Geomorphology, pp. 189-215. Springer Netherlands, Dordrecht.

Den Bieman, J., van de Koppel, M., van Velzen, G., y Verbruggen, W. 2010. Erosion of river banks along Paraná de las Palmas River. Delft University of Technology - Section Hydraulic Engineering. 175 pp.

Depetris, P. J., Probst, J.-L., Pasquini, A. I., y Gaiero, D. M. 2003. The geochemical characteristics of the Paraná River suspended sediment load: an initial assessment. Hydrological Processes, 17: 1267-1277. John Wiley & Sons, Ltd.

Dodero, L. 1961. La navegación en la cuenca del Plata y sus propulsores. Memorias personales. Buenos Aires. 205 pp.

Donadille, G., Postma, J., Prol, L., y Vizia, C. 2010. Producciones, endicamientos y medios de vida en el Delta del Paraná. En Endicamientos y terraplenes en el Delta del Paraná: Situación, efectos ambientales y marco jurídico, 1era edn, pp. 65-81. Ed. D. E. Blanco y F. M. Méndez.

Dorava, J. M., y Moore, G. W. 1997. Effects of Boatwakes on Streambank Erosion Kenai River, Alaska. 89 pp.

Dragani, W. C., y Romero, S. I. 2004. Impact of a possible local wind change on the wave climate in the upper Río de la Plata. International Journal of Climatology: A Journal of the Royal Meteorological Society, 24: 1149-1157. Wiley Online Library.

Dung, L. V., Danh, L. T., Phong, L. T., y Truong, P. 2003. Vetiver System for Wave and Current Erosion Control in the Mekong Delta, Vietnam. En Proceedings in the Tird International Conference on Vetiver and Exhibition, Guangzhou, PR China p. 356-364.

Edmonds, D. A., y Slingerland, R. L. 2008. Stability of delta distributary networks and their bifurcations. Water Resources Research, 44: 1-13.

Escobar, G., Vargas, W., y Bischoff, S. 2004. Wind tides in the Rio de la Plata estuary: Meteorological conditions. International Journal of Climatology, 24: 1159-1169.

Fernández, L. 2002. Servicios ecológicos en humedales, el caso de Tigre, Buenos Aires. Tesis (inédita). Universidad General Sarmiento, Buenos Aires. 57 pp.

Fielding, C. R., Trueman, J., y Alexander, J. 2011. Sedimentology of the modern and Holocene Burdekin river delta of North Queensland, Australia—Controlled by River Output, not by Waves and Tides. En River deltas-concepts, models, and examples, pp. 467-496. Society for Sedimentary Geology.

Fossati, M. 2005. Modelación bidimensional del campo salino en el Río de la Plata. Tesis de Maestría (inédita), Facultad de Ingeniería, Universidad de la República, Uruguay. 267 pp.

Fracassi, N. G., Moreyra, P. A., Lartigau, B., Teta, P., Landó, R., y Pereira, J. 2010. Nuevas especies de mamíferos para el bajo delta del Paraná y bajíos ribereños adyacentes, Buenos Aires, Argentina. Mastozoología neotropical, 17(2), 367-373.

Franco, F., Romano, C., Morbidoni, N., y Schreider, M. 2002. Erosión y estabilidad de taludes en márgenes protegidas. Ingeniería del agua, 9: 135.

Frenguelli, J. 1955. Loess y limos pampeanos. Serie Técnica N°7, Facultad de Ciencias Naturales y Museo, Universidad Nacional de La Plata. 88 pp.

Fucks, E., y Deschamps, C. M. 2008. Depósitos continentales cuaternarios en el noreste de la provincia de Buenos Aires. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 63: 326-343.

Gaffoglio, L. 2010. El Delta suma cada vez más adeptos. Nota del diario La Nación, sección información general, 2 de noviembre de 2010. Extraído en marzo de 2018 del link: de https://www.lanacion.com.ar/1320867-el-delta-suma-cada-vez-mas-adeptos

Galafassi, G. 1996. Aproximación al proceso histórico de asentamiento, colonización y producción en el Delta del Paraná (Argentina). Estudios Sociales, 6: 139-160.

Galafassi, G. P. 2004. Colonización y conformación moderna de las tierras del Delta del Paraná, Argentina (1860-1940). Revista Complutense de Historia de America, 30: 111-130.

Galafassi, G. P. 2005. La pampeanización del Delta: sociología e historia del proceso de transformación productiva, social y ambiental del Bajo Delta del Paraná. Extramuros Ediciones, Buenos Aires. 221 pp.

