



TÍTULO

**DINÁMICA SEDIMENTARIA EN LA COSTA URUGUAYA.
UN ABORDAJE DESDE LA GEOGRAFÍA HISTÓRICA Y LOS
S.I.G. PARA COMPRENDER LAS TENDENCIAS
EVOLUTIVAS VINCULADAS AL CAMBIO GLOBAL**

AUTORA

Ofelia Gutiérrez

Fecha de lectura	28/01/2016
Instituciones	Universidad Internacional de Andalucía
Directores	Dr. Carlos Montes del Olmo
Programa de Doctorado	Doctorado en Tecnología Ambiental y Gestión del Agua
ISBN	978-84-7993-744-7
©	Ofelia Gutiérrez
©	De esta edición: Universidad Internacional de Andalucía
Fecha de edición electrónica	2016



Reconocimiento-No comercial-Sin obras derivadas

Usted es libre de:

- Copiar, distribuir y comunicar públicamente la obra.

Bajo las condiciones siguientes:

- **Reconocimiento.** Debe reconocer los créditos de la obra de la manera especificada por el autor o el licenciadador (pero no de una manera que sugiera que tiene su apoyo o apoyan el uso que hace de su obra).
- **No comercial.** No puede utilizar esta obra para fines comerciales.
- **Sin obras derivadas.** No se puede alterar, transformar o generar una obra derivada a partir de esta obra.
- *Al reutilizar o distribuir la obra, tiene que dejar bien claro los términos de la licencia de esta obra.*
- *Alguna de estas condiciones puede no aplicarse si se obtiene el permiso del titular de los derechos de autor.*
- *Nada en esta licencia menoscaba o restringe los derechos morales del autor.*



**DINÁMICA SEDIMENTARIA EN LA
COSTA URUGUAYA.
UN ABORDAJE DESDE LA GEOGRAFÍA
HISTÓRICA Y LOS S.I.G. PARA
COMPRENDER LAS TENDENCIAS
EVOLUTIVAS VINCULADAS AL CAMBIO
GLOBAL**

TESIS DOCTORAL

Programa de Doctorado en Tecnología Ambiental

Línea de investigación: Física aplicada

DOCTORANDO:

Ofelia Gutiérrez

DIRECTOR DE TESIS:

Dr. Carlos Montes del Olmo,

Universidad Autónoma de Madrid, España

HUELVA, 2015

Universidad Internacional de Andalucía

Créditos de las fotografías del documento

Las fotos que no están acreditadas son
de autoría de Ofelia Gutiérrez / Daniel Panario

UNIVERSIDAD INTERNACIONAL DE ANDALUCÍA



Dinámica sedimentaria en la costa uruguaya.

Un abordaje desde la geografía histórica y los S.I.G. para comprender las
tendencias evolutivas vinculadas al Cambio Global

Memoria presentada por Ofelia Gutiérrez para optar al Grado de Doctor
en Tecnología Ambiental por la Universidad Internacional de Andalucía

Director

Carlos Montes del Olmo
Departamento de Ecología
Universidad Autónoma de Madrid, España

TESIS DOCTORAL

Huelva, noviembre de 2015

En memoria de mi padre.

Dedicada a Caró.

*“la vida no es la que
uno vivió,
sino la que uno
recuerda
y cómo la recuerda
para contarla”*

Gabriel García Márquez
(Vivir para contarla, 2002)

Agradecimientos

Al Profesor Carlos Montes (Universidad Autónoma de Madrid), por concederme el privilegio de aceptar ser el director de esta tesis, sus valiosos consejos y sugerencias, y también por las enriquecedoras charlas en las tardecitas de La Rábida.

Al Profesor Francisco Borja Barrera (Universidad de Huelva), Director del Programa de Doctorado en Conservación y Gestión del Medio Natural, y al cuerpo de docentes del mismo, por la dedicación y excelencia con que transmitieron a la Generación 2008 sus conocimientos y experiencia, convirtiendo nuestra Etapa de Docencia, en un hito de formación.

A Daniel Panario (Director de la UNCIEP y del Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales de la Facultad de Ciencias, Universidad de la República) y a Gustavo Piñeiro con quienes compartimos la investigación de las playas de Montevideo. A Daniel por haberme puesto siempre un nuevo desafío delante, introducirme en el apasionante mundo de la ciencia, sugerirme el tema y orientar el desarrollo de mis hipótesis, además de coordinar ese proyecto. A Gustavo por haber colaborado con los insumos geológicos y sus aportes en el transporte de arena.

A Gustavo Nagy por acercar a mí al *esquivo par* de El Niño – La Niña (y todos los otros eventos), pero especialmente por sus acertados aportes y esa particular contracción al trabajo que lo caracteriza, a Mario Bidegain por introducirme en los modelos climáticos que fueron esenciales para el análisis de mis datos.

A la Dirección de Gestión Ambiental de la IdeM, en especial a Néstor Campal, Carlos Mikolic y Leonardo Puei, por la oportunidad de trabajar en las playas urbanas.

Al Servicio de Geomática de la Intendencia Municipal de Montevideo, en especial a Ricardo Martínez, Néstor Cestau, y demás funcionarios, y a Fabián Barbato (que fuera su anterior Director), por haberme abierto el archivo de fotos aéreas, los datos que permitieron su reconstrucción, y brindarme las coberturas del SIG de Montevideo.

A los funcionarios del Servicio Geográfico Militar y de su Mapoteca, y a los funcionarios del Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea.

A Adriana Dardanelli por la búsqueda de material histórico sobre Pocitos.

A todos los que me proporcionaron materiales y de una u otra manera han colaborado a la conclusión de esta tesis, en especial a Daniel Collazo, Mario Batallés, Carlos Barboza, Antonio Ruik, Andrés Quintans, Loïc Menanteau, (ordenados en orden temporal de colaboración).

Agradecimientos

A todo el equipo humano de la Sede La Rábida, que dio lo mejor de sí, y eso incluye, desde el personal administrativo y de biblioteca hasta los del comedor y los servicios de hotelería en general, recordando como todos se complotaron para hacer que nuestra estadía fuera inolvidable.

A esa Tribu de Pando que es mi familia que de forma tan linda ha ido creciendo a lo largo de estos años con esos pequeños maravillosos, y a mis amigos y amigas, en especial a esas dos del alma Manuela y Teresa, con quienes cuento siempre.

Y a los vecinos de San Luis, con sus veladas veraniegas tan postergadas por la tesis, aviso que vuelvoooooo!

A todos mis compañeros de UNCIEP, por estar... y por ser.

Y a Mozart y Charlie García (que según fuera la tarea me acompañaron)... También al programa Cosechando amigos, que me dio muchas alegrías... en las horas de encierro.

Muy especialmente al grupo de seres maravillosos de Medio Natural generación 2008, con quien compartí la estancia en La Rábida, y cuya amistad me acompañará para siempre a pesar de las distancias, y entre los cuales hemos generado un espacio de resiliencia colectiva (para concluir tesis de Maestría, DEA y Doctorado), al que hemos ido incorporando a otros inolvidables cohabitantes de ese tiempo y lugar. En particular al amigo Dr. Nicolás Ibañez quien nos compartió su experiencia tan generosamente.

Y por último pero no menos importante, a la Universidad Internacional de Andalucía (UNIA) por haberme aceptado como estudiante y concedido una beca que me permitió acceder al Doctorado.

Ofelia Gutiérrez

San Luis, Canelones, Uruguay, noviembre de 2015

Esta tesis tuvo financiación parcial a través de:

- Proyecto: *Propuesta técnica para la conservación recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo*. Convenio UNCIEP (Unidad de Ciencias de la Epigénesis), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay y Departamento de Desarrollo Ambiental, Intendencia Municipal de Montevideo (2007-2008)

Resumen

Durante el siglo pasado se realizaron numerosas acciones sobre el litoral costero uruguayo que modificaron su dinámica, en particular los procesos de extracción de áridos, forestación y urbanización, que afectaron a las playas y los sistemas dunares costeros, en este caso reteniendo una cantidad significativa de la arena en circulación; en paralelo, las playas comenzaron a evidenciar procesos de erosión y retroceso de la posición de la línea de costa.

La presente tesis realiza una visión retrospectiva evaluándose los impactos que han tenido sobre la dinámica sedimentaria costera, las intervenciones realizadas sobre las playas. Para ello se realizó para algunas playas urbanizadas desde larga data de la ciudad de Montevideo, un diagnóstico de evolución, estado y tendencia en el marco del Cambio Global, mediante la realización de un análisis multitemporal, utilizando sensores remotos, técnicas de SIG y revisión de antecedentes históricos. Se seleccionó una muestra representativa de arcos de playa urbanos, Ramírez, Pocitos, Buceo, Malvín y la playa Brava de Malvín, por tener diferencias entre sí, en tamaño, orientación, deriva, fuente de sedimentos, gradiente de profundidad, e historia previa, para analizar su respuesta frente a impulsores del cambio climático y su capacidad de resiliencia.

También se seleccionaron dos desembocaduras, las de los arroyos Pando y Carrasco vinculados ambos a otras playas urbanas, la primera con importantes aportes de sistemas dunares (interrumpidos por forestación), y se procedió a analizar la contribución de los sistemas dunares en la estabilidad de la línea de costa y las repercusiones de las intervenciones vinculadas a los procesos de urbanización.

Por otra parte, se puso a prueba la pertinencia del método de análisis multitemporal cartográfico ¹ para playas cuyas fluctuaciones, tienden a enmascarar las tendencias de largo plazo. Se exploraron distintos registros *proxy* de indicadores de línea de costa, llegándose a la conclusión de la importancia del uso de más de un *proxy* para poder interpretar las respuestas del sistema. Se analizaron las correlaciones con variables climáticas (precipitaciones, regímenes de vientos) y con las crecientes excepcionales de los ríos Paraná y Uruguay. Se exploró la existencia de una correlación positiva entre anomalías en el régimen de vientos y el comportamiento de las playas en estudio. Para ello, fue utilizado el modelo NCEP/NCAR y el modelo 20th Century Analysis (ambos de

^{1/} Nos referimos a cartográfico en sentido amplio (planos, fotos aéreas, etc.).

la NOAA) para el reanálisis de los datos de anomalías de vientos, encontrándose correlaciones significativas entre estas y el comportamiento de la línea de costa, sacándose conclusiones prospectivas de su comportamiento a futuro con las actuales tendencias del cambio climático en el Río de la Plata.

Se analizó a su vez la capacidad de respuesta y el entorno en el cual ella se produce, de la sociedad en la figura de las instituciones que la representan al gestionar estas playas.

Se propone un modelo de resiliencia evolutiva para playas y se establecen recomendaciones a la luz del diagnóstico realizado para las condiciones actuales y en el marco de escenarios de Cambio Climático.

Palabras clave: playas arenosas, desembocaduras, dinámica litoral, SIG, ciclo de la arena, modelos climáticos, registros *proxy* de línea de costa, resiliencia, modelos climáticos, Cambio Climático, Cambio Global, Uruguay.

Índice

AGRADECIMIENTOS.....	I
RESUMEN	III
ÍNDICE	V
ÍNDICE DE FIGURAS	IX
ÍNDICE DE TABLAS	XXI
LISTADO DE PUBLICACIONES QUE CONFORMAN LA TESIS	XXIII
CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN GENERAL	1
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	2
1.2. ANTECEDENTES.....	7
1.3. OBJETIVO GENERAL.....	9
1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS	9
1.4. HIPÓTESIS.....	9
1.5. PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS	10
CAPÍTULO 2. MARCO CONCEPTUAL DE REFERENCIA.....	13
2.1. EL CAMBIO GLOBAL, DE LA PREHISTORIA AL PRESENTE.....	14
CAPÍTULO 3. EL ÁREA DE ESTUDIO EN EL CONTEXTO DEL SISTEMA COSTERO URUGUAYO	19
3.1. ÁREA DE ESTUDIO.....	20
3.2. CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DEL SISTEMA COSTERO URUGUAYO.....	20
CAPÍTULO 4. MATERIALES Y MÉTODOS	26
4.1. JUSTIFICACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO.....	27
4.2. REVISIÓN DE ARCHIVOS.....	28
4.2.1. <i>Archivo de imágenes de Montevideo</i>	<i>29</i>
4.2.2. <i>Archivo de imágenes del Arroyo Pando.....</i>	<i>30</i>
4.3. SELECCIÓN DE LAS ÁREAS DE TRABAJO	31
4.3.1. <i>Desembocaduras con campo de dunas que presuntamente hubieran aportado arena de forma significativa a las playas, y sin este aporte.</i>	<i>31</i>
4.3.1. <i>Playas urbanas con diferentes orientaciones en relación al Swell y los vientos dominantes.</i>	<i>31</i>

4.4.	PREPARACIÓN DEL MATERIAL, GEO-REFERENCIACIÓN DE IMÁGENES Y CONSTRUCCIÓN DEL S.I.G.	34
4.4.1.	<i>Geo-referenciación de imágenes de Montevideo</i>	34
4.4.1.	<i>Geo-referenciación de imágenes del Arroyo Pando</i>	35
4.5.	DIGITALIZACIÓN DE LÍNEAS DE COSTA Y OTROS INDICADORES	35
4.5.1.	<i>Selección de proxies de línea de costa</i>	36
4.5.2.	<i>Procedimiento de digitalización de los proxies seleccionados de playas urbanas de Montevideo</i>	38
4.5.3.	<i>Procedimiento de digitalización de los proxies seleccionados en las desembocaduras</i>	42
4.6.	ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL RETROCESO - AVANCE DE LA LÍNEA DE COSTA Y OTROS INDICADORES	43
4.6.1.	<i>Playas urbanas de Montevideo</i>	43
4.6.2.	<i>Desembocaduras de los Arroyos Pando y Carrasco</i>	44
4.6.3.	<i>Análisis estadístico</i>	46
4.6.4.	<i>Construcción de índices de balance (retroceso - avance) de la línea de costa</i>	47
4.7.	OTROS PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS	48
4.7.	MEDICIÓN DEL APORTE DEL CAMPO DE DUNAS A LAS DESEMBOCADURAS	50
4.8.	OTRAS ACTIVIDADES.....	51
CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PLAYAS EN ESTUDIO		52
5.1.	PLAYA RAMÍREZ	53
5.1.1.	<i>Mineralogía</i>	56
5.2.	PLAYA POCITOS.....	56
5.2.1.	<i>Mineralogía</i>	57
5.3.	PLAYA BUCEO	57
5.3.1.	<i>Mineralogía</i>	58
5.4.	PLAYAS MALVÍN Y BRAVA.....	58
5.4.1.	<i>Mineralogía</i>	59
5.5.	PLAYAS DE LA DESEMBOCADURA DEL ARROYO CARRASCO	59
5.5.1.	<i>Mineralogía</i>	59
5.6.	PLAYAS DE LA DESEMBOCADURA DEL ARROYO PANDO.....	59
5.6.1.	<i>Mineralogía</i>	60
CAPÍTULO 6. RESULTADOS.....		61
	INTRODUCCIÓN	62
6.1.	CARACTERIZACIÓN Y DINÁMICA DE LA COSTA URUGUAYA, UNA REVISIÓN	68



6.2. LONG-TERM MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF URBAN POCKET BEACHES IN MONTEVIDEO (URUGUAY): IMPACTS OF COASTAL INTERVENTIONS AND LINKS TO CLIMATE FORCING.....	103
6.3. CLIMATE TELECONNECTIONS AND INDICATORS OF COASTAL SYSTEMS RESPONSE	124
6.4. EL CICLO DE LA ARENA Y EL COMPORTAMIENTO DE LAS DESEMBOCADURAS... UN PROCESO DESCUIDADO. LA NECESIDAD DE CUANTIFICAR (PARA LA GESTIÓN COSTERA)	157
6.5. PROPUESTA DE INDICADORES CUALI-CUANTITATIVOS DE ESTADO DE PLAYAS	191
CAPÍTULO 7. CONOCER PARA AVANZAR. CONSIDERACIONES COMPLEMENTARIAS DE LOS CASOS DE ESTUDIO A MODO DE DISCUSIÓN	195
INTRODUCCIÓN	196
7.1 LAS PLAYAS, SABER DE DÓNDE SE VIENE, PARA SABER A DÓNDE SE VA. ANÁLISIS HISTÓRICO	197
7.1.1. Playa Ramírez	197
7.1.2. Playa Pocitos.....	205
7.1.3. Playa Buceo.....	209
7.1.4. Playa Malvín-Brava.....	213
7.2 RELACIONES ENTRE EL SISTEMA FLUVIAL, EL SISTEMA DUNAR Y LAS PLAYAS	218
7.2.1. DESEMBOCADURA DEL ARROYO PANDO	218
7.2.1. Desembocadura del Arroyo Carrasco	220
7.3 COMPORTAMIENTO DEL CONJUNTO DE LOS CASOS DE ESTUDIO	221
7.3.1. Anomalías de circulación atmosférica general.....	223
7.4. CONOCER PARA PREVENIR. LAS PLAYAS URBANAS.....	224
CAPÍTULO 8. RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN.....	228
8.1. COMO RESPONDER EN TÉRMINOS DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS A LAS MODIFICACIONES DE LAS PLAYAS URBANAS.....	229
8.2 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN MUNICIPAL DE LAS PLAYAS URBANAS DE MONTEVIDEO	230
CAPÍTULO 9. CONCLUSIONES	233
9.1. CONCLUSIÓN GENERAL	234
9.2. CONCLUSIONES PARTICULARES.....	234
9.3. CONCLUSIONES METODOLÓGICAS	236
9.4. OTRAS CONCLUSIONES	238
9.4 PERSPECTIVAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN	238
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	239
ANEXOS	251

SUPPORTING INFORMATION 1: CAPÍTULO 6.2 - LONG-TERM MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF
URBAN POCKET BEACHES IN MONTEVIDEO (URUGUAY): IMPACTS OF COASTAL INTERVENTIONS
AND LINKS TO CLIMATE FORCING252
ABREVIATURAS.....262

Índice de figuras

CAPITULO 3. EL ÁREA DE ESTUDIO EN EL CONTEXTO DEL SISTEMA COSTERO URUGUAYO

Figura 3.1. Ubicación del área de estudio: Arriba Izquierda: América del Sur. Arriba derecha: Uruguay. Centro: Playas de Montevideo: 1) Ramírez, 2) Pocitos, 3) Buceo, 4) Malvín, 5) Brava de Malvín, 6) Carrasco, 7) San José de Carrasco. Abajo: Playas del Arroyo Pando: 8) El Pinar, 9) Neptunia.21

Figura 3.2. Ciclo de la arena y fuentes de aportes de sedimentos, graficados sobre foto del año 1945, vuelo del Trimetrogón. La rosa de los vientos fuertes que mueven cantidades significativas de arena (superiores a 8m/s) se grafica invertida para facilitar la comprensión de la dinámica dunar en la desembocadura del Arroyo Pando. Foto: Servicio Geográfico Militar (SGM).23

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOS

Figura 4.1. Arriba: Sobre una foto de Duranbah Beach, Nueva Gales del Sur, Australia se señala la ubicación espacial de varios indicadores de línea de costa. Abajo: Esquema de la relación espacial entre indicadores de posición de la línea de costa de uso común en trabajos científicos (Extraído de Boak y Turner, 2005).37

Figura 4.2. En la foto del año 1940, se puede apreciar la ubicación del descanso existente para la época en Playa Ramírez. Para el año 1945 (próximo registro fotográfico disponible) este ya había sido retirado. Foto: CMDF-IdeM (Centro Municipal de Fotografía, Intendencia Municipal de Montevideo).39

Figura 4.3. En la imagen del año 1945, puede observarse el primer trazado de la rambla de la Playa Pocitos. En la foto panorámica del año 1930, se aprecia en más detalle su emplazamiento sobre la playa, convirtiéndola en dos arcos casi independientes. La línea azul indica el área de playa para la foto del año 1927, que fue utilizada como: “límite continental: playa año 1927”. La línea turquesa gruesa indica la ubicación de la rambla en su trazado actual, que fue utilizado como: “límite continental: playa año 2008”. La diferencia de área hacia el NE entre una y otra superficie, está dada por la ganancia de playa obtenida al entubar la desembocadura del Arroyo de los Pocitos. Las flechas rojas indican los extremos del tramo de rambla que ha permanecido inalterado en su ubicación

para toda la serie de fotos. Aerofotografía fondo: enero de 1945, SSRFAU. Foto detalle: archivo CMDF-IdeM.....40

Figura 4.4. Comparación para la Playa Ramírez y Pocitos de la significación estadística de dos indicadores: línea de marea alta previa (LMAP) y línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola (LSH-ZAIO). Como puede observarse, para Ramírez la tendencia es la misma, sin embargo para Pocitos se evidencia una mayor significación cuando se usa LSH-ZAIO, esta diferencia puede explicarse por el intenso pasaje de maquinaria de limpieza y el perfil transversal propio de cada ambiente que influyen sobre la conservación del registro de LMAP, pudiéndose enmascarar las tendencias por lo menos de las fotos de verano. Por tanto, para playas urbanas con intensas medidas de mantenimiento, tal como sostiene A. Pérez Alberti (com. pers.) parece recomendable usar LSH-ZAIO.41

Figura 4.5. En la imagen de 2007 puede observarse el entubado y canalización de la desembocadura del Arroyo Grande de los Pocitos, que pasa a desaguar a 1.000 metros del lugar original, parte del tramo conducido bajo subsuelo. Foto: relevamiento aerofotográfico del 2007, IdeM.42

Figura 4.6. La línea negra gruesa señala la línea de base de mayo de 2002 con los dos transectos perpendiculares utilizados como artefacto para estimar las fluctuaciones, al intersecar con cada línea de costa. El área rayada muestra la posición de la desembocadura del A^o Pando para el año 1928. Por debajo, en color sólido gris claro se presenta el área que para el año 1951 se encontraba situada por delante de la línea de costa actual, y sobre la playa de Neptunia en color gris oscuro se indica la zona que para 1951 se posicionaba por detrás. Aerofotografía: mayo del 2002, Pyke & Cia. S.A.44

Figura 4.7. En blanco se dibuja la posición de la línea de costa para mayo del 2002, tomada como línea de base para realizar las medidas de pérdida-ganancia de "territorio" en la desembocadura del Arroyo Pando. Los transectos perpendiculares están indicados como T1 y T2. Para el período 1928 - 2002, se observa la superposición de las líneas de costa de las principales excursiones hacia el E de la desembocadura del Arroyo Pando. La flecha gris (1928) y la blanca (2002) muestran respectivamente las posiciones y el giro que tuvo la desembocadura en sentido antihorario, así como el marcado retroceso de la ubicación de la playa. Aerofotografía: 22 de octubre de 1951, SSRFAU. Cartografía: Hoja La Unión IX-29, esc.: 1:50.000, SGM, Ed. 1930, apoyo de campo del año 1928.45

CAPÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PLAYAS EN ESTUDIO

Figura 5.1. Rosa de distribución del oleaje e histograma de rumbos de proveniencia del oleaje del sensor de Punta Brava (periodo 23/12/2003 al 22/5/2006), sobre base de datos del Convenio IdeM-IMFIA (Panario et al., 2008b). La serie utilizada comprende datos de diciembre 2003 a junio del 2006, y aunque puede sesgar el rumbo del oleaje, es la única disponible para la zona, por lo que se entendió pertinente su uso. Es de destacar que más allá de que la mayor parte del tiempo, el oleaje responde al swell, la dirección predominante obtenida es coincidente con la dirección de los vientos predominantes E-SE, particularmente durante el período estival.54

Figura 5.2. Topografía de las playas urbanas, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: Ramírez, Pocitos, Buceo, Malvín y Brava. La flecha negra indica la orientación ortogonal de cada una de las playas en relación al N, expresada en grados. Tomado de Panario et al. (2008b). Las flechas rojas indican la dirección de la deriva litoral dominante.55

Figura 5.3. Interpretación de las tendencias granulométricas en términos de deriva litoral dominante para las playas de Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín (en orden de W a E).57

CAPÍTULO 6. RESULTADOS

Figura 6.1. La Rambla Sur de Montevideo, en construcción hacia 1930. Se aprecian las playas desaparecidas y el contorno de la por entonces futura terraza al mar, ubicada frente a Juan D. Jackson y Eduardo Acevedo. Foto: CMDF-IdeM.63

Figura 6.2. La Rambla Sur, consistió en 4.000 metros de rambla desde la calle Jackson hasta la escollera Sarandí, su construcción se realizó sin respetar la forma de la costa ni las dos playas existentes (Santa Ana y Patricios, una de las cuales formaba parte de la configuración original de Ramírez), e insumió unos 500.000 m³ de arena y piedra. Obsérvese como en la foto de abajo, la flecha blanca señala una de las playas que quedaría luego tapada por el relleno. Fotos: CMDF-IdeM.....64

Figura 6.3. Izquierda: América del Sur. Derecha: Uruguay. La línea blanca representa la zona costera analizada en el presente capítulo, las flechas negras indican los límites de los 4 sectores: a) Bajo Uruguay, b) estuario interior, c) estuario exterior, d) costa oceánica. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.73

Figura 6.4. Bajo Uruguay y estuario interior. Recuadro superior: las flechas negras indican sus límites, a) bajo Uruguay: desembocadura del río Negro y Punta Martín Chico. b) estuario interior: Punta Martín Chico y desembocadura del río Santa Lucía. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.	75
Figura 6.5. Estuario exterior. Recuadro superior: las flechas negras indican sus límites, desembocadura del río Santa Lucía y Punta Negra. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.	80
Figura 6.6. Costa oceánica, Recuadro superior: las flechas negras indican sus límites, Punta Negra y Chuy. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.	87
Figura 6.7. Barranca activa de Barra del Chuy, año 1937. Se observa el carácter disipativo de la playa y el retroceso de la barranca cuando las intervenciones en el territorio no eran aun significativas (Fuente: SSRFAU, Foto N° 226).....	93
Figura 6.8. (Figure 1) Location of the urban pocket beaches Ramírez and Pocitos, metropolitan area of Montevideo, Uruguay.	107
Figura 6.9. (Figure 2) Digital elevation models of (a) Ramírez and (b) Pocitos beaches. Contour interval is 20 cm.	108
Figura 6.10. (Figure 3) a) Current location of the coastline of Montevideo overlapped over the old map of Montevideo (Royal Navy, 1849). The current urban blocks (turquoise), the waterfront (“La Rambla”, in blue), the coastline according to WDL-RM at 1927 (green) and 2008 (red). The location of some urban blocks is on the beach. b) The same composition, but with the superposition of the April 2008 image. Note in this case, the location of urban blocks under water.	108
Figura 6.11. (Figure 4) Contours digitized every 1 meter (made in 1906 for the “Sanitation Project of the Pocitos creek Basin”; García, 1908) superimposed on an image of 2007. The red line is the location of the current waterfront and the turquoise line shows the previous high tide high water level (PHTH-WL). Note the increased height and width of the beach shoreline in 1906 compared to 2007 (Source: Image-2007, IdeM).	110
Figura 6.12. (Figure 5) Historical development of Ramírez beach arc from 1927-2008. a) First series of photos (16 entries) using the previous high tide high water level (PHTH-WL). b) the same series, using wet/dry line or run-up maxima (WDLRM). The trend line indicates a weak decline of beach surface but sustained over time and statistically significant at 81%. c) all the 23 registers were used	

with WDL-RM. The trend line indicates a reduction of the beach surface statistically significant at 98%. d) Post-1945 records using WDL-RM are highly significant at $p < 0.001$. e) Series of ENSO anomalies and extreme storm surges show some degree of association with erosion-accretion of the beach surface. Blue triangle represent La Niña events, red triangle El Niño events, and green triangle the extreme storms.....113

Figura 6.13. (Figure 6) Run test results for Ramírez beach. a) all the 23 registers were used with WDL-RM; b) post-1945 records.....114

Figura 6.14. (Figure 7) Historical trend-line of Pocitos beach arc from 1927-2008 using WDL-RM. In a), c) and e) the artifact (L27) "landward limits of the beach in 1927" is used, while in b), d) and f) the artifact (L08) "landward limits of the beach in 2008" is used. In a) and b) the trend-line of the first series of 15 photos shows a weak but sustained decline over time in beach area, significant at 90% in a), and not significant in b). In c) and d) all 23 records of this beach are used. The beach area reduction is statistically significant at 96% when the L27 limit is used, but not significant when using the L08 limit, even indicating a very slight upward trend of the beach area. In e) and f) the post-1954 records are used. The trends are not statistically significant for any of the limits, although a slight loss of area was observed. g) Series of ENSO anomalies and extreme storm surges show some degree of association with erosion-accretion of the beach surface. Blue triangle represent La Niña events, red triangle El Niño events, and green triangle the extreme storms.116

Figura 6.15. (Figure 8) Historical trend-line of Pocitos beach arc from 1927-2008 using WDL-RM. In a), c) and e) the artifact (L27) "landward limits of the beach in 1927" is used, while in b), d) and f) the artifact (L08) "landward limits of the beach in 2008" is used. In a) and b) the trend-line of the first series of 15 photos shows a weak but sustained decline over time in beach area, significant at 90% in a), and not significant in b). In c) and d) all 23 records of this beach are used. The beach area reduction is statistically significant at 96% when the L27 limit is used, but not significant when using the L08 limit, even indicating a very slight upward trend of the beach area. In e) and f) the post-1954 records are used. The trends are not statistically significant for any of the limits, although a slight loss of area was observed. g) Series of ENSO anomalies and extreme storm surges show some degree of association with erosion-accretion of the beach surface. Blue triangle represent La Niña events, red triangle El Niño events, and green triangle the extreme storms.118

Figura 6.16. Study area: a) South America, L and H indicate low and high atmospheric pressure. b) Uruguay. c) Beaches: 1) Ramírez, 2) Pocitos, 3) Buceo, 4) Malvín; and Carrasco and Pando creeks. 5) Indicates the location of the Punta Brava wave sensor. 6) Carrasco airport meteorological station. The white arrow indicates the drift direction.	127
Figura 6.17. Carrasco wind rose 1998-2008. The frequency of directions is shown for all winds (top left), and for those higher than 6 m/s (top right), higher than 8 m/s (bottom left), and higher than 10 m/s (bottom right) from 1998-2008 (Panario et al., 2008).	131
Figura 6.18. Punta Brava wave rose from 2003-2006 (between Pocitos and Ramírez beaches, see Figura 6.16). The prevailing direction related to swell matches quite well the prevailing E-SE winds, particularly during the austral summer (Panario et al., 2008).	131
Figura 6.19. a) Historical development of the beaches Ramírez, Pocitos, Buceo and Malvín, indicated as coastal accretion or retreat process. b) ENSO events, classified as weak, moderate, strong or very strong according to Climate Prediction Center, NOAA (period 1950-2010). c) ENSO events according to Severov et al. (2004) for events before 1950. The vertical gray lines (La Niña) and the vertical dashed black lines (El Niño) suggest the links between the coastal fluctuations and teleconnections.	139
Figura 6.20. a) Historical development of the mouth tidal creeks Carrasco and Pando, indicated as coastal accretion or retreat process. b) ENSO events, classified as weak, moderate, strong or very strong according to Climate Prediction Center, NOAA (period 1950-2010). c) ENSO events according to Severov et al. (2004) for events before 1950. The vertical gray lines (La Niña) and the vertical dashed black lines (El Niño) suggest the links between the coastal fluctuations and teleconnections.	140
Figura 6.21. Historical trend-line of study sites. Beaches: a) Ramírez, b) Pocitos, c) Buceo, d) Malvín. Creeks' mouths: e) Carrasco, f) Pando. The series of remote sensing observations have a minimum of 17 records and a maximum of 27. Different proxy records were explored as indicators of coastline in order to interpret the responses of the system, wet/dry line or run-up maxima (WDLRM) or previous high tide high water level (PHTH-WL).	141
Figura 6.22. Composite of zonal and meridional wind anomalies for moderate and strong ENSO from 1950-2010 (NCEP-NCAR reanalysis). Zonal anomalies: El	

Niño (above left), La Niña (above right), and meridional anomalies: El Niño (below left) and Niña (below right).....	143
Figura 6.23. Wind Vector Anomaly (m/s) for ENSO events during Oct-Mar, from 1950-2010 (NOAA 20 th Century Reanalysis Project): La Niña years (above) and El Niño years (below).....	144
Figura 6.24. Evolution of decadal mean of the maximum yearly storm surges for de RldP.....	145
Figura 6.25. Ubicación del área de estudio. Arriba Izquierda: América del Sur. Arriba derecha: Uruguay, Departamento de Montevideo (marrón), Departamento de Canelones (verde). Centro: Desemboca-dura del Arroyo Carrasco y playas adyacentes, 1) Carrasco, 2) San José de Carrasco. Abajo: Desembocadura del Arroyo Pando y playas adyacentes: 3) El Pinar, 4) Neptunia.	160
Figura 6.26. Ciclo de la arena y fuentes de aportes de sedimentos, graficados sobre foto del año 1945, vuelo del Trimetrogón. La rosa de los vientos fuertes (superiores a 8m/s) que mueven cantidades significativas de arena se grafica invertida para facilitar la comprensión de la dinámica dunar en la desembocadura del Arroyo Pando. Foto: Servicio Geográfico Militar (SGM).	162
Figura 6.27. La línea negra gruesa señala la línea de base de mayo de 2002 con los dos transectos perpendiculares utilizados como artefacto para estimar las fluctuaciones, al intersecar con cada línea de costa. El área rayada muestra la posición de la desembocadura del A ^o Pando para el año 1928. Por debajo, en color sólido gris claro se presenta el área que para el año 1951 se encontraba situada por delante de la línea de costa actual, y sobre la playa de Neptunia en color gris oscuro se indica la zona que para 1951 se posicionaba por detrás. Aerofotografía: mayo del 2002, Pyke & Cia. S.A.	168
Figura 6.28. Carta levantada en el año 1789. El círculo amarillo señala la ubicación de una laguna en la desembocadura del Arroyo Pando, y la barra cerrada. Fuente: National Maritime Museum (1789).	170
Figura 6.29. En esta cartografía antigua, puede observarse la canalización realizada para desecar los bañados del Arroyo Pando (flecha roja), y la orientación de la desembocadura en el año 1920 (fecha del relevamiento). Fuente: Servicio Geográfico Militar (1923).	171
Figura 6.30. Vista panorámica de la desembocadura del Arroyo Pando de fecha 19 de mayo de 1937. Fuente: Servicio de Sensores Remotos de las Fuerzas Aérea de Uruguay (SSRFAU).	172

- Figura 6.31.** Por encima de la foto del 22 de octubre de 1951 (escala 1:20.000), en la que puede observarse la ubicación original del cordón dunar (señalado en trazo grueso rojo), se despliega la foto del 25 de octubre de 1960 (escala 1:20.000), en la que se había forestado en la propia playa. En línea punteada blanca se indica la urbanización realizada; la manzana más próxima al mar (en blanco) ya ha desaparecido, así como parte de la calle de la manzana siguiente y la costanera del arroyo. Fuente: aerofotografías, SSRFAU.173
- Figura 6.32.** Evolución histórica del retroceso de la línea de costa, entre el año 1928 y mayo del 2002, confeccionado a partir de todos los registros obtenidos para esta desembocadura (27 registros), realizado usando como proxy **línea de marea alta previa (LMAP)**, siendo la pérdida de territorio en este caso altamente significativa con una $p < 0,0001$174
- Figura 6.33.** Carta de 1920, donde pueden observarse los humedales de Carrasco antes de las obras de desecación y la presencia de terrenos arenosos en ambas márgenes. Fuente: Mapoteca, SGM.....179
- Figura 6.34.** Evolución histórica del avance-retroceso de la línea de costa período 1939-2008 (19 registros), realizado usando como proxy la línea seca/húmeda o zona actual de infiltración de la ola (LSH-ZAIO). Para toda la serie de fotos, la línea de tendencia por regresión lineal indica un leve incremento de la superficie de playa, significativo estadísticamente (85%), si la tendencia se realiza para el período 1939-1970 la misma tiene una tendencia a la pérdida (línea roja), en cambio si se realiza para el periodo 1970-2008, tiene una tendencia a incrementarse (línea verde) con una pendiente ligeramente más acentuada que la tendencia cuando se considera todo el período.180

CAPITULO 7. CONOCER PARA AVANZAR. CONSIDERACIONES

COMPLEMENTARIAS DE LOS CASOS DE ESTUDIO A MODO DE DISCUSIÓN

- Figura 7.1.** Detalle de la cartografía de 1867 de la Marina Francesa, obsérvense los dos cursos de agua que desembocaban en la playa Ramírez y la profundidad de la batimetría frente a la punta rocosa. Las medidas de las sondas están expresadas en pies franceses (equivalente a 0,3248 m). Fuente: carta francesa, MTOP.198
- Figura 7.2.** Sobre la carta de 1849 de la Marina Inglesa, se superponen los archivos de amanzanamiento (turquesa), de ubicación actual de la rambla (azul), las líneas de costa trazadas por LSH-ZAIO de 1927 (verde) y de 2008 (roja), el

antiguo descanso de principios de siglo XX (amarrillo). Imagen superior: se ven las antiguas construcciones para baños. En la carta de 1883 del mismo origen, el arroyo desemboca en la propia playa pasando entre los padrones. Imagen inferior: se superpone también la foto de 2008. Obsérvese la ubicación de los padrones, hoy en el agua. Nótese el retroceso que ha tenido la playa, el cambio de forma y orientación. El círculo naranja indica la ubicación del actual parque de diversiones. Fuentes: Archivos cad y foto 2008, IdeM; carta inglesa (archivo personal de Loïc Menanteau); líneas de costa (elaboración propia).....199

Figura 7.3. Arriba: La playa Ramírez en la década de 1890, donde existían grandes construcciones para los baños sobre la propia playa (ver Figura 16). Abajo: Vista de la playa Ramírez en el año 1919, al fondo puede observarse el muro de la primera rambla. Foto: CMDf-IdeM.....201

Figura 7.4. La foto pancromática es del año 1927, la foto color (fondo) es del 29 de setiembre de 2007. En turquesa la LMAP correspondiente a 2007, en azul la del 1927. Notesé la rotación que ha sufrido la playa. Ubicado al S en verde está dibujado el espigón que funciona como "rompeolas", y al N en amarillo y verde el espigón que genera problemas de difracción de olas (amarrillo, primer etapa; verde, ampliación). La línea roja gruesa es la ubicación actual de la rambla. La flecha blanca señala una prominencia de la playa originada en las tareas de retirar arena de la playa y trasladarla a la zona de surf, práctica corriente desde aquella época. Fotos: Archivo DINAMA, año 1927; Archivo IdeM, año 2007.....203

Figura 7.5. Izquierda: La flecha blanca señala las acumulaciones artificiales de arena realizadas en las tareas de limpieza (28 de junio de 2001). Derecha: Las flechas celestes indican los lugares en que la arena es depositada en la zona de "surf" (8 de agosto de 2001). Imágenes: Digital Globe, Google Earth 5.204

Figura 7.6. Digitalización de las curvas de nivel cada 1 metro, realizadas en 1906 para el Proyecto de Saneamiento de la Cuenca de los Pocitos (García, 1908), superpuesta a una imagen del 29 de setiembre de 2007. La línea roja es la ubicación de la rambla actual. En turquesa se indica la línea de marea alta previa (LMAP), para el año de la foto. Nótese la mayor altura y ancho de la playa de la línea de costa antigua respecto a la actual. Foto: Archivo IdeM, año 2007.206

Figura 7.7. Arriba izquierda: En turquesa la línea de marea alta previa (LMAP), correspondiente a 2007, y en azul la del 1927. La línea roja gruesa es la ubicación actual de la rambla. Nótese la rotación que ha sufrido la playa. Derecha: Los polígonos sobre la playa indican las ganancias y pérdidas netas que han ocurrido

en un período de 80 años. Fotos: Archivo DINAMA, año 1927; Archivo IdeM, año 2007.....	207
Figura 7.8. La línea roja, indica la posición actual del muro de la rambla. Obsérvese la superficie ocupada en 1945 por la rambla, con una escalera que bajaba en plena línea de marea alta. Foto: Archivo IdeM, 1945.	208
Figura 7.9. Hotel de los Pocitos en 1930, la línea roja punteada señala la ubicación de la berma a cada lado del edificio. El temporal de 1923 ya había destruido su terraza. Foto: CMDF.	208
Figura 7.10. Pocitos visto desde la Punta de Trouville, en el año 1917. Los barcos amarrados indican una relativa profundidad para la época en esa zona. Foto: CMDF-IdeM.....	210
Figura 7.11. Restos atribuidos a la fábrica de vidrio situados al pie del talud de la playa Buceo.....	211
Figura 7.12. En esta cartografía de 1920, se observa la existencia de un curso de agua permanente que fue posteriormente entubado, y su importancia puede deducirse de que el puente era de mampostería (según la leyenda de la carta). Las curvas generales son cada 5 m y las principales cada 20 m. Fuente: Mapoteca, SGM.	211
Figura 7.13. La playa Buceo por el año 1939. Obsérvese que para ese momento ya la configuración de la playa es similar a la actual, presentando una pendiente suave y poca superficie de arena seca. Foto: CMDF-IdeM.	212
Figura 7.14. En la gráfica se presentan las fluctuaciones que ha tenido la superficie de la playa Buceo en el período 1929-2007, clasificadas en: arena seca, playa húmeda, área parquizada, estructuras y dunas parabólicas (blowout), entre el año 1929 y 2007. Nótese la variabilidad de los valores a lo largo del período, así como la disminución de la arena seca a partir de 2006.....	213
Figura 7.15. En esta cartografía de 1920, se observa la existencia de lagunas ubicadas en la desembocadura del Arroyo Malvín, que son relictos de anteriores migraciones de su cauce. Nótese el ancho de la playa en la Brava, ubicada a la derecha de la Punta del Descanso. Fuente: Mapoteca, SGM.	214
Figura 7.16. Cine al aire libre ubicado sobre la playa Brava, año 1945. Foto: CMDF-IdeM.....	215
Figura 7.17. En la gráfica se presenta las fluctuaciones que ha tenido la superficie de la playa Malvín, período 1929-2007, clasificadas en: arena seca, playa húmeda, área parquizada, estructuras. Nótese la variabilidad de los valores. En	

Malvín el área parquizada aumenta en los últimos años en detrimento de la arena seca.....216

Figura 7.18. En la gráfica se presentan las fluctuaciones que ha tenido la superficie de la playa Brava de Malvín, período 1939-2007, clasificadas en: arena seca, playa húmeda, área parquizada, estructuras. Nótese la variabilidad de los valores. En Brava aumenta la zona de playa húmeda en detrimento también de la arena seca.....217

Figura 7.19. En la foto aérea de de mayo de 1991 se observa la distribución de los vallados. La trama roja indica la ubicación de los parches de parquización en 2007, que se observan en la foto panorámica color. La trama verde indica la posición de la vegetación presente en la imagen de 1929 (fundamentalmente conformada por arboles). La ubicación actual de la rambla en azul. Fuentes: Archivos vectoriales y foto 1991, IdeM.....217

Figura 7.20. Sobre la imagen del año 2006, se superpone el shape de la rambla (azul), y la línea de costa trazada por LMAP para el año 1939 (rojo). A la izquierda, obsérvese sobre la playa de Malvín el lugar de la desembocadura del arroyo del mismo nombre. A la derecha de la Punta del Descanso, puede observarse el retroceso, cambio de forma y orientación que ha tenido la playa Brava. A diferencia de la imagen mostrada en la Figura 67, el tómbolo ha disminuido en arena seca y ha sido colonizado por macrófitas (señalado en verde). Fuentes: Archivos vectoriales, IdeM; foto 2006, Google Earth 5.219

Figura 7.21. Vista panorámica de la Punta del Descanso. En primer plano la playa Brava, pudiendo apreciarse su ancho y la importante componente de arena seca. Al fondo la playa Malvín con el arroyo del mismo nombre (que fuera entubado en el período 1945-1961), y parcelas con forestación y construcciones ubicadas en la propia playa. Foto: 14 de enero de 1942, SSRFAU.219

Figura 7.22. En las gráficas superiores, las flechas indican los momentos en que se tomaron acciones de investigación, restauración y/o mitigación en las playas por parte de la administración, realizadas como respuesta a períodos de erosión o retroceso severos de playa (mayoritariamente concomitantes con eventos de La Niña fuertes).227

CAPITULO 8. RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN

Figura 8.1. Cambio en el nivel del mar desde 1970 hasta 2008, en relación con el nivel del mar en 1990. Las líneas continuas están basadas en observaciones

suavizadas para eliminar los efectos de la variabilidad interanual (las líneas claras conectan puntos de datos). Los datos de los últimos años se obtienen a través de sensores de los satélites. La línea envolvente de las previsiones del IPCC se muestra a efectos de comparación; incluye las líneas discontinuas, que marcan cada previsión y el sombreado, que representa la incertidumbre sobre las previsiones (Rahmstorf et al., 2007).231



Índice de tablas

CAPÍTULO 4. MATERIALES Y METODOS

Tabla 4.1. Metadatos de cartografía y sensores remotos de la desembocadura del Arroyo Pando.....32

Tabla 4.2. Metadatos de la cartografía y sensores remotos obtenidos para las playas urbanas de Montevideo.33

xxi

APÍTULO 5. CARACTERIZACIÓN DE LAS PLAYAS EN ESTUDIO

Tabla 5.1. Composición granulométrica de las arenas de Ramírez.56

Tabla 5.2. Composición granulométrica de las arenas de Pocitos.....56

Tabla 5.3. Composición granulométrica de las arenas de Buceo.58

Tabla 5.4. Composición granulométrica de las arenas de Malvín58

APÍTULO 6. RESULTADOS

Tabla 6.1. (Table 1)- List of imagery. Image availability is highlighted in green.111

Tabla 6.2. (Table 2) Calculated percentage difference for Ramírez and Pocitos between the largest/smallest area for each beach from 1927 to 2008 and their current areas. From this figure the distance between the current state and the best/worst case scenario of each beach is analyzed.114

Tabla 6.3. Characterisation of four beaches.136

Tabla 6.4. Characterisation of two creek mouths.....136

Tabla 6.5. Metadatos de la cartografía y sensores remotos obtenidos para la desembocadura del Arroyo Pando.....165

Tabla 6.6. Análisis de los sedimentos del fondo del canal del Arroyo Pando. El recuadro en turquesa señala los porcentajes de arena de diámetro mayor a muy fina.....175

Tabla 6.7. Volúmenes transportados de arena según direcciones agrupadas de viento, calculado a partir de datos de las estaciones meteorológicas Carrasco (InuMet) y Punta Brava (SOHMA) (Piñeiro, 2010).....176

Tabla 6.8. Resultados obtenidos de los Índices de balance (retroceso - avance) de la línea de costa. Con negrita en proxies se señalan los valores positivos y en

probabilidad estadística los resultados con grados de significación >90%. En el Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP) la celda blanca indica valores leves, celeste los moderados y verde los fuertes. En el Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa (ITBSP) en lila se distinguen los procesos fuertes, y en el Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie (ITBSP relativ. por tiempo) en naranja se señalan los procesos fuertes.192

Listado de publicaciones que conforman la Tesis

La presente tesis se presenta como una compilación de artículos, que se detallan a continuación:

xxiii

Gutiérrez, O., Panario, D., 2016. Caracterización y dinámica de la costa uruguaya, una revisión, in: Muniz, P., Conde, D., Venturini, N., Brugnoli, E. (Eds.), *Ciencias Marino--Costeras en el Umbral del Siglo XXI, Desafíos en Latinoamérica y el Caribe*. Editorial AGT Editorial S.A, México DF, México. (Arbitrado, In press).

Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Piñeiro, G., Montes, C., 2015. Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management - Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. Doi:10.5894/rgci553. Supporting information online at http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-553_Gutierrez_Supporting-Information.pdf

Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Bidegain, M., Montes, C., Climate teleconnections and indicators of coastal systems response. En primera revisión en *Ocean & Coastal Management*.

Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Montes, C., El ciclo de la arena y el comportamiento de las desembocaduras... Un proceso descuidado. La necesidad de cuantificar (para la gestión costera). Manuscrito

Capítulo 1.

Introducción general



1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

El concepto de resiliencia ha sido definido como la capacidad de un sistema de experimentar perturbaciones sin perder esencialmente su función, su estructura, sus procesos de retroalimentación, y por lo tanto su identidad (Holling y Gunderson, 2002).

Tal como se expresa en Duarte *et al.* (2009) la resiliencia ecológica hay que entenderla como la capacidad de un sistema ecológico de conservar sus funciones mientras soporta perturbaciones. Los ecosistemas resilientes son aquellos capaces de absorber perturbaciones externas y acontecimientos no previstos, mientras mantengan capacidad para amortiguar perturbaciones, renovarse y reorganizarse después de un cambio.

Por tanto, la resiliencia permite a los sistemas poder recuperarse luego de una alteración o un *shock* producido por variables externas al sistema y que se encuentran fuera de su capacidad de control. En el caso de las playas, su resiliencia depende de la interacción de variables lentas y variables rápidas a las que está sometido ese sistema. Las variables lentas para este sistema son el Cambio Climático, la concomitante subida del nivel del mar y el incremento de la energía en la atmósfera con el aumento de la frecuencia y severidad de eventos climáticos extremos (tempestades); y dentro de las variables rápidas se puede identificar a las intervenciones humanas. Los términos “lento” y “rápido” son relativos y dependen de la escala a la cual el sistema se haya estudiado. Cómo sostiene (Stafford Smith y Reynolds, 2002) siguen sin resolverse los temas que rodean “las causas de” y “las consecuencias de”, y las respuestas a la degradación de los ecosistemas en general.

Según Beatley (2009) , para analizar la resiliencia de ecosistemas costeros es necesario confrontar diferentes escalas temporales, tanto históricas como tendencias de largo plazo inscriptas en el Cambio Global. Debe entonces analizarse la resiliencia del sistema naturaleza-sociedad, para ello es necesario incorporar al análisis, tanto la resiliencia del ecosistema, como la de la sociedad que lo habita, y focalizar dicho análisis en las resultantes de dichas interacciones en nuestro objeto de estudio: las playas.

Las playas del estuario del Río de la Plata son ambientes dominados por las olas, y la presencia o ausencia de playa en la interfase tierra-estuario está condicionada por diversos factores, como son, un cierto gradiente de profundidad, suficiente provisión de sedimentos como para balancear las pérdidas que se producen por deflación eólica,

transporte acuático por deriva litoral, presencia de corrientes de retorno y “*downwelling*” y las diversas intervenciones que desde la administración municipal se han hecho sobre ellas a lo largo del tiempo (Gutiérrez y Panario, 2016; Gutiérrez et al., 2015). Las diversas intervenciones incluyen: ampliaciones, desvío de cursos fluviales, pavimentación de cuencas, construcciones como costaneras, extracción de áridos, conducción de pluviales, además de la carga ejercida sobre ellas por cientos de miles de usuarios durante el período estival, y las tareas de limpieza y retransporte con maquinaria pesada de sedimentos por su limpieza y “reacondicionamiento” entre otras.

Existen desde el punto de vista del transporte sedimentario según Short (1999) dos tipos de playas: a) playas de bolsillo (*pocket beach*), que son aquellas incrustadas en ensenadas profundas y que por tanto sólo pueden presentar pérdidas de arena por deflación eólica que se les denomina tradicionalmente en “**equilibrio estable**”, y b) aquellas sometidas a un balance entre arena que ingresa por distintas vías y es luego retransportada hacia otras playas o compartimentos por las corrientes marinas, en particular por la denominada **deriva litoral**, causada por ingreso oblicuo de las olas de mar de fondo o de vientos locales, y se denominan en “**equilibrio inestable**”. El pertenecer a una u otra de esta tipología, va a repercutir sobre las respuestas del sistema playa y por tanto sobre su capacidad de resiliencia.

Desde una perspectiva histórica, podemos en primer lugar analizar los procesos holócenicos precolonización, y luego los ocurridos a partir de la ocupación del territorio costero desde la época de la colonia y las transformaciones producidas, así como la respuesta de la sociedad a eventos extremos y los procesos de reorganización ocurridos como consecuencia de ellos, a efectos de determinar si la misma ha sido capaz de internalizar el riesgo, proyectando por tanto, otras formas de ocupación del espacio costero y/o respondiendo con medidas de manejo apropiado para poder permitir la adaptación del sistema a las modificaciones que sufra como respuesta al Cambio Global, considerando a este según lo definen Duarte *et al.* (2009) como el conjunto de los cambios ambientales generados por la actividad humana que, trascendiendo las escalas locales y regionales, están modificando los procesos biogeofísicos esenciales que determinan el funcionamiento global de nuestro planeta.

De hecho, el cambio es algo consustancial al planeta Tierra que, a lo largo de sus miles de millones de años de historia, ha experimentado cambios mucho más intensos que los que se avecinan (Duarte et al., 2009), así durante el denominado Optimo Climático, el nivel medio del mar ascendió del orden de los 5 metros en relación al nivel actual, en el Río de la Plata y zonas aledañas entre el 6.000 y el 5.000 AP (Angulo et al., 1999;

Bracco y Ures, 1998; Bracco et al., 2014; Castiñeira et al., 2010). La barranca generada por esta ingresión, en la ciudad de Montevideo (Uruguay) está estabilizada, y además completamente urbanizada, encontrándose ubicada a distancias de la costa actual, que varían entre algunas decenas de metros, hasta algunas centenas. Cualquier respuesta del sistema playas que para mantener su resiliencia, implique una translación espacial de sus estructuras, se encuentra constreñida por la ciudad que las rodea.

En materia de eventos extraordinarios, la costa de Montevideo es relativamente poco vulnerable, dado que se trata de un margen continental pasivo, y con la presencia de una extensa plataforma continental que amortiguaría casi por completo, posibles tsunamis que pudieran producirse por deslizamientos ocurridos a nivel de la plataforma continental.

A lo que sí es vulnerable la costa de Montevideo, es a tormentas generadas por diferentes cuadros sinópticos con la ocurrencia de vientos que pueden superar los 170 km en la hora y persistir con diferentes intensidades por más de 24 horas (Gutiérrez et al., 2016a).

Los eventos más importantes a partir de datos meteorológicos y de mareógrafo de más de un siglo, son por un lado las denominadas *sudestadas*, caracterizadas por fuertes vientos de proveniencia del SE que se generan por fuertes contrastes béricos entre la zona NW del país (depresión atmosférica) y el anticiclón del Atlántico (Bischoff, 2005) y por otro los vientos conocidos como *Pamperos*, generados por el ingreso de un frente polar de alta presión, provenientes del Sur (Nagy et al., 2005). Ambos cuadros sinópticos son capaces de generar fuertes marejadas con crecientes de hasta 3,40 metros sobre el nivel medio del mar (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979).

Esta situación extrema a la que se le ha calculado una tasa de retorno de 821 años (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979), derribó en la primera mitad del siglo XX, parte de los barrios bajos del casco histórico (ubicados por debajo de la barranca ya mencionada), así como estructuras edilicias existentes en la propia playa (residencias, hoteles, etc.), y motivó una reorganización con cambios importantes en la trama urbana que incluyeron la demolición de los barrios bajos, la construcción de una costanera amurallada (denominada **Rambla**) con amplios espacios públicos entre ella y la ciudad. Este proceso permite inferir que existía para esa época, una sociedad económicamente y socialmente preparada para reorganizarse post-impacto, más allá de que esta reorganización pudiera producir nuevos impactos negativos en algunas de las playas objeto del presente estudio.

A una escala espacial más reducida, puede analizarse la resiliencia del sistema playa en sí mismo, como ecosistema compuesto por partículas de tamaño arena (en el caso de Montevideo), y que cuando se encuentra sano está compuesto por una serie de estructuras disipativas que lo caracterizan y le confieren estabilidad y capacidad de reorganización en la medida en que estén presentes tanto sus elementos abióticos como bióticos. Así una playa resiliente debe constar de una playa subacuática con abundancia de sedimentos de tamaño arena o mayores que las olas de mar de fondo (*swell*) suben a la playa subaérea, una o dos bermas, un cordón dunar primario que se forma a una distancia del mar y altura tal que las olas lo alcanzan en promedio una o dos veces por año, dando tiempo a la instalación de especies pioneras que en el caso de estas playas son: *Panicum racemosum* (pasto dibujante), *Espartina* sp, y *Senesio crassiflorus*. La presencia de estas especies, inicia un proceso de recuperación que permite la reproducción de las estructuras que reestabilizan al sistema, que se desplaza entre la fase r y α del modelo general de la dinámica de los Sistemas Complejos Adaptativos de Holling y Gunderson (2002), quienes definen cuatro fases secuenciales: explotación (r), maduración (K), liberación (Ω) y reorganización (α).

En el caso de sistemas tan dinámicos como es la zona litoral activa, el mar suele destruir casi completamente la componente vegetal del ecosistema, antes que pueda evolucionar de la fase r compuesta de especies pioneras, a una fase K , que implica alta conectividad, especies persistentes, estabilización del ciclo de nutrientes, acumulación de energía en forma de biomasa y materia orgánica. Por lo tanto, en la zona litoral activa si todos sus componentes se encuentran presentes, su resiliencia depende de un ciclo abreviado que incluye sólo las fases r , Ω y α , en el cual, la fase α incluye el retransporte de arena por el viento, que genera las condiciones para la colonización vegetal de la duna primaria (Gutiérrez, 2011).

En efecto, la arena fina transportada por el viento hacia el continente, es retenida por la rugosidad generada por estas especies y se deposita conformando una duna que crece hasta una altura, en la que ya está rugosidad no es suficiente para retener la arena, dado que la velocidad del viento se incrementa exponencialmente con la altura. La arena que no puede ser retenida pasa a conformar un cordón secundario y por estar parcialmente protegida por el primario, será de mayor altura y con una comunidad vegetal algo más compleja (Gutiérrez et al., 2016b; Panario y Gutiérrez, 2005; Panario, 2000), que incluye especies arbustivas como la *Dodonea viscosa* (candela).

Las grandes tormentas en general no superan el primer cordón que por infiltración de la ola y saturación del flujo disipan eficientemente su energía, siendo parcial o totalmente destruido, pero estando presentes siempre en el cordón secundario las

especies pioneras capaces de reconstruirlo (Panario y Gutiérrez, 2005), eso ocurrirá en el mismo lugar o ubicado algo más atrás si es que por efecto de un incremento en la frecuencia de estos vientos o por ascenso del nivel del mar debe retroceder hacia el continente, o incluso avanzar en su ubicación si las condiciones son las opuestas.

En el caso de playas de un casco urbano consolidado desde larga data y siendo tan reciente la preocupación por la fragilidad de estos ecosistemas, no es dable esperar se trate de ambientes con una fuerte resiliencia ambiental, como si lo tienen todavía algunas playas de la costa oceánica uruguaya menos perturbadas.

Sin embargo es de destacar que las playas de la zona Este de Montevideo no han sufrido como es frecuente en otras ciudades puerto, la intercepción de la deriva por escolleras o canales de ingreso, y por tanto aún son alimentadas con sedimentos desde el mar.

La otra fuente de sedimentos que funcionó en el pasado, fueron pequeñas cuencas hidrográficas, y la consiguiente recirculación entre dunas y la cuenca baja de estas vías de drenaje (Gutiérrez y Panario, 2006, 2005; Gutiérrez et al., 2016b; Panario, 2000). Estos aportes no existen desde mediados del siglo pasado, en que todas las dunas fueron “pavimentadas” por construcciones y calles, y las vías de drenaje fueron entubadas y desviadas hacia la red de saneamiento o hacia las puntas rocosas cercanas.

La extracción de arena para la construcción o para la fabricación de vidrio, cesaron en estas playas hacia 1930, y el perímetro máximo de playa quedó fijado por la Rambla (costanera) antes del año 1950 en toda su extensión.

El ingreso masivo de personas a estas playas principalmente en la temporada veraniega fue paulatinamente eliminando toda la vegetación nativa, y puede afirmarse que la perdieron casi totalmente ya antes de mediados del siglo pasado según puede observarse en de la época.

Las medidas de gestión dan la impresión de haber sido erráticas, no obstante lo cual, si bien en muchas de ellas se demuestra una pérdida de superficie, esta tendencia en la mayoría de los casos es débil y existe como se verá, un caso de restitución parcial del ecosistema lo que demuestra que si bien han perdido la posibilidad de reorganizarse continente adentro, no la han perdido totalmente en el sentido de reconstruir sus estructuras. La evolución del estado de resiliencia de cada playa respectivamente será analizada en la discusión de resultados de esta investigación.

1.2. ANTECEDENTES

La investigación geomorfológica de la dinámica costera ha cobrado impulso a partir de la década de 1980, con los estudios para Australia de Short, McLahan y Hesp entre otros (Short, 1999), pero su importancia sólo ha sido reconocida a partir de la década de 1990, donde aparece un significativo número de artículos de revisión cubriendo un importante rango de procesos costeros (Sherman y Bauer, 1993; Taylor y Stone, 1996; Hinton, 1997, 1998; Horn, 1997, 1999, 2002; Hesp et al., 1999; Kench, 1999; Shand y Bailey, 1999; Allen, 2000; Butt y Russell, 2000; Díez, 2000; Stephenson, 2000; Mason y Coates, 2001; Elfrink y Baldock, 2002; Hesp, 2002; Jackson et al., 2002; Kennedy y Woodroffe, 2002; Murray et al., 2002; Spencer y Viles, 2002; Trenhaile, 2002; Uncles, 2002). Este proceso es concomitante en los países desarrollados, con la pérdida de supremacía que el abordaje desde la ingeniería había detentado, ante la sucesión de fracasos que ese enfoque hegemónico dejara de manifiesto (Brunsden y Moore, 1999; Hooke, 1999), lo que llevó a un esfuerzo por entender el funcionamiento a través de disciplinas como la geomorfología costera, desarrollándose un nuevo e importante bagaje teórico y metodológico.

Existen numerosos ejemplos en el mundo de países que han implementado con éxito programas de monitoreo e investigación. En EEUU, el *U.S. Geological Survey*, ha realizado el relevamiento de los cambios históricos de la posición de las líneas de costa, para la generalidad de las mismas, incluido el Estado de Hawaii. Pero también México, Cuba, España y Francia, por poner sólo algunos ejemplos, han realizado importantes esfuerzos en este sentido.

Aunque queda clara la importancia estratégica que los recursos costeros tienen para Uruguay, no se condice el esfuerzo dedicado a su conocimiento, tanto en investigadores como en investigación. Son menores aún los intentos de análisis, seguimiento e integración de los esfuerzos realizados desde abordajes sectoriales.

Los primeros y únicos trabajos sistemáticos que abarcaron la totalidad de la costa uruguaya fueron realizados en el marco del proyecto MTOP/PNUD/UNESCO (1979). Debe destacarse esta investigación, en la que por más de dos años se realizó un estudio profundo y sistemático de la dinámica física de la zona costera, incluyendo estudios puntuales, y también un análisis del ciclo de los sedimentos costeros, y cálculos de transporte. Sin embargo, las propuestas de solución a los problemas detectados, como la recarga de la zona SW de la Playa Pocitos, aunque acordes al estado del conocimiento de la época, hoy no son aceptables. Algunas de ellas fueron implementadas, y hoy sus efectos indican el error cometido (por ejemplo, la instalación de nuevos espigones).

Debe ser mencionado, por la carencia previa en cuanto a datos de transporte sedimentario, los estudios realizados por el Instituto de Mecánica de los Fluidos e Ingeniería Ambiental de la Facultad de Ingeniería, midiendo y estimando la deriva litoral hacia el Oeste en la desembocadura del Arroyo Cufre (IMFIA, 1998).

Desde 1990, la UNCIEP (Unidad de Ciencias de Epigénesis), de la Facultad de Ciencias, tomó entre sus líneas de trabajo la zona costera. La necesidad de estos estudios, surge en razón de los procesos degradativos que afectan la dinámica de las playas, como resultado tanto de tendencias naturales, como relacionadas a las actividades antrópicas que históricamente se desarrollan en ellas.

Los estudios puntuales que analizan esta dinámica en playas uruguayas (Casciani y Musso, 1995; González et al., 2003; Panario y Gutiérrez, 2003; Goso et al., 2011; Gutiérrez y Panario, 2006, 2005) han obtenido resultados que indican un retroceso de la línea de costa de entre 0,5 metros por año a 6,4 metros por año.

En cuanto a lo que a playas urbanas se refiere, son numerosísimos los estudios realizados sobre construcciones portuarias o intervenciones puntuales (como muros, edificaciones, espigones, rompeolas, procesos de recarga artificial, etc.). Existen a su vez estudios sobre series de imágenes, en general realizados a partir de pocos registros aunque cubran períodos más o menos prolongados, y en general sin una revisión de crónicas de época o documentos históricos de otra índole.

Montevideo cuenta entre 17 y 27 registros de fotografías aéreas por sitio de estudio (playas y desembocaduras) que cubren un periodo que se remonta desde 1927 al presente, y en la desembocadura del Arroyo Pando, se accede a un registro excepcional que alcanza a más de 25, incrementados en algunos casos significativamente desde el registro de imágenes históricas disponibles en *Google Earth 5*, lo que permite discutir la validez del método, y eventualmente analizar cuál sería un número suficiente de registros y el lapso temporal requerido para las condiciones de esta margen del Río de la Plata.

El presente estudio se enmarca en la necesidad de incrementar el conocimiento de la dinámica costera de playas arenosas en el Uruguay, sus tendencias evolutivas, su resiliencia y escenarios futuros frente a los procesos del Cambio Global, para lo cual es fundamental el conocimiento de la dinámica de ambientes altamente inestables, como las desembocaduras de ambientes fluviales en arcos de playa y las playas urbanas.

1.3. OBJETIVO GENERAL

Aportar conocimiento sobre los principales impulsores del Cambio Global sobre los sistemas costeros del estuario del Río de la Plata, actualmente amenazados por un proceso de urbanización generalizada en los más de 700 km de faja costera, a los efectos de contribuir a la generación de conocimiento para la concreción de políticas de gestión costera integrada, tendientes a maximizar la resiliencia territorial y generar acciones adecuadas de mitigación y/o adaptación.

1.3. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- 1) Realizar una caracterización dinámica de la zona costera uruguaya.
- 2) Conocer la dinámica actual y las tendencias evolutivas de playas urbanas del área metropolitana de Montevideo, Uruguay.
- 3) Analizar las fluctuaciones de la línea de costa en relación a los impulsores de cambios climáticos (ascenso del nivel del mar, régimen de vientos, precipitaciones), permitiendo prever su resiliencia en relación a escenarios futuros de Cambio Climático.
- 4) Evaluar cuantitativamente el impacto sobre la dinámica sedimentaria costera, de la forestación de dunas con especies exóticas y la urbanización en zonas de fuerte intercambio de arena entre estas y la playa, a través del curso inferior de vías fluviales.
- 5) Generar indicadores que permitan relativizar y comparar las tendencias detectadas en los análisis multitemporales de imágenes.
- 6) Evaluar la consistencia en el estudio de playas urbanas, de los análisis por secuencias cartográficas a través de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y la complementación de los mismos con otras fuentes documentales

1.4. HIPÓTESIS

Hipótesis Objetivo 2.

La respuesta de las playas urbanas esta signada por su historia previa, los impulsores de cambios naturales (como el ascenso del nivel del mar, régimen de vientos, precipitaciones) vinculados al Cambio Climático.

Hipótesis Objetivo 3.

La principal forzante natural que explica el comportamiento y las fluctuaciones de

las playas analizadas es el régimen de vientos, en particular los eventos extremos.

Hipótesis Objetivo 4.

La fijación de dunas costeras con especies forestales exóticas y su posterior urbanización (calles, viviendas, enjardinados e impermeabilización en general), ha producido un significativo impacto en el equilibrio dinámico de nuestras playas (a partir de los volúmenes de arena retenidos).

Hipótesis Objetivo 6.

La relevancia de los estudios por secuencias cartográficas depende de la magnitud de los procesos analizados y de la serie de imágenes disponibles.

1.5. PLANTEAMIENTO Y ESTRUCTURA DE LA TESIS

El documento está estructurado en 9 capítulos que de forma sintética, ofrecen un avance en la comprensión de la dinámica de los sistemas costeros urbanos, y de las interacciones entre factores bióticos, abióticos y sociales, que en conjunto determinan su estado y evolución futura.

La tesis se presenta como un compendio de publicaciones, los cuales se asocian con cada uno de los objetivos específicos. Una introducción general y una descripción de las zonas de estudio les preceden, y van seguidos de una discusión general y conclusiones. Uno de los capítulos de resultados se encuentra en el formato de la publicación de la revista científica, y otro con los requerimientos de la revista a la que fue enviado.

En el capítulo **1 “Introducción”**, se realiza el planteo del problema, se describen los antecedentes y se expresan los objetivos de la investigación, así como las hipótesis de trabajo.

En el **capítulo 2 “Marco conceptual de referencia”**, se describe de forma sinóptica y general cuales son las bases conceptuales del Cambio Global que determinan el análisis realizado en el presente trabajo.

En el **capítulo 3 “El área de estudio en el contexto del sistema costero uruguayo”**, se describe el área de estudio donde están ubicadas las cinco playas urbanas y se realiza una

caracterización general del estado del sistema costero uruguayo, a efectos de brindar una contextualización a los casos de estudio.

En el **capítulo 4 “Metodología”**, se explicita la propuesta metodológica que contempla los pasos seguidos para la selección de las áreas de estudio, la recopilación de las series de datos que comprenden la generación de un archivo de imágenes y cartografía, y la generación a partir de ellos de una base de datos, que previamente ingresados a un Sistema de Información Geográfica, permitieron realizar los análisis estadísticos. A su vez fue recopilada información de anomalías climáticas, a efectos de buscar las interrelaciones entre estas y los procesos observados en las playas.

En el **capítulo 5 “Caracterización de las playas en estudio”**, se realiza una breve caracterización física y mineralógica de las playas, información que es utilizada en resultados y discusión.

En el **capítulo 6 “Resultados”**, se presentan estructurados en forma de publicaciones cada una de los cuales responde a los 5 primeros objetivos. El apartado 6.1 aporta una categorización de la costa uruguaya que es el marco necesario para poder analizar la dinámica de los sedimentos de la costa uruguaya. El apartado 6.2 analiza la evolución y tendencia de las playas urbanas. El apartado 6.3 explicita para el total de las playas en estudio los resultados que se obtienen a partir de la contrastación con eventos climáticos (teleconexiones) de las fluctuaciones de la línea de costa. El apartado 6.4 pone el foco en la relación entre las desembocaduras y los sistemas dunares a través de un balance sedimentario. Y finalmente en el apartado 6.5 se proponen índices cuali-cuantitativos que permiten comparar entre sitios costeros diferentes y magnitudes de procesos diferentes. Los antecedentes históricos son usados como complemento para conocer la evolución espacial y la dinámica de cada playa y desembocadura en particular.

En el **capítulo 7 “Conocer para avanzar. Consideraciones complementarias de los casos de estudio a modo de discusión”**, a la luz de los resultados obtenidos y bajo el marco de los objetivos de la tesis, se incluyen consideraciones complementarias de los casos de estudio, donde se integran los resultados obtenidos y se los relaciona con las variables impulsoras de cambios detectadas a partir de analizar a las playas urbanas como un sistema complejo adaptativo. Por la estructura de la tesis, la discusión particular de los resultados ha sido incorporada en los artículos que componen el **Capítulo 6**.

El **capítulo 8 “Recomendaciones”**, A su vez, a la luz de los resultados obtenidos, se proponen algunas posibles medidas para la gestión actual de su resiliencia, y a su vez, en

el marco del Cambio Global, se realizan propuestas para una planificación que contemple su colapso.

En el **capítulo 8 “Conclusiones”**, se sintetizan los principales resultados obtenidos, para que sean empleadas como herramientas en la gestión de su resiliencia. A su vez se exponen las principales conclusiones metodológicas, relativas al análisis de series de imágenes aéreas históricas, así como respecto a la utilidad de los índices generados en el transcurso de esta tesis. Se plantean posibles líneas de investigación a partir de los resultados de esta tesis.

Capítulo 2.

Marco conceptual de referencia



2.1. EL CAMBIO GLOBAL, DE LA PREHISTORIA AL PRESENTE

El Cambio Global es un proceso emergente y complejo que debe ser entendido como el conjunto de los cambios ambientales generados por la actividad humana que, trascendiendo las escalas local y regional, están modificando los procesos biogeofísicos esenciales que determinan el funcionamiento global de nuestro planeta (Duarte et al., 2009).

La palabra *cambio* en el término Cambio Global no se refiere a que los distintos componentes del funcionamiento de la biosfera, como pueden ser el clima o el ciclo del nitrógeno, hayan sufrido variaciones, lo que ha ocurrido en reiteradas oportunidades durante la agitada historia del planeta, donde la constante ha sido el cambio y la aparición de nuevos hechos. La palabra *cambio* en el término Cambio Global hace referencia a que son los propios mecanismos de regulación de la biosfera los que han cambiado (Duarte et al., 2009).

Las claves del Cambio Global en el Antropoceno deben buscarse en la conjunción de dos fenómenos relacionados: el rápido crecimiento de la población humana, y el incremento, apoyado en el desarrollo tecnológico, en el consumo de recursos *per cápita*, que resulta en un desmedido aumento en el uso de recursos naturales por parte de la humanidad (Duarte et al., 2009), consumo que se da fundamentalmente en los países desarrollados. El término *Antropoceno* fue acuñado para designar una nueva era geológica, la actual etapa del planeta Tierra, en la cual la humanidad ha emergido como una nueva fuerza capaz de dominar los procesos biofísicos fundamentales que controlan la dinámica global del planeta (Crutzen, 2006, 2002; Steffen et al., 2007); tal como sostienen algunos autores, una única especie, el *Homo sapiens* es el motor de todos estos cambios (Duarte et al., 2009), a partir de realizar un uso tan intenso como desordenado de la naturaleza, lo que lo ha convertido en la “especie ingeniera de ecosistemas” más importante del planeta (Jones et al., 1996).

La semilla que ha llevado la evolución cultural de la especie humana, y a su vez ha propiciado al Cambio Global, debe rastreársela en los confines de la prehistoria del hombre, seguramente cuando un hombre reutilizó un objeto que le había sido útil, y luego lo mejoró y enseñó el uso de ese objeto a otro hombre, comenzando una coevolución entre el hombre y la herramienta; donde indudablemente en ese proceso se modificó su anatomía (pulgar prensil), y sus funciones cerebrales; el más apto era el más hábil e inteligente. Es a partir de ese momento que comienza a invadir nichos, hábitats y recursos de otras especies, aumenta su control sobre el ambiente y su

capacidad de transformarlo, dando paso a su vez, al nacimiento de la tecnología, una plataforma tecnológica ascendente, que se trasmite culturalmente.

En la historia de la humanidad se han sucedido diversas revoluciones, quizás la primera haya sido el dominio del fuego, la segunda el advenimiento de la domesticación de especies animales, la tercera la domesticación de especies vegetales y con ello el advenimiento de la agricultura y las primeras urbanizaciones y finalmente la revolución industrial.

Es a partir de la agricultura que comienza un proceso de acumulación en términos económicos, de riqueza que en la etapa industrial se convierte en trabajo acumulado como capital, que puede realizarse en la explotación de ecosistemas para la obtención de insumos para las actividades productivas de bienes y servicios, lo que da lugar según Georgescu-Roegen (1986) a una estrategia fundada en la maximización del trabajo y con ello la producción inevitable de entropía creciente.

Paralelamente a este proceso se produce la explosión y reproducción ampliada del capital y la explosión demográfica, al punto que al día de hoy la mayor parte de los hombres que han poblado el planeta son contemporáneos.

Se trata de una sociedad cuya economía crece a base de tecnologías petróleo dependientes, y detentando una tasa de consumo de bienes y servicios, que crece a un ritmo más alto incluso que su crecimiento demográfico. Esta extracción del capital natural para satisfacer a una sociedad consumista, sobrepasa los límites de renovación de los ecosistemas; y en ese marco ocurre el proceso emergente conocido como Cambio Global que implica entre otros componentes:

- * La extinción masiva de especies o sea la pérdida de biodiversidad.
- * Cambios de uso del suelo con la consiguiente sustitución de ecosistemas diversos por monocultivos, de tan baja diversidad que llegan a ser todos los individuos genéticamente idénticos (clones); con la consiguiente pérdida de seguridad alimentaria por la vulnerabilidad que significa depender de un pool de cultivares tan reducido y poco diverso en su genética.
- * El Cambio Climático, producido por la emisión de gases de efecto invernadero que retienen a nivel de la atmósfera las radiaciones de onda larga que la tierra re-emite luego de haber transformado parte de la luz incidente en calor.

El incremento de la temperatura en la atmósfera trae aparejado una serie de fenómenos asociados, como lo son: mayor disponibilidad de energía térmica que se

puede realizar como energía cinética atmosférica en forma de tempestades de vientos; mayor evaporación de agua la que debiera asociarse en amplias zonas de la superficie terrestre a mayores precipitaciones (como es el caso de la zona de estudio con un incremento del 30% en 100 años); subida del Nivel Medio del Mar por derretimiento de las calotas polares y glaciares de la tierra; y aumento del volumen del agua de los océanos por la dilatación, causada por el aumento de la temperatura del agua.

En este contexto, las costas y en particular las costas bajas con playas arenosas son de los ambientes más vulnerables al Cambio Global, debido por una parte a que por efecto del comercio y los servicios ambientales que las zonas costeras brindan, se han convertido en sitios con una enorme presión generada por el continuo incremento de la población que se afinca en su entorno, con el consiguiente efecto de deterioro de las propiedades homeostáticas del sistema. A su vez estos sistemas son el lugar en que el mar disipa en una estrecha franja, la energía entregada por el viento y que convertida en olas golpean al continente, con una energía que se incrementa en más que la segunda potencia, cuando aumenta la profundidad del agua.

El cambio de los mecanismos de regulación de la biosfera que representa el Cambio Global supone un desafío de enormes proporciones, dado que lo que se ha podido aprender de perturbaciones pasadas del planeta Tierra, resultaran de utilidad limitada para predecir lo que nos espera en el futuro (Duarte et al., 2009). El conjunto de interacciones entre el medio físico en transformación, y el medio biótico, genera respuestas no lineales y por tanto de difícil o incluso en algunos casos, de imposible predicción, en la medida en que la biosfera tiene entre sus características la posibilidad de innovar (Holling y Gunderson, 2002).

La consecuencia más importante de que en pocas décadas hayamos expandido considerablemente la escala espacio-temporal de los impactos humanos, es que ha hecho cambiar nuestra percepción de los problemas ambientales y la forma de abordarlos (Álvarez et al., 2006). Para gestionar estas amenazas y eventualmente mitigar sus efectos, en los últimos años ha emergido un espacio transdisciplinar, la denominada Ciencia de la Complejidad, que a hombros de desarrollos de la física y las matemáticas, como la Teoría de la Catástrofe (Thom, 1985), la Teoría General de Sistemas (von Bertalanffy, 1976), la Termodinámica de Sistemas Abiertos (Prigogine y

Stenger, 1983), entre otras, han generado las bases para utilizar como herramienta de la gestión de ecosistemas y eventual mitigación de sus disfunciones, el concepto de “resiliencia”, entendida esta, como la capacidad de un sistema ecológico o social de soportar perturbaciones en un contexto cambiante conservando sus funciones sin pasar a un estado no deseado (Gunderson y Holling, 2000). A su vez, y tal como la define Folke (2006 citado en Brand y Jax, 2007), relativo a los servicios ecosistémicos, resiliencia es la capacidad subyacente de un ecosistema de mantener los deseados servicios ecosistémicos en el marco de un entorno fluctuante y sometida al uso humano.

Tal como sostienen Duarte et al. (2009) la forma más práctica y efectiva de enfrentarse al desafío del Cambio Global y a sus componentes es construir resiliencia a los estados deseados de los ecosistemas, es decir, en aquellos cuadros ecológicos que tienen mayor valor social en términos de la calidad del flujo de servicios ecosistémicos.

En términos prácticos, la comprensión de la resiliencia permite a los gestores identificar los probables cambios o las transiciones entre diferentes configuraciones de un sistema (Peterson, 2000 citado en Beatley, 2009). Esta comprensión pasa por poder identificar en el sistema tres características centrales de la resiliencia: 1) la capacidad de un sistema para absorber o amortiguar disturbios manteniendo sus atributos, 2) la capacidad del sistema para auto organizarse, y 3) la capacidad de aprender y adaptarse en el contexto del cambio (Walker et al., 2002 citado en Brand y Jax, 2007; Berkes et al., 2003 citado en Beatley, 2009).

Los ecosistemas costeros y en particular los ambientes de playa, son ecosistemas mantenidos como pioneros por la acción de la energía que sobre ellos se disipa (Margalef, 1977, 1980). En efecto, el viento que viene del mar ingresa a la zona de playas con muy poca pérdida de energía, salvo una pequeña fracción por rozamiento, así por ejemplo, las marejadas suelen alcanzar buena parte de la denominada zona litoral activa, modificando con su energía en cada evento drásticamente a la biota terrestre que la habita.

Así, con niveles tan altos de entropía, el grado de maduración o rigidez del sistema es siempre bajo y por tanto su resiliencia fuerte, en la medida en que tenga la flexibilidad de mantener sus estructuras, volviendo a reproducirlas, o cambiando su ubicación de lugar, no obstante en ambientes altamente antropizados como son los cascos urbanos consolidados, esta flexibilidad está fuertemente reducida por la constricción espacial

que presentan por la cercanía a infraestructura urbana, lo que presenta un desafío mayor en materia de gestión en sentido amplio, y de gestión de la resiliencia, entendida como una manera económica y eficaz de restablecer equilibrios dinámicos que permitan sostener aquellos servicios ecosistémicos amenazados, y considerados deseables por una sociedad altamente identificados con estos ecosistemas.

Capítulo 3.

El área de estudio en el contexto del sistema costero uruguayo



3.1 **ÁREA DE ESTUDIO**

El área de estudio pertenece al estuario exterior del Río de la Plata, Uruguay, incluyendo playas del Departamento de Montevideo, hasta la desembocadura del Arroyo Pando en el Departamento de Canelones. Comprende playas de la zona Este de la ciudad de Montevideo, y dos desembocaduras (Arroyo Carrasco y Arroyo Pando) con sus playas adyacentes (**Figura 3.1**).

Las cinco playas en estudio son: Ramírez, Pocitos, Buceo, Malvín y Brava de Malvín, Todas son playas ubicadas en zonas altamente consolidadas del casco urbano de la capital del país. En todos los casos a su vez, el límite continental de las playas está dado por una costanera amurallada, denominada **Rambla**.

3.2. **CARACTERIZACIÓN DEL ESTADO DEL SISTEMA COSTERO URUGUAYO**

La costa uruguaya es caracterizable como micromareal ², de ambientes dominados por las olas, estando constituidas mayoritariamente por playas arenosas. Se extiende por aproximadamente 700 km (medidos a escala 1:500.000) entre la desembocadura del Río Negro y el límite con Brasil (Panario y Gutiérrez, 2006). En su condición original, esta franja costera estaba asociada mayoritariamente a ambientes de dunas activas o con cobertura de vegetación rala. Sus playas pueden caracterizarse como en “equilibrio dinámico” (sensu Short, 1999), dependiendo este de que el ingreso de sedimentos (arena) por distintas vías, sea equivalente al egreso principalmente por deriva litoral (Panario, 1999; Panario y Gutiérrez, 2003, 2005, 2006) a una escala temporal de corto y mediano plazo. La vegetación en la costa uruguaya, juega un rol fundamental en la dinámica de las playas arenosas, positivo en las interacciones de la vegetación natural en la construcción del cordón dunar o duna primaria, o negativo cuando la forestación o la invasión de especies exóticas (ej. garra de león, *acacia longifolia*) interrumpe el flujo normal de sedimentos entre las dunas y las playas o entre las dunas y las desembocaduras de los cursos fluviales (Panario y Gutiérrez, 2005).

Si bien desde el punto de vista de la investigación de los sistemas costeros en el Uruguay, ha habido un importante avance en el conocimiento de la dinámica ecológica de estos ambiente, no se ha cuantificado y/o estimado en forma integrada y

^{2/} Se caracterizan como micromareales aquellas costas donde las mareas se encuentran por debajo de los 2 metros, según la clasificación propuesta por Davies (1964).

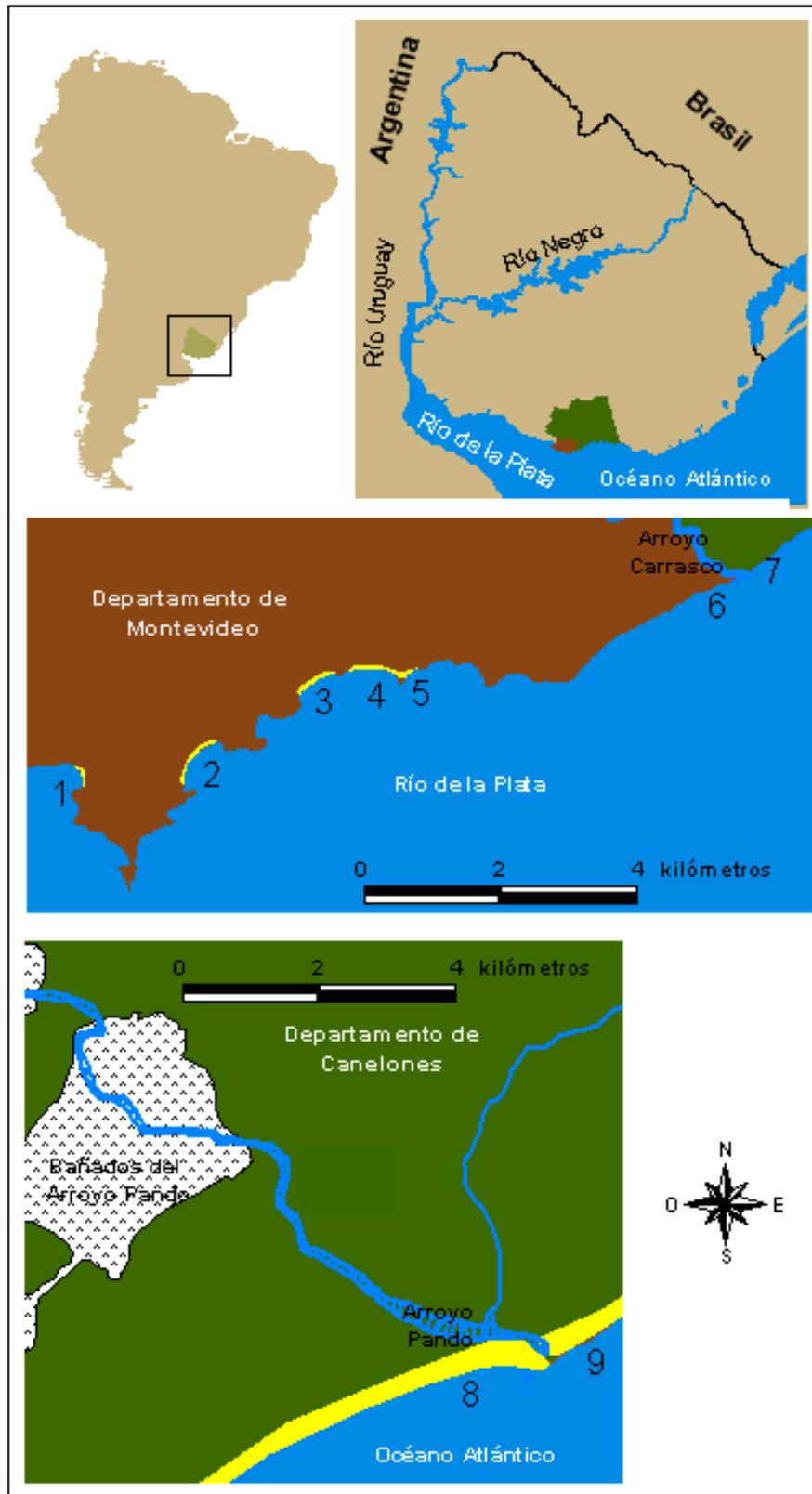


Figura 3.12. Ubicación del área de estudio. Arriba izquierda: América del Sur. Arriba derecha: Uruguay. Centro: Playas de Montevideo: 1) Ramírez, 2) Pocitos, 3) Buceo, 4) Malvín, 5) Brava de Malvín, 6) Carrasco, 7) San José de Carrasco. Abajo: Playas del Arroyo Pando: 8) El Pinar, 9) Neptunia.

sistematizada (más allá de esfuerzos puntuales), la degradación ambiental de estos ecosistemas y la pérdida irreversible de elementos únicos o singulares: los campos dunares costeros y sus ecosistemas asociados (monte psamófilo, humedales, pajonales, marismas, entre otros); la modificación de la dinámica existente por forestación con árboles exóticos, la extracción generalizada de arena, y la posterior urbanización. Tampoco se ha analizado la descaracterización que ha sufrido su valor paisajístico, ni se ha estimado la pérdida de territorio continental por retroceso de la ribera. En el caso de la costa uruguaya, existen amplios sectores en los cuales se ha perdido la vegetación nativa necesaria, y otros donde la forestación con especies exóticas y/o la urbanización ha interrumpido el tránsito de arena provocando un continuo retroceso de la línea de costa o disminución del tránsito de arena, que a su vez, debido a las anteriores acciones, ha conducido al estrechamiento de la franja costera y dañado estructuras naturales y antrópicas asociadas. Además, debe tenerse en cuenta la calidad de vida de la población allí instalada, y la pérdida de elementos culturales (entre otros, sitios arqueológicos), y económica en general, porque la infraestructura que se destruye por efecto del retroceso de la línea de costa, o la infraestructura que se construye como “defensa”, deben ser considerados como un gasto que suele correr a cuenta de la sociedad en su conjunto y sus consecuencias redundan en desvalorización del patrimonio natural.

La separación de factores naturales y antrópicos en dinámica costera es muy difícil debido a que la misma está sujeta a fluctuaciones periódicas que van desde ciclos diarios o estacionales, a fluctuaciones decadales o centenarias, a las que se le deben agregar movimientos aperiódicos, fruto de variaciones climáticas, de corrientes marinas, de reserva de sedimentos subacuáticos, etc., cuyos orígenes pueden ser pretéritos y desencadenarse en determinado momento por efectos inerciales, o de agotamiento de *stocks* en el caso de la disponibilidad de sedimentos (Gutiérrez y Panario, 2016; Panario, 2000). En efecto, el balance sedimentario en la costa uruguaya depende en gran medida de la deriva litoral y esta a su vez del balance de vientos de direcciones opuestas cuya prevalencia se altera con el tiempo, más la acción del *swell* que puede *a priori* considerarse relativamente constante.

En la actualidad según Bidegain et al. (2005) la componente de vientos fuertes del sector S y SW ha disminuido, en tanto puede suponerse, y la documentación histórica lo confirma, que con anterioridad al siglo XIX, su frecuencia podría ser mayor. Así, Politis (1984) basado en trabajos de numerosos autores, sostiene que durante el siglo XVIII para la región pampeana ocurrió una variación climática denominada “*Pequeña Edad del Hielo*”, y como consecuencia de ella un aumento de la aridización, mientras

que desde comienzos del siglo XIX y hasta la actualidad se registra un incremento de las precipitaciones medias anuales. Por tanto, puede deducirse que en ese período más frío y seco que el actual, había una mayor frecuencia de vientos del SW y por lo tanto, en gran parte de la costa, podría haber sido mayor de lo que es actualmente la componente W a E de la deriva. El otro componente fundamental de la dinámica sedimentaria litoral (**Figura 3.2**), sería como fuera mencionado, la existencia de campos dunares que movidos por el viento, vuelcan significativos volúmenes de arena a las vías de drenaje, las que cuando aumenta su capacidad de transporte (en épocas de precipitaciones), aportan este sedimento al mar o al estuario y pasa entonces a ser transportado por deriva litoral, alimentando a las playas en el sentido de la deriva dominante (Gutiérrez y Panario, 2016, 2005; Panario, 2000, 1999).