Galloway, W. E. 1975. Process Framework for Describing the Morphologic and Stratigraphic Evolution of Deltaic Depositional Systems: 87-98. Houston Geological Society.

Gentile, E., y Natenzon, C. E. 1998. Ordenamiento del territorio en el delta del Paraná/L'aménagement du territoire dans le delta du Parana. Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, 5: 71-112.

Groeber, P. 1961. Contribuciones al conocimiento geológico del Delta del Paraná y alrededores, Comisión de Investigaciones Científicas de la Provincia de Buenos Aires (CICBA). Anales II: 9-54.

Guerrero, R. A., Acha, E. M., Framin, M. B., y Lasta, C. A. 1997. Physical oceanography of the Río de la Plata Estuary, Argentina. Continental shelf research, 17: 727-742. Elsevier.

Gurnell, A. M., Downward, S. R., y Jones, R. 1994. Channel planform change on the river dee meanders, 1876–1992. Regulated Rivers: Research & Management, 9: 187-204. John Wiley & Sons, Ltd.

Hails, J. R. 1977. Applied geomorphology: a perspective of the contribution of geomorphology to interdisciplinary studies and environmental management. Elsevier, Amsterdam. 418 pp.

Halcrow, Sir W. 1969. Estudio y proyecto del Canal Vinculación entre el Puerto Buenos Aires y el Río Paraná de las Palmas. Informe Final, DNCPyVN. Sir William Halcrow & Partners. Ingenieros consultores, (inédito) Londres.

Hampson, R., MacMahan, J., y Kirby, J. 2011. A low-cost hydrographic kayak surveying system. Journal of Coastal Research, 27 (3): 600-603.

Hart, B. S. 1995. Delta Front Estuaries. En Developments in Sedimentology, 53: 207-226. Elsevier.

Hession, W. C., y Curran, J. C. 2013. The Impacts of Vegetation on Roughness in Fluvial Systems. Treatise on Geomorphology, 12: 75-93.

Hiatt, M., y Passalacqua, P. 2015. Hydrological connectivity in river deltas: The first-order importance of channel-island exchange. Water Resources research, 51: 2264-2282.

Hjulstrom, F. 1935. Studies of the morphological activity of rivers as illustrated by the River Fyris, Bulletin. Geological Institute Upsalsa, 25: 221-527.

Iriondo, M. 1980. Esquema evolutivo del delta del Paraná durante el Holoceno. En Actas Simposio sobre problemas geológicos del Litoral Atlántico Bonaerense, pp. 74-88.

Iriondo, M. 1999. Climatic changes in the South American plains: records of a continent-scale oscillation. Quaternary International, 57: 93-112. Elsevier.

Iriondo, M. 2004. The littoral complex at the Paraná mouth. Quaternary International, 114: 143-154. Elsevier.

Iriondo, M. H. 2010. Geología del Cuaternario en Argentina. Museo Provincial de Ciencias Naturales Florentino Ameghino, Paraná, Entre Ríos. 359 pp.

Iriondo, M. H., y Paira, A. R. 2007. Physical geography of the basin. En The Middle Paraná River, pp. 7-31. Springer.

Isla, F. I. 2009. Relevamiento batimétrico de la zona Tres Bocas. Dirección Provincial de Islas (inédito). 4 pp.

Jackson, N. L., Nordstrom, K. F., Saini, S., y Smith, D. R. 2010. Effects of nourishment on the form and function of an estuarine beach. Ecological Engineering, 36: 1709-1718.

Junod, J. 1996. Aspectos mareológicos de la Hidrovia. Revista del Instituto Argentino de Navegación, 5: 45-52.

Kalesnik, F. A. 2000. Relaciones entre las comunidades vegetales de los neoecosistemas de albardón y la heterogeneidad ambiental del Bajo Delta del Rıo Paraná. Tendencias sucesionales y proyecciones sobre la composición futura. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires, Buenos Aires, Argentina. 201 p.

Kalesnik, F., y Malvárez, A. 1996. Uso antrópico potencial de las especies vegetales nativas y naturalizadas del Bajo Delta del Río Paraná, Argentina. Vida Silvestre Neotropical 5, 12-21.

Kalfayan, A. D. 2012. Presencia de una aguada en la desembocadura del arroyo El Dorado. Revista Bienvenido a Bordo Año XXIII n°217: 130-132. Buenos Aires.

Kandus, P., y Malvárez, a I. 2004. Vegetation patterns and change analysis in the lower delta islands of the Paraná River (Argentina). Wetlands, 24: 620-632.

Kuehl, S. A., Allison, M. A., Goodbred, S. L., Kudrass, H., Giosan, L., y Bhattacharya, J. P. 2005. The Ganges-Brahmaputra Delta. Special Publication-SEPM, 83: 413. SEPM (Society for Sedimentary Geology).

Laborde, J. L., y Nagy, G. J. 1999. Hydrography and sediment transport characteristics of the Río de la Plata: a review. En Estuaries of South America, pp. 133-159. Springer.

Laderoute, L., y Bauer, B. 2013. River Bank Erosion and Boat Wakes Along the Lower Shuswap River, British Columbia: Regional District of North Okanagan Fisheries and Oceans Canada: 72p.

Laprida, C., Orgeira, M. J., y García Chapori, N. 2009. El registro de la Pequeña Edad de Hielo en lagunas pampeanas. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 65: 603-611.

Lawler, D. M., Thorne, C. R., y Hooke, J. 1997. Bank erosion and instability. En Applied fluvial geomorphology for river engineering and management Ed. C. R. Thorne, R. D. Hey, y M. D. Newson., pp. 137-171.

Limerinos, J. T., y Smith, W. 1975. Evaluation of the causes of levee erosion in the Sacramento-San Joaquin Delta, California. 53 pp.

Lóczy, D., y Süto, L. 2011. Human activity and geomorphology. The SAGE Handbook of Geomorphology, London: 260-278.

Lombardo, R. J., O'Farrell, I., y dos Santos Afonso, M. 2010. Spatial and temporal ion dynamics on a complex hydrological system: The lower Luján river (Buenos Aires, Argentina). Aquatic Geochemistry, 16: 293-309.

Loponte, D., y Acosta, A. 2013. La construcción de la unidad arqueológica guarani en el extremo meridional de su distribución geográfica. Cuadernos del Instituto de Antropología y Pensamiento Latinoamericano- Series Especiales., 1: 193-235.

Lothrop, S. K. 1931. Indians of the Paraná delta, Argentina. Annals of the New York Academy of Sciences, 33: 77-232. Wiley Online Library.

Luciano, D. 1993. Navegación Isleña 1900-1967 Una empresa de servicios entre San Fernando y el Delta. Instituto de Estudios Historicos de San Fernando de Buena Vista, San Fernando. 99 pp.

Maidana, N. I., O'Farrell, I., Lombardo, R. J., y Dos Santos Afonso, M. 2005. Short-Term ecological implications of the diversion of a highly polluted lowland river: A case study. Bulletin of Environmental Contamination and Toxicology, 75: 1176-1184.

Malvárez, A. I. 1997. Las comunidades vegetales del Delta del río Paraná. Su relación con factores ambientales y patrones del paisaje. Tesis doctoral. Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires. (Inédita). 179 pp.

Manassero, M., Camilión, C., Poiré, D., Da Silva, M., y Ronco, A. 2008. Grain size analysis and clay mineral associations in bottom sediments from Parana River Basin. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 15: 125-137.

Mangini, S., Prendes, H., Huespe, J., y Yasser Palay, E. 2018. Medición de la erosión de la costa del río Paraná provocada por el oleaje de una embarcación. En XXVIII Congreso Latinoamericano de Hidráulica, Actas del Simposio Ríos (edición digital) Buenos Aires, Argentina. 2pp.

Marchand, M., Long, T., y Sawarendro. 2012. Adaptive Water Management for Delta Regions: Towards GREEN Water Defense in East Asia. Delft. 95 pp.

Marcolini, S., y Parker, G. 1992. Geomorfología del Delta del Paraná y su extensión hacia el Río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 47: 243-249.

Marcomini, S. C., Tripaldi, A., Leal, P., López, R. A., Alonso, M. S., Ciccioli, P., Quesada, A., y Bunicontro, P. 2018. Morfodinámica y sedimentación de un sector del frente deltaico del Paraná (1933-2016), Provincia de Buenos Aires, Argentina. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 75: 1-16.

Marcomini, S., y López, R. 2006. Evolution of a beach nourishment project at Mar del Plata. Journal of Coastal Research, 2: 834-837.

Maynord, S. T. 2001. Boat waves on Johnson Lake and Kenai River, Alaska. U.S. Army Engineer Research and Development Center Vicksburg Coastal and Hydraulic Lab. 154 pp.