Para la costa uruguaya, la forestación de dunas en zonas próximas a cursos de agua importantes, realizada en general a partir de la década de 1940, podría ser uno de los impactos más fuertes que desataron la erosión de playas. Debe tenerse en cuenta como se observa en la **Figura 3.2**, que los campos dunares, dadas las direcciones de los

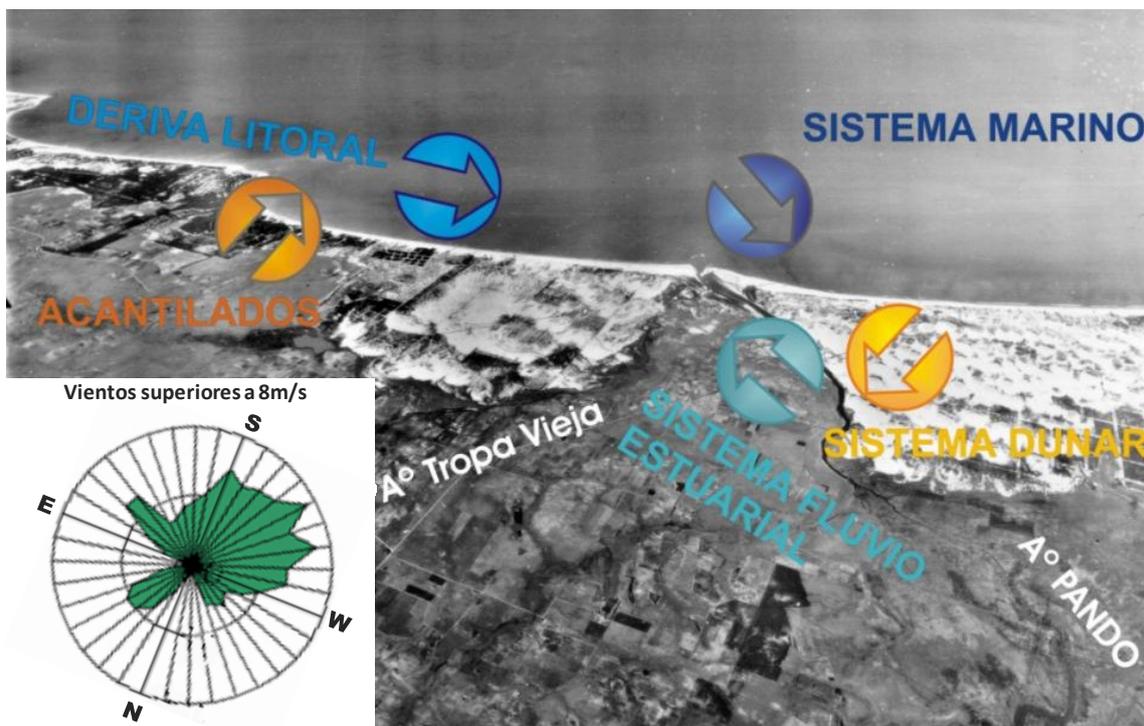


Figura 3.2. Ciclo de la arena y fuentes de aportes de sedimentos, graficados sobre foto del año 1945, vuelo del Trimetrogón. La rosa de los vientos fuertes que mueven cantidades significativas de arena (superiores a 8m/s) se grafica invertida para facilitar la comprensión de la dinámica dunar en la desembocadura del Arroyo Pando. Foto: Servicio Geográfico Militar (SGM).

vientos predominantes, eran una de las principales fuentes de alimentación de las playas, y no un “sumidero de arena” como lo proponen para otras regiones Díaz Pineda y Schmitz (2003). Esta forestación en general ha ido acompañada de la aparición de infraestructura (ramblas costaneras, calles, muros de contención) y otras construcciones, que terminan interrumpiendo los aportes de sedimentos desde este componente del ciclo de la arena.

Este proceso ha “fijado” la mayor parte de los sedimentos arenosos; pero sobre todo ha interrumpido un ciclo, al que debe sumársele la extracción minera de arena, bien documentada en playas como Pocitos a principios del siglo XIX (García Moyano, 1969; Ros, 1923), Costa Azul de Canelones hasta 1980, y hasta el presente en Bella Vista y en playas del W de Montevideo (en estas últimas en forma más o menos artesanal). Si bien la extracción ha sido mayoritariamente prohibida, aún subsisten extracciones ilegales de tipo artesanal en playas de Montevideo; e incluso otras que cuentan con la autorización de DINAMA (Dirección Nacional de Medio Ambiente) y/o DNH (Dirección Nacional de Hidrografía) en Bellavista (Dpto. Maldonado), La Esmeralda³ (Dpto. Rocha) y en extensas áreas del Dpto. de Colonia (Gutiérrez y Panario, 2016; Panario y Gutiérrez, 2006). El retroceso de la costa o la disminución del prisma de arena de la playa, tiene aquí una causal de importancia, pues el sistema costero debe estabilizar su estructura y funcionamiento con un menor *stock* sedimentario disponible.

A estas intervenciones, en las playas urbanas se ha agregado la canalización, desvío y entubamiento de vías de drenaje en áreas fuertemente urbanizadas, cuyos efectos positivos o negativos no han sido aún evaluados.

La erosión costera en zonas urbanas comenzó a hacerse notar a principios del siglo pasado (Panario et al., 2008a), tomándose en Montevideo las primeras medidas en la década de 1920 con la construcción de espigones en Ramírez, la demolición de los restos del hotel de Los Pocitos (ubicado sobre la propia playa) en la década de 1930, y luego la rectificación del trazado original de la costanera en esta última playa en la década de 1950. En otras zonas, como en Piriápolis, la primer batería de espigones data de la década de 1940, en tanto en el resto del Uruguay, los procesos erosivos, se comenzaron a sentir como un problema ambiental, recién en la década del 1960 (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979), implementándose medidas duras tendientes a

^{3/} En este caso la autorización para extracción es de la fracción de bioclastos (en este caso la arena es gruesa a muy gruesa y en su composición se observa hasta un 60 por ciento de material biogénico), elemento que ni siquiera se estudió si es renovable (Castiñeira et al., 2010).

revertirla en la década de 1970, como la construcción de espigones en Atlántida y La Floresta, sin que se consiguieran los efectos esperados.

Para el año 1982, un estudio realizado por la Dirección Nacional de Turismo (OEA, 1987), indicaba que la costa del Dpto. de Rocha estaba completamente fraccionada en unos 200.000 lotes que ocupan una superficie de 14.302 hectáreas, casi todos vendidos. La mayor parte de estas urbanizaciones o balnearios, que por decreto del año 1967 fueron declarados zonas suburbanas, aún sólo existen en los papeles y planos de las mismas, archivados en el municipio de Rocha (que en su momento las aprobó). La situación para otros departamentos costeros, es aún más comprometida. De continuarse esta tendencia de apropiación, sin conocimiento del funcionamiento de la costa, este paisaje y sus ecosistemas estarían condenados a ser descaracterizados aun antes de conocer su estructura y funcionamiento. Por lo tanto, conocer, cuantificar y entender las respuestas que el sistema costero da, tanto a la propia dinámica natural como a las intervenciones antrópicas, es una necesidad perentoria, y para ello es necesario comenzar por comprender la dinámica sedimentaria costera.

Capítulo 4.

Materiales y métodos



En este apartado se describen los materiales y métodos en extenso. En el "[Capítulo 6](#)", cada apartado preparado como publicación incluye su metodología expuesta en forma sucinta.

4.1. JUSTIFICACIÓN DE LOS CASOS DE ESTUDIO

La mayor parte de la población del planeta se concentra en el área costera, desarrollando actividades como residencia, pesca, industrias, terminales de comercio, puertos, actividades agropecuarias y turismo, en el marco de "políticas de desarrollo", que conciben al ambiente como una fuente ilimitada de recursos (De Álava, 1994). Esta interpretación ha llevado a que se alcance un punto tal de transformaciones, que torne difícil evitar la pérdida definitiva de los servicios ambientales de estos ecosistemas. A su vez, muchas de estas inversiones han perdido su valor al no haberse realizado un manejo integrado de los recursos, lo que demuestra que los conceptos de desarrollo actuales no son sustentables, incluso a veces ni siquiera desde el punto de vista económico. La problemática es cada día más compleja, demandando urgentemente una nueva concepción de la interacción humana con un medio que es especialmente frágil, por ser una transición entre los ecosistemas del continente y los marítimos, siendo difícil interpretar la incidencia de cada uno en esa estrecha franja arenosa que denominamos playa, y menos aún la responsabilidad de cada intervención en los procesos observados, en la medida en que los efectos de una intervención pueden observarse mucho tiempo después de producida y estar enmascarados por otras intervenciones e incluso por procesos naturales tendenciales de largo plazo, cuya dinámica es aún poco conocida; o por los efectos del Cambio Climático. Al mismo tiempo se pretende contribuir a dimensionar una de las componentes del ciclo de la arena (arena aportada por los sistemas dunares activos) a partir de algunas desembocaduras de vías de drenaje con y sin dunas activas en su situación original, aspecto este poco tenido en cuenta en la bibliografía y que sin embargo podría presentar particular relevancia en la costa uruguaya, por ser en estos lugares donde suelen presentarse los campos dunares extensos.

Esta tesis pretende avanzar en el estudio y conocimiento de las costas arenosas del Uruguay, a partir del análisis de playas urbanas, en algunas de las cuales se habían observado procesos de retroceso costero o disminución del prisma de playa (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979; Galzerano et al., 1993; Piñeiro y Panario, 1993; De Alava, 1994; Casciani y Musso, 1995; De Alava y Panario, 1996; Panario y Piñeiro, 1997; Panario, 2000; Gómez Pivel, 2001; Panario y Gutiérrez, 2003, 2006, Panario et al., 2008a, 2008b, 2008c.) a los efectos de tener una primera aproximación de las relaciones causales que determinan las actuales tendencias, así como en la medida de lo posible, establecer relaciones entre los impulsores de cambios naturales y las fluctuaciones de la línea de costa, que permitan prever tendencias asociadas al Cambio

Climático, y la resiliencia que estas playas aún puedan tener para seguir permaneciendo como tales. Debe tenerse en cuenta que en el área metropolitana de Montevideo, vive la mitad de la población del país, que estas playas han sido certificadas como de calidad para baños por las normas ISO 14.001, y que a ellas acuden más de 100.000 personas en un día caluroso de verano, constituyendo por tanto ellas, y la rambla (costanera) que las bordea un icono de la cultura nacional, además de uno de los últimos espacios de interacción social democrática e igualitaria, donde todas las clases sociales se dan cita en armonía.

Las playas arenosas, están constituidas del punto de vista ecológico, por dos componentes: un ecosistema marino controlado por la acción de las olas y habitado por una biota marina; y un ecosistema terrestre controlado por la acción del viento, ocupado por una biota terrestre. Ambos sistemas, si bien distintos, interactúan en una única unidad geomórfica llamada "zona litoral activa". Esta zona constituye una interfase entre el océano y el continente, existiendo un estado de equilibrio dinámico en el que los sedimentos son continuamente retransportados (McGwynne y MacLachlan, 1992).

Una definición idealizada del litoral costero puede considerarlo como la interfase física entre la tierra y el agua (Dolan et al., 1980 citado en Boak y Turner, 2005). A pesar de su evidente simplicidad, esta definición es en la práctica un desafío en su aplicación. En realidad, la posición del litoral cambia continuamente con el tiempo, debido al tránsito de sedimentos en la zona litoral y especialmente debido a cambios del nivel del agua en el límite costero (por ej. mareas, agua subterránea, oleaje, tormentas, aumento del nivel medio del mar, etc.). El litoral se debe por lo tanto considerar en un sentido temporal, y a una escala de tiempo elegida, dependiendo del contexto de la investigación (Boak y Turner, 2005).

4.2. REVISIÓN DE ARCHIVOS

Fue realizada una búsqueda procurando acceder a la mayor cantidad de cartografía, imágenes aéreas y documentos de las zonas de estudio, tanto en poder de otros investigadores como de instituciones públicas de Uruguay: Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), Intendencia Municipal de Montevideo (Idem), Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea (SSRFAU) y Servicio Geográfico Militar (SGM). También fueron revisados los archivos de la Dirección Nacional de Hidrografía (DNH). Fueron utilizadas también imágenes del archivo de "imágenes históricas" del *Google Earth 5* (disponibles desde el año 2000 para las zonas en estudio), y del archivo propio de la UNCIEP (Facultad de Ciencias, Universidad de la

República), así como un recubrimiento aerofotogramétrico tomado por encargo para el estudio de la desembocadura del Arroyo Pando (Panario y Gutiérrez, 2003).

El archivo de imágenes recopiladas comprende imágenes de muy diferente calidad e incluye tanto tomas verticales como oblicuas, en diferentes escalas y resoluciones, la mayoría en escala de grises y las más recientes en color. Fue imposible conseguir completos los metadatos⁴ de todo el archivo obtenido. En algunos casos sólo pudo llegarse a recuperar el mes y el año de la foto. De algunas imágenes, sólo se ha recuperado el dato del año, tal el caso de varios relevamientos fotográficos digitales, realizados para la zona costera y que incluyen al Arroyo Pando.

Una vez seleccionadas las áreas de estudio, se procedió a la digitalización de las fotos papel con un escáner de mesa usando 1.200 dpi para la escala 1:20.000 (y menores) y 800 dpi para la escala 1:10.000 (y mayores). Fueron escaneadas orientadas al norte para minimizar los errores. Además siempre que fue posible, se usó la mayor resolución disponible de los relevamientos realizados con cámaras digitales.

A su vez fue buscada información documental de cartografía antigua en repositorios de bibliotecas *online* (como es el caso de la *Bibliothèque Nationale de France* y el *National Maritime Museum*), en el archivo particular del investigador Dr. Loïc Menanteau de la Universidad de Nantes, y en la Mapoteca del SGM. Además, fundamentalmente para Pocitos, se encontraron relatos de época y estudios en la Colección Arredondo de la Biblioteca de la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, UdelAR.

- 4.2.1. Archivo de imágenes de Montevideo

En el archivo de la Intendencia Municipal de Montevideo, se solicitó y obtuvo autorización para revisar sus archivos fotográficos clasificados y no clasificados, consistentes en algunos miles de tomas entre placas en vidrio y copias en papel (estimadas en unas 7.000 aproximadamente), que abarcan los relevamientos aerofotográficos totales o parciales de Montevideo efectuados entre los años 1927 y 1996, pudiéndose realizar una muy aceptable reconstrucción de la información.

Puede asignarse plena certeza al orden cronológico de las fotos, confirmado luego de un exhaustivo análisis de la evolución de la ciudad en general, y en particular de las infraestructuras cercanas a las playas. Para esta reconstrucción resultó imprescindible

^{4/} Se denomina así a toda aquella información descriptiva sobre el contexto, calidad, condición o características de un recurso, dato u objeto que tiene la finalidad de facilitar su recuperación, autenticación, evaluación, preservación y/o interoperabilidad (para este caso: cámara, altura, distancia focal, hora, fecha del vuelo, número de negativo, donde está archivada, etc.).

la información aportada por técnicos que estuvieron vinculados a este archivo. A su vez, se procedió a crear un registro con los metadatos disponibles, y a corregir el archivo de la IdeM. Sin embargo, debido a los errores que suele haber en los archivos de documentos, sobre todo los fotográficos (olvidos, omisiones, errores, cambios de criterios de que datos conservar), pueden deslizarse confusiones involuntarias. Fueron utilizados los números de los negativos para recomponer la secuencia en que fueron tomadas las fotos ⁵, y se usaron las anotaciones del SGM (que realizó las copias en papel), que son colocadas (por lo menos) detrás de la primera o última foto de cada relevamiento. También fueron usados para afinar la clasificación y resolver contradicciones, las anotaciones hechas por los técnicos que las utilizaron en la época en que fueron adquiridas. Asimismo se realizaron contrastaciones contra diferentes cartografías realizadas por la propia IdeM, y también contra información pública de fechas y escalas de los recubrimientos aerofotográficos del Departamento de Montevideo, para confirmar la validez de la reconstrucción y el análisis.

Asimismo se han utilizado cartografías de precisión de 1906 realizadas para una propuesta de saneamiento de Pocitos (García, 1908), y escenas de diferentes sensores remotos modernos: *Ikonos*, *Digital Image*. Así como dos relevamientos aerofotográficos digitales de la IdeM.

- 4.2.2. Archivo de imágenes del Arroyo Pando

En este caso la búsqueda fue realizada en el archivo del Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea, en principio dirigida a obtener las imágenes utilizadas en la investigación del MTOP/PNUD/UNESCO (1979). Parte de esta información fue encontrada en la DINAMA. Al constatarse que se encuentran perdidos los negativos de varios relevamientos, se procedió a rescatar la información del único registro que parece haberse preservado, y que consiste en fotos digitales de resolución media, de las imágenes originales impresas en papel. También fue utilizada una escena Spot.

Debe señalarse que por fiables que puedan resultar los archivos (como el del SSRFAU), siempre se requiere analizar la congruencia de la fecha con lo observado en imágenes anteriores o posteriores, pues se ha verificado para esta zona, que los rollos de negativos, pueden contener imágenes copiadas por contacto y por tanto, incluir fotos

^{5/} Por ejemplo de este análisis surgió que el contador de la cámara Poivilliers A-18 propiedad de la IdeM (con las que se tomaron la mayoría de las fotos en escala 1/10.000 por las décadas de los años 1960 a 1980, montada en un avión del SSRFAU) estuvo varias veces roto en los dígitos que indican el año.

de otro año; sin que ello aparezca en los metadatos que se conservan, cuando ellos están disponibles de forma completa.

4.3. SELECCIÓN DE LAS ÁREAS DE TRABAJO

Concomitante a la revisión de archivos, se realizó la selección de las áreas de trabajo, playas urbanas con diferentes orientaciones en relación al *swell* y los vientos dominantes, y que tuvieran coberturas aerofotográficas y relevamientos cartográficos en una densidad suficiente como para permitir analizar tendencias aún de escasa magnitud.

- 4.3.1. Desembocaduras con campo de dunas que presuntamente hubieran aportado arena de forma significativa a las playas, y sin este aporte.

Fueron seleccionados dos sitios, uno en el que existían evidencias de interacciones entre el sistema dunar y la costa, tal es el caso de la desembocadura del Arroyo Pando (playas El Pinar y Neptunia, ubicadas respectivamente al E y W), y otro, donde el campo de dunas asociado no parecía realizar aportes significativos, como es la desembocadura del Arroyo Carrasco (playas de Carrasco y San José de Carrasco ubicadas al E y W) por no presentar dunas activas de importancia.

La inclusión de la desembocadura del Arroyo Pando, se fundamentó además en el hecho de la numerosa documentación existente sobre la misma, habiéndose relevado 27 recubrimientos (que la abarcan en forma total, y otros 7 parciales) entre aerofotografías y cartografía a partir del año 1928 (Panario y Gutiérrez, 2003; Gutiérrez y Panario, 2005, 2006), lo que lo torna un punto ineludible de análisis (**Tabla 4.1**). Se incorporó además una carta de 1789.

A su vez la desembocadura del Arroyo Carrasco tiene también un importante número de coberturas aerofotográficas, que fueron incrementadas con los archivos disponibles en *Google Earth 5*, cubriendo un lapso entre 1929 hasta el año 2008 (**Tabla 4.2**).

- 4.3.1. Playas urbanas con diferentes orientaciones en relación al Swell y los vientos dominantes.

Fueron seleccionados cinco arcos de playa urbanos de Montevideo: Ramírez, Pocitos, Buceo, Malvín y Brava, por tratarse de las primeras playas certificadas de la capital, según normas ISO 14.001).

Tabla 4.1. Metadatos de cartografía y sensores remotos de la desembocadura del Arroyo Pando.

CARTOGRAFÍA			
Fecha	Característica	Fuente	Escala
“Carta esférica del Río de la Plata desde su desembocadura <i>hafta</i> Buenos-Ayres” [sic]	levantada en 1789 y rectificada en 1794, (publicada 1798)	NMM	--
Hoja La Unión IX-29	apoyo de campo 1928 (edición 1930)	SGM	1:50.000
Hoja Montevideo 24	edición 1933	SGM	1:200.000
Hoja El Pinar J-29-a	apoyo de campo mayo 1987 (edición noviembre 1988)	SGM	1:25.000
Hoja La Unión J-29	apoyo de campo junio 1984 (edición agosto 1984)	SGM	1:50.000

AEROFOTOGRAFÍAS			
Fecha	Característica	Fuente	Escala
1937, 19 de mayo	panorámica	FAU	--
1943, 14 de marzo	oblicua	SGM	1:40.000
1951, 22 de octubre	vertical	FAU	1:20.000
1960, 25 de octubre	vertical	FAU	1:20.000
1964, 14 de setiembre	vertical	FAU	1:20.000
1966, 27 de enero	vertical	SGM	1:20.000
1966, 26 de diciembre	vertical	SGM	1:20.000
1967, 13 de junio	vertical	SGM	1:40.000
1971, 26 de enero	vertical	FAU	1:10.000
1971, 26 de agosto	vertical	FAU	1:10.000
1975, 21 de enero	vertical	FAU	1:20.000
1976, 06 de febrero	vertical	FAU	1:10.000
1976, 17 de junio	vertical	FAU	1:20.000
1977, 13 de mayo	vertical	FAU	1:20.000
1978, 26 de abril	vertical	FAU	1:20.000
1980, 12 de enero	vertical	FAU	1:50.000
1980, 25 de mayo	vertical	FAU	1:20.000
1982, 13 de febrero	vertical	FAU	1:20.000
1984, 4 de diciembre	vertical	FAU	1:10.000
1987, marzo	vertical	SGM	1:40.000
1990, 2 de junio	SPOT XS	----	pixel 25 m
1994, mayo-junio	vertical	DINAMA	1:5.000
1995, 23 de octubre	vertical	FAU	1:10.000
1996, 22 de enero	vertical	FAU	1:5.000
1997, abril	vertical	DINAMA	1:5.000
1998, 1 de diciembre	vertical	CCG	pixel 0.75 m
1999, 16 de noviembre	vertical	FAU	1:20.000
2000, 25 de abril	vertical	FAU	1:10.000
2000, 24 de noviembre	vertical	FAU	1:20.000
2001, 21 de enero	vertical	FAU	
2001, 21 de noviembre	vertical	FAU	1:25.000
2002, marzo	vertical	DINAMA	
2002, mayo	Vertical	<i>Pyke y Cia</i>	pixel 0.20 m

Abreviaturas: NMM: *National Maritime Museum*; FAU: Fuerza Aérea Uruguaya; DINAMA: Dirección de Medio Ambiente; SGM: Servicio Geográfico Militar; CCG: Comisión de Cambio Global

Tabla 4.2. Metadatos de la cartografía y sensores remotos obtenidos para las playas urbanas de Montevideo.

Fecha*	Fuente	Esc original	Ramírez	Pocitos	Buceo	Malvín	Brava
1927, marzo 16	DINAMA	1/8.000					
1929, marzo 21	SGM	1/7.500					
1939	IMM	1/5.000					
1942, noviembre 25	DINAMA	1/7.300					
1945, enero	IMM	1/10.000					
1949	DINAMA	?					
1954, mayo 14	IMM	1/15.000					
1954, mayo 17	IMM	1/30.000					
1961, diciembre 13	IMM	1/15.000					
1961, diciembre 21	IMM	1/15.000					
1965 octubre 26	IMM	1/10.000					
1966, enero 26	SGM	1/20.000					
1970, julio 21	IMM	1/7.500					
1970, agosto 21	IMM	1/7.300 y 1/10.000					
1970, diciembre 07	IMM	1/10.000					
1971, mayo 01	IMM	1/10.000					
1975, enero 29	IMM	1/10.000					
1979, marzo 29	IMM	1/10.000					
1983, febrero 12	IMM	1/12.000					
1985, diciembre	IMM	1/10.000					
1991, mayo	IMM	1/5.000					
1996, junio	IMM	1/40.000					
2000, setiembre 22	Google Earth						
2001 agosto 09	Google Earth						
2002, setiembre 21	Google Earth						
2003, octubre 23	IMM	1/10.000					
2004, mayo 28	Google Earth						
2005, noviembre 27	Google Earth						
2006, septiembre 6	Google Earth						
2006, septiembre 24	Google Earth						
2007, septiembre 29	IMM	1/10.000					
2007, diciembre 8	Google Earth						
2008, abril 30	Google Earth						
Totales:			23	21	17	17	17

* No siempre se cuenta con datos precisos de la fecha.

Abreviaturas: IMM: Intendencia Municipal de Montevideo; DINAMA: Dirección de Medio Ambiente; SGM: Servicio Geográfico Militar

Las playas urbanas seleccionadas tienen un importante número de vuelos, los que fueron incrementados con los archivos disponibles en *Google Earth 5*, cubriendo un lapso desde 1927 hasta el año 2008: 23 en Ramírez, 22 en Pocitos, 17 en Buceo, 17 en Malvín, 17 en Brava (ver **Tabla 4.2**). Se incorporaron además tres cartas del siglo XIX al análisis de Ramírez.

4.4. PREPARACIÓN DEL MATERIAL, GEO-REFERENCIACIÓN DE IMÁGENES Y CONSTRUCCIÓN DEL S.I.G.

Elegidas las desembocaduras y los arcos de playa urbanos y obtenida la información cartográfica, se procedió a la geo-referenciación de las imágenes, usando la proyección UTM (*Universal Transverse Mercator*) zona 21S.

El software usado fue *ArcView* 3.3® con la extensión *Image Analysis* 1.1 y *ArcGis* 10®. Otras extensiones de *ArcView* usadas fueron *Polygeom*, *Santitools* y *Xtools*.

- 4.4.1. Geo-referenciación de imágenes de Montevideo

El archivo vectorial realizado por la IdeM a partir de un relevamiento con precisión decimétrica del muro interior de la Rambla, fue usado como base para la geo-referenciación de las imágenes, usando como datos accesorios otras coberturas vectoriales, entre ellas la cartografía de padrones⁶. Fue asumido un margen de error en el entorno de ± 50 cm en la geo-referenciación relativa entre imágenes para la zona de interés, debido a corrimientos y errores de posicionamiento atribuibles a deformaciones de las fotos (que no fueron ortorectificadas). Como el objetivo del presente estudio es verificar las modificaciones de la ubicación de la **línea de costa**, en el proceso de superposición de las imágenes, fue priorizada la precisión a ser alcanzada desde el muro de la rambla hacia la playa. La cartografía de la rambla tiene una precisión submétrica, por lo que su error sumado al obtenido en la geo-referenciación relativa de las imágenes, no superaría en mucho al metro respecto a su geo-referenciación absoluta.

Para la geo-referenciación de las imágenes de Montevideo, fue tomada como base el relevamiento hecho por SSRFAU para la IdeM en setiembre de 2007⁷, y geo-referenciado por esta última, al que se le hicieron ajustes de referenciación en la zona de interés. Una vez corregida esta imagen se la suma al análisis para buscar puntos de referencia con la foto inmediata anterior (creándose una cobertura auxiliar de puntos de geo-referenciación a partir de dibujar objetos más o menos persistentes a través de los años, como árboles, calles o trillos, construcciones y estructuras geomorfológicas). La secuencia de referenciación se hace tomando siempre la imagen más próxima en el tiempo. Con esta metodología, se logró referenciar toda la serie de imágenes sobre la misma base cartográfica, minimizando así las deformaciones y errores en términos comparativos entre las mismas.

^{6/} Contiene información de identificación y geometría parcelaria del catastro urbano.

^{7/} Concomitante al relevamiento se realizó un relevamiento de campo.

Para la geo-referenciación de la serie de imágenes de la desembocadura del Arroyo Carrasco, sólo se contaba con el archivo vectorial de la Rambla, hasta el límite departamental. Al constatarse que el relevamiento de setiembre del 2007 de la IdeM, al Este del arroyo tenía una deformación muy importante, fue utilizado como base para la referenciación relativa del resto de las imágenes, un relevamiento realizado por la Intendencia Municipal de Canelones en setiembre de 2006.

- 4.4.1. Geo-referenciación de imágenes del Arroyo Pando

En la desembocadura del Pando, se procedió a referenciar en formato digital la hoja cartográfica “El Pinar J-29-a” (escala 1:25.000) del Servicio Geográfico Militar (proyección Gauss, meridiano de contacto 62G, *Datum* Yacaré), la que fue utilizada como base para la geo-referenciación de la serie de imágenes. Como esta carta fue confeccionada sobre la base de fotos aéreas de marzo del año 1987 y apoyo de campo de mayo del mismo año, se comenzó por dicha imagen, a partir de la cual, se buscaron puntos de referencia con la foto inmediata anterior de diciembre de 1984, procediéndose tal como fue detallado en la metodología de las playas urbanas (*ítem 4.4.1 Geo-referenciación de imágenes de Montevideo*), y luego repitiendo el procedimiento a partir de la foto de marzo de 1987 para las imágenes más recientes.

Las imágenes utilizadas incluían, como fuera expresado *up supra*, desde tomas con diferentes grados de oblicuidad, hasta verticales, en diferentes escalas y resoluciones. De hecho, estas tomas incluyeron también escalas desde 1:5:000 a 1:50:000, así como una imagen del satélite *Spot*; y desde negativos escaneados hasta fotos de cámara digital tomadas a una imagen en papel, y por tanto de muy diferente calidad. En todos los casos, se consiguió un error relativo promedio aceptable (± 3 m) para el tramo de costa, salvo para las fotos muy oblicuas, las que de todas formas permiten tener una idea cualitativa de los procesos y las modificaciones que a lo largo del tiempo se produjeron en el sistema, pero no fueron utilizadas para los análisis estadísticos.

Las fotos en formato digital, con cierto grado de oblicuidad, fueron recortadas para formar mosaicos que permitieran alcanzar la precisión deseada.

4.5. DIGITALIZACIÓN DE LÍNEAS DE COSTA Y OTROS INDICADORES

Debido a la naturaleza dinámica del “límite idealizado de la línea de costa”, para los propósitos práctico de investigaciones costeras generalmente se adopta el uso de *indicadores* de línea de costa. Un indicador de la línea de costa es una característica que se utiliza como *proxy* (indicador indirecto) para representar a la "Verdadera" posición de la costa (Boak y Turner, 2005).

- 4.5.1. Selección de *proxies* de línea de costa

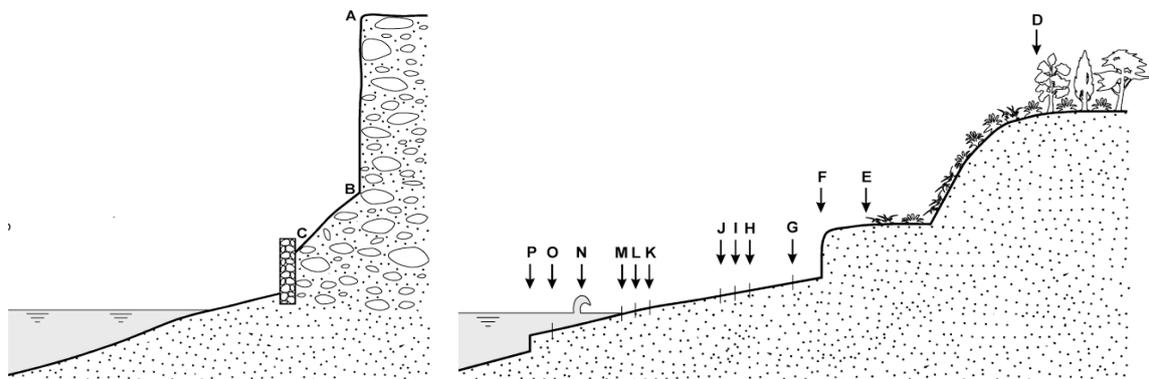
Se tomó la decisión de utilizar tres criterios a la hora de digitalizar este indicador sobre las imágenes.

Por un lado se utilizó la denominada **línea de marea alta previa - LMAP** (*Previous high tide high water level*⁸⁾, utilizada en este tipo de trabajo, porque diferencias relativamente importantes entre mareas, producen un error mínimo en la traslación cartográfica horizontal de la línea de costa, dado que el segmento de playa por encima de la marea alta, es el que presenta mayor pendiente en el perfil transversal de la misma (según Norris, 1964; Anders y Byrnes, 1991; Inman y Masters, 1991; Crowell et al., 1991, 1993; Shalowitz, 1964, Byrnes et al., 1991 citados en Mc Bride et al., 1995; Orford et al., 1997; Crowell y Leatherman, 1999; Moore, 2000; Willis, 2002; Barton et al., 2003; Domínguez et al., 2004; Moore et al., 2006). Es una estructura fácilmente visible en los registros, permitiendo una relativa estandarización de la posición del nivel del mar para la serie histórica de fotos analizadas. En la **Figura 4.1** está identificada con la **letra I**.

Por otro lado, a los efectos de comparar resultados, también se utilizó otro indicador denominado **línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola - LSH-ZAIO** (*Wet/dry line or runup maxima*) (según Dolan et al., 1978, 1980, Overton et al., 1999 citados en Boak y Turner, 2005), indicado en la con la **letra K**. Esta línea indica el límite erosivo-constructivo ubicado en la zona de máximo alcance de la ola, y en las fotos se identifica muy nítidamente por diferencia de tonos. Se detecta en la propia playa por un cambio en la forma, pasando de un perfil cóncavo a un perfil convexo, y también por un quiebre claro en el ángulo de la pendiente.

El tercer indicador utilizado es el **antiguo límite de marea alta - ALMA** (*An old high tide water level*), que es el límite con la arena seca, que presenta los inconvenientes de que el viento puede borrarla o tornarla discontinua (según Crowell et al., 1991; Leatherman, 1983, Stafford y Langfelder, 1971, Dolan et al., 1978, 1980, Overton et al., 1999 citados en Boak y Turner, 2005). Aparece identificado con la **letra H** en la **Figura 4.1**. Otro inconveniente observado, es que en playas urbanas, que reciben tratamientos de limpieza durante todo el año, y una carga de visitantes muy importante en verano, debe tomarse con precaución la permanencia inalterada de este indicador en las fotos.

^{8/} Se decidió incluir el nombre en inglés para facilitar la comparación, la traducción al español fue realizada por el autor de esta tesis, y puede no corresponderse con las efectuadas por otros autores.



- | | |
|---|--|
| A Bluff top/cliff top | I Previous high tide high water level |
| B Base of bluff/cliff | J Mean high water (datum referenced) |
| C Landward edge of shore protection structure | K Wet/dry line or runup maxima |
| D Seaward stable dune vegetation line | L Groundwater exit point |
| E Seaward dune vegetation line | M Instantaneous water line |
| F Erosion scarp | N Shorebreak maximum intensity |
| G Storm/debris line | O Mean lower low water line (datum referenced) |
| H An old high tide water level | P Beach toe/crest of beach step |

Figura 4.1. Arriba: Sobre una foto de *Duranbah Beach*, Nueva Gales del Sur, Australia se señala la ubicación espacial de varios indicadores de línea de costa. Abajo: Esquema de la relación espacial entre indicadores de posición de la línea de costa de uso común en trabajos científicos (Extraído de Boak y Turner, 2005).

También se debe señalar que Se debe señalar que el **nivel antiguo de marea alta** (letra **H**) y la **línea de marea alta previa** (letra **I**), bajo ciertas condiciones pueden coincidir totalmente en la misma ubicación espacial en la playa; este hecho no resulta significativamente grave, dado que se trata de registros del mismo fenómeno en intensidades similares y ocurridos en un período de tiempo no demasiado extenso. Además sus registros siempre quedan en posiciones espaciales muy cercanas, y en algunos puntos normalmente se superponen.

También se debe señalar que los anteriores, bajo ciertas condiciones de marea alta, pueden coincidir espacialmente con la ubicación de la **línea seca/húmeda** o **zona actual de alcance de la ola (K)**.

Boak y Turner (2005) realizan una revisión de autores e indicadores, y si bien existen más registros proxy que pueden ser utilizados (**Figura 4.1**), los mismos quedan enmascarados para las condiciones de las playas urbanas por construcciones, como el caso del cordón dunar, o directamente no son aplicables o generalizables.

La digitalización en pantalla de las líneas de costa se realizó a una escala 1:3.000 para estandarizar el procedimiento.

- 4.5.2. Procedimiento de digitalización de los *proxies* seleccionados de playas urbanas de Montevideo

Para el análisis multitemporal de los avances y retrocesos de las **líneas de costa** de las playas urbanas (Ramírez, Pocitos, Buceo, Malvín y Brava), se optó por trazar el polígono (área) de cada una de las imágenes, tomando como límites el *shape* **Rambla** digitalizado por la IdeM (y que fuera usado para la geo-referenciación del archivo de imágenes de estas playas), y como límite externo uno de los indicadores de **línea de costa**.

La selección de la rambla como límite se debe a que ya estaba presente (total o en su mayor parte) aun en las fotos más antiguas de las que se dispone, y ha funcionado como un límite de la zona de playa a los efectos de medir las variaciones de pérdidas o ganancias en términos de superficies. En particular, Buceo, Malvín y Brava desde los registros fotográficos más antiguos mantienen la rambla en el trazado actual, Ramírez en fotografías de 1923, ya tenía la rambla que la circunda en la misma ubicación, sin embargo existía por esa fecha un descanso que ocupaba un área importante (1.000 m²) retirado con posterioridad (después de 1940 y antes de 1945, **Figura 4.2**). A diferencia de las anteriores, la playa de Pocitos creció en superficie, luego de que fuera entubado el Arroyo de los Pocitos que desembocaba en su extremo NE,

posteriormente al año 1927, construyéndose una rambla sobre la superficie de playa “ganada”, la que posteriormente se demuele (año 1952) y se ubica en la posición actual (**Figura 4.3**).

Para Ramírez y Pocitos se utilizaron la **línea de marea alta previa (LMAP)** y la **línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola (LSH-ZAIO)**, a efectos de comparar resultados, y analizar si se modificaba la tendencia de evolución de estas playas, por usar uno u otro. En algunos registros fotográficos, la ubicación de ambos indicadores está situada en el mismo lugar. Si bien en estas dos playas se utilizaron ambas líneas a efectos de la comparación de métodos, los resultados obtenidos (R^2 similares) (**Figura 4.4**) habilitaron a optar por uno u otro, según la facilidad de observarlo propia de cada ambiente.



Figura 4.2. En la foto del año 1940, se puede apreciar la ubicación del descanso existente para la época en Playa Ramírez. Para el año 1945 (próximo registro fotográfico disponible) este ya había sido retirado. Foto: CMDF-IdeM (Centro Municipal de Fotografía, Intendencia Municipal de Montevideo).



Figura 4.3. En la imagen del año 1945, puede observarse el primer trazado de la rambla de la Playa Pocitos. En la foto panorámica del año 1930, se aprecia en más detalle su emplazamiento sobre la playa, convirtiéndola en dos arcos casi independientes. La línea azul indica el área de playa para la foto del año 1927, que fue utilizada como: *“límite continental: playa año 1927”*. La línea turquesa gruesa indica la ubicación de la rambla en su trazado actual, que fue utilizado como: *“límite continental: playa año 2008”*. La diferencia de área hacia el NE entre una y otra superficie, está dada por la ganancia de playa obtenida al entubar la desembocadura del Arroyo de los Pocitos. Las flechas rojas indican los extremos del tramo de rambla que ha permanecido inalterado en su ubicación para toda la serie de fotos. Aerofotografía fondo: enero de 1945, SSRFAU. Foto detalle: archivo CMDF-IdeM.

	LMAP	LSH-ZAIO
Playa Ramírez	R= 0.344964 p = 0.1907 significativo al 81%	R= 0.346699 p = 0.1883 significativo al 81%
Playa Pocitos	R= 0.32249 p = 0.2411 significativo al 76%	R= 0.445421 p = 0.0961 muy significativo al 90%

Figura 4.4. Comparación para la Playa Ramírez y Pocitos de la significación estadística de dos indicadores: línea de marea alta previa (LMAP) y línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola (LSH-ZAIO). Como puede observarse, para Ramírez la tendencia es la misma, sin embargo para Pocitos se evidencia una mayor significación cuando se usa LSH-ZAIO, esta diferencia puede explicarse por el intenso pasaje de maquinaria de limpieza y el perfil transversal propio de cada ambiente que influyen sobre la conservación del registro de LMAP, pudiéndose enmascarar las tendencias por lo menos de las fotos de verano. Por tanto, para playas urbanas con intensas medidas de mantenimiento, tal como sostiene A. Pérez Alberti (*com. pers.*) parece recomendable usar LSH-ZAIO.

En **Buceo** se trazó la línea de costa siguiendo dos indicadores **LMAP** y **antiguo límite de marea alta (ALMA)**. A su vez se realizó también una evolución de la cobertura de uso del suelo de cinco clases: arena seca (**ALMA**), arena húmeda, dunas parabólicas (*blowout*), área “parquizada”^{9/}, y estructuras antrópicas (construcciones tales como paradores, baños, etc.).

En **Malvín** se trazó la línea de costa siguiendo dos indicadores **LMAP** y **ALMA**. A su vez se realizó también una evolución de la cobertura de uso del suelo separando cuatro clases: arena seca (**ALMA**), arena húmeda, área “parquizada” (fijación de la playa por vegetación con formación de suelo) y estructuras antrópicas (construcciones tales como paradores, baños, etc.).

En **Brava** se trazó la línea de costa siguiendo dos indicadores **LMAP** y **ALMA**. A su vez se realizó una evolución de estructuras antrópicas (construcciones tales como cine, colector del saneamiento, baños, etc.).

A su vez para la **Punta del Descanso**, ubicada entre las playas Malvín y Brava, se digitalizó también como polígonos la evolución de la colonización por vegetación del tómbolo lo que puede interpretarse en términos de saturación en sedimentos del flujo (Gutiérrez y Panario, 2005).

^{9/} Zona enjardinada mantenida con corte de pasto y donde se plantan árboles, arbustos y otras plantas decorativas, sin llegar a ser un jardín.

Para **Pocitos**, se tomó la decisión de trazar la evolución de la línea de costa de dos formas. Por un lado, se decidió usar un artefacto (denominado “límite continental: playa año 1927”) para analizar la evolución multitemporal de esta playa, recortando el *límite continental* de la playa, por el existente en el año 1927 (ver **Figura 4.3**), por lo tanto, con un polígono con ese límite, se digitalizaron las posiciones de costas para la serie de imágenes, a efectos de analizar el comportamiento de esta playa sin la ganancia “artificial” de área generada por el retiro de la desembocadura del Arroyo Pocitos, al ser entubado y conducida su salida atrás del Parador Kibón (**Figura 4.5**). Un segundo análisis fue hecho a partir de digitalizar el área de playa correspondiente a cada imagen, considerando todas las rectificaciones que ha tenido el trazado de la rambla hasta llegar a su configuración actual (artefacto denominado “límite continental: playa año 2008”).

- 4.5.3. Procedimiento de digitalización de los *proxies* seleccionados en las desembocaduras

Como se mencionó precedentemente no se pudo estandarizar el método de cálculo por la disparidad de comportamiento de los sitios. En efecto, mientras las playas urbanas de Montevideo están contenidas en su límite continental por estructuras permanentes como los muros de la costanera, en otras playas de urbanizaciones menos consolidadas como en las desembocaduras de ambos arroyos en estudio, el



Figura 4.5. En la imagen de 2007 puede observarse el entubado y canalización de la desembocadura del Arroyo Grande de los Pocitos, que pasa a desaguar a 1.000 metros del lugar original, parte del tramo conducido bajo subsuelo. Foto: relevamiento aerofotográfico del 2007, IdeM.

límite externo ha variado como resultado de diferentes procesos como la urbanización y la forestación, y en El Pinar y Neptunia ninguno de esos dos procesos ha logrado consolidar el límite continental, siendo removidas por efectos de las olas, costaneras y forestaciones.

Para las desembocaduras de los Arroyos Pando y Carrasco, se procedió a la digitalización en pantalla de las líneas de costa creando *shapes* de líneas. La selección del indicador de línea de costa, se hizo analizando cual se encontraba mejor expresado en cada serie de fotos.

Para la desembocadura del Arroyo Carrasco se utilizó la **línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola (LSH-ZAIO)**.

Para la desembocadura del Arroyo Pando se utilizó la **línea de marea alta previa (LMAP)**, dado que la peor calidad de las imágenes (baja resolución de muchas de ellas) hacía que quedara enmascarado el indicador **LSH-ZAIO**. La **línea de marea alta previa** es un registro que siempre está presente en las imágenes (y tomando en consideración que los vuelos aerofotogramétricos, en general, se realizan en condiciones atmosféricas estables), la marea alta permite una relativa estandarización del nivel del mar en la serie de fotos.

4.6. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS DEL RETROCESO - AVANCE DE LA LÍNEA DE COSTA Y OTROS INDICADORES

- 4.6.1. Playas urbanas de Montevideo

Los polígonos del análisis multitemporal de imágenes realizado para cada playa seleccionados por cada **indicador de línea de costa** utilizado, fueron fusionados en un sólo *shape* usando la extensión *Geoprocessing*, para generar de manera automatizada la tabla que contuviera la información de fechas y áreas en metros cuadrados, y con ellas se procedió al análisis de tendencias y su significación estadística. La decisión de analizar la evolución de las playas a partir de medir las pérdidas-ganancias (avances y retrocesos) en superficie de arena expuesta, fue tomada ante la imposibilidad de realizar balances sedimentarios, por no existen registros históricos de alturas del perfil de playa que permitan calcular volúmenes, y considerar que su estimación a partir de barra de paralaje con estereoscopio de espejos, genera un error que invalida el uso de esta técnica para estos fines.

A su vez, se analizaron los cambios de uso del suelo, la evolución de la colonización por juncos de la Punta del Descanso, y la significación estadística de sus tendencias.

• 4.6.2. Desembocaduras de los Arroyos Pando y Carrasco

Para medir los avances - retrocesos de las líneas de costa para ambas desembocaduras, se optó por usar un artefacto para determinar las pérdidas y ganancias entre una posición de la línea de costa considerada como año base y los polígonos que la excedían, o le restaban área por retroceso en relación a dicho año (Gutiérrez y Panario, 2005, 2006). El año base tomado para el Arroyo Pando fue la imagen de mayo del 2002, y para el Arroyo Carrasco fue la imagen del año 2008. A los efectos de determinar tendencias los resultados fueron graficados como una función acumulativa de ganancias-pérdidas entre períodos.