Medina, R. A., y Codignotto, J. O. 2013. Evolución del delta del río Paraná y su posible vinculación con el calentamiento global, 15: 191-200.

Menendez, A., Kazimierski, L. D., y Re, M. 2017. Sedimentación extraordinaria en los canales de navegación de Martín García. Actas del VIII Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos (edición digita), Córdoba, Argentina 11pp.

Mianzan, H., Lasta, C., Acha, E., Guerrero, R., Macchi, G., y Bremec, C. 2001. The Río de la Plata estuary, Argentina-Uruguay. En Coastal marine ecosystems of Latin America, pp. 185-204. Springer.

Milana, J. P., y Kröhling, D. 2015. Climate changes and solar cycles recorded at the Holocene Paraná Delta, and their impact on human population. Scientific Reports, 5: 1-8. Nature Publishing Group.

Mmom, P. C., y Chukwu-Okeah, G. O. 2012. Sand dredging and river morphology change along parts of New Calabar river in Akpor Area of Rivers State, Nigeria and its implications for biological resource Conservation. Research Journal of Environmental and Earth Sciences, 4: 82-87.

Molina, R. A. 1956. El curso de los Ríos Paraná y Luján en la cartografía primitiva. Historia, 4: 83-111.

Municipalidad de Tigre. 2012. Plan de manejo de la primera sección del Delta de Tigre. Fundación Metropolitana. Documento Base Convenio de Colaboración Universidad Tecnológica de la Nación y Municipalidad de Tigre, Tigre. 136 pp.

Municipalidad de Tigre. 2013. Ordenanza 3343-13 Plan de manejo integral del Delta de Tigre. Dirección de Despacho General y Digesto. Partido de Tigre. Ordenanza Municipal., Partido de Tigre. 1-69 pp.

Municipio de Tigre. 2013. Normativa de Construcciones para el Delta de Tigre. Boletin Oficial 681, 15 de marzo de 2013. Ordenanza 3344/13, Decreto Municipal 178/13: 3-47.

MVOTMA. 2016. Monitoreo calidad del agua del Río Negro. Ministerio de Vivienda, Ordenamiento Territorial y Medio Ambiente de la Republica Oriental del Uruguay, Montevideo. 69 pp.

Nagy, G. J., Martínez, C. M., y Forbes, E. A. 1996. Physical environment variability at the Montevideo coastal zone. I: historical evolution. En EcoPlata'96 International Conference-Towards a Sustainable Development of the Uruguayan Coastal Zone of the Rio de la Plata. Abstract of Scientific Papers.

Nanson, G. C., Krusenstierna, A. V. O. N., Bryant, E. A., y Renilson, M. R. 1994. Experimental measurements of river-bank erosion caused by boat-generated waves on the gordon river, tasmania, 9: 1-14.

Neiff, J. J. 1982. Esquema sucesional de la vegetacion en islas flotantes del Chaco Argentino. Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, 21: 325-341.

O'Farrell, I., Lombardo, R. J., De Tezanos Pinto, P., y Loez, C. 2002. The assessment of water quality in the Lower Luján River (Buenos Aires, Argentina): Phytoplankton and algal bioassays. Environmental Pollution, 120: 207-218.

Oberhagemann, K., y Hossain, M. M. 2011. Geotextile bag revetments for large rivers in Bangladesh. Geotextiles and Geomembranes, 29: 402-414. Elsevier Ltd.

Olariu, C., y Bhattacharya, J. P. 2006. Terminal Distributary Channels and Delta Front Architecture of River-Dominated Delta Systems. Journal of Sedimentary Research, 76: 212-233.

Parker, G. 1990. Estratigrafía del Río de la Plata. Revista de la Asociación Geológica Argentina, 45: 193-204.

Parker, G., Cavallotto, J., Violante, R., y Marcolini, S. 1987. Modelo esquemático de dispersión de sedimentos en el Río de la Plata. Ciencia y Tecnología del Agua. Servicio de Hidrografía Naval, 1: 68-80.

Parnell, K. E., y Kofoed-Hansen, H. 2001. Wakes from Large High-Speed Ferries in Confined Coastal Waters: Management Approaches with Examples from New Zealand and Denmark. Coastal Management, 29: 217-237. Informa UK Ltd.

Patterson Britton & Partners. 2001. Parramatta River Long-term Shoreline Monitoring Study: Final Report. 24 pp.