El artefacto consistió en dibujar sobre cada línea de costa tomada como año cero dos transectos perpendiculares a la costa y paralelos entre sí (T1 y T2), uno sobre cada lado de la desembocadura, para que funcionaran como límite externo (Figura 4.6). La

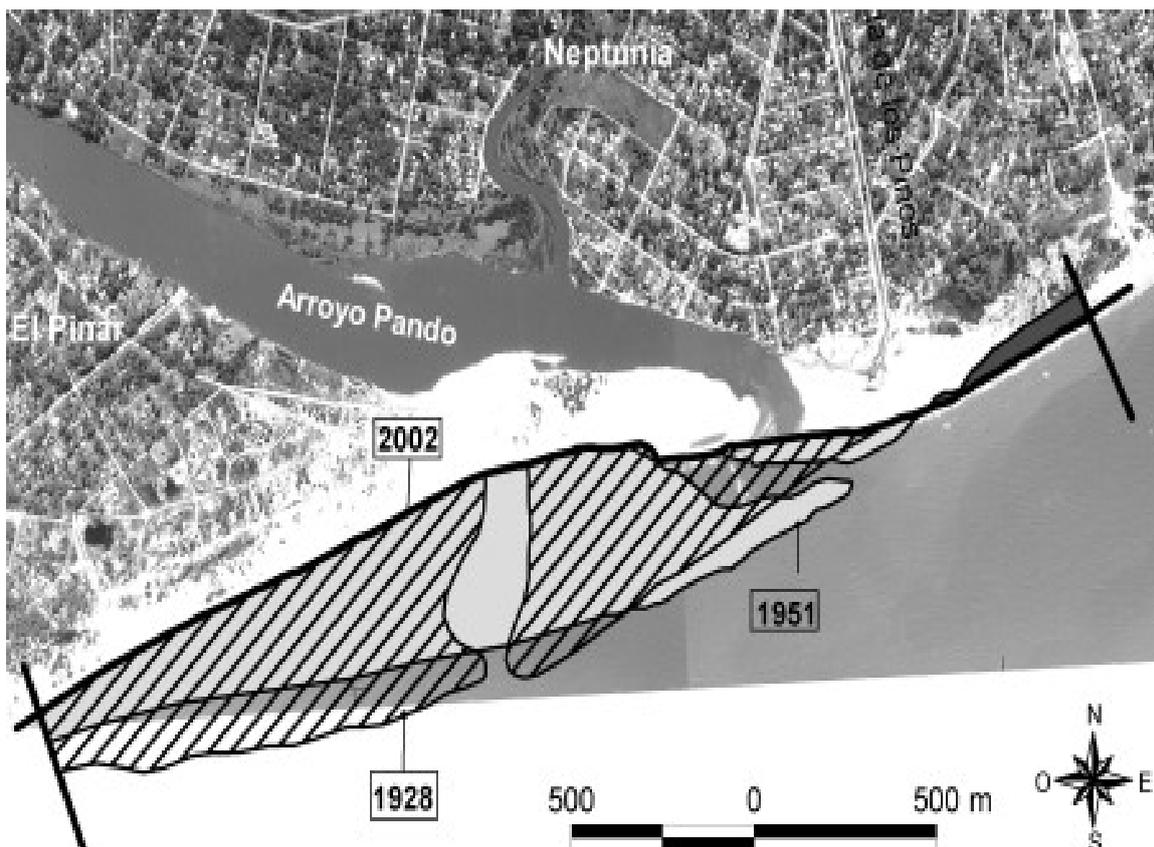


Figura 4.6. La línea negra gruesa señala la línea de base de mayo de 2002 con los dos transectos perpendiculares utilizados como artefacto para estimar las fluctuaciones, al intersecar con cada línea de costa. El área rayada muestra la posición de la desembocadura del Aº Pando para el año 1928. Por debajo, en color sólido gris claro se presenta el área que para el año 1951 se encontraba situada por delante de la línea de costa actual, y sobre la playa de Neptunia en color gris oscuro se indica la zona que para 1951 se posicionaba por detrás. Aerofotografía: mayo del 2002, Pyke & Cia. S.A.

elección de su ubicación espacial estuvo condicionada a que comprendieran entre ellos a todas las posiciones documentadas o inferidas para cada desembocadura. Además fueron situados donde se expresaba una disminución de las fluctuaciones entre las diferentes líneas de costa históricas. Un paso previo fue preparar todas las líneas de costa, mediante unir con una línea recta los puntos más cercanos entre ambos márgenes de la desembocaduras, a efectos de obtener líneas continuas.

Luego de efectuados estos preparativos, se procedió a intersecar una por una cada línea de costa con el artefacto preparado con la línea de año base. Posteriormente la(s) superficie(s) así delimitada(s) por líneas, se convierten en polígonos y se calcula el área en metros cuadrados, estimándose la pérdida, medida como superficie, entre las diferentes posiciones que la línea de costa ha tenido en el archivo de imágenes relevado (**Figura 4.7**).

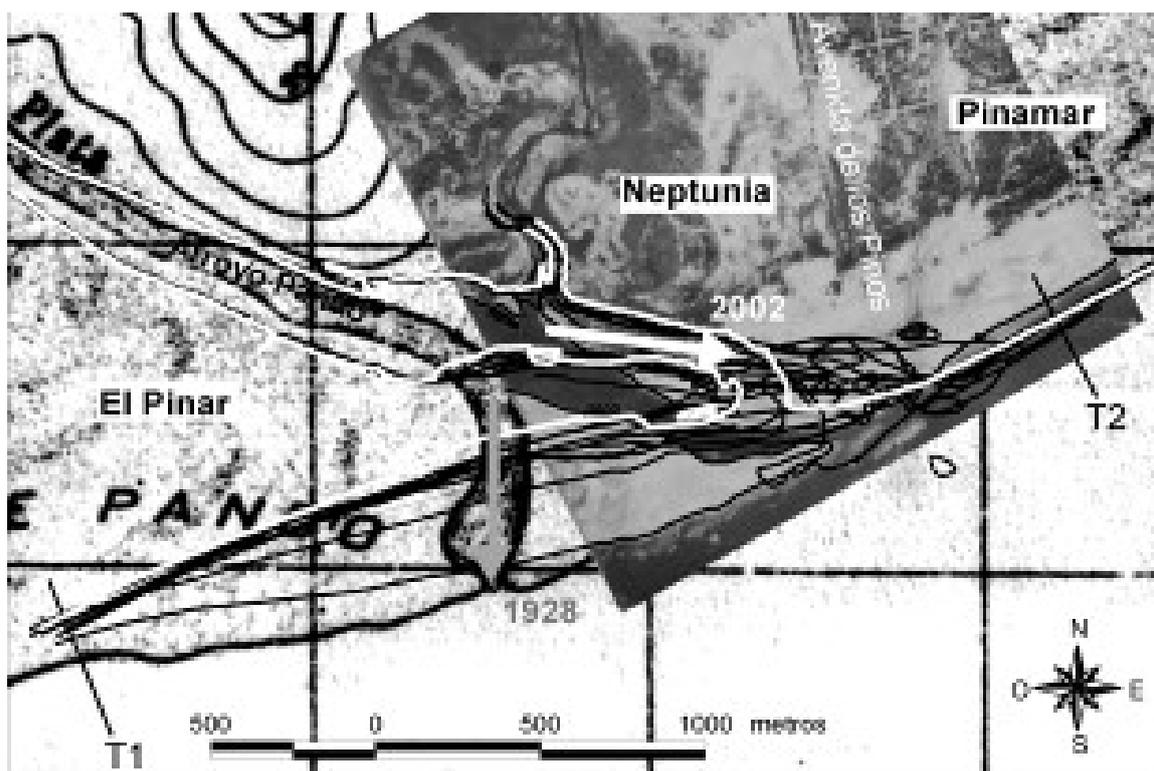


Figura 4.7. En blanco se dibuja la posición de la línea de costa para mayo del 2002, tomada como línea de base para realizar las medidas de pérdida-ganancia de “territorio” en la desembocadura del Arroyo Pando. Los transectos perpendiculares están indicados como T1 y T2. Para el período 1928 - 2002, se observa la superposición de las líneas de costa de las principales excursiones hacia el E de la desembocadura del Arroyo Pando. La flecha gris (1928) y la blanca (2002) muestran respectivamente las posiciones y el giro que tuvo la desembocadura en sentido antihorario, así como el marcado retroceso de la ubicación de la playa. Aerofotografía: 22 de octubre de 1951, SSRFAU. Cartografía: Hoja La Unión IX-29, esc.: 1:50.000, SGM, Ed. 1930, apoyo de campo del año 1928.

Como algunas de las fotos no cubrían la totalidad del área, frente a la observación de que hacia los transectos T1 y T2 de los extremos Este y Oeste (que oficiaban de límite a estas medidas), las líneas de costa convergían asintóticamente hacia una posición de la costa casi invariante, se procedió a reconstruir dicho trazado para aquellas vistas en las que no se disponía de la totalidad de la zona bajo análisis.

- 4.6.3. Análisis estadístico

A las series de datos obtenidas para cada sitio en estudio, se les generó un informe estadístico de una sola variable para los datos del rango de entrada, obteniendo información acerca de la tendencia central y dispersión de los datos: media, mediana, moda, desviación estándar, varianza, coeficiente de variación, etc., usando la herramienta de análisis *Estadística descriptiva* de *Microsoft Office Excel*. La línea de tendencia fue ajustada por el método de mínimos cuadrados (regresión) del tipo $y = mx + b$ (donde **m** es la pendiente y **b** es la intersección).

El valor obtenido de **R cuadrado** y el **N** de los datos relevados, fueron usados para realizar una prueba de distribución **T** (Student), que es una distribución de probabilidad a partir de estimar la media de una población normalmente distribuida cuando el tamaño de la muestra es pequeño. Se utilizó para los cálculos, el *Website for Statistical Computation del Vassar College* (<http://faculty.vassar.edu/lowry/tabs.html#r>).

Se fijó a priori un α (alfa) de 0,2 a efectos de marcar el nivel de rechazo de la hipótesis nula. Aunque es usual trabajar con un alfa igual o menor a 0,05, se decidió trabajar con un nivel de confianza del entorno del 80%, justificado en el hecho de que se trata de series que no son continuas y con pocos eventos cada una de ellas (entre 15 y 22), pero pasibles de ser analizadas estadísticamente. No obstante, es de señalar que para la temática, estos datos son más abundantes de lo usual, y no es común la existencia de tantos registros aerofotográficos para una misma playa, cubriendo períodos de tiempo extensos (entre 68 y 81 años) y con cierta regularidad en las tomas.

Por tanto el nivel de confianza, o probabilidad de que las diferencias que se detecten no se deban al azar y rechacemos la hipótesis nula será según la siguiente regla de decisión:

Si p es menor de 0,2, la probabilidad de que las diferencias encontradas se deban al azar son demasiado grandes para aceptar la hipótesis alternativa y, por tanto, no se rechaza la hipótesis nula: las diferencias encontradas están dentro de las que consideramos debidas al azar.

Si p es mayor o igual a 0,2, se admite que la probabilidad de que las diferencias encontradas se deban al azar son demasiado pequeñas, por lo que rechazaremos la hipótesis nula y aceptaremos la alternativa.

A su vez, se aplicó a los datos un *Run test* (test de rachas) usando el software *Past 1.96* (Hammer et al., 2001). Este análisis es un test no-paramétrico para una secuencia de valores obtenidos en una secuencia espacial, y que permite analizar aleatoriedad de los sucesos. Este test estudia el orden o secuencia en que las muestras individuales fueron obtenidas, con el objetivo de probar que la muestra es aleatoria, basándose en la cantidad de rachas que la muestra exhibe. Por *racha* se entiende una sucesión de símbolos idénticos que pueden estar separados o no por otro símbolo, ejemplo, magnitudes dicotómicas identificadas con los símbolos de resultado positivo (+) o negativo (-) a juicio del investigador, de acuerdo con cierto criterio profesional empleado (Azzimonti, 2003). La selección de este test fue hecha teniendo en consideración que los datos obtenidos no son continuos, y además por su propia naturaleza, no son vuelos planificados para el relevamiento sistemático del objeto de estudio, sino que responden a otros fines de planificación territorial. A pesar de los esfuerzos de búsqueda de archivos, no se ha podido en todos los casos alcanzar para todos los sitios en estudio, los 20 registros (n) que este test necesita para obtener un margen de confiabilidad de los resultados, y poder poner en evidencia si existe alguna tendencia en los datos.

Para el caso de estas cinco playas urbanas, dado que las series de datos de medidas del área de playa para cada una de las imágenes están compuestas por valores positivos, se los transformó mediante substraerles la media, obteniendo entonces números positivos y negativos.

- 4.6.4. Construcción de índices de balance (retroceso - avance) de la línea de costa

Fueron construidos índices a efectos de poder establecer comparaciones cuantitativas entre los sitios de estudio, a partir de valores de cambios relativizados.

Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP): Construido a partir de relativizar el valor estimado por la tendencia de ganancia - pérdida en metros cuadrados de playa por año, mediante dividir esa magnitud por los metros lineales de línea de costa de cada playa (o sea establecer la pérdida en m^2 por metro lineal). A estos efectos se toma la línea de costa más reciente para cada una de las playas, usando cuando estaba disponible el *proxy* **LSH-ZAIO**, y en su defecto el **LMAP**. La intensidad de los procesos

de pérdida o ganancia por metro lineal de playa fue agrupada en tres clases, a partir de considerar a los valores menores a ± 0.09 como cambios **leves**, entre ± 0.09 y ± 0.20 como **moderados**, y mayores a ± 0.20 como **fuertes**. Estos intervalos fueron establecidos a partir de valores de media y varianza (respectivamente) de los sitios en estudio. Este índice permite relativizar y tornar comparables los procesos que ocurren en playas con distinto tamaño.

Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior (IDMaSPA): Construido mediante calcular el porcentaje de diferencia entre el registro de mayor expresión de superficie que cada playa ha tenido (considerando toda la serie relevada) y su superficie actual; a partir de este índice se analiza la distancia entre el estado actual y el mejor escenario (real) posible para cada playa.

Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior (IDMeSPA): Construido mediante calcular el porcentaje de diferencia entre el registro de menor expresión de superficie que cada playa ha tenido (considerando toda la serie relevada) y su superficie actual; a partir de este índice se analiza la distancia entre el estado actual y el peor escenario (real) posible para cada playa.

Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa (ITBSP): Construido a partir de la ecuación que define para cada gráfica la tendencia lineal del conjunto de datos, se calcula a partir de ponderar el valor teórico inicial y final para cada serie graficada. En cada caso, se toma como “100” el mayor valor teórico, usando por tanto el valor inicial para tendencias decrecientes y el final para tendencias crecientes, obteniendo de esa forma el porcentaje de variación de superficie entre dichos valores.

Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie (ITBSP relativizado por tiempo): Construido a partir de dividir por el período de años de la serie de datos utilizada para cada período, a los efectos de obtener números redondos fue multiplicado por mil y redondeado a número entero, consiguiendo por lo tanto unificar en pocas clases los valores obtenidos. Se consideran como procesos fuertes los valores iguales o mayores a ± 3 y débiles a los demás valores.

4.7. OTROS PARÁMETROS UTILIZADOS PARA EL ANÁLISIS

Se trabajó con bases de datos de parámetros físicos, meteorológicos y oceanográficos, para establecer correlaciones de las variaciones registradas en la posición de la línea de costa, con series de eventos que pudieran explicar los comportamientos observados.

Fueron analizadas las variaciones positivas (avances) de las líneas de costa en las desembocaduras correlacionándolas con períodos de altas precipitaciones durante las cuales se generan las condiciones para el transporte de sedimentos arenosos hacia el mar, los que fueron ingresados en los arroyos por las mareas o por el viento en los casos de ocurrencias de dunas próximas a las desembocaduras. Para ello se tuvo en cuenta datos de máxima pluviosidad en la cuenca de los mismos (series suministradas por Mario Bidegain).

Se compararon las posiciones de las líneas de costa, en especial las variaciones negativas (retrocesos) con las elevaciones del Río de la Plata, que son producidas por las grandes crecientes de los Ríos Paraná y Uruguay, en conjunto o separados (Camilloni y Barros, 2000, 2003; Menéndez y Berbery, 2006; Camilloni, 2009).

También fue analizada la serie histórica de grandes tormentas para la zona, series hasta el 1979: MTOP/PNUD/UNESCO (1979); series 7 hasta el 2005: Bidegain *et al.*, (2005). También se analizaron estos datos combinados con la ocurrencia de crecientes excepcionales del nivel del mar (más de 3 metros sobre el cero Wharton).

A su vez, fue analizada la incidencia en la respuesta de la línea de costa (retroceso o avance) de los años que presentaban anomalías positivas de vientos (dirección, frecuencia y/o intensidad) y de los años sin anomalías o con anomalías negativas de vientos. Para este análisis fueron utilizados:

a) el archivo de datos del NCEP/NCAR (*National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research*) de NOAA-CIRES Climate Diagnostic Center (Kalnay et al., 1996), de donde fueron obtenidos los componentes **Zonal Wind (u)**¹⁰ y **Meridional Wind (v)**¹¹, para el periodo comprendido entre enero de 1948 y noviembre de 2009 a nivel de superficie. También se usó el componente de **Precipitación Rate** y **Precipitation (udel)**. Esta base de datos utiliza un modelo de interpolación 3D para estimar el valor de las variables meteorológicas en las coordenadas solicitadas, a partir de la combinación de datos obtenidos de diferentes fuentes (estaciones meteorológicas, globos, satélites y datos sinópticos).

^{10/} Viento zonal - El viento, o el componente de viento, siguiendo el paralelo de latitud local, a diferencia del viento meridional. En un sistema de coordenadas horizontales fijas a nivel local con el eje x dirigida hacia el Este y el eje dirigido hacia el Norte, el viento zonal es positivo si sopla desde el Oeste y negativo si desde el Este.

^{11/} Viento meridional - El viento o componente del viento a lo largo del meridiano local, a diferencia de los vientos zonales. En un sistema de coordenadas horizontales fijas a nivel local con el eje x dirigida hacia el Este y el eje y hacia el Norte, el viento meridional es positivo si sopla desde el Sur, y negativo si desde el Norte.

b) el archive de datos del *Twentieth Century Reanalysis Project dataset* (Version V2) generado por el *Physical Sciences Division, NOAA/ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory)*, y el CIRES, University of Colorado de donde fueron obtenidos los componentes **Zonal Wind (u)** y **Meridional Wind (v)**, y **Vectorial Wind**.

4.7. MEDICIÓN DEL APORTE DEL CAMPO DE DUNAS A LAS DESEMBOCADURAS

El análisis de la extensión del frente del campo dunar de las desembocadura en estudio, se realizó utilizando documentos antiguos y las fotos previas a la forestación. La delimitación se realizó por fotointerpretación con pares estereoscópicos, procediéndose a medir la longitud del campo de dunas en contacto directo con el arroyo.

Para el cálculo del volumen de arena, se utilizó el modelo de Fryberger *et al.* (1979) a los efectos de estimar la resultante de transporte por metro lineal de contacto, según la fórmula:

$$UV = [V^2(V-V_t)]/100 \times t$$

- UV = unidades vectoriales,
- V = velocidad del viento,
- V_t = umbral de velocidad requerido para comenzar a mover arena
- t = número de mediciones en un tiempo dado.

Las unidades vectoriales son convertidas a m³ m⁻¹ año⁻¹ con la relación propuesta por Fryberger *et al.* (1984) donde 14 UV son equivalentes a 1m³ m⁻¹ año⁻¹, utilizando el ajuste realizado por Panario y Piñeiro (1997) para nuestras condiciones.

Se realizó la estimación cuantitativa de las diferencias de los volúmenes transportados, antes y después de la forestación y urbanización de las dunas, así como una estimación de los aportes que aún se realizan a partir de la barra arenosa ubicada en la margen de El Pinar.

Fue realizado a su vez un relevamiento del uso del suelo en la serie de fotos obtenidas, forestación y urbanización, cuando las mismas alteraban el normal intercambio de arena. Se tomaron muestras del canal del Arroyo Pando a los efectos de caracterizar la competencia en el transporte actual de sedimentos. Se realizó también un análisis de la documentación de obras de infraestructura propuestas y/o realizadas, en los archivos de la Dirección de Hidrografía del Ministerio de Transporte y Obras Públicas entre otros documentos.

4.8. OTRAS ACTIVIDADES

Se procedió a través de fotointerpretación de series históricas, a cartografiar y cuantificar los cambios de uso del territorio a los cuales pueda atribuirse cambios en la dinámica sedimentaria de los arcos de playa.

Fueron realizadas topografías de detalle de las playas en estudio de Montevideo.

Capítulo 5.

Caracterización de las playas en estudio



Las playas uruguayas son ambientes micromareales, desde el punto de vista de la disipación de energía, siguiendo la propuesta de Dean (1982) y utilizando el parámetro omega (H_b/WT) donde H_b es la altura significativa, W es la velocidad de caída del sedimento y T el período de ola. Valores **inferiores a 1** están asociados a playas reflectivas, valores **entre 1 y 6** a estados intermedios y **superiores a 6** a playas típicamente disipativas. Panario *et al.* (2008b) aplican el parámetro omega a las cuatro playas urbanas y en su totalidad se comportan como intermedias a disipativas para las condiciones promedio de mar ($46\text{cm}/[2\text{cm}\cdot\text{s} \times 4.4\text{s}] = 5.2$) si bien como se indicará, las condiciones locales no reflejan esa clasificación en todos los casos.

Las playas del estuario medio del Río de la Plata contienen sedimentos arenosos subactuales, con ocasionales lentes gravillosos, erosionados, transportados y redepositados en el entorno de la línea de costa por las olas. Los sedimentos derivan de cuatro principales: i) arenas y gravas estuáricas, ii) aluviones autóctonos subactuales, iii) atritos del basamento cristalino, y iv) material bioclástico (conchillas), además para Montevideo, de escombros provenientes de diversas obras (depósitos tecnogénicos o Quinario). Los sedimentos son luego parcialmente retransportados por la acción eólica, el escurrimiento y en Montevideo la acción antrópica, fundamentalmente en tareas mecanizadas de mantenimiento (Panario *et al.*, 2008a, 2008b).

La dirección del oleaje más frecuente es del SE (35%) seguida del E (24%), el S (20%), W y SW con <10% y NW, NE y N <5% (Panario *et al.*, 2008a, 2008b). Se expresa en forma gráfica en la rosa e histograma de rumbos adjuntos (**Figura 5.1**).

La siguiente caracterización de las playas urbanas se basa en el trabajo de Panario *et al.* (2008a, 2008b):

5.1. PLAYA RAMÍREZ

Ramírez es una playa disipativa, de perfil cóncavo y suave pendiente (1,9º) que se acentúa hacia el extremo Norte con un máximo de 2.7 grados entre las cotas 0,5 y 1,5 msnm (metros sobre el nivel medio del mar), con un sector húmedo de 10 a 15 metros de ancho, y uno seco del entorno de los 65m, medidos ambos en su sector

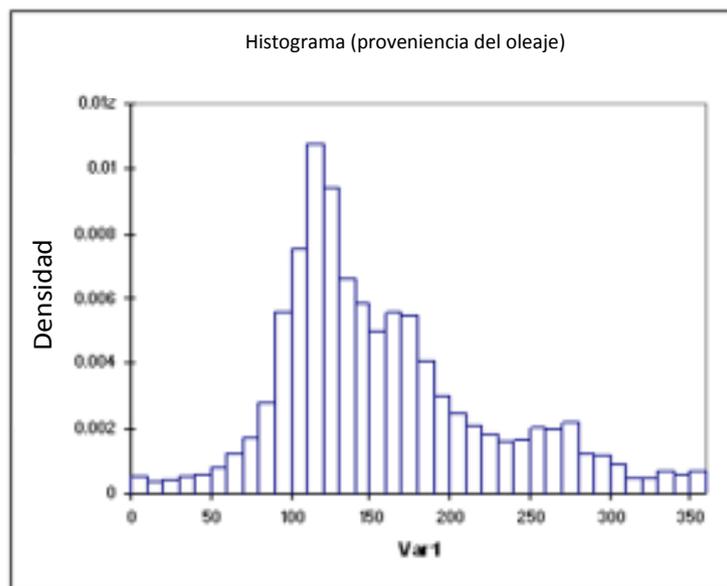
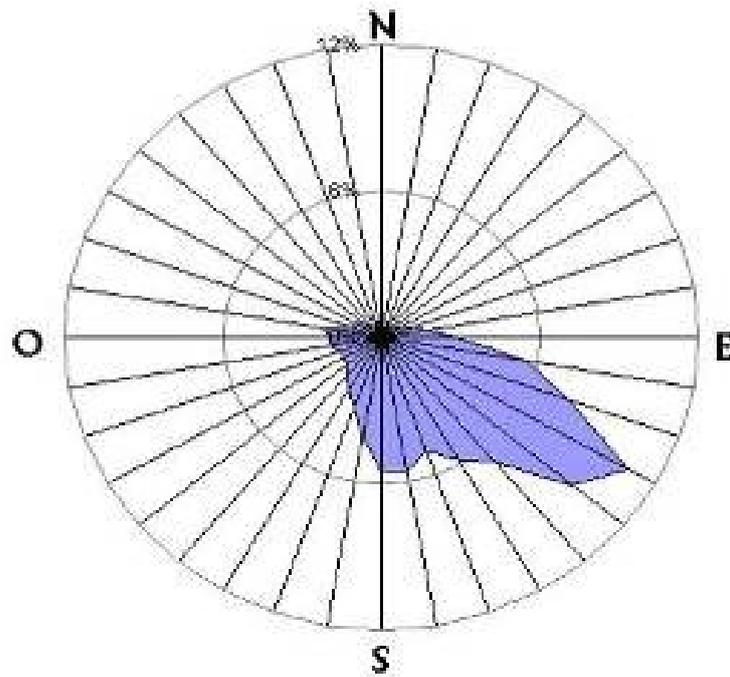


Figura 5.1. Rosa de distribución del oleaje e histograma de rumbos de proveniencia del oleaje del sensor de Punta Brava (periodo 23/12/2003 al 22/5/2006), sobre base de datos del Convenio IdeM-IMFIA (Panario *et al.*, 2008b). La serie utilizada comprende datos de diciembre 2003 a junio del 2006, y aunque puede sesgar el rumbo del oleaje, es la única disponible para la zona, por lo que se entendió pertinente su uso. Es de destacar que más allá de que la mayor parte del tiempo, el oleaje responde al swell, la dirección predominante obtenida es coincidente con la dirección de los vientos predominantes E-SE, particularmente durante el período estival.

medio. Expone más de 100 metros suplementarios de playa en condiciones de bajante. Carece de duna primaria y se encuentra limitada por la rambla costanera y espigones en ambos extremos. La dirección normal a su tangente es N68°E (Figura 5.2).

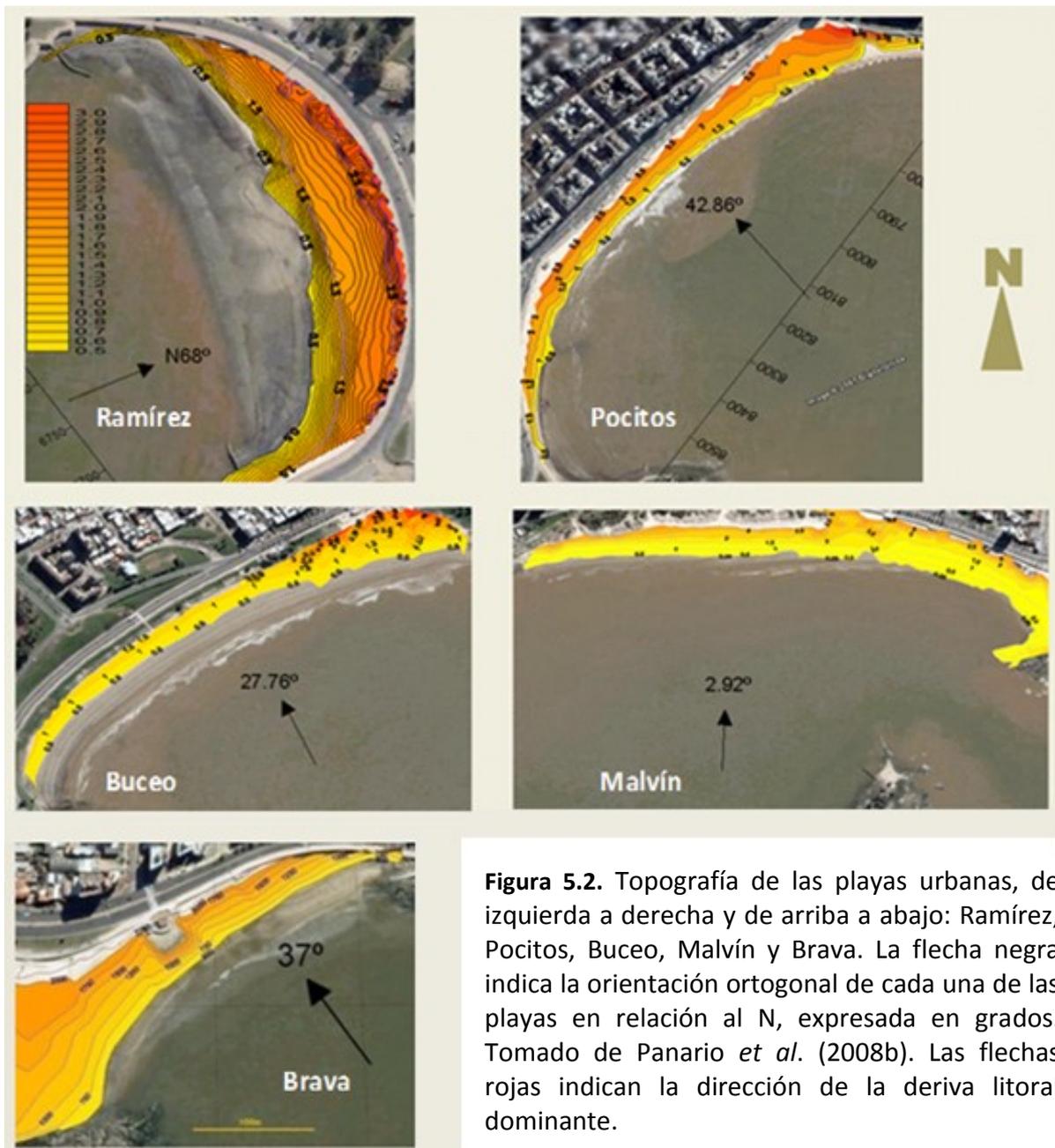


Figura 5.2. Topografía de las playas urbanas, de izquierda a derecha y de arriba a abajo: Ramírez, Pocitos, Buceo, Malvín y Brava. La flecha negra indica la orientación ortogonal de cada una de las playas en relación al N, expresada en grados. Tomado de Panario *et al.* (2008b). Las flechas rojas indican la dirección de la deriva litoral dominante.

- 5.1.1. Mineralogía

Las arenas de Ramírez son arenas medias cuarzo feldespáticas con anfíbol y piroxeno (**Tabla 5.1**), como minerales accesorios principales, la mineralogía se asemeja a la esperable a partir de gneises y anfibolitas de la Formación Montevideo *sensu* Preciozzi (Preciozzi et al., 1985).

A continuación de Ramírez, en dirección a Pocitos, existe un arco de costa rocosa sin playa, limitado por la Punta de las Carretas o Punta Brava y otro arco de costa rocosa entre ésta y la Punta de Trouville (**Figura 5.3**), ambos arcos rocosos a pesar de tener un gradiente de profundidad suave, casi carecen de costa con arena y cuando la misma está presente, se trata de retransporte de materiales quaternarios provenientes de diversas obras como terraplenados y ataguías. Se trata de una costa erosiva *sensu* Shepard (Thurman y Burton, 2003).

5.2. PLAYA POCITOS

Pocitos es un arco de playa delimitado por dos puntas rocosas (conocidas como Trouville y Kibón) es de perfil convexo hacia la berma y suave pendiente (1,8°), que se acentúa hacia el extremo norte (2,6° entre las cotas 0,5 y 1,5m), concomitante con su evolución en esa dirección de disipativa a intermedia. Carece de duna primaria y se encuentra limitada por la rambla costanera, con un sector húmedo en su parte media de 10 a 15 metros de ancho y uno seco de 65 metros de ancho. La dirección normal a su tangente es N43°W (ver **Figura 5.2**).

Tabla 5.1. Composición granulométrica de las arenas de Ramírez.

n=100 x 5		
Minerales	avg	std
cuarzo	58.2	3.3
feldespato	26.0	6.5
Anf + Px	8.8	5.5
biotita	3.2	4.3
otros	1.5	1.6
granate	0.6	1.3
circón	0.6	0.9
opacos	0.4	0.9
calcita	0.4	0.5
sillimanita	0.4	0.9

Tabla 5.2. Composición granulométrica de las arenas de Pocitos.

n=100 x 5		
Minerales	avg	std
cuarzo	65.5	10.6
feldespato	23.8	9.7
Anf + Px	5.1	2.1
biotita	0.8	0.8
otros	2.9	1.9
granate	0.4	0.9
circón	1.0	0.7
opacos	0.6	1.3
calcita	0.0	0.0
sillimanita	0.4	0.9

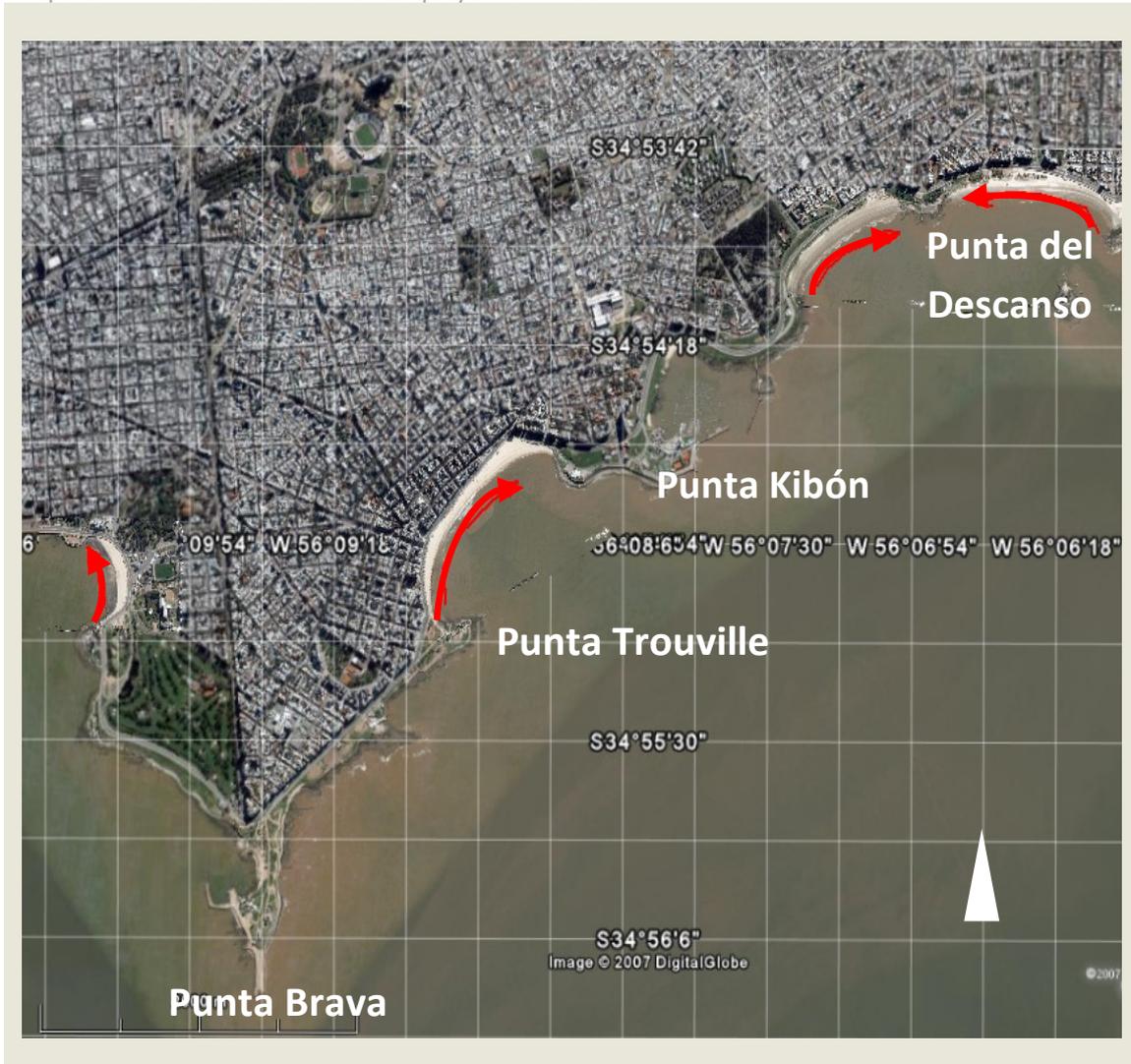


Figura 5.3. Interpretación de las tendencias granulométricas en términos de deriva litoral dominante para las playas de Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín (en orden de W a E).

- 5.2.1. Mineralogía

Las arenas de Pocitos son arenas medias cuarzo feldespáticas con anfíbol y piroxeno como minerales accesorios principales (**Tabla 5.2**). La mineralogía se asemeja a la esperable a partir de gneises y anfibolitas de la Fm. Montevideo *sensu* Preciozzi (Preciozzi et al., 1985).

5.3. PLAYA BUCEO

Buceo es una playa enteramente disipativa, prácticamente húmeda en toda su extensión en el invierno y de perfil erosivo predominantemente cóncavo, de suave pendiente (que varía entre 1,9 y 2,2 grados de W a E) con arenas cuarzosas compactadas de granulometría fina y pendientes. Presenta protodunas hacia el Este que es donde con más frecuencia existe una zona con playa seca; y una duna primaria

en formación hacia el parador hacia el W. Existen restos de estructuras y varios pluviales. La dirección normal a su tangente es N28ºW (ver **Figura 5.2**).

• 5.3.1. Mineralogía

Las arenas de *Buceo* son arenas finas y su composición mineralógica es cuarzo feldespáticas, con muy escaso anfíbol y piroxeno y también con muy escasos puntos de granate, opacos y calcita (**Tabla 5.3**). Han sido observados circón, estaurilita, leucóxeno y un punto de anfíbol sódico y de calcedonia botroidal. La mineralogía difiere a la encontrada en las playas anteriores tanto por el contenido elevado en cuarzo y feldespato como por el escaso contenido en ferromagnesianos.

5.4. PLAYAS MALVÍN Y BRAVA

Malvín se puede considerar dividida en dos arcos, uno perteneciente a Malvín (en sentido estricto) y el otro a la denominada Playa Brava, separados por un tómbolo denominado Punta del Descanso. El arco de playa denominado Malvín es una playa disipativa a intermedia y la segunda es reflectiva a intermedia. Presentan una pendiente de 2,4 grados en el sector en que se reconstruyó la duna primaria en el año 1991 y que varía entre 2,2 y 1,9 grados en el resto de la playa con perfil en este sector cóncavo, denotando que es un perfil erosivo. La dirección normal a su tangente es N3ºE (**Figura 5.2**).

La playa Brava incluye antiguas estructuras edilicias cercano a la Punta del Descanso y un colector en desuso de 100 metros de largo en su extremo E. Presenta una pendiente entre 2,2 y 2,8º grados, siendo en el sector próximo al tómbolo relativamente alto (hasta 2,5 msnm) y levemente convexo, con arena seca, que evoluciona a una

Tabla 5.3. Composición granulométrica de las arenas de Buceo.

n=100 x 5		
Minerales	avg	std
cuarzo	74.8	3.5
feldespato	20.3	2.4
Anf + Px	0.3	0.6
biotita	0.0	0.0
otros	3.9	0.2
granate	0.4	0.5
circón	0.2	0.4
opacos	0.4	0.9
calcita	0.0	0.0
sillimanita	0.0	0.0

Tabla 5.4. Composición granulométrica de las arenas de Malvín

n=100 x 5		
Minerales	avg	std
cuarzo	69.5	8.8
feldespato	25.2	5.9
Anf + Px	0.7	0.5
biotita	0.2	0.4
otros	3.2	3.4
granate	0.4	0.9
circón	0.2	0.4
opacos	0.2	0.4
calcita	0.0	0.0
sillimanita	0.2	0.4

playa baja, cóncava y de arena húmeda en el sector E, donde el oleaje expuso la pared exterior del antiguo colector instalado a comienzos del Siglo XX. La dirección normal a su tangente es N37°W.

- 5.4.1. Mineralogía

Las arenas de Malvín son arenas medias cuarzo feldespáticas, con muy escaso anfíbol y piroxeno, calcita, opacos y puntos de granate, circón, turmalina, andalucita y epidoto (**Tabla 5.4**). De la diversidad mineralógica se deduce un origen no local de parte de la muestra, atribuible a rocas y sedimentos en parte del W y mayoritariamente del E, como cuarzo de tono celeste que se considera diagnóstico de esa proveniencia. Otra fuente de sedimentos la representarían las arenas cuaternarias poco consolidadas de color rojo o amarillento, cuya aparición frecuente a nivel de la berma estaría denotando que parte de la arena de reposición es actualmente de este origen.

5.5. PLAYAS DE LA DESEMBOCADURA DEL ARROYO CARRASCO

Las playas *Carrasco* y *San José de Carrasco* ubicadas al W y E respectivamente de la desembocadura del Arroyo Carrasco son disipativas a intermedias. Las direcciones normales a las tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura son N26,3°W y N36°W respectivamente. San José de Carrasco, presenta una duna primaria degradada, con cortes y formación de *blowouts*.

- 5.5.1. Mineralogía

La composición mineralógica de esta playa es similar a Malvín y denota que la fuente principal es la deriva del E.

5.6. PLAYAS DE LA DESEMBOCADURA DEL ARROYO PANDO

Las playas *El Pinar* y *Neptunia* ubicadas al W y E de la desembocadura del Arroyo Pando son disipativas, evolucionando de disipativa a intermedia en El Pinar al alejarse de la desembocadura. El Pinar presenta dunas en toda su extensión con abundantes cortes, vinculables mayoritariamente a bajadas peatonales a la playa, en donde se forman *blowouts*.

La duna primaria ha desaparecido en toda su extensión, aunque muestra en algunos puntos señales de recuperación vinculadas generalmente a obras de mantenimiento (vallados). Las direcciones normales a las tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura son N24°W y N17,3°W respectivamente para el año 2002. Mientras que para el año 1928 las direcciones normales a las

tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura eran N9,2°W y N27,3°W respectivamente; y para el año 1960 (usado para los cálculos de aportes directos de las dunas al curso) las direcciones normales a las tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura eran N14,5°W y N31,2°W respectivamente.

- 5.6.1. Mineralogía

Por su mineralogía, al igual que las anteriores, Neptunia y El Pinar, denotan deriva del E como fuente principal.

Capítulo 6.

Resultados



INTRODUCCIÓN

Como ya se mencionó que expresaran Boak y Turner (2005), para comprender las tendencias actuales se debe elegir una escala temporal adecuada, o necesariamente se combinaran procesos de diferente origen que pueden no ser funcionales a la dinámica actual, por ello se destaca la complejidad de la elección de la extensión de las series a analizar, es decir:

- ¿porqué, cuando se analiza información antigua en playas de centros urbanos fuertemente consolidados, o en zonas con intervenciones que han modificado la dinámica del ciclo de la arena, es importante tener en cuenta que las perturbaciones provocadas por esas intervenciones, pueden haber generado cambios de tipo cualitativos, y se podría estar, desde el punto de vista de su dinámica, frente a otro sistema?;
- ¿cuánto podemos remontarnos hacia el pasado, y aún estar analizando el mismo sistema?

En efecto, durante el siglo XIX y también a comienzos del siglo XX, las playas urbanas presentaban dimensiones y estructura en planta completamente diferente a la que se observa a partir de mediados del siglo XX, y por tanto, si incorporamos esta cartografía e incluso alguna foto aérea muy antigua a nuestro análisis tendencial, en realidad se estarían uniendo tendencias que responden a diferentes procesos, y que pueden reflejar cambios en tendencias climáticas en el caso de los datos anteriores a 1850 (fin de la denominada "*Pequeña Edad del Hielo*" (Bracco et al., 2014, 2011; Iriondo et al., 2009; Piovano et al., 2009; Politis, 1984); o manifestar los efectos de procesos afectados por el Cambio Global; o ser la consecuencia de acciones antrópicas locales, como la construcción de la Rambla de Montevideo, con el relleno de sectores de arcos de playa o playas enteras, como ocurrió en el caso de la construcción de la denominada Rambla Sur (que se trazó uniendo de manera lineal la playa Ramírez y la Bahía) y sin duda modificó el transporte de sedimentos, más teniendo en cuenta que la mayor parte del relleno se realizó por refulado (relleno artificial) de arena de las proximidades del lugar (**Figura 6.1** y **Figura 6.2**).



Figura 6.1. La Rambla Sur de Montevideo, en construcción hacia 1930. Se aprecian las playas desaparecidas y el contorno de la por entonces futura terraza al mar, ubicada frente a Juan D. Jackson y Eduardo Acevedo. Foto: CMDF-IdeM.

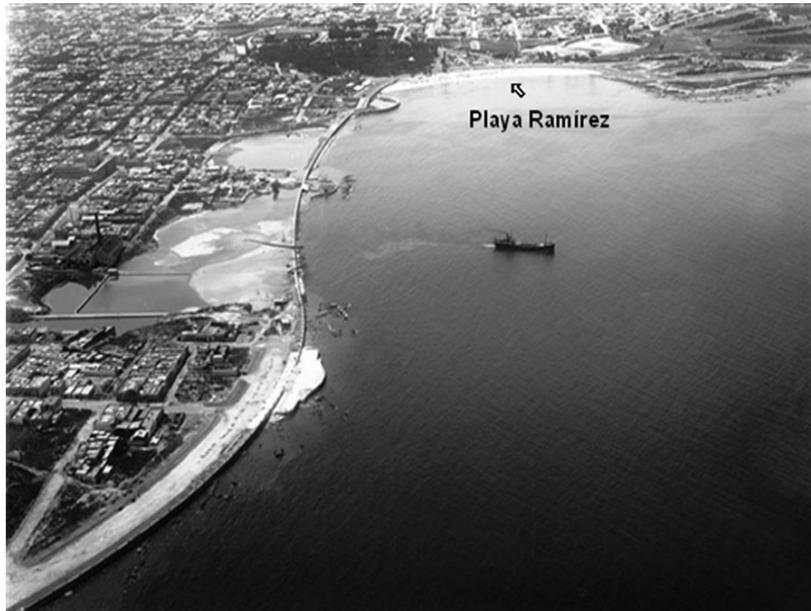


Figura 6.2. La Rambla Sur, consistió en 4.000 metros de rambla desde la calle Jackson hasta la escollera Sarandí, su construcción se realizó sin respetar la forma de la costa ni las dos playas existentes (Santa Ana y Patricios, una de las cuales formaba parte de la configuración original de Ramírez), e insumió unos 500.000 m³ de arena y piedra. Obsérvese como en la foto de abajo, la flecha blanca señala una de las playas que quedaría luego tapada por el relleno. Fotos: CMDF-IdEM.

Los análisis desarrollados en el marco de la investigación permitieron determinar los cambios de tendencias de la dinámica sedimentaria de la costa uruguaya producida por diferentes impulsores de cambio tanto naturales (ej. la tempestad del año 1923) como antrópicos: forestación de dunas, construcción de costaneras, canalización de humedales, lo que permitió separar las tendencias en diferentes periodos para cada playa en particular.

La elección del área de estudio requirió previamente la realización de una caracterización de la costa Uruguaya (**capítulo 6.1**) a los efectos de seleccionar sistemas representativos de problemas actuales; pero también identificar los problemas a presentarse en el futuro, ante la consolidación de todos los fraccionamientos costeros, que como un continuo van configurando una ciudad lineal para toda la costa uruguaya, desde el Departamento de Colonia hasta la frontera con Brasil.

El estuario del Río de la Plata ocupa la mayor parte de esta costa conformada por ambientes dominados por las olas, y se lo suele dividir en interior y exterior, la zona elegida del estuario exterior (denominada también zona frontal y por algunos autores estuario medio), es claramente una zona de transición con el océano, y en razón de ello fue el tramo seleccionado. Las intervenciones sobre ella pueden remontarse al menos al siglo XVIII, pudiendo ser analizadas a través de diversa documentación (**capítulo 6.2 y capítulo 6.4**).

Los resultados obtenidos permitieron a su vez establecer las relaciones entre la variabilidad del comportamiento de esta playas con la variabilidad climática y relacionarla con teleconexiones como el ENSO (**capítulo 6.3**).

Por último, como forma de sistematizar y comparar los resultados obtenidos para los sitios en estudio, se proponen indicadores cuali-cuantitativos, cuya pertinencia y utilidad deberá ser chequeada en futuras investigaciones (**capítulo 6.5**).

Referencias:

- Boak, E. H., Turner, I. L. (2005). Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4), 688-703. doi:10.2112/03-0071.1
- Bracco, R., del Puerto, L., Inda, H., Panario, D., Castiñeira, C., García-Rodríguez, F. (2011). The relationship between emergence of mound builders in SE Uruguay and climate change inferred from opal phytolith records. *Quaternary International*, 245, 62-73. doi:10.1016/j.quaint.2010.05.025
- Bracco, R., Inda, H., del Puerto, L., Capdepon, I., Panario, D., Castiñeira, C., García-Rodríguez, F. (2014). A reply to «Relative sea level during the Holocene in Uruguay». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 401, 166-170. doi:10.1016/j.palaeo.2013.10.012
- Iriondo, M., Brunetto, E., Kröhling, D. (2009). Historical climatic extremes as indicators for typical scenarios of Holocene climatic periods in the Pampean plain. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 283(3-4), 107-119. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.005
- Piovano, E. L., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M., Sylvestre, F. (2009). Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka. En: F. Vimeux, F. Sylvestre, M. Khodri (Eds.), *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions. From the Last Glacial Maximum to the Holocene* (Vol. 14, pp. 323-351). Netherlands: Springer. doi:10.1007/978-90-481-2672-9_14
- Politis, G. (1984). Climatic variations during historical times in Eastern Buenos Aires Pampas, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 2, 133-161.

Capítulo 6.1

Caracterización y dinámica de la costa uruguaya, una revisión

Ofelia Gutiérrez @, ¹, Daniel Panario¹

@ Autor corresponsal

1 - UNCIEP, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay.

En prensa en *Ciencias Marino--Costeras en el Umbral del Siglo XXI, Desafíos en Latinoamérica y el Caribe*. Editorial AGT Editorial S.A, México DF, México.

6.1. CARACTERIZACIÓN Y DINÁMICA DE LA COSTA URUGUAYA, UNA REVISIÓN

Resumen

Uruguay entre la desembocadura del Río Negro en el Río Uruguay y el arroyo Chuy, cuenta con 700 km de playas de ambientes dominados por las olas. La mayor parte de esos ambientes son playas arenosas. Esta costa, desde un punto de vista geomorfológico, es caracterizada a partir de la dirección de la deriva, la morfología, la dinámica, salinidad, los controles estructurales subacuáticos y las fuentes de sedimentos; en cuatro sectores: bajo Uruguay, estuario interior, estuario exterior y costa oceánica. Si bien en términos generales nuestra categorización es coincidente con las eco-regionalizaciones realizadas teniendo en cuenta factores como salinidad, profundidad, y su biota asociada, difiere en algunos límites.

Estos cuatro sectores a su vez se subdividen en tramos menores (unidades funcionales), determinadas a partir de la delimitación de celdas de circulación de sedimentos, siendo analizados los principales problemas detectados en cada una de ellas. Para cada unidad funcional son analizadas las fuentes de sedimentos, caracterizando cuando corresponde las causas de su déficit y siempre que es posible, identificando las intervenciones o procesos naturales que las provocan.

Los principales problemas detectados en la costa derivan de una visión estática que se tiene de ella, por lo cual se han realizado actividades contradictorias, ignorando en términos generales la gravedad de los procesos que los mismos han desencadenado. Entre las principales intervenciones inadecuadas se señala: la forestación de dunas, urbanizaciones densas y mal planificadas, obras de infraestructura incorrectamente diseñadas o emplazadas, extracción de arena para la construcción, a los que se suman procesos tales como la invasión de dunas por especies exóticas.

Palabras clave: Playas arenosas, caracterización de la dinámica costera, Uruguay.

6.1 Characterization and dynamic of the Uruguayan coast, a review.

Abstract

Between the confluence of the Negro River with the Uruguay River, and the Chuy Creek, Uruguay has 700 km of wave-dominated shoreline. Most of these shores are sandy beaches. From a geomorphological point of view, this coastline is classified by drift direction, morphology, dynamics, salinity, underwater structural controls and sediment sources, into four sectors: the lower Uruguay river, the inner estuary, the outer estuary and the oceanic coast. While our classification is generally consistent with the eco-regions defined by factors such as salinity, depth and associated biota, there are some differences in the sector limits.

These four sectors were subdivided into smaller areas (functional units) on the basis of defining sediment circulation cells, and the main problems in each were analysed. For each functional unit, sediment sources were analysed. Causes of deficits, where applicable, were characterised, and the interventions or natural processes causing them were identified wherever possible.

The main problems identified on the coast are derived from the view that it is a static ecosystem. Contradictory activities have taken place, generally ignoring the seriousness of the processes they have triggered. Among the main inappropriate interventions are: afforestation of dunes, dense and poorly planned urbanizations, improperly designed or sited infrastructure works, sand mining for construction, and other processes such as the invasion of dunes by exotic species.

Keywords: Sandy beaches, coastal dynamics characterization, Uruguay.

6.1 Caracterização e dinâmica da costa uruguaia, uma revisão

Resumo:

Uruguai entre a boca do Rio Negro no Rio Uruguai e o Arroio Chuí, possui 700 km de praias de ambientes dominados pelas ondas. A maior parte desses ambientes são praias arenosas. Esta costa, desde um ponto de vista geomorfológico, é caracterizada a partir da direção da deriva, da incidência das enchentes fluviais, morfologia, dinâmica, salinidade, controles estruturais subaquáticos e fontes de sedimentos, em três setores: baixo Uruguai, estuário (o qual por sua vez subdivide-se em estuário interior, médio e exterior) e zona atlântica. Enquanto em termos gerais a nossa categorização é coincidente com as eco-regionalizações realizadas levando em consideração fatores tais como a salinidade e profundidade, ela difere em alguns limites. Estes três setores por sua vez subdividem-se em áreas menores, determinadas a partir da delimitação de células de circulação de sedimentos. Sendo analisados os principais problemas detectados em cada uma delas. Para cada unidade funcional são analisadas as fontes de sedimentos, caracterizando as causas do seu déficit e sempre que foi possível identificando as intervenções ou processos naturais que as provocam. Os principais problemas detectados na costa derivam de uma visão estática dela, a partir da qual atividades contraditórias têm sido realizadas, ignorando em termos gerais, a gravidade dos processos que têm sido desencadeados. Dentre as principais intervenções inadequadas mencionam-se: o florestamento de dunas, urbanizações densas e mal planejadas, obras de infraestrutura incorretamente desenhadas ou posicionadas, a extração de areia para a construção, além da invasão de dunas por espécies exóticas.

Palavras chave: praias arenosas, caracterização da dinâmica costeira, Uruguai

6.1.1 Introducción

La evolución de las zonas costeras está estrechamente relacionada con los fenómenos relativos de ascensos y descensos territoriales y/o del nivel del mar, con los consecuentes desplazamientos de la línea de costa en el plano horizontal (Codignotto 1996), y consecuentemente a procesos de erosión y acreción; donde olas, corrientes y mareas van modelando las áreas costeras. La evolución de estas costas estuvo pautada por la alternancia de fases transgresivas y regresivas como resultado de la sucesión de paleoclimas y las variaciones del nivel del mar que caracterizaron al Holoceno.

A escalas temporales más reducidas (decenas de años o menores) la responsabilidad de las modificaciones de la línea de costa se asocia a la subida del nivel del mar relacionada al cambio climático. También pueden ser responsables de las variaciones observadas, oscilaciones de diferente período de recurrencia como teleconexiones, por ejemplo: la Oscilación del Atlántico Norte (Ortega et al. 2013), el ENSO (Gutiérrez et al. 2015), el ciclo de Rossby (Simionato et al. 2005, 2007), u otras que modifican la temperatura de las corrientes marinas o directamente la circulación atmosférica, si bien el conocimiento de su efecto sobre dicha relación es aún incipiente. Pero sin duda las intervenciones humanas han demostrado ser más significativas que los procesos naturales. La responsabilidad de cada uno de estos factores y sus eventuales acoplamientos son muy complejos, pero su estudio es clave para establecer escenarios futuros y medidas de adaptación o mitigación.

En el presente trabajo se adelantan algunas hipótesis de las incidencias de los diferentes impulsores de cambios en los sectores de costa analizados.

6.1.2 Caracterización

Esta región en general, presenta características ambientales excepcionales, derivadas de la interacción entre masas de agua de diferente proveniencia, lo cual origina una importante heterogeneidad ambiental (Brazeiro and Defeo 2006).

Dada la singularidad de cada sector de la costa uruguaya, para su análisis en profundidad se requiere una caracterización de la misma que permita determinar su respuesta a los diferentes impulsores de cambio y sus márgenes de resiliencia.

Uruguay cuenta con aproximadamente 700 km (medidos a escala 1:500.000) de playas de ambientes dominados por las olas, entre la desembocadura del Río Negro y el arroyo Chuy (Panario y Gutiérrez 2005, 2006, Gómez et al. 2008). Son ambientes micromareales con una amplitud de marea máxima de 50 cm y se encuentran

sometidos a vientos fuertes que superan los 100 km/h por más de 24 horas de proveniencia del S (S, SSW, SW y SSE), que producen elevaciones del nivel del mar que han llegado a superar los 3 metros sobre el nivel medio del mar (SNMM) a la altura de Montevideo (MTOP/PNUD/UNESCO 1979, Gutiérrez et al. 2015).

Se trata de playas mayoritariamente en equilibrio inestable (playas con deriva dominante), con forma de arcos espiral logarítmicos (Panario 1999, Gómez-Pivel et al. 2001, Panario y Gutiérrez 2005, Gadino et al. 2012), incluyendo también algunas playas de bolsillo (*pocket beach*), particularmente en el Departamento de Montevideo (como Ramírez, Pocitos, La Colorada, Santa Catarina, entre otras).

El transporte de sedimentos a lo largo del litoral es inducido por las olas que inciden directamente sobre la costa. En costas abiertas, estas olas denominadas de mar de fondo (*swell*) fueron generadas previamente por el viento en otro sitio, para el caso en el Atlántico Sur. A su vez, existen olas generadas localmente, que bajo ciertas condiciones meteorológicas, si bien pueden modificar la dirección del transporte, y tener un impacto morfodinámico sobre la playa, no condicionan la dirección neta del transporte.

Si se exceptúa el tramo que denominaremos bajo Uruguay (**Figura 6.3**), en el resto de la costa la deriva está comandada por el *swell*, generando en función del ángulo con que arriban a la costa, una deriva dominante hacia el NE a partir del arroyo Valizas, y hacia el W a partir de Cabo Polonio (MTOP/PNUD/UNESCO 1979, Gómez-Pivel 2001, Panario and Gutiérrez 2006, Terence 2013), con pocas excepciones. La costa argentina según Cavallotto (2002) tiene una configuración similar, donde a partir de Punta Piedras, que se comporta como un punto de concentración de las olas provenientes del SE, se indujo la formación de dos corrientes de deriva litoral con direcciones opuestas, una orientada al NW (hacia el Río de la Plata) y otra al SW (hacia la bahía de Samborombón).

Para caracterizar la estructura y funcionamiento de la costa uruguaya en sus diferentes sectores, se debe tener en cuenta: i) su exposición a las olas de mar de fondo, ii) las tormentas del cuadrante Sur, iii) la presencia de diferentes controles estructurales (cabos y plataforma de abrasión subacuática), iv) las diferentes fuentes y disponibilidad de sedimentos; así como también v) a los efectos de las intervenciones que sobre ella se han ejercido, como construcciones de infraestructura (puertos, escolleras, costaneras, espigones, entre otros) y alteraciones del ciclo de sedimentos (obras de infraestructura, extracción minera, forestación de dunas, etc.).

La morfología de una playa en un momento dado depende de las características del sedimento, de las condiciones del oleaje, de mareas y vientos, así como del estado morfológico precedente (Gómez et al. 2008). Al ser mayoritariamente ambientes de deriva, el equilibrio dinámico de estas playas depende del balance sedimentario que en los diversos sectores está representado por diferentes fuentes (Panario and Gutiérrez 2006).

Como antecedente debe tenerse en consideración, una zonificación ambiental en tres grandes ambientes o eco-regiones que fue propuesta por Mianzán et al. (2002): i) una zona Dulceacuícola (delta del Paraná - desembocadura del río Santa Lucía, ii) otra zona Fluvio-marina (Río de la Plata exterior), y por último, iii) una zona Oceánica con varias sub-zonificaciones, una de las cuales es aproximadamente coincidente con la usada en el presente análisis, la denominada “área costera” (Punta del Este – Chuy), que comprende la faja costera continental. Esta zonificación, fue propuesta teniendo en cuenta gradientes de salinidad y profundidad, y fue validada para la distribución

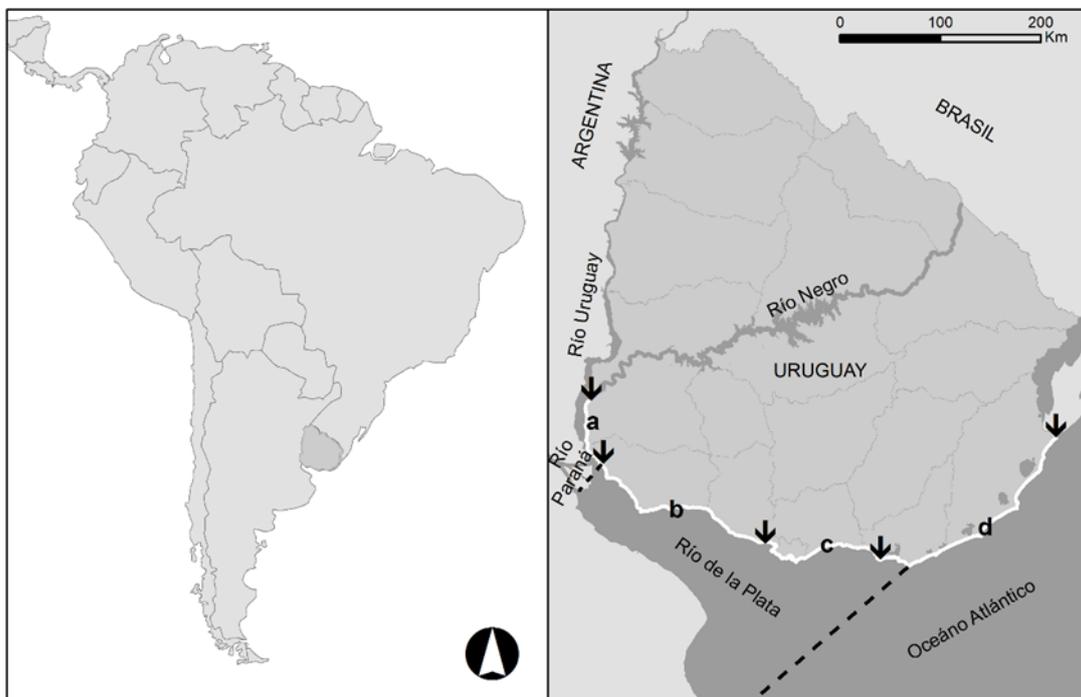


Figura 6.3. Izquierda: América del Sur. Derecha: Uruguay. La línea blanca representa la zona costera analizada en el presente capítulo, las flechas negras indican los límites de los 4 sectores: a) Bajo Uruguay, b) estuario interior, c) estuario exterior, d) costa oceánica. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.

espacial de biota bentónica, comunidades nectónicas y planctónicas (Mianzán et al. 2002). Estudios posteriores de mayor resolución espacial han confirmado estos patrones (Brazeiro et al. 2006, Brazeiro y Defeo 2006). Estas zonas se corresponden en términos generales, con los límites que permiten caracterizar la zona costera desde el punto de vista hidro-dinámico y geomorfológico.

La zona Dulceacuícola estricta, consideramos sin embargo que se extiende entre la desembocadura del Río Negro en el Río Uruguay y el delta del Río Paraná (aquí denominada bajo Uruguay), mientras el siguiente ambiente denominado “zona Dulceacuícola” por Mianzán et al. (2002) entre otros, si bien tradicionalmente se tipifica como dulceacuícola, debe señalarse que está influenciado por la salinidad del estuario en un gradiente decreciente entre Montevideo y Colonia (donde incluso el Río de la Plata es utilizado para proveer de agua potable).

En el presente trabajo desde el punto de vista de la dinámica costera, entre la desembocadura del Río Negro y el límite con Brasil, consideramos la subdivisión en 4 sectores: i) una primera denominada **bajo Uruguay**, ii) una segunda zona, **estuario interior**, delimitada entre la Punta Martín Chico y la desembocadura del río Santa Lucía; iii) una tercer zona, **estuario exterior**, delimitada entre dicha desembocadura y Punta Negra; y iv) una cuarta zona, marítima, denominada **costa oceánica**, entre Punta Negra y Chuy; considerando que desde un punto de vista geomorfológico a partir de Punta Negra se establece una zona de transición hacia el dominio oceánico (ver **Figura 6.3**).

i. El Bajo Uruguay

Lo que denominamos bajo Uruguay (**Figura 6.4**), es un complejo fluvial que si bien se encuentra sometido parcialmente a mareas, no sufre el ingreso de cantidades significativas de agua salada, como es el caso de otros subestuarios del Río de la Plata. A este ingreso, se opone la suma de caudales del Río Paraná y el Río Uruguay, que según Barros (2013) implica un caudal medio de $24.000 \text{ m}^3/\text{s}^{-1}$. Este ambiente, presenta pendiente casi nula y un profundo y relativamente estrecho canal de más de 10 metros de profundidad (Iriondo and Kröhling 2008), por el cual son evacuados los sedimentos gruesos que trascienden el delta del Río Uruguay.

Los sedimentos circulantes en la costa son atribuibles a la ingesión marina del 6.000 AP, durante el óptimo climático holocénico (Bracco et al. 2014 y referencias en él), que convirtió a la zona en un extenso golfo (Iriondo and Cerruti 1981) con abundantes sedimentos arenosos.

Las olas de mar de fondo no alcanzan este tramo, por tanto las playas existentes, son generadas por el oleaje producido por los vientos del S, SW y WSW. Los vientos del S, alcanzan a desarrollarse sobre un *fetch* de hasta 75 km (entre Fray Bentos y Punta Chaparro) que producen olas que generan una deriva hacia el N contraria a la

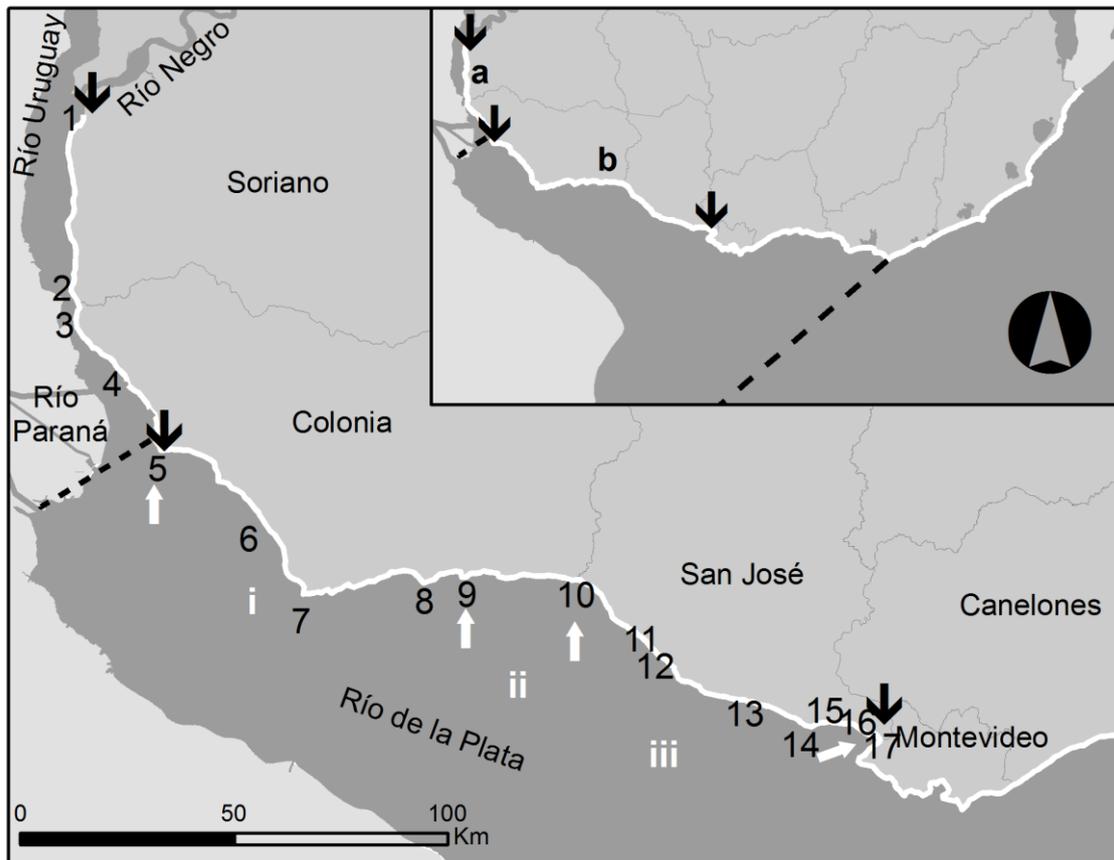


Figura 6.4. Bajo Uruguay y estuario interior. Recuadro superior: las flechas negras indican sus límites, a) bajo Uruguay: desembocadura del río Negro y Punta Martín Chico. b) estuario interior: Punta Martín Chico y desembocadura del río Santa Lucía. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.

Las flechas blancas delimitan las tres unidades funcionales del estuario interior, de izquierda a derecha: i) Punta Martín Chico - puerto de Juan Lacaze, ii) puerto de Juan Lacaze - desembocadura del arroyo Cufre, iii) desembocadura del arroyo Cufre – Río Santa Lucía.

Referencias geográficas: 1) Fray Bentos, 2) Punta Chaparro, 3) Nueva Palmira, 4) Punta Gorda, 5) Punta Martín Chico, 6) barranca de San Pedro, 7) ciudad de Colonia, 8) Punta Artilleros, 9) Juan Lacaze, 10) arroyo Cufre y playa Boca del Cufre, 11) barranca Arazatí, 12) barranca y arroyo San Gregorio, 13) barranca de Mauricio, 14) Punta del Tigre, 15) Playa Pascual, 16) playa Penino, 17) desembocadura del río Santa Lucía.

dirección de la corriente fluvial (Panario y Gutiérrez 2006, Muñoz-Pérez et al. 2015). Dicha corriente fluvial sobre la costa no tiene competencia para transportar las granulometrías presentes (arenas medias y gruesas).

Las fuentes de sedimentos para estas playas, están constituidas principalmente por el aporte de depósitos marinos remanentes de la ingresión (incluidas paleodunas holocénicas), y en menor cuantía de la reclasificación de los materiales sedimentarios poco consolidados incorporados por el retroceso de acantilados de materiales friables, que ocurre en algunos tramos durante las tormentas.

La playa subacuática está conformada por una planicie de abrasión de la ingresión holocénica, de rocas sedimentarias con capacidad de controlar la altura de la ola. Estas rocas soplan de edad variable pero todas pertenecientes al Cenozoico (Oligoceno a Pleistoceno).

Las arenas subacuáticas de este sector han sido explotadas como áridos para la construcción por decenios, lo que motivó una desaturación del flujo, que unido al carácter dulce del agua, produjo la colonización por macrófitas de la playa subacuática, y finalmente la instalación de un monte ripario en la playa subaérea, que la ocupó casi totalmente en un período de treinta años (Panario and Gutiérrez 2005).

Al sur de Nueva Palmira y en las proximidades de Punta Gorda las barrancas activas constituyen un rasgo notable, alcanzando en Punta Gorda alturas de 40 m y presentándose como paredes escalonadas a verticales que delimitan una playa muy angosta de 10 a 20 m de ancho (Giordano and Lasta 2004). Existen extensos campos de dunas que alcanzan su máxima expresión al este de Punta Gorda y al sur de Carmelo, (Giordano and Lasta 2004).

ii. El Estuario Interior

La segunda zona, denominada estuario interior (entre la Punta Martín Chico y la desembocadura del río Santa Lucía, ver **Figura 6.4**), puede caracterizarse por baja energía de ola, pendiente de playa subacuática débil, control estructural subacuático muy significativo, y circulación costera del tipo lacunar con abundantes barras arenosas subacuáticas efímeras¹² desarrolladas con orientación sub-perpendicular a la costa.

^{12/} Estas barras arenosas que se generan en el estuario interior, a diferencia de las que se desarrollan en los sistemas lacunares, son destruidas por los temporales.

Las playas son disipativas con perfil cóncavo en la playa baja, que se torna convexo hacia la berma de tormenta cuanto se encuentra presente esta estructura, al comportarse como disipativa a intermedia en condiciones de tormenta.

La duna primaria cuando presente, tiene una expresión temporal reducida siendo eliminada en años con mayor frecuencia de vientos del sur, probablemente asociados a eventos “La Niña” (Gutiérrez et al. 2015).

La evolución de esta costa, como sugiere Cavallotto (2002) para su similar argentina, estuvo condicionada por las fluctuaciones del nivel del mar, sobre todo por el proceso de progradación que acompañó al último descenso relativo del nivel del mar, determinando una morfología costera, que es responsable del aporte y transporte del sedimento.

El estuario interior se caracteriza por su poca profundidad fuera de los canales de navegación, los que coinciden con un sistema de paleocauces fluviales entallados por dos grandes ríos, el Uruguay próximo a la costa uruguaya y el Paraná más al sur, durante las regresiones marinas (MTOP/PNUD/UNESCO 1979). Estas regresiones fueron de aproximadamente -130 a -120 metros respecto al presente (Corrêa 1996) ocurridas en el entorno de 18.000 a 14.000 AP.

Las mareas y la deriva han transportado sedimentos hacia el estuario interior por milenios, generando bajo fondos arenosos conocidos como “bancos”, de alguno de los cuales se han extraído enormes volúmenes de arena.

Desde el punto de vista de la provisión de sedimentos se destacan dos fuentes principales: i) sedimentos en tránsito desde el este traídos por efecto combinado de las mareas y la deriva dominante, y ii) sedimentos provenientes de los acantilados cenozoicos, cuya altura supera los 25 m en algunos sectores y según Panario (2000) y Goso et al. (2011) retroceden entre 0,5 y 1 m/año. En Barranca de Mauricio, departamento de San José, dicho retroceso puede estimarse en unos 1.000 m para los últimos 1.400 años (Panario and Gutiérrez 2006), estimación realizada atendiendo a la simetría del relieve continental afectado por dicha erosión. Este retroceso estaría generado y anteriormente frenado, por la existencia de bajos fondos que se proyectan hacia el estuario como cabos subacuáticos (denominados bancos en las cartas náuticas), lo que podría explicar que el retroceso no se haya producido en forma más pronunciada cuando el nivel del estuario fue hasta 5 metros mayor que el actual, hace sólo 6.000 años (según proponen los modelos regionales de Martin y Suguio (1992), y Bracco et al. (2014).

Los materiales provenientes del estuario son sedimentos finos cargados a la playa baja por las olas de mar de fondo. La berma cuando presente, está compuesta por sedimentos gruesos respondiendo a tormentas del SW. La proveniencia de estos sedimentos es mayoritariamente de la Formación Raigón de origen fluvial (Bossi and Navarro 1991), por efecto del retroceso de los acantilados que comprenden esta formación y respondiendo a una deriva de dirección opuesta a la anterior generada por estos vientos fuertes.

Según Giordano y Lasta (2004) para el primer tramo del estuario interior, los depósitos holocénicos se encuentran confinados conformando una línea de costa baja y estrecha, caracterizada por la presencia de humedales y dunas que se desarrollan por delante de la paleocosta con la presencia, casi continua, de acantilados generalmente activos. Más hacia el este, la costa se hace más amplia y se caracteriza por la alternancia de barrancas activas (San Pedro, Arazatí, San Gregorio, Mauricio, entre otras). Existen a su vez, extensos campos de dunas que alcanzan su máxima expresión, en la zona este de Colonia (hasta Punta Artilleros), y en los alrededores de San Gregorio, Punta del Tigre y Playa Pascual.

El estuario interior, puede subdividirse en tres unidades funcionales ¹³ separadas por el puerto de Juan Lacaze y por la escollera de Bocas del Cufre; ambas intervenciones con capacidad de interrumpir la deriva.

- Punta Martín Chico - puerto de Juan Lacaze

En este tramo, la desaturación de la corriente longitudinal parece más evidente que en los otros sectores del estuario interior, lo que ha generado la colonización parcial por vegetación, de la playa subacuática y ocasionalmente la subaérea (Panario y Gutiérrez 2005, Gómez et al. 2008), obligando a retirarla mecánicamente en temporada de verano. Esta desaturación puede atribuirse a la permanente extracción de áridos desde barcasas, actividad que se viene desarrollando desde principios del siglo pasado.

^{13/} La unidad funcional en este trabajo se entiende como un tramo de costa en que todos los ambientes presentes se comportan de manera similar incluso desde un punto de vista de los ecosistemas presentes, o son tramos de costa cuyas playas se encuentran conectadas por el flujo de sedimentos por deriva y separadas de otras por cabos impermeables a dicho tránsito. Un ejemplo de las primeras son tramos de costa rocosa con playas de bolsillo intercaladas.

- Puerto de Juan Lacaze - desembocadura del arroyo Cufré

El tramo comprendido entre Juan Lacaze y la desembocadura del arroyo Cufré ha sufrido procesos de erosión costera a partir de la década de 1990, cuando se construyó una escollera en dicha desembocadura. Dicha escollera según IMFIA (1998) implicó la retención de 30.000 a 50.000 m³/año⁻¹ y como consecuencia en las playas en la dirección del transporte se produce una desaturación del flujo y la consiguiente erosión de playas en todo el tramo.

Como respuesta a la erosión que se produjo hacia el oeste, y ante fuerte presión social, en el año 2014 se efectúa un *bypass* mecánico de sedimentos, que de mantenerse en el tiempo puede colaborar en revertir los procesos observados.

- Desembocadura del arroyo Cufré – río Santa Lucía

Esta unidad funcional se puede caracterizar en la mayor parte de su recorrido por playas con acantilados de entre 9 y 20 metros de altura con retrocesos que pueden estimarse en 1 m/año (Panario and Gutiérrez 2006). Sin embargo, debido a la interrupción de la deriva por la escollera, se favoreció localmente la ampliación de las playas ubicadas al este de la misma, deteniendo el retroceso de la línea de costa en sus proximidades.

El tramo más próximo a la desembocadura del río Santa Lucía está representado por playa Penino, que es la playa más disipativa de la costa uruguaya con un perfil de muy baja pendiente tanto en la playa subaérea como en la subacuática. Esta característica se vincula, al enorme volumen de arena muy fina exportada fuera del delta del río Santa Lucía, formando el denominado “Banco del Santa Lucía” (con una extensión hacia el sur de 3,5 km y que llega a aflorar en bajamar) y su transporte en dirección oeste.

ii. El Estuario exterior

El estuario exterior se extiende entre la desembocadura del río Santa Lucía y Punta Negra (**Figura 6.5**).

El límite del estuario exterior es situado habitualmente en Punta del Este, tomando en cuenta aspectos tales como salinidad, profundidad y la comunidad biológica asociada. En el presente trabajo, se lo extiende hasta Punta Negra, dado que a partir de ella, se establece una zona de transición hacia el dominio oceánico. A partir de esta punta, desde un punto de vista geomorfológico, dejan de ser tan significativos los controles

subacuáticos de las planicies de abrasión sobre el oleaje incidente, y aumentan significativamente los aportes de sedimentos desde el mar.

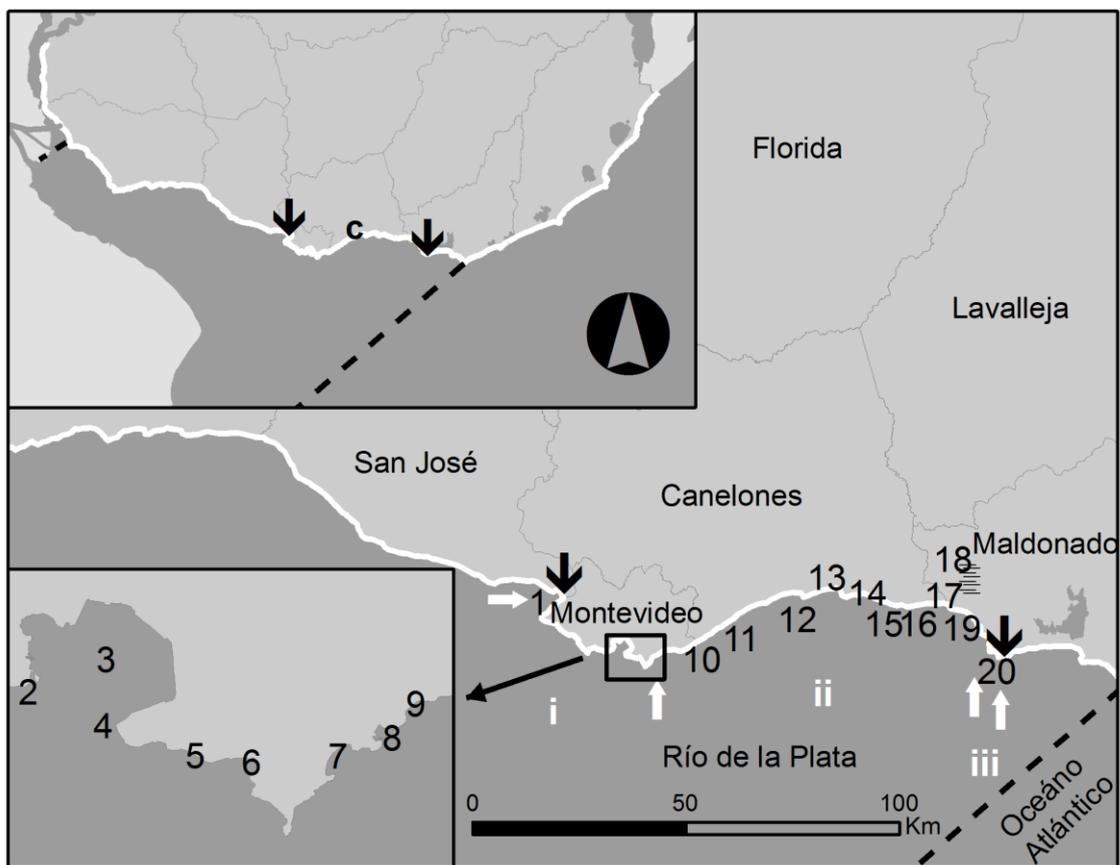


Figura 6.5. Estuario exterior. Recuadro superior: las flechas negras indican sus límites, desembocadura del río Santa Lucía y Punta Negra. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.

Las flechas blancas delimitan las tres unidades funcionales del estuario exterior, de izquierda a derecha: i) río Santa Lucía – puerto del Buceo, ii) puerto del Buceo – Piriápolis, iii) Piriápolis – Punta Negra.

Referencias geográficas: 1) desembocadura del río Santa Lucía, 2) Punta Lobos, 3) bahía de Montevideo, 4) Punta Sarandí, 5) Rambla Sur, 6) playa Ramírez, 7) playa Pocitos, 8) puerto del Buceo, 9) playa del Buceo, 10) arroyo Carrasco, 11) arroyo Pando y playa Pinamar, 12) Atlántida, 13) arroyo Solís Chico y playa La Floresta, 14) arroyo del Bagre y playa San Luis, 15) Biarritz, 16) Balneario Argentino, 17) Jaureguiberry, arroyo Solís Grande y Balneario Solís, 18) Sierra de Ánimas, 19) Bella Vista, arroyo Tarariras y playa Verde, 20) Piriápolis, Punta Colorada y Punta Negra.

Un tramo importante de esta costa comprende, como unidades morfogeoestructurales más importantes, al Graben del Santa Lucía (fosa actualmente inactiva) y al borde sudoccidental de Sierras del Este (Panario et al. 2014). Según Giordano y Lasta (2004) los depósitos holocénicos se encuentran confinados a los valles fluviales (depósitos fluviales, aluviales y coluviales) y al área costera (playas y depósitos eólicos).

La zona comprendida entre la desembocadura del río Santa Lucía y Punta Negra, reviste una gran variedad de situaciones, que van desde sectores con playas que funcionan como unidades independientes (playas de bolsillo) sin interacciones sedimentarias significativas, a unidades funcionales que al ser playas de deriva se relacionan por el tránsito sedimentario, estando delimitadas por cabos que por sus características resultan impermeables a dicho tránsito.

El estuario exterior, puede subdividirse en tres unidades funcionales separadas por el puerto del Buceo y por Piriápolis; ambas intervenciones con capacidad de interrumpir la deriva.

- Río Santa Lucía – puerto del Buceo

Esta unidad funcional, entre el río Santa Lucía y el puerto del Buceo, está compuesta por numerosas playas de bolsillo y costas rocosas. Es junto con los sectores próximos a Piriápolis uno de las áreas de la costa uruguaya con extensos arcos de costa rocosa, evidenciando una escasa disponibilidad de sedimentos, dado que el gradiente de profundidad permitiría la formación de playas.

Entre el río Santa Lucía y la bahía de Montevideo, se observan playas de bolsillo de muy escasa longitud, situadas mayoritariamente en bahías profundas, lo que las torna vulnerables ante la extracción de áridos, que en forma artesanal e informal se sigue produciendo. Puede considerarse que todo este conjunto de playas de bolsillo son funcionalmente independientes a diferencia de lo que ocurre en casi todo el resto de la costa. La fuente de sedimentos de estas playas ha sido el atrito de las rocas cristalinas de la Formación Montevideo, y el aporte de pequeñas cañadas que desembocaban en ellas y que hoy se encuentran mayoritariamente entubadas.

Entre Punta Lobos y Punta Sarandí, la costa se abre hacia el norte en forma de herradura, conformando la bahía de Montevideo que ocupa un área deprimida del basamento cristalino (Giordano and Lasta 2004).

En el sector de la bahía de Montevideo, por efecto del puerto y actividades conexas, han desaparecido las playas allí existentes a comienzo del siglo XX (la última de las

cuales fue playa Capurro), y al este del puerto, otras playas fueron eliminadas por el trazado de la costanera (Rambla Sur).

Existen en este tramo, dos playas relativamente extensas, que pueden ser caracterizadas como de bolsillo situadas a ambos lados de una proa continental (Ramírez y Pocitos). Estas dos playas, han tenido una evolución orientada por trabajos de restauración del gobierno local (desde por lo menos la primera mitad del Siglo XX), y el efecto contrapuesto de la subida del nivel medio del mar (Gutiérrez et al. 2015).

- Puerto del Buceo – Piriápolis

El siguiente tramo (unidad funcional) comienza con la playa del Buceo (ubicada a continuación del puerto)/ y se extiende hasta Piriápolis. Se trata del sector del estuario (zona de transición) compuesto por un continuo de ciudades balnearias con un territorio totalmente parcelado, pero con un factor de ocupación del suelo de densidad variable, fluctuando entre zonas urbanas completamente consolidadas y otras con edificaciones dispersas, que suelen conectarse por una avenida costanera, la que presenta pocas interrupciones en sus aproximadamente 100 km de longitud.

Tal estructura urbana ha generado problemáticas diversas como elevación de la freática, proliferación de pluviales, generación de cubetas de deflación (*blowout*) por destrucción de vegetación psamófito en los accesos a las playas, invasión de especies exóticas, destrucción de amplios sectores de duna primaria, extracción de áridos hasta fines del siglo XX, forestación de dunas que intercambiaban arena con el mar fundamentalmente a través de las vías de drenaje (Panario 1999) o por detrás de puntas rocosas (Gómez-Pivel 2006).

Cuando es la duna secundaria la que ha quedado en primera línea, dado que su altura no está en equilibrio con la velocidad del viento y que además se encuentran parcialmente forestadas con *Acacia longifolia*, las mismas sufren frecuentes cortes (*blowout*) y mantienen un perfil frontal vertical lo que aumenta su vulnerabilidad. Si bien los tramos en que se han realizado trabajos de reconstrucción de duna primaria han sido exitosos, estos no se han generalizado en Uruguay.

Las forestaciones con especies exóticas realizadas en campos dunares aledaños a puntas rocosas o a desembocaduras a los efectos de su posterior urbanización, impidió la recirculación de sedimentos, lo que se evidenció en procesos acelerados de retroceso de la línea de costa. Como respuesta técnica de uso en la época, fueron

construidos espigones¹⁴ en varias playas con notorias consecuencias, al interrumpir parcialmente la deriva litoral dominante y expulsar por efecto de corrientes de retorno, parte de los materiales arenosos hacia el mar, los que alcanzarán la costa lejos de su sitio de partida.

En esta unidad funcional, drenajes como los cursos fluviales Carrasco, Pando, Solís Chico y Solís Grande (algunos, aun asociados a remanentes de campos dunares), condicionan la dinámica de amplios sectores de playas muy sensibles a cambios en sus cuencas y en particular en las zonas vinculadas a las desembocaduras (Gutiérrez and Panario 2005, 2006), su estudio resulta clave para interpretar la evolución que han tenido las playas del estuario exterior y su zona de transición, prever su evolución futura y establecer medidas de manejo.

Salvo el caso de la playa del Buceo, que es netamente disipativa (Panario et al. 2008), el resto se trata de arcos de playa del tipo espiral logarítmica, siendo disipativas en su extremo este, evolucionando a reflectivas en dirección al cabo que intercepta la deriva (MTOPI/PNUD/UNESCO 1979). El transporte tiende a acumular sedimentos en la punta rocosa y por tanto esta acumulación modifica el ángulo de incidencia del *swell*. Al progradar la línea de costa, la playa va ocupando aguas más profundas y por tanto descargando más energía en el *swash* (zona de saca y resaca). Se alcanza un equilibrio dinámico cuando por el proceso de acreción de la playa, el *swell* llega casi paralelo a la costa, formando una playa de *swash* de granulometría gruesa, tanto como lo permita el tipo de sedimentos en tránsito para ese punto en particular (Panario and Gutiérrez 2006). Este comportamiento demuestra que en las playas uruguayas que evolucionan de disipativas a reflectivas, es el ángulo del *swell* junto a la profundidad del sustrato rocoso, los factores que condicionan el tipo de ambiente, y no sólo como postula Short (1996), la existencia de sedimentos de una granulometría dada o el nivel de energía acorde al parámetro omega (o número de Dean, Ω) que fue utilizado por Wright et al. (1985) para describir un modelo simple de clasificación de playas en reflectivo, intermedio y disipativo.

El comportamiento de esta unidad funcional ha sido condicionado por el efecto de las modificaciones en las fuentes de sedimentos. Así el tramo aledaño a la desembocadura del arroyo Carrasco, ha mostrado recuperación por obras de canalización en su cuenca baja, cuya profundización alcanzo arenas holocénicas que aumentaron el aporte de

^{14/} Los espigones pueden ser una solución adecuada para otras condiciones. Para su correcto funcionamiento, se requiere que el principal (y más abundante) aporte a la playa, sean los sedimentos subacuáticos, que arrimados por las olas son retenidos por estas estructuras.

sedimentos a la playa (Gutiérrez 2010). El sector de costa vinculado al arroyo Pando, donde se producía un fuerte intercambio entre dunas y curso fluvial, ha tenido un retroceso continuo desde la década de 1950 (Gutiérrez and Panario 2005), aunque en la dirección de la deriva la playa se recupera seguramente a partir del abanico subacuático generado por la descarga del arroyo, y el retroceso de la zona aledaña a la desembocadura.