Payenberg, T. H. D., y Lang, S. C. 2003. Reservoir geometry of fluvial distributary channels—Implications for Northwest Shelf, Australia, deltaic successions. The APPEA Journal, 43: 325-338. CSIRO.

Peña, C. M., y Tokatlian, L. 2013. El bambú en el delta bonaerense y su gente : Desarrollo de proyectos sustentables para el delta de la provincia de Buenos Aires, gestión 2008-2012. Tigre. 257 pp.

Pereyra, P. 2009. Desde el vapor: historia sobre la navegación de pasajeros en el Delta. Del Eclipse, Buenos Aires. 152 pp.

Picard, L. 1941. Delta del Paraná y sus alrededores. Neptunia. Disponible en Bibioteca de la Nación Argentina: Mapoteca- No. Sistema: 000883443. 1 pp.

PNA. 2015. Regulación de la navegación deportiva: Navegar a velocidad reducida en canales distributarios. PZDE R17 N°02/15. Argentina.

Poi de Neiff, A. 2016. Camalotes: Historia de una planta viajera. Ciencia Hoy 25(150):31-35.

Pope, J. 1997. Responding to coastal erosion and flooding damages. Journal of Coastal Research, 13: 704–710.

Pousa, J. L., D'Onofrio, E. E., Fiore, M. M. E., y Kruse, E. E. 2013. Environmental impacts and simultaneity of positive and negative storm surges on the coast of the Province of Buenos Aires, Argentina. Environmental Earth Sciences, 68: 2325-2335.

Prat, M. C., y Salomon, J. N. 1998. Milieux naturels et mise en valeur de l'espace dans le delta du Parana (Argentine)/Medios naturales y valorizacion del espacio en

el delta del Parana (Argentina). Travaux du Laboratoire de Géographie Physique Appliquée, 5: 5-70.

Re, M., Menéndez, A. N., y Amsler, M. L. 2009. Metodología para la generación de series temporales de descarga sólida de los ríos Paraná de las Palmas y Paraná Guazú. En RIOS 2009 Cuarto Simposio Regional sobre Hidráulica de Ríos, p. 11. Salta, Argentina.

Restrepo, J. D., y Kjerfve, B. 2002. The San Juan Delta, Colombia: tides, circulations, and salt dispersion. Continental Shelf Research, 22: 1249-1267. Pergamon.

Reyna, J., Spalletti, P., y Brea, J. D. 2007. Riesgo de Inundaciones en el Río Luján. Instituto Nacional del Agua (inédito), Ezeiza, Buenos Aires. 13 pp.

Rinaldi, V. A., Abril, E. G., y Clariá, J. 2006. Aspectos geotecnicos fundamentales de las formaciones del delta del río Paraná y del Estuario del Río de la Plata. Rev. Int. de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil., 6: 18.

Ríos, D. 2010. Espacio urbano y riesgo de desastres: la expansión de las urbanizaciones cerradas sobre áreas inundables de Tigre (Argentina). Ambiente & Sociedade, 12: 99-114.

Ríos, J. 1996. La Aeroisla y los rellenos infinitos: Andá a trabajar a la draga. Buenos Aires, Argentina. 151 pp.

Rossi, R. C. 1962. La industria arenera argentina. Tesis Doctoral (inédita) Universidad de Buenos Aires. Facultad de Ciencias Económicas. 77p.

Santos, M. L., y Stevaux, J. C. 2000. Facies and architectural analysis of channel sandy macroforms in the upper Parana river. Quaternary International, 72: 87-94.

Sarmiento, D. F. 1859. El Carapachay. Eudeba. 144 pp.

Sarubbi, A. 2007. Análisis del Avance del Frente del Delta del Río Paraná. Universidad de Buenos Aires. 145 pp.

Sarubbi, A., Pittau, M. G., y Menendez, A. N. 2006. Delta del Paraná: avance del frente e incremento areal. Ezeiza. 58 pp.

Sastre, M. 1858. El Tempe Argentino, Impresiones y Cuadros del Paraná. Buenos Aires. 478 pp.

Schieber, J., y Southard, J. B. 2009. Bedload transport of mud by floccule ripples - Direct observation of ripple migration processes and their implications. Geology, 37: 483-486.

Schmitt, K., y Albers, T. 2014. Area Coastal Protection and the Use of Bamboo Breakwaters in the Mekong Delta. En Coastal Disasters and Climate Change in Vietnam, pp. 107-132. Elsevier.

Schuerch, M., Scholten, J., Carretero, S., García-Rodríguez, F., Kumbier, K., Baechtiger, M., y Liebetrau, V. 2016. The effect of long-term and decadal climate and hydrology variations on estuarine marsh dynamics: An identifying case study from the Río de la Plata. Geomorphology, 269: 122-132. Elsevier B.V.

Schulz, A. G. 1961. Nota sobre la vegetación acuatica chaqueña. «esteros» y «embalsados». Boletín de la Sociedad Argentina de Botánica, IX: 141-150.

Sepúlveda, H. H., Valle-Levinson, A., y Framiñan, M. B. 2004. Observations of subtidal and tidal flow in the Río de la Plata Estuary. Continental Shelf Research, 24: 509-525.

Silva Busso, A., Amato, S., Seoane, N., y Pittau, M. G. 2004. Aportes al conocimiento de la geología del Delta del Río Paraná. Informe INA: 3-235.

Simionato, C. G., Dragani, W., Meccia, V., y Nuñez, M. 2004. A numerical study of the barotropic circulation of the Río de la Plata estuary: sensitivity to bathymetry, the Earth's rotation and low frequency wind variability. Estuarine, Coastal and Shelf Science, 61: 261-273. Elsevier.

Simionato, C., Moreira, D., Piedra-Cueva, I., Fossati, M., Guerrero, R., De Los Campos, T., Balestrini, C., Cayocca, F., Gohin, F., y Repecaud, M. 2011. Proyecto FREPLATA-FFEM Modelado numérico y mediciones in-situ y remotas de las transferencias de sedimentos finos a través del Río de la Plata Parte a: Adquisición

de datos. Frente Marítimo, 22: 237. CTMFM--Comisión Técnica Mixta del Frente Maritimo.

Sirolli, H. 2018. Regeneración de especies nativas en los bosques de albardón del Delta Frontal del río Paraná (Buenos Aires, Argentina). Tesis doctoral (inédita) Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires.

Soldano, F. A. 1947. Régimen y aprovechamiento de la red fluvial Argentina. Parte I: El río Paraná y sus tributarios. Editorial Cimera, Buenos Aires 264 p.

Sunstein, C. R. 2014. Más simple: el Futuro del Gobierno. Marcial Pons, Ediciones Jurídicas y Sociales, Madrid, 231 pp.

Suter, J. R. 1994. Deltaic coasts. En Coastal Evoltuion: Late Quaternary Shorline Morphodynamics, pp. 87-114. Ed. R. W. G. Carter y C. D. Woodroffe.

Szabó, J. 2010. Anthropogenic Geomorphology: Subject and System. En Anthropogenic Geomorphology, pp. 3-10. Springer Netherlands, Dordrecht.

Ta, T., Nguyen, V., Tateishi, M., Kobayashi, I., Tanabe, S., y Saito, Y. 2002. Holocene delta evolution and sediment discharge of the Mekong River, southern Vietnam. Quaternary Science Reviews, 21: 1807-1819.

Tamura, T., Saito, Y., Bateman, M. D., Lap Nguyen, V., Oanh Ta, T. K., y Matsumoto, D. 2012. Luminescence dating of beach ridges for characterizing multi-decadal to centennial deltaic shoreline changes during Late Holocene, Mekong River delta. Marine Geology 326-328: 140-153.

Thorne, C. R. 2002. Geomorphic analysis of large alluvial rivers. Geomorphology, 44: 203-219.

Thorne, C. R., Reed, S., y Doornkamp, J. C. 1993. Bank erossion on navigable waterways. Nottingham. 47 pp.

UBANEX. 2011. Línea de base preliminar del sistema ed islas del frente de avance de la 1° Sección del Delta Bonearense (Tigre). Buenos Aires. 82 pp.

Urien, C. M. 1966. Distribución de los sedimentos en el Río de la Plata Superior. 3 (3) 197-203 pp.

Verheij, H. J. 2000. Samenwerkingsproject modellering afslagoevers: Voortgangsrapportage 1999. Deltares (WL). 66 pp.

Vieira, J. R., y Lanfredi, N. W. 1996. A hydrodynamic model for the Río de la Plata, Argentina. Journal of Coastal Research: 430-446.

Wright, L. D. 1977. Sediment transport and deposition at river mouths: A synthesis. Geological Society of America Bulletin, 88: 857.

Yrigoyen, M. 1993. Morfología y geología de la ciudad de Buenos Aires. Actas Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, 7: 7-38.