El tramo entre la playa de Atlántida y el arroyo Pando, sufrió fuertes procesos erosivos quizá como resultado de la forestación temprana de los campos de dunas allí ubicados que intercambiaban arena con la playa. Como respuesta a ello, en la década de 1970 se comenzaron a construir espigones (MTO/PNUD/UNESCO 1979), los que no resultaron una solución adecuada, y fueron transfiriendo la erosión hacia los sectores ubicados más al oeste (Gutiérrez and Panario 2005). El mismo proceso se repitió en la Floresta, otro de los balnearios antiguos del estuario (Gómez et al. 2008). Para playas del Departamento de Canelones se han llegado a reportarse hasta 2 m/año de retroceso (Goso et al. 2011).

Debe destacarse que según puede apreciarse por fotos aéreas y memoria ciudadana; la mayoría de las playas del estuario a partir de Atlántida contaban con una barra subacuática permanente, la cual se ha tornado discontinua en tiempo y espacio, o incluso ha desaparecido total o parcialmente, denotando una desaturación creciente del flujo y por tanto, el aumento de la vulnerabilidad de la costa.

La desaturación del flujo se manifiesta además en la desaparición de la duna primaria entre el arroyo Carrasco y el Pando, sustituida por protodunas que evidencian la posibilidad de su recuperación, no obstante, a partir de Pinamar y hasta Atlántida, en amplios sectores, con posterioridad a la década de 1960, las olas han alcanzado la escarpa de la paleocosta holocénica, tornándola activa en diversos tramos, a partir de la desaparición de las dunas que las protegían hasta la segunda mitad del Siglo XX.

De Atlántida al arroyo Solís Chico existe una mayor estabilidad, aunque la duna primaria se encuentra muy afectada por abundantes cubetas de deflación, cuyo lóbulo frontal en invierno suele interrumpir la costanera.

A partir de la desembocadura del arroyo Solís Chico y hasta la desembocadura del arroyo del Bagre, se repite la situación de acantilados activos por desaparición del cordón dunar y las dunas secundarias. Entre la playa San Luis y Balneario Argentino se repite un tramo de mayor estabilidad, aunque con extensos sectores con protodunas en lugar de duna primaria.

El tramo entre Balneario Argentino y el Balneario Solís inclusive, muestra barrancas activas en casi toda su extensión. El retroceso de las barrancas que se extienden entre Balneario Argentino y Jaureguiberry, es anterior a cualquier intervención significativa en los ambientes costeros del área. En Balneario Argentino y Balneario Solís, las barrancas están conformadas por limos pleistocénicos, pero mientras en el primero tienen muy poca altura sobre el nivel medio del mar (menos de 2 metros), en el segundo se expresan con aproximadamente 9 metros de altura, denotando que el proceso de erosión, puede vincularse a subsidencia. Entre ambos balnearios, el material de las barrancas activas (del entorno de los 7 metros) están conformado por arenas rojizas pleistocénicas, presumiblemente más modernas que los limos circundantes. A su vez, en Balneario Solís existen rocas intrusivas aflorantes, que sólo vuelven a aparecer hacia el oeste en Cuchilla Alta.

El retroceso del tramo Balneario Argentino y Balneario Solís ha sido muy intenso con anterioridad a la década del 1970, y más lento con posterioridad lo que alentaría a analizar si existe relación con la Oscilación del Atlántico Norte, que como ha sido puesto de manifiesto por Ortega et al. (2013) tiene incidencia en aspectos tales como temperatura y salinidad en nuestras costas, y por tanto al igual que el ENSO podría implicar mayor frecuencia de temporales del S.

El tramo de costa entre Balneario Solís y playa Verde es un sector constituido por una berma de alto ángulo, conformada por cantos rodados de hasta 15 cm de diámetro, cuya abundancia se asocia a pequeñas vías de drenaje que nacen a más de 300 metros de altura (Sierra de Ánimas) y a menos de 10 km de su desembocadura, y por tanto con competencia para transportar hasta la costa clastos de gran tamaño. En la actualidad casi todas estas vías de drenaje se encuentran represadas, con la excepción del arroyo Tarariras, por lo cual han perdido parcialmente su capacidad de aporte a la costa de sedimentos gruesos. A su vez, una falta de comprensión de la importancia de estos materiales en la estabilidad del sistema, hizo que se autorizara la extracción artesanal por más de 60 años de estos materiales de la propia playa. Este conjunto de acciones comienzan a manifestarse como erosión costera.

La playa en la mayoría de los casos, presenta control subacuático por plataformas de abrasión labradas en diferentes materiales, aunque mayoritariamente materiales sedimentarios oligocenos de la Formación Fray Bentos, y en algunos tramos rocas cristalinas (San Luis) y en otros pleistocénicas (Biarritz, Balneario Solís y Argentino).

El tramo de costa entre Bella Vista y Piriápolis está compuesto por una serie de pequeños arcos sometidos a deriva y tramos de costa rocosa de escasa profundidad,

incluso con macrófitas enraizadas (*Spartina* sp.) lo que denota un notorio déficit de sedimentos en el área. El último sector lo constituye la playa de Piriápolis, una de las ciudades balnearias más antiguas del país. La costanera de la misma se construyó por sobre la duna primaria, por lo que sólo conserva una estrecha franja arenosa que se mantiene en función de carecer de pérdidas importantes por deriva.

En todo este sector del estuario, la arena en la playa subacuática representa una franja relativamente estrecha, encontrándose hacia el mar, fondos fangosos o rocosos por lo que la estabilidad del sistema es función de los aportes por deriva y desde el continente, siendo negligibles los aportes desde el estuario.

- Piriápolis – Punta Negra

La unidad funcional comprendida entre Piriápolis (Punta Fría) y Punta Negra cuenta con dos arcos de playa relativamente estables separados por un cabo impermeable al tránsito de sedimentos, Punta Colorada.

Si bien el límite del Río de la Plata se ubica en Punta del Este, a los efectos de esta caracterización, se considera que el tramo entre Punta Negra y Punta del Este tiene condiciones de energía similares al ambiente oceánico, al ser poco significativo el control estructural sub-acuático y significativos los aportes desde el mar.

ii. La Costa Oceánica

Desde un punto de vista geomorfológico a partir de Punta Negra se establece una zona de transición hacia el dominio oceánico (**Figura 6.6**). Los controles estructurales cuando presentes están conformados por lumaquelas a cemento calcáreo del Pleistoceno, situados a 3 metros por debajo del nivel medio del mar, lo que permite la aproximación de olas de mayor tamaño, generando en los arcos más extensos playas expuestas de carácter netamente reflectivo en la mayor parte de su extensión.

Al igual que en el estuario, los cabos (hasta Cabo Polonio) presentan una playa reflectiva al este y una disipativa al oeste, que en esta zona se torna reflectiva a poca distancia del cabo. A partir de Cabo Polonio, esta relación se invierte.

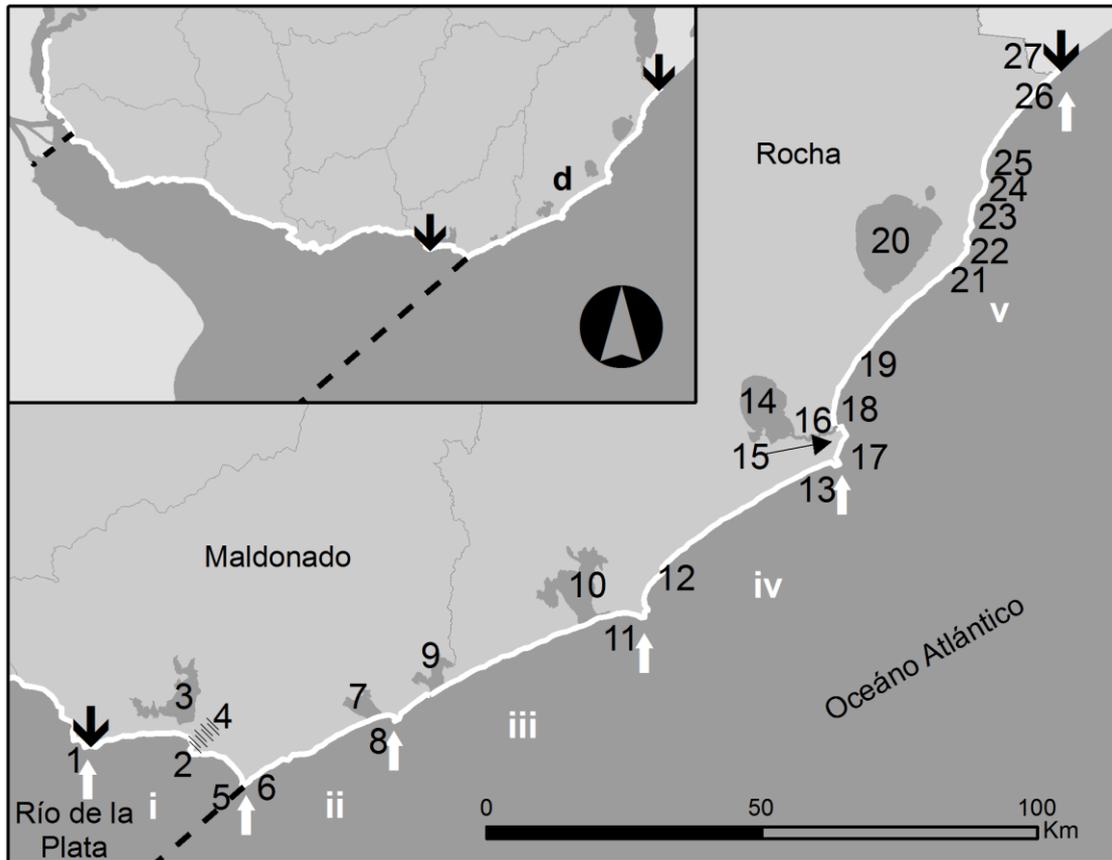


Figura 6.6. Costa oceánica, Recuadro superior: las flechas negras indican sus límites, Punta Negra y Chuy. La línea punteada negra señala los límites del estuario del Río de la Plata.

Las flechas blancas delimitan las cinco unidades funcionales de la costa oceánica, de izquierda a derecha: i) Punta Negra – Punta del Este; ii) Punta del Este – José Ignacio; iii) José Ignacio – La Paloma; iv) La Paloma - Cabo Polonio; v) Cabo Polonio – Chuy.

Referencias geográficas: 1) Punta Negra, 2) Punta Ballena, 3) laguna del Sauce, 4) Sierra de la Ballena, 5) Punta del Este, 6) arroyo Maldonado, 7) laguna José Ignacio, 8) José Ignacio, 9) laguna Garzón, 10) laguna Rocha, 11) puerto y ciudad de La Paloma, 12) Costa Azul, 13) Cabo Polonio, 14) laguna de Castillos, 15) cerro Buena Vista, 16) arroyo Valizas, 17) playa La Calavera, 18) Aguas Dulces, 19) La Esmeralda, 20) laguna Negra, 21) Cerro de la Viuda, 22) Cabo Verde (rebautizado Punta del Diablo), 23) Parque Nacional de Santa Teresa, 24) Cerro Verde, 25) La Coronilla, 26) balneario Chuy, 27) arroyo Chuy.

A diferencia del estuario, en la costa atlántica existen sedimentos arenosos subacuáticos que permiten reposición de arena desde el mar (Ayup-Zouain et al. 1994, Martins et al. 2003).

La costa oceánica, puede subdividirse en cinco unidades funcionales:

- Punta Negra – Punta del Este

Esta unidad funcional está conformada por dos sectores independientes separados por Punta Ballena que es totalmente impermeable al tránsito de sedimentos. El primer tramo está compuesto por una serie de pequeñas playas de bolsillo (sin conexión por deriva entre ellas), y un arco de playa entre Punta Negra y Punta Ballena, y otro a partir de Punta Ballena hasta el puerto de Punta del Este, con playas más extensas y vulnerables, debido a la proximidad de la costanera y estacionamientos vehiculares, y la degradación de la duna primaria. Si bien este tramo ha presentado fluctuaciones importantes en la posición de las líneas de costa derribando construcciones, mantiene cierta estabilidad en las últimas décadas.

En el sector entre Punta Negra y Punta Ballena, se encuentra la laguna del Sauce, conectada con el mar a través del arroyo del Potrero. La laguna del Sauce se formó sobre una profunda bahía limitada al este por la Sierra de la Ballena, seguramente en un corto período regresivo del Holoceno tardío. Durante ese período quedó represada por un sistema de dunas transversales que circulando de SW a NE impulsadas por los fuertes vientos del SW, alcanzaron el borde occidental de la sierra. Por delante de este sistema, se formó sobre la planicie de abrasión de la ingesión del 6.000 AP, un marisma que fue cerrado hacia el mar por una berma, luego una duna primaria y por detrás se depósitos arenosos que colmataron el humedal. Como resultado de esto se generó una playa por aportes de arena subacuática, lo que terminó configurando la forma espiral logarítmica característica de estas playas. Esta génesis denota la existencia de arena subacuática en cantidad suficiente para su alimentación desde el mar, dado que la Punta Ballena es impermeable a la deriva del este, que es la dominante en el sector.

La existencia de este humedal por debajo de delgados depósitos de arena y la permeabilidad del cierre de laguna del Sauce, condiciona una playa húmeda en todo el sector. Ello resulta potenciado por el represamiento realizado para elevar el nivel de la laguna. La urbanización, realizada sobre las arenas que colmataron al humedal, sufre frecuentes anegamientos y los intentos de bajar la freática por bombeo en la propia playa, si bien exitosos a su instalación, fueron luego destruidos por los temporales.

- Punta del Este – José Ignacio

El tramo entre Punta del Este y José Ignacio presenta la desembocadura del arroyo Maldonado confinada entre dos puntas rocosas que mantienen estable la posición de dicha desembocadura. Le siguen una serie de arcos conectados por deriva que se extienden hasta José Ignacio, que actúa como punto impermeable al tránsito de sedimentos por su proyección hacia el mar.

- José Ignacio - La Paloma

La unidad funcional que se extiende entre José Ignacio y La Paloma es un sector de playa extenso que se ha mantenido relativamente estable (Gadino et al. 2012, Conde et al. 2015) lo que puede asociarse a que su orientación al *swell* implica una resultante de transporte sumamente débil (Conde et al. 2015). A partir de José Ignacio las playas comienzan a presentar una barra casi continua, lo que implica saturación del flujo.

El arco de playa entre José Ignacio y La Paloma presenta la barra de dos lagunas costeras: Garzón y Rocha. A diferencia de la laguna de Castillos, que permanece abierta por largos períodos, la apertura de las lagunas antes mencionadas es efímera, provocada por lluvias torrenciales para luego cerrarse con el primer temporal del sur, lo que demuestra una fuerte saturación del flujo de sedimentos.

- La Paloma - Cabo Polonio

A diferencia de la anterior, en esta unidad funcional la costa muestra retrocesos, con anterioridad a que la zona manifestara intervenciones antrópicas de entidad.

El primer sector contiguo al puerto de La Paloma (incluyendo la playa Chica de la bahía), sufrió el impacto del mismo, incrementado en la zona este por difracción en la escollera del puerto, incrementada por la difracción de las olas generadas por vientos del SW. A su vez, el puerto se colmata por tener su apertura de frente a la deriva (Gómez-Pivel et al. 2001).

El balneario que sigue a continuación (Costa Azul) ha tenido fuertes retrocesos que han derribado un número significativo de viviendas. Según Gómez-Pivel et al. (2001) y Calliari et al. (1998) este retroceso acelerado, se debería a restingas ubicadas a una cierta distancia de la costa, que funcionan como focos de concentración de oleaje. Este proceso debiera ser relativamente efímero, al tratarse de barrancas compuestas por sedimentos arenosos deleznales, dado que cuando el bajo fondo queda posicionado a una distancia adecuada para actuar como foco, ocurre una erosión acelerada que lo alejará del mismo, alcanzando un nuevo equilibrio dinámico. Procesos como este han

dejado sus huellas en varias zonas en las costas uruguayas. Por lo tanto focos activos de esta naturaleza, sugieren la existencia de procesos activos coadyuvantes, como por ejemplo subsidencia.

Al este y hasta las proximidades de Cabo Polonio, el retroceso de la costa podría deberse también a procesos de subsidencia, aspectos estos reconocidos en costas argentinas (Codignotto 1996, Codignotto et al. 2012), que no han sido estudiados en este sector, aunque hay evidencias de neotectónica al NE del sitio (Bossi and Montaña 1999, Panario and Gutiérrez 2011), y en un área tan fallada como el Río de la Plata y la costa atlántica, son eventos difíciles de interpretar (López Laborde and Jackson 1996, Gómez-Pivel 2001).

Las fuentes de sedimentos en este sector son arenas provenientes del mar, reclasificación de sedimentos de acantilados, recirculación desde campos dunares, y en menor medida aportes por cárcavas costeras.

La unidad funcional se caracteriza por la presencia de cárcavas muy antiguas, de gran superficie y profundidad (algunas llegan a tener más de un kilómetro en su eje mayor), que se mantienen activas por el potencial morfogénético generado entre la divisoria de aguas y la barranca costera. Los materiales sedimentarios son arenas del Pleistoceno superior (aproximadamente 110.000 AP según Villwock et al. 1986) muy friables, y de tamaño arena muy fina por lo que su contribución al balance sedimentario es poco significativa (Gómez-Pivel et al. 2001, Panario y Gutiérrez 2011).

Si bien esta unidad funcional no recibe aportes de arena de las playas ubicadas al este, existe una transferencia de sedimentos que le aporta el campo de dunas de gran dimensión que pasa por detrás del tómbolo conocido como Cabo Polonio, y que son evacuados a través del canal meándrico denominado arroyo Valizas (efluente de la laguna de Castillos). Estas dunas a su vez, también aportan su arena al mar, entre el cerro granítico llamado Buena Vista y el arroyo Valizas (Panario and Piñeiro 1997).

- Cabo Polonio – Chuy

La unidad funcional entre Cabo Polonio y Chuy presenta el cambio más significativo en la dinámica costera, que se inicia a partir del sector Cabo Polonio – Punta del Diablo, donde la costa se orienta al NE y por tanto cambia el ángulo de incidencia del oleaje, y con él, según Panario (2000) y Gómez-Pivel et al. (2001) la dirección de la deriva dominante. A su vez, a partir de Cabo Polonio – Punta del Diablo también se incrementan significativamente los volúmenes resultantes transportados, que contra algunas decenas de miles del resto de la costa atlántica y estuarial (MTOPI/PNUD/UNESCO 1979), para el segmento Chuy – Lagoa Mangueira, Toldo et al. (2004, 2005) y Barboza et al. (2011) establecen esta resultante en el orden de los 2.747.000 m³/año.

La principal fuente de sedimentos de este arco la constituyen el campo de dunas móviles de estructura barjanoide del sistema Cabo Polonio que se desplazan de SW a NE impulsadas por los fuertes vientos de esa dirección (Panario and Piñeiro 1997, Panario and Gutiérrez 2005), y que al final de su recorrido también se introducen en el mar en este sector.

La playa La Calavera (ubicada al este del cabo), carece de duna primaria por su orientación paralela a los vientos dominantes, los que producen un transporte neto en la misma dirección que la tenue deriva dominante que caracteriza a esta zona en particular.

Entre las dos puntas de Punta del Diablo, se desarrolla una playa de bolsillo y luego comienza uno de los arcos de playa más extensos de la costa uruguaya, que se extiende hasta el cabo denominado “Cerro de la Viuda”. Las fuentes de sedimentos en el primer tramo de este arco de playa, la constituyen arenas aportadas por el denominado arroyo Valizas. Estas arenas en parte provenían del propio cauce y sus barrancas asociadas mayoritariamente de arenas muy finas y del aporte de arena gruesa del campo de dunas del Sistema Cabo Polonio (Panario 1999, Panario and Gutiérrez 2005). La disminución de estos aportes por la fijación parcial del campo de dunas y la migración hacia el este de la desembocadura del arroyo Valizas, desencadenó un fuerte proceso erosivo con la destrucción de numerosas construcciones edilicias de la zona.

Según Gómez-Pivel (2001) al déficit de sedimentos de esta zona, a aproximadamente 9 kilómetros al NE, se le suma otro foco de concentración de oleaje en torno al balneario Aguas Dulces, que provocó la eliminación de varias hileras de viviendas en dicho

balneario, proceso que continua activo a la fecha. A partir de ese punto, la playa se torna reflectiva y estable quizás por el aporte de sedimentos gruesos desde el mar, con alto porcentaje de material biogénico presente en la playa subacuática (MTOP/PNUD/UNESCO 1979, Gómez-Pivel 2001, Martins and Urien 2004), que según Castiñeira et al. (2010) a la altura de la playa La Esmeralda representan hasta el 60% de la composición de la arena.

Esta condición de estabilidad ha permitido preservar en la parte aérea de la playa, y por detrás del cordón litoral casi continuo, hasta dos paleobermas compuestas mayoritariamente por restos triturados de malacofauna (*beachrock*) a cemento calcáreo de entre 3.240 + 60 AP y 2.370 + 50 AP (Castiñeira et al. 2010) que seguramente han desaparecido en playas menos estables.

El cabo denominado Cerro de la Viuda, es otro punto impermeable al tránsito de arena subacuática, y la conexión entre ambas playas a través de los campos de dunas existentes por detrás de dicho cabo, se encuentra limitada por la forestación con especies exóticas que se han implantado. Como consecuencia el arco de playa entre dicho cabo y el Cabo Verde (rebautizado Punta del Diablo) se ha tornado erosivo.

A partir del Cerro Verde, la costa está constituida por arcos menores entre puntas rocosas. La forestación de los arenales incluidos dentro del denominado Parque Nacional de Santa Teresa, con la introducción de numerosas especies exóticas invasoras y diversas obras realizadas por la administración del parque a cargo del Ejército Nacional, han desencadenado procesos erosivos generalizados.

A partir del denominado Cerro Verde (La Coronilla) comienza la playa más extensa del continente que se continúa hasta el puerto de Río Grande do Sul, Brasil. En territorio uruguayo, se trata de una playa disipativa de alta energía y de carácter predominantemente erosivo con anterioridad a cualquier intervención significativa en el territorio como lo denotan imágenes aéreas del año 1936 (**Figura 6.7**).

Si bien Gómez-Pivel et al. (2001) también vincula esta erosión a focos de concentración de oleaje, por encontrarse dentro del Graben de la Laguna Merín, se puede asumir un efecto coadyuvante de subsidencia para el retroceso de la costa, con fuertes repercusiones en el balneario Chuy. En Hermenegildo (Brasil) a pocos kilómetros, el mismo proceso ha sido observado por Calliari et al. (1998) y Dillenburg et al. (2004).

El arroyo Chuy tuvo un importante desplazamiento de su desembocadura hacia el NE, causando problemas de delimitación de la frontera, razón por la cual en el año 1978 (Gómez-Pivel 2001), decidieron fijar su salida al mar con la construcción de espigones

(Figueiredo and Calliari 2006, Terence 2013) lo que ha agravado la erosión en las playas brasileñas próximas y estabilizado relativamente las playas contiguas del lado uruguayo.



Figura 6.7. Barranca activa de Barra del Chuy, año 1937. Se observa el carácter disipativo de la playa y el retroceso de la barranca cuando las intervenciones en el territorio no eran aun significativas (Fuente: SSRFAU, Foto N° 226).

6.1.2 Conclusiones

Las variaciones extremas de las características dinámicas, estructurales y ecosistémicas hacen de la costa uruguayo, un sistema complejo y variable no sólo en su estructura y funcionamiento, sino también, fundamentalmente, en su respuesta a cambios tanto naturales como a intervenciones antrópicas.

La relativamente temprana (a escala latinoamericana) urbanización de la costa, que ya a mitad del siglo XX, se encontraba casi totalmente fraccionada en pequeños solares, hizo necesaria una reconstrucción cronológica de intervenciones y sus consecuencias a los efectos de separar impulsores de cambios de cambio, de procesos y fluctuaciones naturales.

En el presente capítulo, se hizo una síntesis de los esfuerzos previos de caracterización estructural y dinámica, principalmente a partir de antecedentes de los proyectos UNDP/URU/73/007 entre 1976 y 1978 (ejecutado en el MTOP y financiado por PNUD/UNESCO) y de EcoPlata entre 1995 y 2010 (financiado por IDRC/PNUD/MVOTMA), y la observación de los autores (como visitantes curiosos hasta la década de 1970, y en el marco de una investigación sistemática desde esa década hasta el presente). Estas experiencias que se sistematizan en esta contribución, incluyendo los aportes de tesis de estudiantes y trabajos de colegas (tanto de Uruguay, como de Argentina y Brasil), pretende ser un punto de partida para la elección de unidades representativas para futuras investigaciones, que develen las tendencias, riesgos, vulnerabilidades y oportunidades de un desarrollo costero acorde a tendencias que permitan compatibilizar diferentes objetivos sociales a largo plazo.

6.1.2 Referencias bibliográficas

Ayup-Zouain, R.N., Fachel, J.M.G., Corrêa, I.C.S., Toldo, Jr. E.E., Wolff, I.M., Weschenfelder, J. & Oliveira, F.M. 1994. Classificação dos sedimentos superficiais de fundo do rio de la Plata e plataforma continental adjacente através da análise de agrupamento. **Pesquisas em Geociências**, 21(1): 17–33.

Barboza, E.G., Rosa, M.L.C. da C., Tomazelli, L.J., Dillenburg, S.R. & Ayup-Zouain, R.N. 2011. Comportamento regressivo/transgressivo da linha de costa na bacia de pelotas durante o holoceno médio e tardio. Pp. 15–30. *In*: López, R.Á. & Marcomini, S.C. (Eds.). **Problemática de los ambientes costeros. Sur de Brasil, Uruguay y Argentina**. Editorial Croquis, Buenos Aires, Argentina, 211 p.

Barros, V. 2013. **Escenarios hidrológicos de caudales medios del río Paraná y Uruguay**. Naciones Unidas, Santiago de Chile, 55 p.

Bossi, J. & Montaña, J. 1999. Dinámica de las barras costeras de las lagunas de Garzón y Rocha. Pp. 59–84. *In*: Hernández, J. (Ed.). **Seminario: Costa Atlántica. Estado actual del conocimiento y estrategia de investigación de la costa y sus barras lagunares (Rocha, marzo de 1997)**. PROBIDES, Rocha, Uruguay, 135 p.

Bossi, J. & Navarro, R. 1991. **Geología del Uruguay**. Departamento de Publicaciones, Universidad de la República, Montevideo, 839 p.

Bracco, R., Inda, H., del Puerto, L., Capdepon, I., Panario, D., Castiñeira, C. & García-Rodríguez, F. 2014. A reply to “Relative sea level during the Holocene in Uruguay”. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 401: 166–170.

Brazeiro, A. & Defeo, O. 2006. Bases ecológicas y metodológicas para el diseño de un Sistema Nacional de Áreas Marinas Protegidas en Uruguay. Pp. 379–390. *In*: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. & Conde, D. (Eds.). **Bases para la Conservación y el Manejo de la Costa Uruguaya**. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, 668 p.

Brazeiro, A., Borthagaray, A.I. & Giménez, L. 2006. Patrones geográficos de diversidad bentónica en el litoral rocoso de Uruguay. Pp. 171–178. *In*: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. & Conde, D. (Eds.). **Bases para la Conservación y el Manejo de la Costa Uruguaya**. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, 668 p.

Calliari, L.J., Speranski, N. & Boukareva, I.I. 1998. Stable focus of wave rays as a reason of local erosion at the Southern Brazilian coast. **Journal of Coastal Research**, SI 26: 19–23. Special Issue Proceedings of the International Coastal Symposium, Florida.

Castiñeira, C., Panario, D., Bracco, R. & Gutiérrez, O. 2010. Concheros en la costa atlántica uruguaya y su vinculación con la dinámica litoral. Pp. 635–644. *In: **Arqueología argentina en los inicios de un nuevo siglo, Anales del XIV Congreso Nacional de Arqueología Argentina, Rosario, 2001***. Laborde Libros, Rosario, Argentina, 756 p.

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(4): 376–388.

Codignotto, J.O. 1996. Geomorfología y dinámica costera. Pp. 89–105. *In: Boschi, E.E. (Ed.). **El mar argentino y sus recursos pesqueros. Tomo 1. Antecedentes históricos de las exploraciones en el mar y las características ambientales***. INIDEP, Instituto Nacional de Investigación y Desarrollo Pesquero, Mar del Plata, Argentina, 222 p.

Codignotto, J.O., Kokot, R.R. & Marcomini, S.C. 2012. Neotectonism and sea-level changes in the coastal zone of Argentina. **Journal of Coastal Research**, 8(1): 125–133.

Conde, D., Vitancurt, J., Rodríguez-Gallego, L., de Álava, D., Verrastro, N., Chreties, C., Solari, S., Teixeira, L., Lagos, X., Piñeiro, G., Seijo, L., Caymaris, H. & Panario, D. 2015. Chapter 13 – Solutions for Sustainable Coastal Lagoon Management: From Conflict to the Implementation of a Consensual Decision Tree for Artificial Opening. Pp. 217–250. *In: Baztan, J., Chouinard, O., Jorgensen, B., Tett, P., Vanderlinden, J.-P. & Vasseur L. (Eds.). **Coastal Zones. Solutions for the 21st Century***. Elsevier, Amsterdam, Holanda, 376 p.

Corrêa, I.C.S. 1996. Les variations du niveau de la mer durant les derniers 17.500 ans BP: l'exemple de la plate-forme continentale du Rio Grande do Sul-Brésil. **Marine Geology**, 130(1-2): 163–178.

Dean, R.G. 1982. **Models for Beach Profile Response**. Technical Report No. 30, Newark University of Delaware.

Dillenburg, S.R., Esteves, L.S. & Tomazelli, L.J. 2004. A critical evaluation of coastal erosion in Rio Grande do Sul, Southern Brazil. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, 76(3): 611–623.

Figueiredo, S.A. & Calliari, L.J. 2006. Sedimentología e suas implicações na morfodinâmica das praias adjacentes às desembocaduras da linha de costa do Rio Grande do Sul. **Gravel**, 4(1): 73–87.

Gadino, I., Brazeiro, A., Panario, D., Roche, I. & Gutiérrez, O. 2012. El modelo actual de desarrollo turístico al oeste del balneario La Paloma, Rocha, Uruguay. Tendencias, riesgos y propuestas. **Sustentabilidade em Debate**, 3(2): 21–40.

Giordano, S. & Lasta, C. 2004. **Erosión en las costas del Río de la Plata y su frente marítimo. Informe FREPLATA.** Proyecto PNUD/GEF/RLA/99/G31, Montevideo, Uruguay, 26 p.

Gómez, M., Martino, D., Defeo, O., Vincent, P., Acuña, A., Amestoy, F., De Álava, A., Castiñeira, E., Delfino, E., Fagúndez, C., Olaso, F.G., Píngaro, R.G., Gutiérrez, O., Horta, S., Laporta, P., Marianovich, P., Martínez, G., Passadore, C., Puig, P., Ríos, M., Szephegyi, M.N. & Trimble, M. 2008. Zona Costera. Pp. 118–176. *In: Geo Uruguay. El estado del medio ambiente en Uruguay.* PNUMA-CLAES-DINAMA. Gráfica Mosca, Montevideo, Uruguay, 350 p.

Gómez-Pivel, M.A. 2001. A costa atlântica uruguaia como um sistema geomorfológico. **MSc. Tesis.** Universidad Federal de Rio Grande, Brasil, 91 p.

Gómez-Pivel, M.A. 2006. Geomorfología y procesos erosivos en la costa atlántica uruguaya. Pp. 35–43. *In: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. & Conde, D. (Eds.). Bases para la Conservación y el Manejo de la Costa Uruguaya.* Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, 668 p.

Gómez-Pivel, M.A., Speranski, N. & Calliari, L.J. 2001. A erosão praial na costa atlântica Uruguaia. Beach Erosion along the Uruguayan Atlantic Coast. **Pesquisas em Geociências**, 28(2): 447–457.

Goso, C., Mesa, V. & Alvez, M. del C. 2011. Sinópsis geológico-ambiental de la costa platense y atlántica de Uruguay. Pp. 59–76. *In: López, R.Á. & Marcomini, S.C. (Eds.). Problemática de los ambientes costeros. Sur de Brasil, Uruguay y Argentina.* Editorial Croquis, Buenos Aires, Argentina, 211 p.

Gutiérrez, O. & Panario, D. 2005. Dinámica geomorfológica de la desembocadura del arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos. **Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente**, 5: 107–126.

Gutiérrez, O. & Panario, D. 2006. Evolución de la desembocadura del arroyo Pando (Canelones, Uruguay): ¿tendencias naturales o efectos antrópicos? Pp. 391–400. *In*: Menafra, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. & Conde, D. (Eds.). **Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya**. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, 668 p.

Gutiérrez, O. 2010. Dinámica sedimentaria en la costa uruguaya: evolución y tendencias de playas urbanas en el marco del Cambio Global. **MSc. Tesis**. Universidad de la República. Uruguay, 98 p.

Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Piñeiro, G. & Montes, C. 2015. Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. **Journal of Integrated Coastal Zone Management - Revista de Gestão Costeira Integrada**, 15(4): xx-xx. doi: 10.5894/rgci553. (*In press*).

IMFIA. 1998. **Estudio de las obras de navegación en el arroyo Cufre y sus impactos sobre la zona costera. Informe final**. Convenio Dirección Nacional de Hidrografía - Instituto de Mecánica de los Fluidos, Facultad de Ingeniería. Montevideo, Uruguay, 59 p.

Iriondo, M. & Cerruti, C.N. 1981. Las unidades geomorfológicas fluviales del extremo noroeste de Entre Ríos y su relación con los asentamientos humanos prehispánicos. **Revista de la Asociación de Ciencias Naturales del Litoral**, 12: 72–84.

Iriondo, M. & Kröhling, D.M. 2008. **Cambios ambientales en la cuenca del río Uruguay: desde dos millones de años hasta el presente**. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina, 360 p.

López Laborde, J. & Jackson, M. 1996. Continental shelf and coastal plain sediments of the southeast and south coast of Brazil. Pp. 55–61. *In*: Martins, L.R. & Corrêa I.C.S. (Eds.). **Morphology and Sedimentology of the Southwest Atlantic Coastal Zone and continental shelf From Cabo Frio (Brazil) to Península Valdés (Argentina). Explanatory text of the atlas**. Intergovernmental Oceanographic Commission-IOC/UNESCO, Ministério da Ciência e Tecnologia-MCT, Companhia de Pesquisa de Recursos Minerais-CPRM, Porto Alegre, Brasil, 74 p.

Martin, L. & Suguio, K. 1992. Variation of coastal dynamics during the last 7000 years recorded in beach-ridge plains associated with river mouths: example from the central

Brazilian coast. **Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology**, 99(1-2): 119–140.

Martins, L.R. & Urien, C.M. 2004. Areias da plataforma e a erosão costeira. **Gravel**, 2(1): 4–24.

Martins, L.R., Martins, I.R. & Urien, C.M. 2003. Aspectos sedimentares da plataforma continental na área de influência do Rio de la Plata. **Gravel**, 1: 68–80.

Mianzán, H.W., Brazeiro, A., Gómez-Erache, M. & Lo Nostro, F. 2002. **Biodiversity. Fluvial and marine biodiversity of the Río de la Plata river and its maritime front. Technical Report.** PNUD Project/GEF RLA/99/G31, Montevideo, Uruguay, 75 p.

MTOP/PNUD/UNESCO. 1979. **Conservación y mejora de playas - URU. 73.007.** Unesco, Montevideo, Uruguay, 593 p.

Muñoz-Pérez, J.J., Solari, S., Teixeira, L., Alonso, R., & Neves, M.G. 2015. Propuesta de estudio de la morfología determinada por el oleaje en playas fluviales. “La Concordia” en el río Uruguay, un caso práctico. **Geo-temas. VIII Jornadas de Geomorfología Litoral**, 15: 49–52.

Ortega, L., Celentano, E., Finkl, C. & Defeo, O. 2013. Effects of climate variability on the morphodynamics of Uruguayan sandy beaches. **Journal of Coastal Research**, 29(4): 747–755.

Panario, D. & Gutiérrez, O. 2005. La vegetación en la evolución de playas arenosas. El caso de la costa uruguaya. **Ecosistemas. Revista de la Asociación Española de Ecología Terrestre**, 14(2): 150–161.

Panario, D. & Gutiérrez, O. 2006. Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas. Pp. 21–34. *In*: Menafra, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F. & Conde, D. (Eds.). **Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya.** Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, 668 p.

Panario, D. & Gutiérrez, O. 2011. Introducción a la geomorfología de lagunas costeras, lagos someros y charcas de Uruguay. Pp. 49–63. *In*: García-Rodríguez, F. (Ed.). **El Holoceno en la zona costera de Uruguay.** Departamento de Publicaciones, Unidad de Comunicación de la Universidad de la República (UCUR), Montevideo, Uruguay, 263 p.

Panario, D. & Piñeiro, G. 1997. Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay. **Climate Research**, 9(1-2): 67–72.

Panario, D. 1999. Dinámica de la costa atlántica uruguaya. Pp. 23–54. *In*: Hernández, J. (Ed.). **Seminario: Costa Atlántica. Estado actual del conocimiento y estrategia de investigación de la costa y sus barras lagunares (Rocha, marzo de 1997)**. PROBIDES, Rocha, Uruguay, 135 p.

Panario, D. 2000. Las playas uruguayas. Su dinámica, diagnóstico de situación actual y tendencias a mediano plazo. Pp. 111–125. *In*: Domínguez, A. & Prieto, R. (Eds.). **Perfil ambiental del Uruguay - 2000**. Editorial Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay, 260 p.

Panario, D., Gutiérrez, O., Sánchez Bettucci, L., Peel, E., Oyhantçabal, P. & Rabassa, J. 2014. Ancient Landscapes of Uruguay. Pp. 161–199. *In*: Rabassa, J. & Maud, R.R. (Eds.). **Gondwana landscapes in southern South America. Argentina, Uruguay and southern Brazil**. Springer Earth System Sciences, Dordrecht, Holanda, 545 p.

Panario, D., Piñeiro, G. and Gutiérrez, O. 2008. **Propuesta técnica para la conservación recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe final**. Montevideo, Uruguay, 76 p. y anexos

Short, A.D. 1996. The role of wave height, period, slope, tide range and embaymentisation in beach classifications: a review. **Revista Chilena de Historia Natural**, 69(4): 589–604.

Simionato, C.G., Meccia, V.L., Guerrero, R.A., Dragani, W.C. & Nuñez, M.N. 2007. Río de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intraseasonal scales: 2. Currents' vertical structure and its implications for the salt wedge structure. **Journal of Geophysical Research**, 112: C07005.

Simionato, C.G., Vera, C.S. & Siegmund, F. 2005. Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area. **Journal of Coastal Research**, 21(4): 770–783.

Terence, V. 2013. Caracterização do sistema praia-duna ao longo da Costa Uruguiaia, de Montevideo a la Coronilla. **MSc. Tesis**. Universidade de São Paulo, Brasil, 107 p.

Toldo, Jr. E.E., Nicolodi, J.L., Almeida, L.E.S.B., Corrêa, I.C.S. & Esteves, L.S. 2004. Coastal dunes and shoreface width as a function of longshore transport. **Journal of Coastal Research**, SI 39: 390–394.

Toldo, Jr. E.E., Almeida, L.E.S.B., Nicolodi, J.L. & Martins, L.R. 2005. Retração e progradação da zona costeira do estado do Rio Grande do Sul. **Gravel**, 3(1): 31–38.

Villwock, J.A., Tomazelli, L.J., Loss, E.L., Dehnhardt, E.A., Horn Filho, N.O., Bachi, F.A. & Dehnhardt, B.A. 1986. Geology of the Rio Grande do Sul coastal province. **Quaternary of South America and Antarctic Peninsula**, 4: 79–97.

Wright, L.D., Short, A.D. & Green, M.O. 1985. Short-term changes in the morphodynamic states of beaches and surf zones: An empirical predictive model. **Marine Geology**, 62 (3-4): 339–364.

Capítulo 6.2

Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing

Ofelia Gutiérrez^{@, 1}, Daniel Panario¹, Gustavo J. Nagy², Gustavo Piñeiro³, Carlos Montes⁴

[@] Autor corresponsal

1 - UNCIEP, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Gutiérrez: oguti@fcien.edu.uy and gutierrez.ofelia@gmail.com, Panario: panari@fcien.edu.uy and daniel.panario@gmail.com

2 - Grupo de Cambio Ambiental y Gestión Costero-Marina, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Nagy: gnagy@fcien.edu.uy and gustavo.nagy56@gmail.com

3 - Departamento de Evolución de Cuencas, Instituto de Ciencias Geológicas, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Piñeiro: gaitapi@fcien.edu.uy and estudiosgeologicos@gmail.com

4 - Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, España. e-mail: Montes: carlos.montes@uam.es

Publicado en *Journal of Integrated Coastal Zone Management - Revista de Gestão Costeira Integrada*. Doi:10.5894/rgci553

6.2. LONG-TERM MORPHOLOGICAL EVOLUTION OF URBAN POCKET BEACHES IN MONTEVIDEO

(URUGUAY): IMPACTS OF COASTAL INTERVENTIONS AND LINKS TO CLIMATE FORCING

Resumen

Se analizan dos playas de bolsillo, Ramírez y Pocitos (Montevideo, Uruguay) para evaluar su evolución y tendencias (erosión / acreción) asociada a las intervenciones humanas y forzantes climáticos desde 1927 hasta 2008. Se realizó un estudio multitemporal utilizando técnicas SIG, series largas de fotos aéreas, imágenes de satélite, antecedentes históricos y análisis estadístico. Se proponen indicadores cualitativos de la estabilidad de la zona de playa. Se analiza la relevancia de esta metodología en playas cuyas fluctuaciones tienden a enmascarar su evolución a largo plazo. Ambas playas se mantienen relativamente estables, pero fluctuando desde 1927, con una ligera pérdida de superficie, especialmente en Ramírez. La influencia de los siguientes factores se discute: i) las intervenciones humanas; ii) los eventos ENSO; iii) las mareas de tempestad; iv) los cambios en la zona de la playa de acuerdo con la regla de Bruun por el aumento del nivel del mar en Montevideo. Aunque los cuatro factores parecen haber actuado en diferentes períodos, la evidencia no es concluyente en cuanto a su importancia cuantitativa relativa. Este artículo pone de relieve la importancia del uso de series largas de sensores y el análisis histórico, a efectos de interpretar los procesos vinculados a la inercia del pasado en ambientes que han sido modificados desde larga data. El análisis de las tendencias de estas dos playas urbanas de bolsillo permite inferir que su resiliencia no se ha visto afectada aun, lo que les permite hacer frente a factores de estrés no climático. A los efectos de una mejor gestión se recomienda: i) llevar a cabo un seguimiento continuo; ii) reducir al mínimo las acciones de limpieza de playa mecanizada y de pérdida de arena por fugas o remoción; iii) implementar la reconstrucción de estructuras naturales como las dunas primarias; y iv) se debiera aplicar la metodología explicada en este trabajo en otras playas urbanas de Montevideo para comprender mejor los forzamientos climáticos.

Palabras clave: Teledetección, playas de arena, los registros de proxy costa, erosión / acreción, parámetro omega, gestión costera

Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing*

104

Ofelia Gutiérrez^{@, a}; Daniel Panario^a; Gustavo J. Nagy^b; Gustavo Piñeiro^c; Carlos Montes^d

ABSTRACT

Two pocket beaches, Ramírez and Pocitos (Montevideo, Uruguay) are analyzed to assessing their evolution (erosion/accretion) associated with human interventions and climatic forcings from 1927-2008. A multitemporal study was conducted using GIS, long series of aerial photos, satellite imagery, survey of historical background, and statistical analysis. Qualitative indicators of the stability of the beach area are proposed. The relevance of this methodology is analyzed on beaches whose fluctuations tend to mask their long-term evolution. Both beaches remain relatively stable but fluctuating since 1927, with slight loss of surface, especially in Ramírez. The influence of the following factors is discussed: i) human interventions; ii) ENSO events; iii) storm surges; iv) changes in beach area according to the Bruun rule and rising sea level in Montevideo. Although the four of them appear to have acted in different periods, the evidence is not conclusive regarding their relative quantitative importance. This article highlights the importance of using long series of remote sensing and historical analysis to interpret processes linked to inertia of the past in environments that have been modified from longstanding. The trend analysis of these two urban pocket beaches allows to infer that their resilience has not been affected yet, which would allow them to face not extreme climatic stressors. For the purpose of better management it is recommended to: i) conduct continuous monitoring; ii) minimize the actions of mechanized cleaning and sand losses by leakage or removal; iii) implement the reconstruction of natural structures such as primary dunes; and iv) apply the methodology explained in this paper in other Montevideo urban beaches to better understand the climate forcings.

Keywords: Remote sensing, sandy beaches, coastline *proxy* records, erosion/accretion, omega parameter, coastal management.

[@] Corresponding author to whom correspondence should be addressed.

^a Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), UNCIEP, Montevideo, Uruguay. e-mails: Gutiérrez <oguti@fcien.edu.uy>; <gutierrez.ofelia@gmail.com>; Panario <panari@fcien.edu.uy>; <daniel.panario@gmail.com>

^b Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Grupo de Cambio Ambiental y Gestión Costero Marina, Oceanografía y Ecología Marina, Montevideo, Uruguay. e-mail: <gnagy@fcien.edu.uy>; <gustavo.nagy56@gmail.com>

^c Universidad de la República, Facultad de Ciencias, Instituto de Ciencias Geológicas, Departamento de Evolución de Cuencas, Montevideo, Uruguay. e-mail: <gaitapi@fcien.edu.uy>; <estudiosgeologicos@gmail.com>

^d Universidad Autónoma de Madrid, Facultad de Ciencias, Departamento de Ecología, Madrid, España. e-mail: <carlos.montes@uam.es>

* Submission: 11 SEP 2014; Peer review: 11 OCT 2014; Revised: 25 MAY 2015; Accepted: 7 JUN 2015; Available on-line: 8 JUN 2015

This article contains supporting information online at http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-553_Gutierrez_Supporting-Information.pdf



RESUMO[§]

Evolução morfológica de longo prazo das praias urbanas de bolso de Montevideu (Uruguai): impactos das intervenções costeiras e relações com as forças climáticas.

Dois praias de bolso, Ramirez e Pocitos (Montevideo, Uruguai) foram analisados para avaliar a sua evolução (erosão / acreção) associado a intervenções humanas e forças climáticas durante o período 1927-2008. Para tal, desenvolveu-se estudo multitemporal utilizando GIS, uma série longa de fotos aéreas, imagens de satélite, exame dos antecedentes históricos, e análise estatística. São propostos indicadores qualitativos da estabilidade da praia. A relevância da metodologia utilizada é analisada em praias cujas variações tendem a mascarar a sua evolução a longo prazo. Ambas as praias permaneceram, desde 1927, relativamente estáveis, embora com variações e ligeira perda de superfície, especialmente a praia de Ramirez. Neste artigo é discutida a influência dos seguintes fatores: i) intervenções humanas; ii) eventos de El Niño; iii) temporais; iv) mudanças na praia de acordo com a regra Bruun e elevação do nível do mar, em Montevideu. Embora os quatro fatores referidos tenham atuado em diferentes períodos, as evidências não são conclusivas quanto à sua importância quantitativa relativa. O artigo destaca a importância da utilização de séries longas de sensoriamento remoto e da análise histórica na interpretação dos processos ligados à inércia do passado em ambientes que foram modificados desde há muito. A análise de tendências destas duas praias urbanas de bolso permite inferir que a sua resistência ainda não foi afetada, o que lhes permitiria enfrentar os estressores climáticos extremos. Com o objetivo de conseguir uma melhor gestão, recomenda-se: i) realizar monitoramento contínuo; ii) minimizar as ações de limpeza mecanizada e as perdas de areia por vazamento ou remoção; iii) implementar a reconstrução de estruturas naturais, como dunas primárias; e iv) aplicar a metodologia apresentada neste artigo noutras praias urbanas de Montevideu para compreender melhor as forças climáticas.

Palavras-chave: *sensoriamento remoto, praias de areia, indicadores da linha de costa, erosão / acreção, parâmetros omega, gestão costeira.*

1. Introduction

Beach erosion is a serious world-wide problem; according to Bird (1985), at least 70% of sandy beaches are recessional. From the 1990s, this finding has driven to the achievement of long-term studies, in some countries taking advantage of the existence of high-resolution images (from *circa* 1930) and cartographic precision surveys (since the late nineteenth century). The relationship between trends and natural or induced events has allowed to understand the processes involved in each case, and develop baseline scenarios (i.e., Dias *et al.*, 2000; Ferreira *et al.*, 2006; Dolch, 2010; Baptista *et al.*, 2011; Klemas, 2011; Pilkey *et al.*, 2011; Sato *et al.*, 2011; Almeida, 2012; Freitas & Dias, 2012; Echevarría *et al.*, 2013; Ribeiro *et al.*, 2013; Splinter *et al.*, 2013).

Achieving integrated coastal management of beaches is a global aspiration because of their vulnerability, ecological and heritage value, and the mounting pressure on the ecosystem driven by the steady increase in the population settled in coastal areas over the past few decades (Brown & McLachlan, 2002).

Modification of coastal ecosystems and increased pressures on the resources that sustain their structure and function, should be seen as a global problem, as these ecosystems are of fundamental importance, providing various goods and services that directly contribute to socio-economic development defined by the Millennium Ecosystem Assessment (2005) as the direct or indirect benefits that humans obtain from ecosystems.

Thus, healthy and functional beaches provide various ecosystem services, which can be grouped into three main functions: provisioning, regulating and cultural. However, these ecosystems have been modified and adapted by direct or indirect human interventions, which ultimately affect the system's capabilities to provide these services and therefore support social welfare.

In this article, the concept of ecosystem services is the framework of our research and hypotheses. Therefore, the focus is on the surface of the beach and not only in the behavior of the coastline.

Despite the interest in beach conservation, management successes have been few, and since the 1980s widespread erosion of beaches (Bird, 1985) has increased due to Land Use Change (civil construction, real estate pressure, aggregate extraction), or simply by gradual depletion of circulating sand. These changes are enhanced by the effects of climate change such as rising sea levels, and increased frequency and intensity of storms (Nordstrom, 2004).

Causes of successive failures are multiple, but two can be highlighted: firstly the lack of knowledge of the long-term dynamics of each particular beach (Carter, 1988) and secondly, the multiplicity of jurisdictions and interests acting in this complex system. In Uruguay in particular, during the twentieth century, human interventions have changed the coastal morphology and dynamics, while in parallel the beaches began to show erosion and retreat of the coastline was observed (Panario & Gutiérrez, 2006).

According to Dias *et al.* (2012) in order to adopt corrective measures and an effective coastal zone management, it is essential to understand the current situation.

[§] Abstract and captions translation to Portuguese on behalf of the Editorial Board

This analysis focuses on two beaches, Ramírez and Pocitos at Montevideo, the capital city of Uruguay and home to a million and a half inhabitants. Both beaches have economic importance as areas for recreation, tourism, culture, and as iconic symbols. The intensity of use in both beaches led to a loss of their natural structure, leaving only sand surfaces bordered by a waterfront promenade, called "Rambla Costanera" or simply "La Rambla", which is the most popular ride in the city.

Because of their importance, these beaches have been certified for bathing, according to ISO 14001 standards by the municipal government of Montevideo (IdeM). These standards require the implementation of a continuous improvement process. Therefore, a retrospective analysis was performed in order to: i) depict the historical evolution; ii) project trends of erosion-accretion, taking advantage of the existence of a large number of remote sensing images; and iii) establish management recommendations.

The trends and drivers of the historical evolution of the beaches are analyzed from the extensive series of vertical aerial photographs since 1927, old maps, chronicles of physical and climatic databases over time using statistical indicators and various indicators of changes in the coastline. So the relevance of the method of long multi-temporal analysis (1927-2008) is tested on beaches whose fluctuations tend to mask long-term trends.

2. Study area and characterization

2.1. The Beaches

Ramírez and Pocitos are two urban pocket beaches located opposite each other, on a headland. They are oriented NNE-SSW, the former to the east side and the latter to the west side of the bow (Figure 1). This coast is a microtidal environment (amplitude less than 50 cm, Verocai *et al.*, 2015), wave-dominated (significant wave height [Hs]: 0.54 m; wave period [T] 5.66 s) and located in the middle region (brackish waters) of the Río de la Plata river estuary.

Ramírez is a dissipative beach with a convex profile bounded by two headlands (Figure 2a), a gentle slope (1.9°) that accentuates to the north end with a maximum of 2.7 degrees between 0.5 and 1.5 m water level amsl (meters above mean sea level reference = 0.91 m), with wet and dry sectors 10-15 and 65 m wide respectively, measured in its middle section, with a coastline of 500 m. As a particular feature, Ramírez exposes more than 100 m of additional beach during ebb, composed of sediments enriched with dense minerals.

Pocitos is also bounded by two headlands (Trouville and Kibón). It is a sandy beach convex toward the berm (Figure 2b), with a gentle slope (1.8°), which is accentuated to the north end (2.6° between water levels 0.5

and 1.5 m), concomitant with its northward evolution from a dissipative beach into an intermediate one. This beach has a wet area of 10 to 15 m width at its middle zone and a dry width of 65 m. The coastline is 1,427 m length. Both beaches are bounded by the wall of the waterfront, which is semicircular in Ramírez, and both lack the primary dune. The sediments of Pocitos and Ramírez beaches originate from different sources: estuarine sands and gravels, subrecent autochthonous alluvium, erosion of the crystalline basement debris and bioclastic material (shells). These sediments are partially re-transported by runoff, human action in mechanized maintenance, and wind action with sand losses to the mainland (roads).

2.2. Issues and Background

a. Ramírez Beach

Maps by the British Navy (years 1849 and 1883) and the French Navy (1867) indicate that Ramírez was wider and extended to the NW about 800 meters (about twice as long as by 2008), and seaward about 200 meters (twice the width remaining in its current location) (Figure 3). The survey of the IdeM (25/07/2007 manzanas.dwg, file) included cadastral references that are now located under water on this beach.

Ramírez beach was probably used as one of the primary sources of sand for construction of Old Montevideo and later the surrounding neighborhoods, as was subsequently Pocitos, once the expansion of the city reached its vicinity. In particular, in the early 1960s, according to MTOP/PNUD/UNESCO (1979) Ramírez was used as a source of sand to make an attempt to nourishment of Pocitos beaches.

Ramírez suffered significant erosion before 1927, leaving a surface enriched with sandy heavy minerals, which explains the slope of the beach. An area located to the NW was covered by the construction of the southern waterfront promenade, and the fill material was sand dredged from the offshore vicinities, which reduced the stock of nearshore sediment available in this area.

In photographic records of 1927 and 1929, a retreat of 200 meters had already occurred. The chart of the Military Geographic Service (published in 1929) based on surveys conducted in 1920, recorded this shoreline retreat with a configuration similar to the present. In turn, the image of 1927 presumably reflects the effect of extreme storm surges that occurred in 1923 and 1924, a feature clearly documented in the existing iconography. The storm surge of July 1923 was the strongest ever recorded since the beginning of measurements in 1898 (Verocai *et al.*, 2015) with a water level of 3.39 m amsl and an estimated return period of 821 years (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979). The storm surge of



Figure 1 - Location of the urban pocket beaches Ramírez and Pocitos, metropolitan area of Montevideo, Uruguay.
Figura 1 – Localização das praias urbanas de bolso, Ramírez and Pocitos, na área metropolitana de Montevideo, Uruguay.

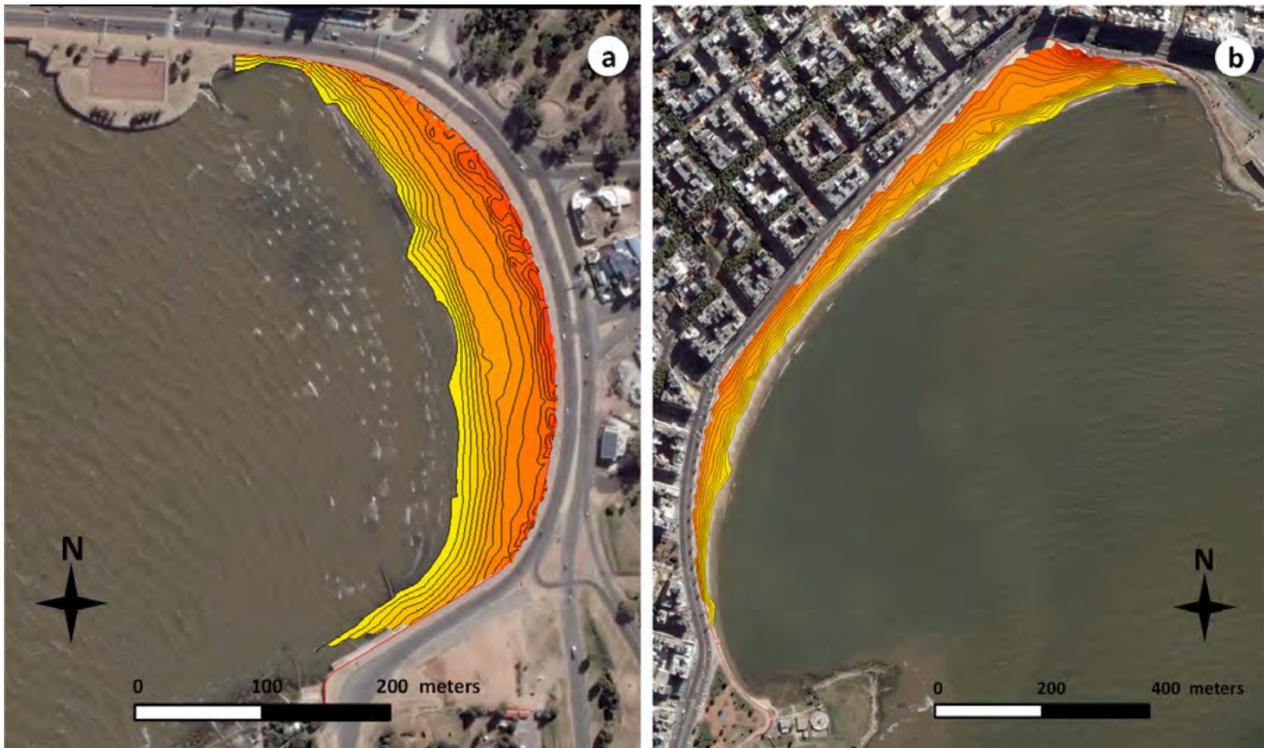


Figure 2 - Digital elevation models of (a) Ramírez and (b) Pocitos beaches. Contour interval is 20 cm.
 Figura 2 – Modelos digitais do terreno das praias de (a) Ramírez e (b) de Pocitos. Equidistância: 20 cm.

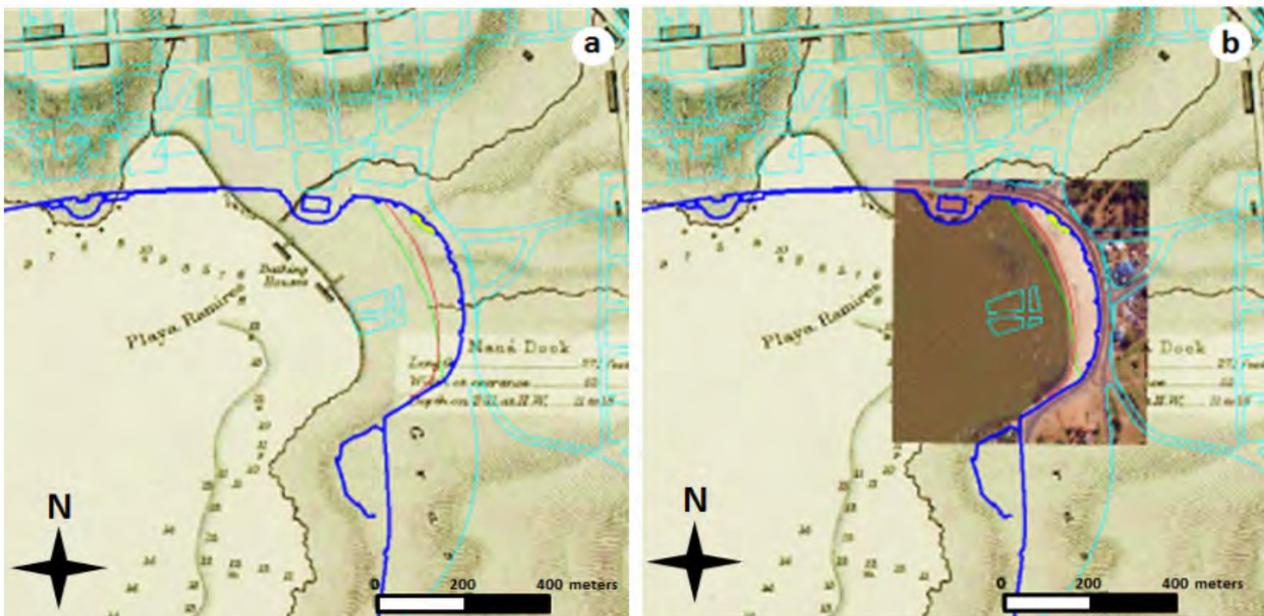


Figure 3 - a) Current location of the coastline of Montevideo overlapped over the old map of Montevideo (Royal Navy, 1849). The current urban blocks (turquoise), the waterfront (“La Rambla”, in blue), the coastline according to WDL-RM at 1927 (green) and 2008 (red). The location of some urban blocks is on the beach. b) The same composition, but with the superposition of the April 2008 image. Note in this case, the location of urban blocks under water.

Figura 3 – a) Localização actual do litoral de Montevideu sobreposto a um antigo mapa de Montevideu (Royal Navy, 1849). Os atuais blocos urbanos (turquesa), a beira-mar (“La Rambla”, em azul), o litoral de acordo com WDL-RM em 1927 (verde) e em 2008 (vermelho). A localização de alguns blocos urbanos situa-se na praia. b) A mesma composição, mas com a sobreposição da imagem de Abril de 2008. Neste caso, alguns blocos urbanos situam-se debaixo de água.

January 1924 reached a water level of 2.19 m amsl (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979; modified from the database of the Directorate of Oceanography, Meteorology and Hydrography of the Navy-SOHMA). The 1923 storm had winds of over 150 km/hour. This storm devastated the south coast of the city, which was reported by the press: "All the (South) Rambla has disappeared as well as the resorts of Ramírez and Pocitos" (El País Newspaper the day after the storm surge).

The cartographic documentation hiatus between 1886 and 1920 has not allowed generating a reconstruction of the rhythms of intense erosion process verified over that period, or specifying their causes.

The existence of a dune field is reflected in old place names (e.g., Road to the Dunes: "Camino a los Médanos"). The recirculation of this sand dune field originated from the mouths of the two creeks that existed on this beach. This recirculation was stopped early (late nineteenth century), when the waterfront promenade "La Rambla" was built, encircling the arc of the beach. This first layout of the waterfront at Ramírez beach, confined the beach to a well constrained arc. Such intervention modified the beach, dividing what was originally a functional unit, consisting of an arc of beach with the presence of a small tombolo near its southern end. Subsequently, the northwest beach portion was filled, with the promenade (public walk), which was built gaining land to sea.

The arc of beach on the outside did not encompass the shape as was the original natural setting, because the new beach had a greater curvature. Since then the storm waves concentrate at both ends.

b. Pocitos Beach

The geomorphological changes documented in Pocitos beach have also been dramatic. Near the mid-nineteenth century there were dunes up to 10 meters high, and a beach prism several meters higher than the current situation (Ros, 1923; García-Moyano, 1969; Barrios-Pintos, 1971). These dunes were removed along with beach sand, to be used for construction (Ros, 1923; García-Moyano, 1969). This activity severely affected the amount for the beach sediment budget, to the extent that the foundations of houses were seen during an extreme low water event in the early twentieth century (Ros, 1923).

At the beginning of the twentieth century, three creeks flowed into this beach, but when the southern stretch of the waterfront was built in 1912, the creeks were encased and diverted. This original waterfront protruded into a section of beach and divided it into two sections (See Supporting Information SI.1c). At that time a large building ("Hotel de los Pocitos") was built on the beach, but was demolished in 1935, after being affected by the extreme storm surge in 1923. The 1927 photo

shows only the Pocitos creek (See SI.1b), which in 1945 (See SI.1a) had also been encased and widened, cutting the recirculation of sand dune fields through its mouth. By 1950, the layout of "La Rambla" was rectified to its present form, and the surface of dry beach located in the NE sector was artificially extended.

Prior to the construction of "La Rambla", the beach was wider, from 40 to about 80 meters (based on an accurate survey conducted for the "Sanitation Project of the Pocitos Creek Basin", García, 1908). Also in that time, the prism of the beach was approximately two meters higher than present (Figure 4), whereas the prism now fluctuates around 60 cm thick above a layer of reworked Pleistocene sands. By the time of the photographic record of 1927, it had already occurred a widespread retreat of the coastline (See Supporting Information SI.2).

Despite the importance of beaches in the social imaginary for Uruguay, there is only one systematic study of beaches (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979), which includes a reference to Pocitos and the recommendation for a refill of sand, and an article from Saizar (1997) which predicts its evolution using the Bruun's Rule.

3. Materials and methods

A multi-temporal analysis was undertaken, using remote sensing from 1927-2008, GIS techniques and historical information. A total of 23 and 21 aerial photographic surveys (1927-2008) were analyzed for Ramírez and Pocitos respectively (Table 1), obtained from the archives of the IdeM, the National Directorate of the Environment (DINAMA), the Military Geographic Service (SGM), and Google Earth satellite images. To better understand the long-term morphological changes, maps of the nineteenth and early twentieth centuries were also included, which have acceptable accuracy.

The series of aerial photographs was scanned at 1200 dpi, and the Google Earth images were downloaded in the best possible resolution. ArcGIS 10 was used for georeferencing, which was carried out using a detailed mapping of the wall of the waterfront surrounding both beaches made by the Department of Geomatics of the IdeM. This map was made by orthorectification and checkpoints from differential GPS with sub-meter relative accuracy, allowing to minimize errors between images. An accuracy of one pixels is assumed for the imaging georeferencing process. The UTM (Universal Transverse Mercator) Zone 21S projection and WGS84 datum was used.

Shorelines were digitized on screen using a constant scale of 1:3000 to standardize the procedure, according to Ciavola *et al.* (2003), Gutiérrez & Panario (2005) and Armaroli *et al.* (2006). The landward limit of the beach

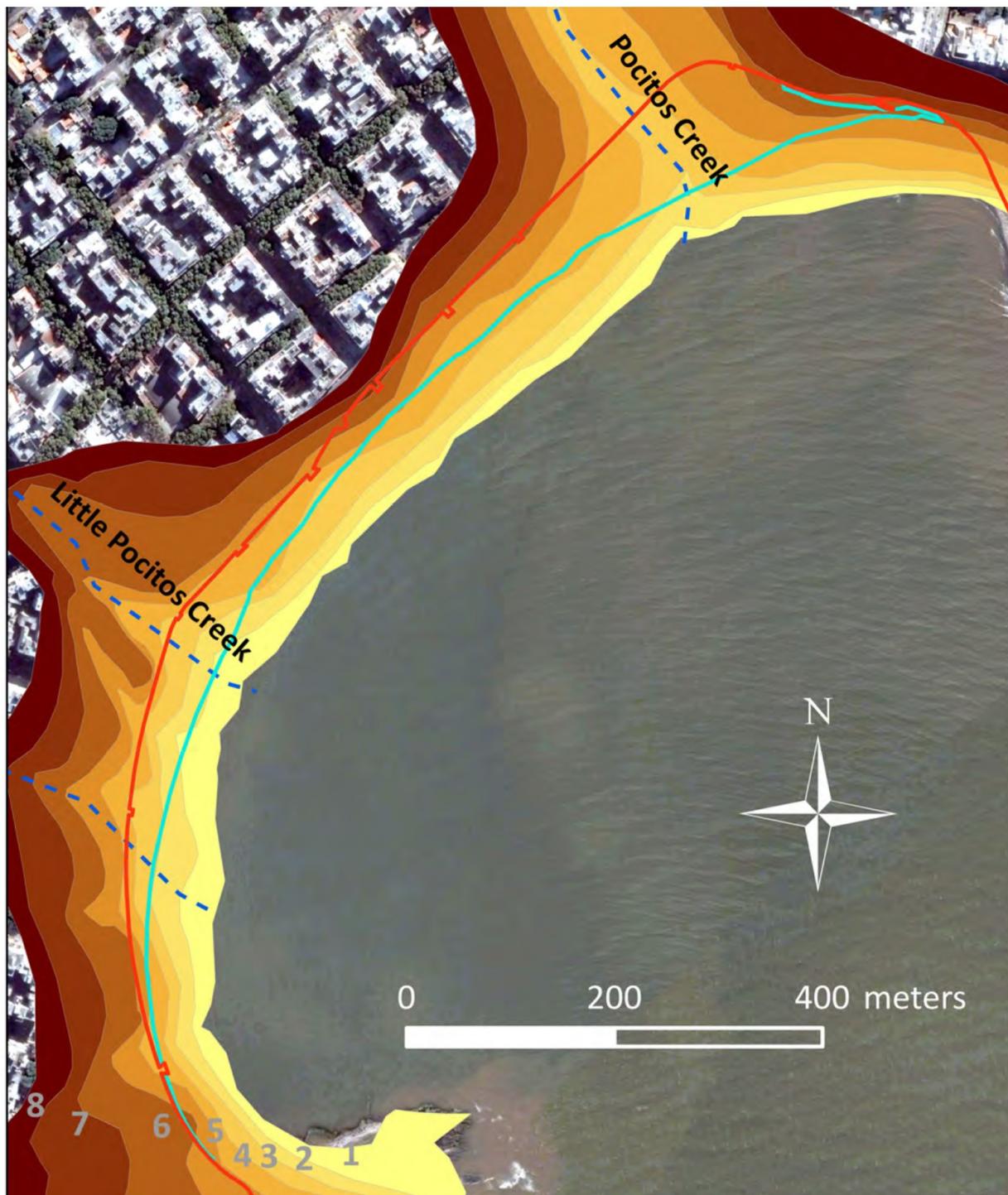


Figure 4 - Contours digitized every 1 meter (made in 1906 for the “Sanitation Project of the Pocitos creek Basin”; García, 1908) superimposed on an image of 2007. The red line is the location of the current waterfront and the turquoise line shows the previous high tide high water level (PHTH-WL). Note the increased height and width of the beach shoreline in 1906 compared to 2007 (Source: Image-2007, IdeM).

Figura 4 – Linhas de nível digitalizadas a cada metro (feito em 1906 para o “Projeto de Saneamento da Bacia do riacho Pocitos”; García, 1908) sobreposta a uma imagem de 2007. A linha vermelha corresponde à localização do cais atual e a linha turquesa traduz o nível máximo da maré cheia (PHTH-WL). É de ressaltar a grande altura e largura da praia em 1906 comparativamente à de 2007 (Fonte: Imagem-2007, IdeM).

Table 1 - List of imagery. Image availability is highlighted in green.
 Tabela 1 - Lista de imagens. A disponibilidade das imagens está realçada a verde.

Date *	Source	Original scale	Ramírez	Pocitos
1927, March 16	DINAMA	1/8.000		
1929, March 21	SGM	1/7.500		
1939	IdeM	1/5.000		
1942, November 25	DINAMA	1/7.300		
1945, January	IdeM	1/10.000		
1949	DINAMA	?		
1954, May 14	IdeM	1/15.000		
1954, May 17	IdeM	1/30.000		
1961, December 13	IdeM	1/15.000		
1961, December 21	IdeM	1/15.000		
1965, October 26	IdeM	1/10.000		
1966, January 26	SGM	1/20.000		
1970, July 21	IdeM	1/7.500		
1970, August 21	IdeM	1/7.300 y 1/10.000		
1970, December 07	IdeM	1/10.000		
1971, May 01	IdeM	1/10.000		
1975, January 29	IdeM	1/10.000		
1979, March 29	IdeM	1/10.000		
1983, February 12	IdeM	1/12.000		
1985, December	IdeM	1/10.000		
1991, May	IdeM	1/5.000		
1996, June	IdeM	1/40.000		
2000, September 22	Google Earth			
2001 August 09	Google Earth			
2002, September 21	Google Earth			
2003, October 23	IdeM	1/10.000		
2004, May 28	Google Earth			
2005, November 27	Google Earth			
2006, September 6	Google Earth			
2006, September 24	Google Earth			
2007, September 29	IdeM	1/10.000		
2007, December 8	Google Earth			
2008, April 30	Google Earth			
Totals of available imagery for each beach:			23	21

* Detailed dates of the images are not always available.

Abbreviations:

IdeM: municipal government of Montevideo;
 DINAMA: National Directorate of the Environment;
 SGM: Military Geographic Service.

was defined as the wall of “La Rambla”, as it has historically functioned as the limit of the active littoral zone, defined here as the area where sediment exchanges between the beach and the nearshore occur.

Different proxy records were explored as indicators of coastline (Boak & Turner, 2005) in order to interpret the responses of the system, i.e., *i*) the previous high tide high water level - PHTH-WL (Boak & Turner, 2005; Moore *et al.*, 2006) and, *ii*) in order to evaluate the consistency of the results, the wet/dry line or run-up maxima - WDL-RM (Boak & Turner, 2005; Dolan *et al.*, 1978, 1980; Overton *et al.*, 1999). For the studied beaches, and in agreement with Boak & Turner (2005), both lines are clearly distinguishable from the other. The PHTH-WL is identified by the marks left by the tide (i.e. plant debris), and WDL-RM can be distinguished by the wet-dry sand contrast.

Due to the small size of the beaches and the multi-temporal evolution of the accretion and retreat of the coastline, a beach polygon (area) was drawn as proposed by Gutiérrez & Panario (2005) which is defined by each coastline proxy in each of the images and the corresponding landward limit. This procedure allows reducing uncertainty, since the surface is equivalent to infinite transects (method commonly used for these studies), and ultimately, the beach area is the parameter of greatest socio-economic, ecological and management interest.

It was calculated the percentage difference between the largest/smallest area for Ramírez and Pocitos beaches from 1927 to 2008 and their current areas.

An artifact called “*landward limits of the beach in 1927*” (L27) was used in Pocitos beach, where the landward limit of the beach was defined on the basis of its configuration in 1927, in order to know the trend, regardless of public works that expanded their area (creek diversion and re-alignment of the coast). A second artifact called “*landward limits of the beach in 2008*” (L08) was used, where the landward limit is the current (2008) spatial configuration.

The analysis included the long-term fluctuations of the beach area, especially the reductions, which were evaluated against freshwater and sea levels increases in the Río de la Plata river estuary produced by the great floods of the rivers Paraná and Uruguay (combined or separated), the time-series of severe storm surges, and the occurrence of El Niño Southern Oscillation (ENSO) El Niño and La Niña anomalies. Data for sea-level and storm surges at Montevideo (brackish waters) and river flow at the middle Río de la Plata river estuary are provided for the studied period (1928-2008) by the Uruguayan *Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada* (SOHMA) and the Argentinean *Instituto Nacional del Agua y el Ambiente* (INA) respectively.

Mineralogical analysis of the subaerial and subaquatic sediments of Ramírez and Pocitos beaches was conducted.

For Ramírez beach the Dean’s dimensionless parameter Ω ($H_b / w_f \cdot T$) was calculated where H_b is the significant wave height, w_f is the sediment fall velocity and T is the wave period, applied as proposed by Wright & Short (1984).

A simple regression statistical analysis is performed using R-CRAN statistical (R Core Team, 2013) software to calculate the model parameters of sand surface evolution. The assumption of normality and randomness was previously evaluated (See Supporting Information SI.I and SI.II). The Anderson-Darling test for normality was conducted on the surfaces value series and a run test was applied with PAST 1.96 (Hammer *et al.*, 2001).

The run test analysis is a non-parametric test for values obtained in time sequence to analyze randomness of events. The data set was transformed by subtracting the average, to obtain positive and negative numbers. This test was used because the data are not continuous by nature, since the flights were not planned for the systematic survey of the morphological evolution of beaches and that despite their statistical significance, the small magnitude of the changes could introduce uncertainty about the randomness of trends.

4. Results and discussion

4.1. Evolution of Ramírez beach

To analyze Ramírez beach, the start date was set at the date of the first image available (1927), when the arc of beach was similar to the current one.

Using a first series of 16 images (1927-2007), the evolution of the coastline according to PHTH-WL and WDL-RM indicators showed a weak significant trend of loss of surface ($p < 0.19$) (Figure 5a and 5b). Then, with a second series of 23 images (1927-2008), the analysis was completed (Figure 5c) and, given the similarity of results obtained, WDL-RM was the only one used as the proxy because it was best expressed in the time-series resulting in a tendency to a significant surface loss with $p < 0.02$. Some of the early records were removed (Figure 5d), based on the assumption that the image of 1945 (there are no records between 1927 and 1929) was shaped more like the present form. Before 1927, the most intense storms ever recorded occurred in Montevideo in 1923, and after the image of 1929, a prominent structure was built in the north end that changed the circulation patterns of sand sediment; hence the images of 1927 and 1929 were excluded.

Since 1927, there was an increase in the area of the arc of the beach until 1961 (maximum increase), possibly recovered from the impact of storm surges of 1923 and 1924. Since 1945, the beach has had the current con-

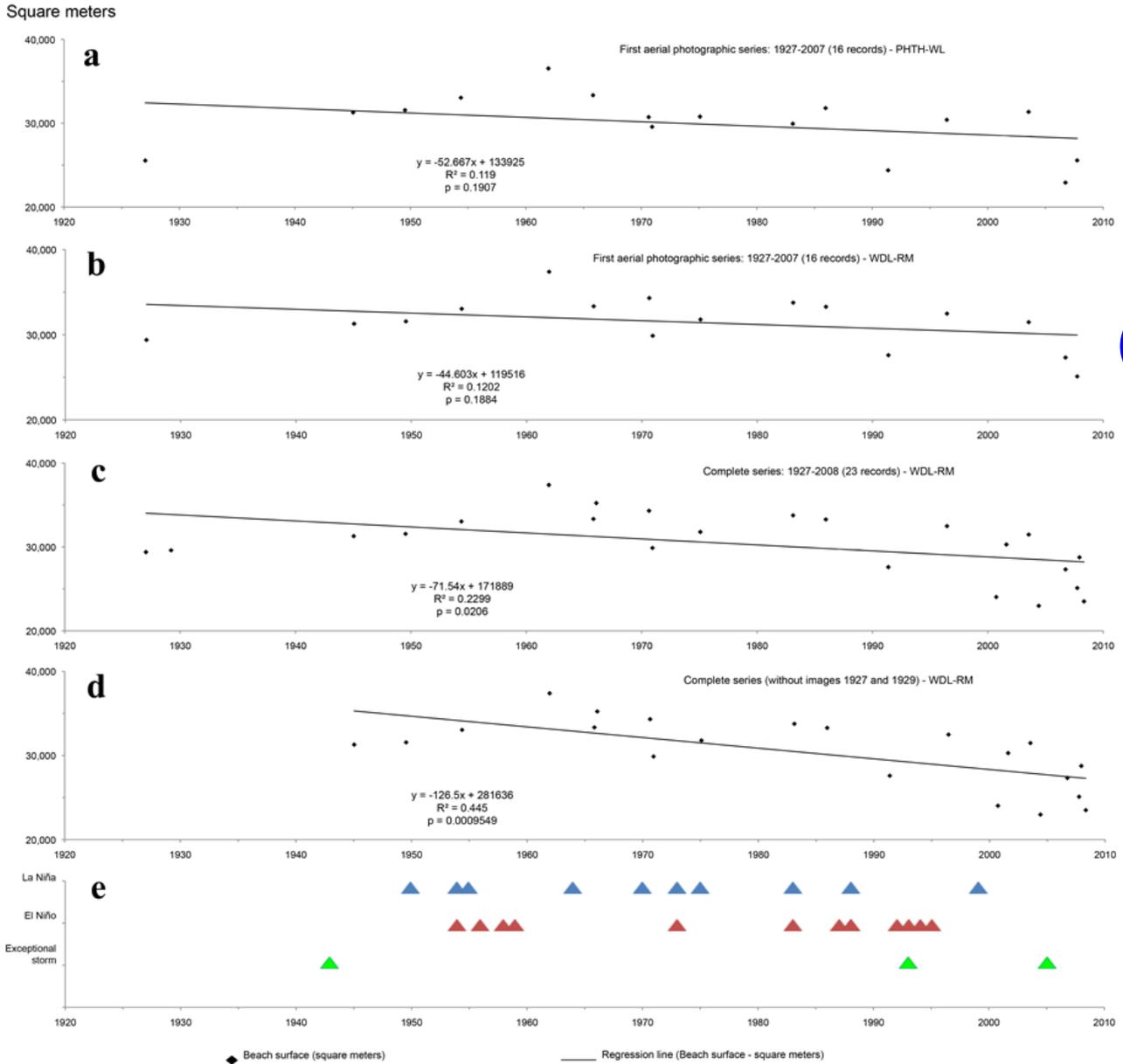


Figure 5 - Historical development of Ramírez beach arc from 1927-2008. a) First series of photos (16 entries) using the previous high tide high water level (PHTH-WL). b) the same series, using wet/dry line or run-up maxima (WDL-RM). The trend line indicates a weak decline of beach surface but sustained over time and statistically significant at 81%. c) all the 23 registers were used with WDL-RM. The trend line indicates a reduction of the beach surface statistically significant at 98%. d) Post-1945 records using WDL-RM are highly significant at $p < 0.001$. e) Series of ENSO anomalies and extreme storm surges show some degree of association with erosion-accretion of the beach surface. Blue triangle represent La Niña events, red triangle El Niño events, and green triangle the extreme storms.

Figura 5 - Desenvolvimento histórico do arco da praia de Ramírez no período 1927-2008. a) Primeira série de fotos (16) considerando a linha da maré cheia anterior à foto (PHTH-WL). b) A mesma série, considerando a linha praia seca / praia molhada ou o run-up máximo (WDL-RM). A linha de tendência revela um pequeno declínio da superfície da praia, mas persistente ao longo do tempo e estatisticamente significativo (81%). c) Conjunto dos 23 registros considerando em todos a linha praia seca / praia molhada ou o run-up máximo (WDL-RM). A linha de tendência indica uma redução da superfície de praia estatisticamente significativa em 98%. d) Os registros pós-1945 utilizando WDL-RM são altamente significativas para $p < 0,001$. e) As séries de anomalias ENSO e de temporais extremos apresentam algum grau de associação com a erosão-acreção da superfície da praia. Os triângulos azuis representam eventos de La Niña, os triângulos vermelhos os eventos de El Niño, e os triângulos verdes os temporais extremos.

figuration and the evolution of its surface areas shows a highly significant ($p < 0.001$) negative trend (Figure 5d and see Supporting Information SI.III). The randomness of the process was ruled out by the runs test (Figure 6). Descriptive statistics (See SI.IV) for the series of 16 images (1927-2007) was analyzed for the full set of 23 images (1927-2008), and the complete series using post-1945 images. The coefficient of variation ($CV = 12.69\%$) of beach surface areas shows little variability in the data and it is further reduced by removing from the analysis the photos prior to 1945 ($CV = 13.24\%$). From the analysis of the multi-temporal evolution of Ramírez, and depending on the considered period, a decrease in the surface area of $126 \text{ m}^2/\text{year}$ was recorded (from 1945-2008).

Ramírez behaves as a dissipative beach in typical sea conditions because it is characterized by a large area of low slope, surf and spilling breaking waves. However, the Dean's dimensionless parameter Ω classifies Ramírez as an "intermediate" sandy beach ($46\text{cm} / [2\text{cm}\cdot\text{s} \times 4.4\text{s}] = 5.2$). The Ω parameter determines the threshold values or transition from reflective to intermediate or from dissipative to intermediate beach type. Dean (Ω) values "less than 1" are associated with reflective beaches, values between "1 and 6" are intermediate states and those "over 6" are typically dissipative beaches. The apparent contradiction of this result, may explain its relative stability, despite suffering significant losses due to wind transport towards the waterfront.

The convex transverse profile is characteristic of an intermediate beach as established by the parameter Ω . However, the geological control exerted by the shore platform in the surf zone, determined that under normal conditions the beach behaves as dissipative, whereas it behaves as intermediate under storm surge conditions according to its convex profile and the value of Ω . Here, storm surge is defined as an increase in coastal water level caused by the action of wind blowing over the sea surface (wind setup) (DECCW, 2010).

During low water conditions, the coastline of this beach retreats 200 m and exposes an area of abrasion enriched in dense minerals. Therefore, the relative stability of

this beach would be supported by a slow recovery of the profile due to sediment transport from the plain of abrasion to the sub-aerial beach. The analysis of the series of images indicates that Ramírez lost a beach area of $5,791.5 \text{ m}^2$ (19.7%) from 1927 to 2008. This loss is relatively consistent with the observed 11 cm sea level rise (SLR) at Montevideo in the last 100 years (Bidegain *et al.*, 2005; Magrin *et al.*, 2007; Nagy *et al.*, 2013, 2014a; Verocai *et al.*, 2014), and the consequent reduction of $5,600 \text{ m}^2$ obtained by Saizar (1997) applying the Bruun Rule (where the shoreline retreat is equal to the ratio of rising sea level with the tangent of the angle of the beach).

In addition, the difference between the current state and the best/worst case scenario of each beach in the time-series was analyzed. The percentage difference between the largest observed area and its current area was -37.1%, whereas the percentage difference between the smallest observed area and its current area was only 2.3% (Table 2).

Table 2 - Calculated percentage difference for Ramírez and Pocitos between the largest/smallest area for each beach from 1927 to 2008 and their current areas. From this figure the distance between the current state and the best/worst case scenario of each beach is analyzed.

Tabela 2 - Diferença percentual calculada para Ramírez e Pocitos entre a maior / menor área de cada praia entre 1927 e 2008 e suas áreas atuais. A diferença entre o estado atual e os pior e melhor cenários de cada praia foi analisada com base nestes dados.

	Ramírez		Pocitos	
	L27	L08	L27	L08
Difference with the largest beach area ever registered	-37.1	-42.2	-32.6	
Difference with the smallest beach area ever registered	2.3	0.2	0.0	

Nevertheless, this calculation assumes a linear steady SLR from 1927-2008 which was not been the case;

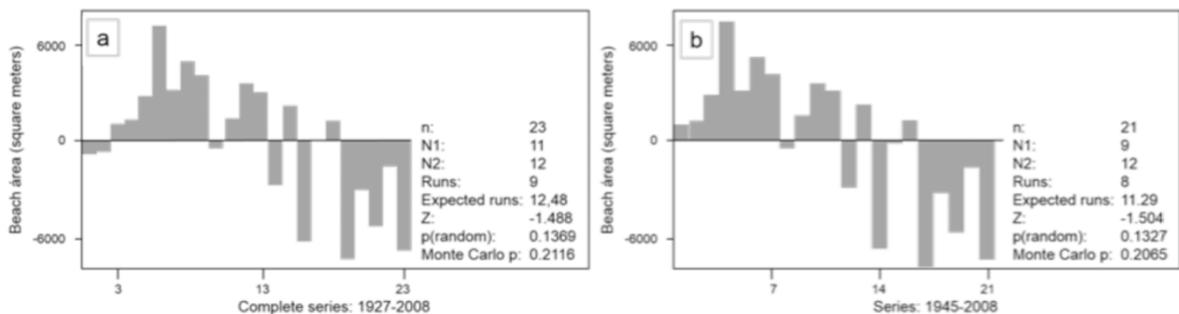


Figure 6 - Run test results for Ramírez beach. a) all the 23 registers were used with WDL-RM; b) post-1945 records.

Figura 6 - Resultados do teste para a praia de Ramírez. a) considerando a totalidade dos 23 registros, com WDL-RM; b) considerando apenas os registros pós-1945.

more than half of the observed SLR occurred between 1961-2003 (Nagy *et al.*, 2005). Thus, there is not that good fit between morphological changes and SLR when shorter periods are considered.

4.2. Evolution of Pocitos beach

The analysis of the series of images of Pocitos also begins in 1927, the year of the first photographic record. Unlike Ramírez, Pocitos is oriented eastward which made it less vulnerable to the extreme storm surge in 1923, associated with very strong (> 100 km/hour) and persistent (over 24 hours) Southwest Wind (data collected for the old *Servicio Meteorológico del Uruguay*). The trend analysis of Pocitos beach was performed using the two artifacts L27 and L08 for the wet/dry line or run-up maxima (WDL-RM) as a proxy of the coastline. The first trend analysis was performed with a series of 15 images from 1927-2007 (Figure 7a and 7b). This series does not show significant changes in the surface area of exposed sand, but for the L27 limit it suggests a marginally significant retracement trend ($p = 0.1$) (Figure 7a and see Supporting Information SI.Va) of the beach area.

The coefficient of variation (See Supporting Information SI.VI) of beach surface area (series of 15 images: 1927-2007) indicates little variability in the data using L27 (CV = 14.82%), which is further reduced by analyzing the series using L08 as landward limit (CV = 10.21%). To deepen this analysis and confirm or exclude the evidence shown in the previous analysis, a set of 21 images was analyzed from 1927 to 2008. The linear regression trend line indicates a reduction of the beach surface statistically significant ($p < 0.04$) for L27 (See SI.Vc), while the trend is not significant for L08 (See SI.Vd), even indicating a very slight upward trend of beach area (+6 m²/year). This would confirm that the effect of the artificial extensions might have masked the loss of surface area (Figure 7c and 7d). The coefficient of variation of beach surface area (series of 21 images: 1927-2007) indicates little variability in the data (L27 CV = 15.33% and L08 CV = 10.94%) (See SI.VIc and SI.VId).

For both series (15 and 21 images) the runs test does not rule out that the behavior of the advance and retreat of the coastline is of a random type, considering that the value of the test is very close to 0.2 at the edge of the range from which it is considered random (Figure 8a to 8d). The Pocitos dry-beach surface area has increased by 24,000 m² from 1927 to date due to the expansion work done by the IdeM. Likewise, what was done in Ramírez, assuming that the present configuration of the beach begins in 1954, images of 1927, 1945 and 1949 were removed from the analysis. Then, the beach surface area loss was not statistically significant for L27 and L08. This result would indicate that the surface area

of the beach shows a relatively stable system after human intervention began (Figure 7e and 7f).

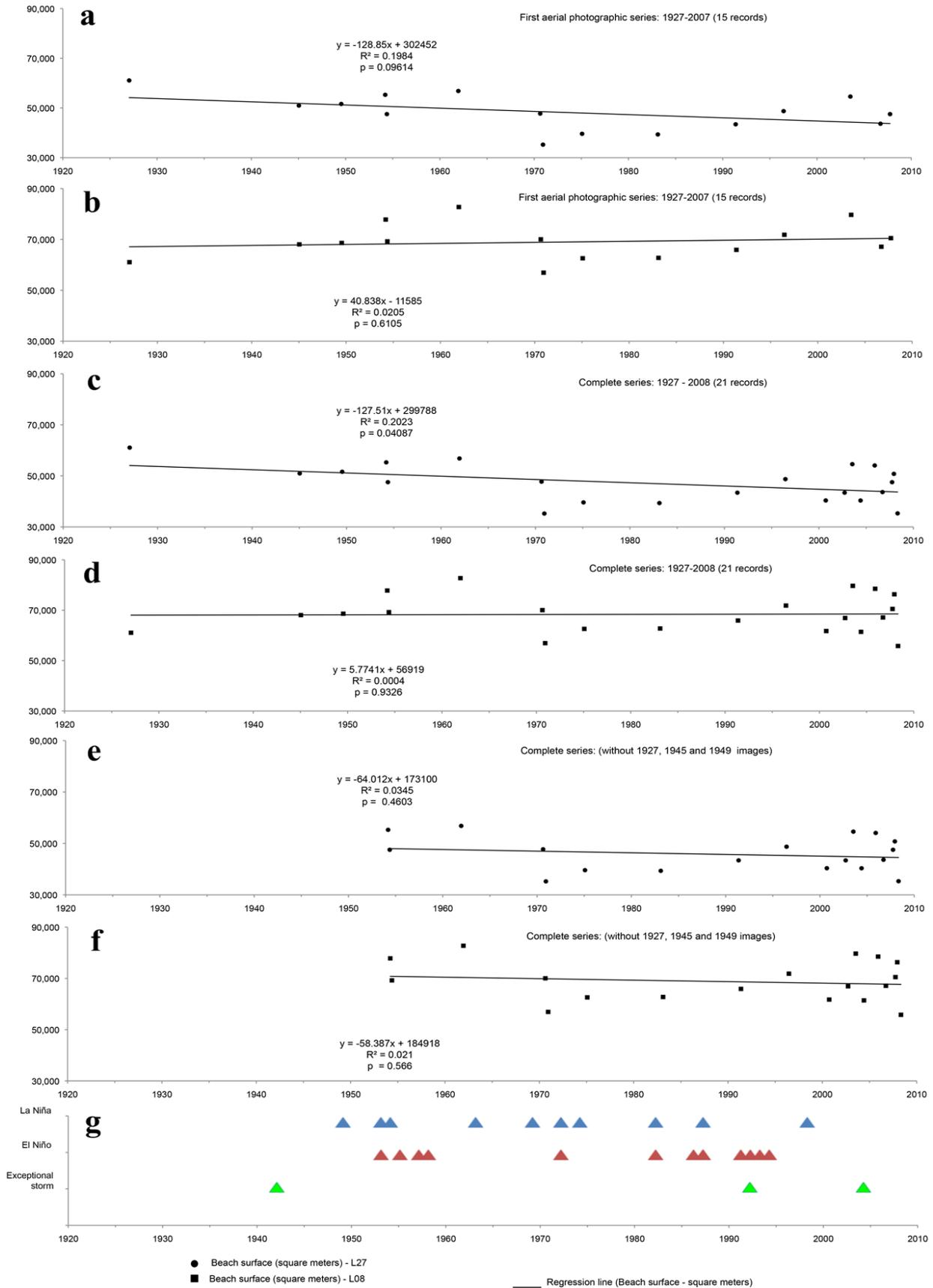
Such relative stability can have several causes: a) likewise Ramírez, Pocitos also has an abrasion plain located on its southern area (end of Trouville) and much of its current relative stability may be due to slight drift transport from the South to the North, which is reinforced by aeolian transport in the same direction; b) due to its location, the beach is relatively protected from the SW storms, the primary cause of wind-related coastal erosion. Furthermore, fluctuations in the beach match its natural dynamics and/or human intervention, including beach sand filling from Ramírez in the early 1960s.

The descriptive statistics of the series of 18 images from 1954 were also analyzed (See Supporting Information SI.VIe and SI.VIf) when the coast had already been rectified and the beach had a configuration similar to the present. The coefficient of variation of beach surface for L27 decreases (CV = 14.77%) when compared to the test performed with the full set of 21 images, probably because since 1954 the beach has had a conformation similar to the present. However, when the analysis is performed for the series of 18 images using L08 as landward limit (CV = 11.49%), this ratio increases due to increases in the beach surface area and the various modifications made by the local government (IdeM).

Runs test was applied to this series of 18 images (1954 to 2008), and to the two approaches (L27 and L08). The test infers that the advance and retreat of the coastline is random for the level of significance set for both L27 and L08 (Figure 8e and 8f), while the coefficients of variation of the data are kept low for both cases (L27 CV = 14.77% and L08 CV = 11.49%). The figure obtained by applying the Bruun Rule, with the parameter calculated by Saizar (1997) for beaches of Montevideo, is 15,982 m² in Pocitos which is intermediate between the current (L08), and which would have been observed without human intervention (L27). Also, the estimated regression loss would be negligible for L08 (470 m²) and 10,328 m² for L27 for 1927-2008 which represents 0.8 and 16.9% respectively.

The loss of sand in Pocitos from 1927-2008 was estimated at 5,257 m² (8.6% of the surface area) using the L08 artifact, which includes all interventions that increased the surface of the beach; instead, the L27 artifact, that restricts the analysis to the original surface of the beach in 1927, estimated a loss of 25,756 m² or 42.2% (1927-2008). Despite the relative stability of the coastline, the beach prism suffered a significant reduction from the earliest available detailed map (Figure 4). Such reduction could be explained by the permanent leakage of sand towards the waterfront, from where the sand has been definitively removed whit mechanized cleaning by the IdeM, during the entire analysis period.

Square meters



116

Figure 7 – See caption in the next page
 Figura 7 – Ver legenda na próxima página

Figure 7 - Historical trend-line of Pocitos beach arc from 1927-2008 using WDL-RM. In a), c) and e) the artifact (L27) "landward limits of the beach in 1927" is used, while in b), d) and f) the artifact (L08) "landward limits of the beach in 2008" is used. In a) and b) the trend-line of the first series of 15 photos shows a weak but sustained decline over time in beach area, significant at 90% in a), and not significant in b). In c) and d) all 23 records of this beach are used. The beach area reduction is statistically significant at 96% when the L27 limit is used, but not significant when using the L08 limit, even indicating a very slight upward trend of the beach area. In e) and f) the post-1954 records are used. The trends are not statistically significant for any of the limits, although a slight loss of area was observed. g) Series of ENSO anomalies and extreme storm surges show some degree of association with erosion-accretion of the beach surface. Blue triangle represent La Niña events, red triangle El Niño events, and green triangle the extreme storms.

Figura 7 - Tendência histórica da linha do arco da praia de Pocitos no período 1927 a 2008 usando WDL-RM. Em a), c) e e) foi utilizado o artefato (L27) "limite terrestre da praia em 1927", enquanto que em b), d) e f) se utilizou o artefato (L08) "limite terrestre da praia em 2008". Em a) e b) a linha de tendência da primeira série de 15 fotos revela pequeno mas persistente declínio ao longo do tempo da área de praia, significativa a 90% em a), e não significativa em b). Em c) e d) foram utilizados todos os 23 registros desta praia. A redução de área de praia é estatisticamente significativa em 96% quando o limite L27 é utilizado, mas não é significativa quando se usa o limite L08, mesmo indicando uma ligeira tendência de aumento da área de praia. Em e) e f) foram utilizados apenas os registros pós-1954. As tendências não são estatisticamente significativa para qualquer um dos limites, embora se tenha observado uma ligeira perda de área. g) As séries de anomalias ENSO e de temporais extremos apresentam algum grau de associação com a erosão-acreção da superfície da praia. Os triângulos azuis representam eventos de La Niña, os triângulos vermelhos os eventos de El Niño, e os triângulos verdes os temporais extremos.

However, the percentage difference between the largest observed area compared with the photographic records shows differences of -42% for L27 and -32.6% for L08 suggesting that beyond the statistical results, the current state of the beach shows the highest percentage loss of surface compared to previous states. Moreover, the percentage difference between the lower recorded area compared to the photographic record was 0.2% for L27 and L08 for 0.0%, since 2008 coincides with the lowest record (Table 2).

Therefore, the analysis of the series of 21 images of Pocitos beach from 1927-2008, shows that the dry surface area of this beach has increased, although the same considerations that were made to Ramírez are valid, compounded by the fact that Pocitos beach has in some areas less than 0.60 m of sand thickness. Therefore, the apparent stability of this beach can relate mainly to a continuous "dry beach construction" by the IdeM (Figures 7c and 7e). So, without human intervention Pocitos beach should have suffered a significant reduction.

4.3. Behavior of the ensemble of case studies

For pocket beaches, especially if they are subject to human intervention, a different analysis than the one usually used for a wide beach is required. Pocket beaches may have significant responses to severe climate events; however, trends show spatial changes of small magnitude in the medium term. Ramírez and Pocitos have almost opposite orientations (the former to the West and the latter to the East), different depth gradients and divergent drifts, and although they have a similar mineralogical composition, they are two separate beaches, and independent of the other urban beaches of Montevideo (Figure 1). Therefore, it is particularly important to analyze the causes of the similarities in behavior over the years.

The existence of a relationship between the floods of the Paraná and Uruguay rivers, individually and combined, with the Río de la Plata level at Montevideo was explored, since floods trigger sea level fluctuations (Bidegain *et al.*, 2005; Nagy *et al.*, 2005) and according to recent studies (Nagy *et al.*, 2013, 2014b, 2015), these fluctuations may be in the range of 10-20 cm. This influence of river inflow on SLR is explained by the local effect of a close mouth of a great river (Nicholls *et al.*, 2011) such as the Río de la Plata (Nagy *et al.*, 2014b). Thus the possibility of a receding shoreline cannot be ruled out. However, the comparison between these flood events and the behavior of the middle estuary beaches, contrary to expected, shows that the period when the beaches show increased recovery coincide with major flooding and higher sea levels at Montevideo.

A series of subsequent images to the extreme Southern storm events (1923 and 1924) was analyzed that produce positive anomalies in sea level (storm surges), finding three events with increases in water/sea level of 2 m amsl or more, which coincide with the shoreline retreats observed in 1943, 1993 and 2005. Storm surges over 2 m amsl are those exceeding the prism of the beaches studied in most of its surface. These beaches have very little area above 1.84 m amsl which is the height of the biennial extraordinary high tide, and 2.11 m amsl with an estimated return period of 10 years (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979). Therefore, since the current major impacts occur when water level increases 2 m amsl, and the observed SLR is 0.11 m amsl, a future SLR of only 0.20 m or less, would be sufficient to reach a critical point.

Unfortunately, the available discontinuous series of images and the low number of simultaneous occurrence of ENSO years 1-2 years before them precludes any robust statistical inference. However, the results presented

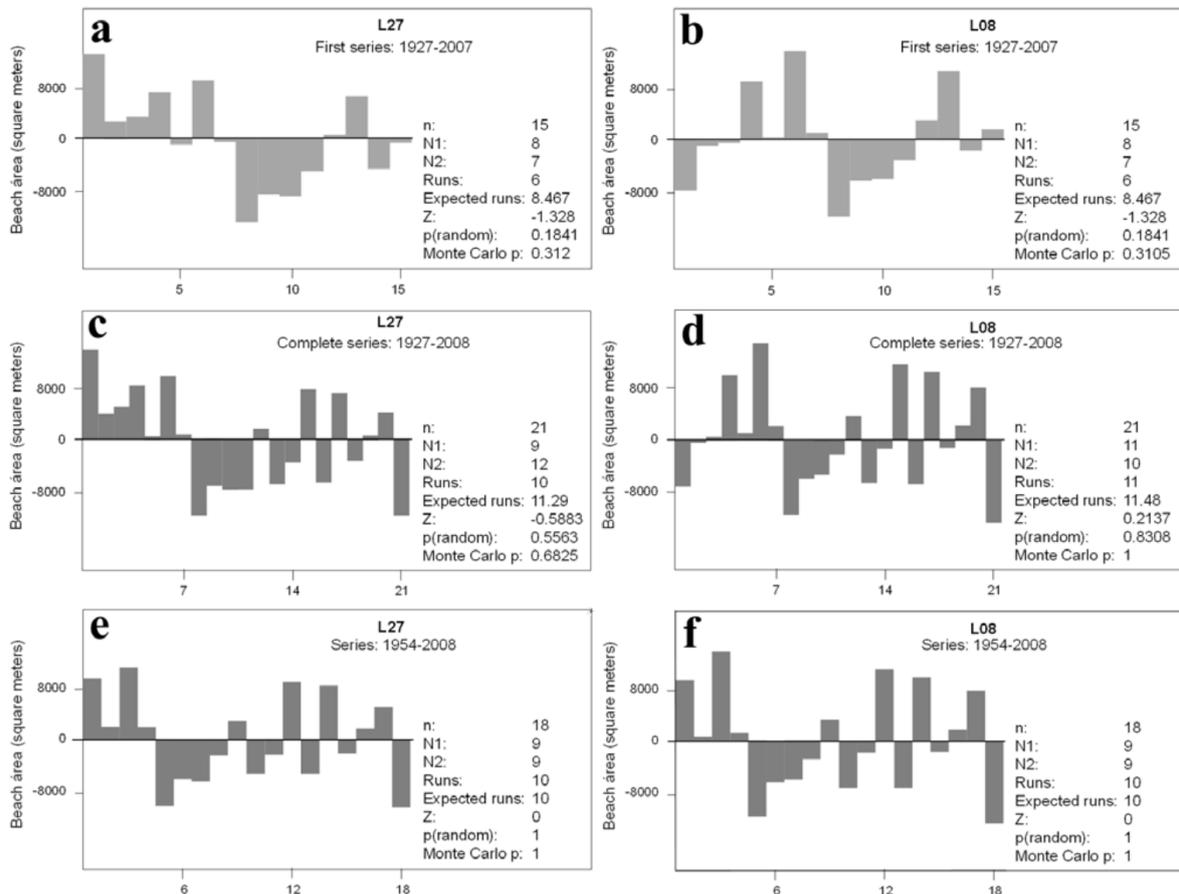


Figure 8 - Run test results for Pocitos beach. L27: a) First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); c) Complete series: 1927-2008 (21 records); e) Complete series (without 1927, 1945 and 1949 images). L08: b) First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); d) Complete series: 1927-2008 (21 records); f) Complete series (without 1927, 1945 and 1949 images).

Figura 8 - Resultados do teste para a praia de Pocitos. L27: a) Primeira série fotográfica aérea: 1927-2007 (15 registros); c) Série completa: 1927-2008 (21 registros); e) série completa (sem imagens de 1927, 1945 e 1949). L08: b) Primeira série fotográfica aérea: 1927-2007 (15 registros); d) Série completa: 1927-2008 (21 registros); f) série completa (sem imagens de 1927, 1945 e 1949).

here support the hypothesis of the existence of some degree of relationship between the occurrence of strong to moderate La Niña events of long duration-and shoreline retreat, which were analyzed according to the historical series of ENSO events (Severov *et al.*, 2004) and, conversely, recoveries during El Niño events (Figure 5 and 7). In the same way, Ortega *et al.* (2013) in analyzing two ocean sandy beaches of Eastern Uruguay, plotted the values of wind speed anomalies for the area and the sedimentary balance of sands. The trend line from 1985-2009 and the distribution of outliers (anomalies) suggests a similar pattern of coincidence between ENSO events and sedimentary balance. The apparent correlation with ENSO events needs further research.

5. Conclusions

The examples presented in this article show how dependent on the magnitude of the changes, the time-scale

of the analysis and the frequency of records, are the conclusions. Thus, in urban pocket beaches, it is crucial to have numerous aerial photos and satellite images over long time intervals in order to make reliable analysis of the morphological evolution.

Since the discontinuous time-series of records can not match ideally with the occurrence of human interventions and climate events, it is important to obtain as many records as possible.

Ramírez and Pocitos beaches seem to be relatively stable but fluctuating from 1927 (first aerial photographic record available) to 2008. Both beaches are shown to be resilient to sporadic water/sea level rises. For Pocitos, this was true only after the end of heavy human intervention affecting this beach in the first half of the twentieth century which left the beach very vulnerable. However, the risk might increase again if the frequency of extreme events increases under likely future climate change scenarios.

In addition to the diverse human interventions explained along this article and the observed 11 cm sea level rise, some of the fluctuations observed in the 81-year period of analysis seem to be associated with years with atmospheric circulation anomalies related to ENSO or extreme storms with an increase in sea level of more than two meters above the historical mean sea level.

Therefore, a better understanding of the medium-term trends in regional atmospheric circulation will allow estimating likely beach evolution under climate change and, in particular in pocket beaches, of the expected sea level rise, in order to provide a basis to planning better adaptations to the threats and impacts associated with these trends.

Understanding the evolution of urban beaches subjected to long term human interventions such as Pocitos and Ramírez of Montevideo, requires a historical analysis to determine both the effects of the inertia of the past, and to determine when the beaches acquired a dynamic setting similar to the present, in order to have scenarios of future developments. Keeping the desired state of resilience of these beaches under both climatic and human pressures requires a thorough understanding of trends and variables that affect their states of balance-imbalance.

6. Management recommendations

To an effective coastal zone management it is crucial to understand the roots of the conflicts and issues that influence the littoral at Present (according to Dias *et al.*, 2012).

Therefore, it would be a wise practice the recovery of natural structures, like primary dune and seed of psamophyl native grasses and other pioneers species as a way of recovering beach prism to prevent the reflection of waves from the armored road.

From the knowledge generated by this research, we believe that in order to analyze long-term morphological changes and improve the prognosis of the future evolution of these beaches, it would be desirable that the local government conduct the following actions:

- Keep track of trends in these beaches. This will make it possible to assess the resilience of both beaches regarding restoration measures. But fundamentally, it will reveal the evolution of the beaches facing the gradual sea level rise and storm surges.
- Control sand loss by building fences to prevent its loss by the stairs to the beach.
- Replenish sand extracted in cleaning.
- Redistribute the already existing sand aimed at increasing prism height beach.

Moreover, the implementation of a monitoring of the evolution of beach prism would allow the agencies in charge of coastal management to contrast the effectiveness of the measures taken, considering not only the time factor but also some variables involved and/or affected by the intra-annual variability.

Will the studied pocket beaches keep stable under a plausible and likely climatic scenario for the near future of a La Niña event ("erosive Southwestern winds") and a storm surge (+ 2.3 amsl) with a slight SLR of only +5 cm?

Therefore, our results suggest the importance of continuing the analysis of the evolution of these and other urban beaches of Montevideo, to better understand the suggested relationship between climate forcings, i.e., ENSO and fluctuations in the beach area.

Knowing the morphological responses of these beaches will allow better coastal management and climate adaptation.

Appendix

Supporting Information associated with this article is available online at http://www.aprh.pt/rgci/pdf/rgci-553_Gutierrez_Supporting-Information.pdf

Acknowledgements

This research was conducted as part of the "Technical Proposal for the conservation and recovery of Buceo beach and certified beaches of Montevideo", agreement between UNCIEP, Facultad de Ciencias, Universidad de la República and the Departamento de Desarrollo Ambiental, Intendencia de Montevideo (IdeM). We are grateful to the four reviewers: William J. Neal, Carlos Loureiro, Augusto Pérez-Alberti and the anonymous reviewer. Their suggestions and valuable comments on drafts of this paper have improved its quality. We too sincerely thank Daniela Peluffo for her language assistance.

References

- Almeida, D. (2012) - Land use changes in Costa de Caparica and Albufeira: an input to coastal management. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 12(3):263–275. DOI: 10.5894/rgci326
- Armaroli, C.; Ciavola, P.; Balouin, Y.; Gatti, M. (2006) - An Integrated Study of Shoreline Variability Using GIS and ARGUS Techniques. *Journal of Coastal Research* (ISSN: 0749-0208), SI39:473–477, Itajaí, SC, Brazil. Available on line at http://siaiacad09.univali.br/ics2004/arquivos/94_armaroli.pdf.
- Baptista, P.; Cunha, T.; Bernardes, C.; Gama, C.; Ferreira, Ó.; Dias, A. (2011) - A Precise and Efficient Methodology to Analyse the Shoreline Displacement Rate. *Journal of Coastal Research*, 27:223–232. DOI: 10.2112/09-1187.1
- Barrios-Pintos, A. (1971) - *Montevideo, Los Barrios I*. Editorial Nuestra Tierra. 62p., Impresora Rex S.A., Montevideo, Uruguay. Available on line at http://www.periodicas.edu.uy/o/Nuestra_tierra/pdfs/4-Montevideo_Los_barrios_I.pdf.
- Bidegain, M.; Caffera, R.M.; Blixen, F.; Pshennikov, V.; Lagomarsino, J.J.; Forbes, E.A.; Nagy, G.J. (2005) - Tendencias climáticas, hidrológicas, y oceanográficas en el Río de la Plata y Costa Uruguaya. In: V. Barros, A. Menéndez & G.J. Nagy (eds.),

- El Cambio Climático en el Río de la Plata*, pp.137–143, Project assessments of impacts and adaptation to climate change (AIACC), CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina. Available on line at http://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/libros/Cambio_Climatico-Texto.pdf.
- Bird, E.C.F. (1985) - *Coastline changes: A global review*. 219p., Wiley, Chichester, U.S.A. ISBN: 978-0471906498.
- Boak, E.H.; Turner, I.L. (2005) - Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4):688–703. DOI: 10.2112/03-0071.1
- Brown, A.C.; McLachlan, A. (2002) - Sandy shore ecosystems and the threats facing them: some predictions for the year 2025. *Environmental Conservation*, 29(01):62–77. DOI: 10.1017/S037689290200005X
- Carter, R.W.G. (1988) - *Coastal Environments: An Introduction to the Physical, Ecological and Cultural Systems of Coastlines*. 617p., Academic Press, London, England. ISBN: 978-0121618568.
- Ciavola, P.; Corbau, C.; Cibin, U.; Perini, L. (2003) - Mapping of the coastal zone of the Emilia-Romagna region using geographical information systems. In: E. Özhan (ed.), *Proceedings of The Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment*, Volume III, pp.2363–2374, MEDCOAST, Ravenna, Italy. Available on line at <http://www.medcoast.net/modul/index/Menu/MEDCOAST-03-2009>.
- DECCW (2010) – *Coastal Risk Management Guide. Incorporating sea level rise benchmarks in coastal risk assessments*. 6p., Department of Environment, Climate Change and Water NSW, Sydney South, Australia. ISBN: 978-1742329222. Available on line at <http://www.environment.nsw.gov.au/resources/water/coasts/10760CoastRiskManGde.pdf>
- Dias, J.M.A.; Boski, T.; Rodrigues, A.L.; Magalhães, F. (2000) - Coast line evolution in Portugal since the Last Glacial Maximum until present — a synthesis. *Marine Geology*, 170(1-2):177–186. DOI: 10.1016/S0025-3227(00)00073-6
- Dias, J.M.A.; Mahiques, M.M. de; Cearreta, A. (2012) - Coastal Management: the result of a doubtful relationship between Man and Nature. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 12(1):3–6, DOI: 10.5894/rgci331
- Dolan, R.; Hayden, B.P.; Heywood, J. (1978) - A new photogrammetric method for determining shoreline erosion. *Coastal Engineering*, 2:21–39. DOI: 10.1016/0378-3839(78)90003-0
- Dolan, R.; Hayden, B.P.; May, P.; May, S. (1980) - The reliability of shoreline change measurements from aerial photographs. *Shore & Beach* (ISSN: 0037-4237), 48(4):22–29, American Shore & Beach Preservation Association, Fort Myers, FL, U.S.A.
- Dolch, T. (2010) - Analysis of Long-Term Changes of a Sandy Shoreline Utilising High-Resolution Aerial Photography. In: D.R. Green (ed.), *Coastal and Marine Geospatial Technologies, Coastal Systems and Continental Margins*. pp. 187–196, Springer Netherlands, Dordrecht. DOI: 10.1007/978-1-4020-9720-1_17
- Echevarría, L.; Gómez, A.; Piriz, C.; Quintas, C.; Tejera, R.; Conde, D. (2013) - Capacity building for local coastal managers: a participatory approach for Integrated Coastal and Marine Zones Management in Uruguay. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 13(4):445–456. DOI: 10.5894/rgci402
- Ferreira, Ó.; Garcia, T.; Matias, A.; Taborda, R.; Dias, J.M.A. (2006) - An integrated method for the determination of set-back lines for coastal erosion hazards on sandy shores. *Continental Shelf Research*, 26:1030–1044. DOI: 10.1016/j.csr.2005.12.016
- Freitas, J.G. de; Dias, J.M.A. (2012) - Praia da Rocha (Algarve, Portugal): um paradigma da antropização do litoral. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 12(1):31–42. DOI: 10.5894/rgci317
- García-Moyano, G. (1969) - *Pueblo de los Pocitos*. 111p., Ediciones de la Banda Oriental, Montevideo, Uruguay.
- García, V.I. (1908) - Proyecto de saneamiento de la cuenca de los Pocitos. *Revista de la Asociación de Ingenieros y Arquitectos del Uruguay* (ISSN: 0797-4973), 2(10):22–29, Asociación de Ingenieros y Arquitectos del Uruguay, Montevideo, Uruguay. Available on line at <http://www.fing.edu.uy/biblioteca/revistas/198147.pdf>
- Gutiérrez, O.; Panario, D. (2005) - Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos. *Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio E Medio Ambiente* (ISSN: 1578-5637), 5:107–126, Departamento de Xeografía, Universidade de Santiago de Compostela, Santiago de Compostela, España. Available on line at <http://hdl.handle.net/10347/3742>
- Hammer, Ø.; Harper, D.A.T.; Ryan, P.D. (2001) - PAST: paleontological statistics software package for education and data analysis. *Palaeontologia Electronica*, 4(1):art.4 (9p.). DOI: 10.1016/j.bcp.2008.05.025
- Klemas, V. (2011) - Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. *Journal of Coastal Research*, 27:2–17. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-10-00103.1
- Magrin, G.; García, C.G.; Choque, D.C.; Giménez, J.C.; Moreno, A.R.; Nagy, G.J.; Nobre, C.; Villamizar, A. (2007) - Latin America. Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability. In: M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden & C.E. Hanson (eds.), *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*, pp.581–615, Cambridge University Press, Cambridge, England. ISBN: 978-0521880107. Available on line at http://www.ipcc.ch/publications_and_data/ar4/wg2/en/ch13.html.
- Millennium Ecosystem Assessment (2005) - *Ecosystems & Human Well-Being: Wetlands and water Synthesis*. 68p., World Resources Institute, Washington, D.C., U.S.A. ISBN: 1-5697-35972. Available on-line at <http://www.millenniumassessment.org/documents/document.358.aspx.pdf>.
- Moore, L.J.; Ruggiero, P.; List, J.H. (2006) - Comparing mean high water and high water line shorelines: Should proxy-datum offsets be incorporated into shoreline change analysis? *Journal of Coastal Research*, 22(4):894–905. DOI: 10.2112/04-0401.1
- MTOP/PNUD/UNESCO (1979) - *Conservación y mejora de playas - URU. 73.007*. 593p., Unesco, Montevideo, Uruguay. Available on line at http://www.ecoplata.org/wp-content/files_mf/1396027637%20Conservaci%003a%20mejoradeplayasURU.73.007.pdf.
- Nagy, G.J.; Ponce, A.; Pshennikov, V.; Silva, R.; Forbes, E.A.; Kokot, R. (2005) - Desarrollo de la capacidad de evaluación de la vulnerabilidad costera al Cambio Climático: Zona Oeste de Montevideo como caso de estudio. In: V. Barros, Á. Menéndez & G.J. Nagy (eds.), *El Cambio climático en el Río de la Plata*, pp.173–180, Project assessments of impacts and adaptation to climate change (AIACC), CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina. Available on line at http://www.cima.fcen.uba.ar/~lcr/libros/Cambio_Climatico-Texto.pdf.
- Nagy, G.J.; Seijo, L.; Verocai, J.E.; Brugnoli, E.; Bidegain M. (2013) - Enfoque, conocimiento y medidas para enfrentar las amenazas del clima presente en la zona frontal del Río de la Plata, Uruguay. *Costas, Revista Iberoamericana de Manejo Costero Integrado* (ISSN: 2304-0963), 2(2):69–87, UNESCO, Montevideo, Uruguay. Available on line at <http://unesdoc.unesco.org/images/0022/002270/227017m.pdf> - 227739.
- Nagy, G.J.; Seijo, L.; Verocai, J.E.; Bidegain, M. (2014a) - Stakeholders' climate perception and adaptation in coastal Uruguay. *International Journal of Climate Change Strategies and Management*, 6(1):63–84. DOI: 10.1108/IJCCSM-03-2013-0035
- Nagy, G.J.; Muñoz, N.; Verocai, J.E.; Bidegain, M.; Seijo, L. (2014b) - Adjusting to current climate threats and building alternative future scenarios for the Río de la Plata coast and estuarine



- front, Uruguay. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 14(4):553-568. DOI: 10.5894/rgci472
- Nagy, G.J.; Gómez-Erache, M.; Kay, R. (2015) - A risk-based and participatory approach to assessing climate vulnerability and improving governance in coastal Uruguay. In: Bruce Glavovic, Michael Kelly, Robert Kay & Ailbhe Travers (eds.), *Climate change and the coast. Building resilient communities*, pp.357-378, CRC Press / Taylor & Francis, London. ISBN: 978-0415464871. DOI: 10.1201/b18053-23
- Nicholls, R.J.; Hanson, S.E.; Lowe, J.A.; Warrick, R.A.; Lu, X.; Long, A.J.; Carter, T.R. (2011) - Constructing Sea-Level Scenarios for Impact and Adaptation Assessment of Coastal Area: A Guidance Document. 47p., Supporting Material, Intergovernmental Panel on Climate Change Task Group on Data and Scenario Support for Impact and Climate Analysis (TGICA). Available on line at http://www.ipcc-data.org/docs/Sea_Level_Scenario_Guidance_Oct2011.pdf.
- Nordstrom, K.F. (2004) - *Beaches and dunes of developed coasts*. 356p., Cambridge University Press, Cambridge, England. ISBN: 978-0521545761.
- Ortega, L.; Celentano, E.; Finkl, C.; Defeo, O. (2013) - Effects of climate variability on the morphodynamics of Uruguayan sandy beaches. *Journal of Coastal Research*, 29(4):747-755. DOI: 10.2112/JCOASTRES-D-13-00003.1
- Overton, M.F.; Grenier, R.R.; Judge, J.E.K.; Fisher, J.S. (1999) - Identification and Analysis of Coastal Erosion Hazard Areas: Dare and Brunswick Counties, North Carolina. *Journal of Coastal Research* (ISSN: 0749-0208), Si28:69-84, Coastal Education & Research Foundation, Coconut Creek, U.S.A. Available on line at <http://www.jstor.org/stable/25736187>
- Panario, D.; Gutiérrez, O. (2006) - Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas. In: R. Menafra, L. Rodríguez-Gallego, F. Scarabino & D. Conde (eds.), *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*, pp.21-34, Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay. ISBN: 9974-758920. Available on line at http://vidasilvestre.org.uy/wp-content/uploads/2012/09/03_Dinamicas-y-fuentes-de-sedimentos-de-las-playas-uruguayas-Panario.pdf
- Pilkey, O.H.; Neal, W.J.; Cooper, J.A.G.; Kelley, J.T. (2011) - *The World's Beaches. A Global Guide to the Science of the Shoreline*. 302p., University of California Press, Berkeley, C.A., U.S.A. ISBN: 978-0520268722.
- R Core Team (2013) - *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. Available on line at <http://www.r-project.org/>
- Ribeiro, J. dos S.; Sousa, P.H.G. de O.; Vieira, D.R.; Siegle, E. (2013) - Evolução da vulnerabilidade à erosão costeira na Praia de Massaguaçu (SP), Brasil. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 13(3):253-265. DOI: 10.5894/rgci377
- Ros, F.J. (1923) - *Pleito - Pocitos. Su historia y el dictamen profesional que a pedido de los propietarios demandados produjo el Agrimensor D. Francisco J. Ros*. 253p., M. García (ed.), Imprenta El Siglo Ilustrado (Colección Estudio), Montevideo, Uruguay. Available at: Biblioteca de la Facultad de Humanidades y Ciencias de la Educación, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Saizar, A. (1997) - Assessment of impacts of a potential sea-level rise on the coast of Montevideo, Uruguay. *Climate Research*, 9(1-2):73-79. DOI: 10.3354/cr009073
- Sato, S.; Kishimoto, S.; Hiramatsu, H. (2011) - Long-term evolution of sand and gravel beaches on the Miyazaki Coast. *Coastal Engineering Proceedings* [S.l.] (Online), 1(32):sediment.57. DOI: 10.9753/icce.v32.sediment.57
- Severov, D.N.; Mordecki, E.; Pshennikov, V. (2004) - SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/Southern oscillation. *Advances in Space Research*, 33(3):343-347. DOI: 10.1016/S0273-1177(03)00479-4
- Splinter, K.D.; Turner, I.L.; Davidson, M.A. (2013) - How much data is enough? The importance of morphological sampling interval and duration for calibration of empirical shoreline models. *Coastal Engineering*, 77:14-27. DOI: 10.1016/j.coastaleng.2013.02.009
- Verocai, J.; Bidegain, M.; Nagy, G.J. (2014) - Nivel del mar y eventos extremos en las aguas costeras del Río de la Plata y costa oceánica uruguaya. In: C. Goso (ed.), *Nuevas miradas a la Problemática de los Ambientes Costeros. Sur de Brasil, Uruguay y Argentina*, pp.131-146, DIRAC, Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. ISBN: 978-9974011236.
- Verocai, J.E.; Gómez-Erache, M.; Nagy, G.J.; Bidegain, M. (2015) - Addressing climate extremes in Coastal Management: The case of the Uruguayan coast of the Río de la Plata System. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(1):91-107. DOI: 10.5894/rgci555
- Wright, L. D.; Short, A.D. (1984) - Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology*, 56(1-4):93-118. DOI: 10.1016/0025-3227(84)90008-2

Ver en

Anexo 1.

Supporting Information - Capítulo 6.2. Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate *FORCING*

(rgci-553_Gutierrez_Supporting-Information.pdf)

Capítulo 6.3

Climate teleconnections and indicators of coastal systems response

Ofelia Gutiérrez[@] 1, Daniel Panario¹, Gustavo J. Nagy², Mario Bidegain³, Carlos Montes⁴

[@] Autor corresponsal

1 - UNCIEP, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Gutiérrez: oguti@fcien.edu.uy and gutierrez.ofelia@gmail.com, Panario: panari@fcien.edu.uy and daniel.panario@gmail.com

2 - Grupo de Cambio Ambiental y Gestión Costero-Marina, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Nagy: gnagy@fcien.edu.uy and gustavo.nagy56@gmail.com

3 - Instituto Uruguayo de Meteorología (InUNet), Barrios Amorín 1488, CP 11200, Montevideo, Uruguay. *e-mail*: bidegain.mario@gmail.com

4 - Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, España. e-mail: Montes: carlos.montes@uam.es

En revisión en *Ocean & Coastal Management*

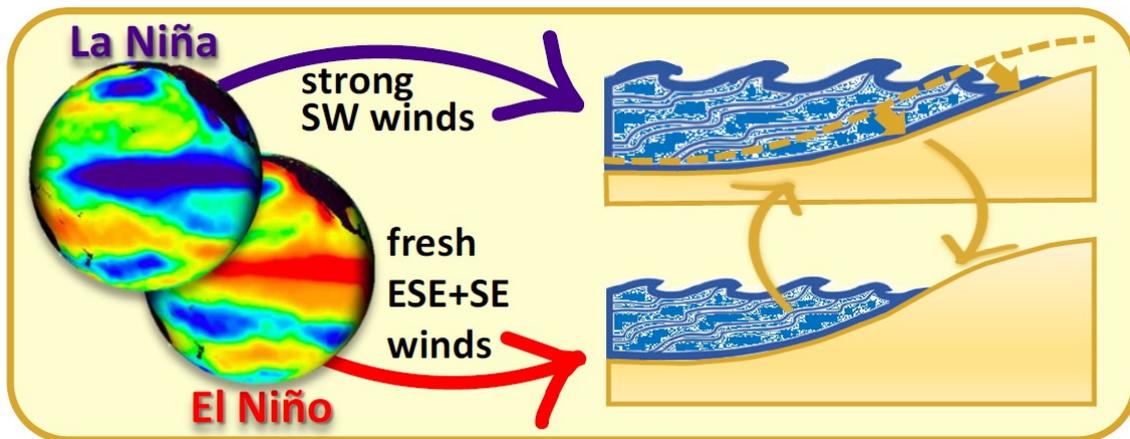
6.3. CLIMATE TELECONNECTIONS AND INDICATORS OF COASTAL SYSTEMS RESPONSE

Abstract

This article surveys secular urban sandy beaches erosion – accretion and its relationship with climate teleconnections, e.g., El Niño Southern Oscillation (ENSO), Atlantic Multidecadal Oscillation (AMO), and extreme events, e.g., storm surges, great rivers' floods, and heavy rains in adjacent basins. The paper aims to discuss these issues and the expected coastal retreat as a consequence of manmade climate changes, e.g., sea level rise (SLR) and increased storminess in the coming decades. Several beaches with different characteristics but all constrained by coastal linear infrastructure and two tidal creek sandy mouths were studied. These sites are located along the urbanised coast of the middle region of Río de la Plata microtidal river estuary. All of them show a more or less strong retreat trend with alternated fluctuations, e.g., weak retreat likely due to sea level rise, significant erosion very likely due to storm surges, and processes of loss of sediment stock, as well as episodes of sand recovery. Therefore, these beaches require interventions to preserve their beach prism and dry sand surface. In search of answers to better understand why and under what conditions the process of advance and retreat of the coastline occur, we have analysed different teleconnections and had taken reanalyses for wind anomalies during ENSO events from 1951-2010. Both weak and moderate erosion-accretion periods are likely related to atmospheric anomalies, e.g., wind direction changes and the consequent swell and littoral drift changes, related to El Niño and La Niña events. The former associated with accretion and the latter with erosion. In the past most interventions have been reactive. Increased knowledge of climate and weather relationship with the sedimentary balance will allow developing beach risk-management, pro-active strategies and climate adaption measures focused on the generation and recovery planning based on the analysis of the occurrence and prediction of El Niño / La Niña events.

Keywords: Sandy beach; creek mouths; erosion-accretion; El Niño - La Niña events; Río de la Plata estuary

Graphical Abstract



Highlights

- Urban beaches are suffering alternated processes of erosion-accretion.
- Analysis of remote sensing series allows highlighting both trends and attribution.
- Links between erosion-accretion, teleconnections and extreme events are explored.
- Erosion-accretion processes match quite well with ENSO events and storm surges.
- ENSO looks like a good predictor of short-term trends useful for beach management.

6.3.1 Introduction

The growing threat that hangs over coastal systems due to global change is induced primarily by forcings such as changing land use and climate change, especially sea level rise (SLR) (Masselink and Gehrels, 2014). Socioeconomic, cultural and environmental importance of beaches make it necessary to create as accurate as possible scenarios of their evolution in the medium and long term (Dias et al., 2013; Ledoux and Turner, 2002), in order to develop mitigation and adaptation plans and measures against these threats (Luisetti et al., 2014).

The generation of resilience in ecosystems is a clear objective of modern science (Holling and Gunderson, 2002). For coastal environments this involves analysing the capacity to generate the necessary conditions for maintaining ecosystem functions that support the services provided by the beaches (Flood and Schechtman, 2014).

In order to build resilience in an ecosystem subject to fast and slow drivers of change, e.g., extreme events and gradual climate change respectively, there is a need to identify them, particularly the fast ones and their trends in the mid-term (months to years), since they may produce undesirable and irreversible shifts. These threats are very important in urban beaches constrained by linear infrastructure.

World's beaches are threatened not only by the increase in mean sea level (MSL)¹⁵, with a recent trend of +3.26 mm/year (average rate 3.3 ± 0.4 mm/year) measured by high-precision altimetry satellites (Nicholls and Cazenave, 2010), but also by other natural forcings as subsidence, depletion of underwater sand reserves, changes in atmospheric circulation and possible increase in wind speed due to global warming. In addition, attention should be given to local human forcings, such as construction or resizing of harbours, building walls, breakwaters, jetties or breakwaters, sand mining, or urbanisation of exchanging sand dune systems (Gutiérrez and Panario, 2005; Gutiérrez et al., 2015; Marshall and Banks, 2013; Panario and Gutiérrez, 2005; Panario and Piñeiro, 1997; Stevens et al., 2005).

As a result of these actions, most of the Uruguayan beaches are showing evidences of degradation e.g., the loss of the primary dune, and/or the decrease in the area of dry sand and/or the height of the beach prism, which makes them vulnerable. Typically these beaches have their land limit constrained by the presence of coastal linear infrastructure. Several experiences of primary dune reconstruction carried out by our team have been successful while others have failed due to storms that destroyed the

^{15/} **Abbreviations:** **AMO:** Atlantic Multidecadal Oscillation, **AMSL:** above mean sea level, **ENSO:** El Niño Southern Oscillation, **MSL:** mean sea level, **NCEP/NCAR:** National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, **PDO:** Pacific Decadal Oscillation, **PTH-WL:** high tide high - water level, **RdIP:** Río de la Plata, **SLR:** sea level rise, **SSTA:** Sea Surface Temperature Anomalies, **WDL-RM:** wet/dry line or run-up maxima, **WSA:** wind speed anomalies.

installed soft works. The chances of success of these initiatives on these beaches could be fostered if both the causality and prognosis of increased storms, and the periods of increased beach prism, therefore of the availability of aeolian sand, were better known.

From our experience it should be noted that the reconstruction of dunes in long stretches of coastline requires adequate economic, human, and material resources, and logistics to perform the task. The failures discourage funding sources of these activities. Therefore it is of paramount importance to anticipate preparedness for when these activities are most likely to occur and in sufficient time to have the human and material resources for execution.

This article focuses on four beaches Pocitos, Ramírez, Buceo and Malvín of Montevideo city, and two tranches with mouths included (Carrasco and Pando creeks) on the Uruguayan coast of the large Río de la Plata (from now on RdIP) river estuary (38,000 km², 100-230 km wide) (Figura 6.16). The northern Uruguayan coast of the estuary is

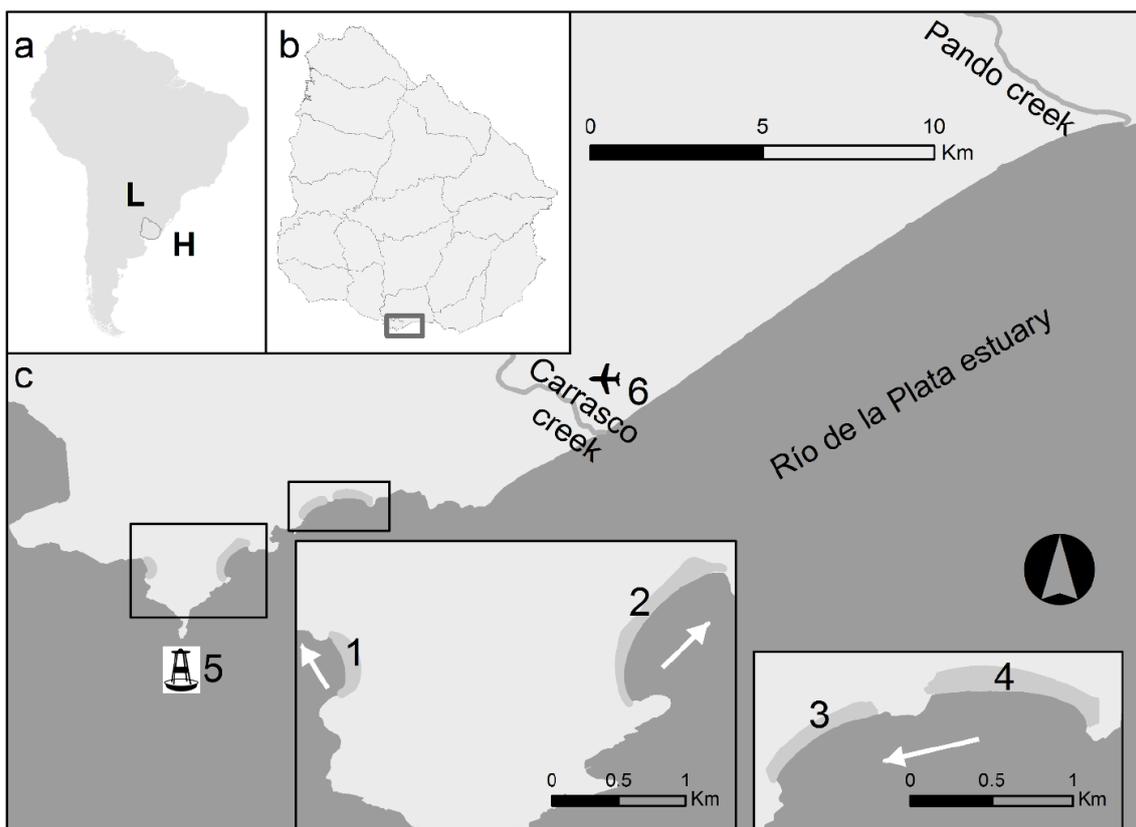


Figura 6.16. Study area: a) South America, L and H indicate low and high atmospheric pressure. b) Uruguay. c) Beaches: 1) Ramírez, 2) Pocitos, 3) Buceo, 4) Malvín; and Carrasco and Pando creeks. 5) Indicates the location of the Punta Brava wave sensor. 6) Carrasco airport meteorological station. The white arrow indicates the drift direction.

characterised by the presence of wave-dominated sandy beaches. This coast and its beaches are subject to the action of tides (< 0.5 m amplitude), wind climate patterns, episodic river floods and storm surges events, and gradual sea level rise (SLR) (Gutiérrez et al., 2015; Nagy et al., 2014a, 2014b; Verocai et al., 2015).

The selected beaches have notable differences, e.g., orientation, bathymetry, exposure length, profile, presence/absence of primary dune, as well as in the mineralogical composition. From all these differences it is very likely the existence of diverse sources of sediment for the studied beaches and creek mouths).

Among the fast climate stressors on the Uruguayan coast, the wave climate change stands out. This change is associated with: i) atmospheric circulation changes likely attributable to global warming (Young et al., 2011); ii) the Atlantic Multidecadal Oscillation - AMO (Ortega et al., 2013) and the Pacific Decadal Oscillation - PDO (Nagy et al., 2014a, 2014b); and iii) oscillations associated with El Niño Southern Oscillation - ENSO teleconnections (Bidegain et al., 2015, 2014; Nagy et al., 2014a, 2008a, 2008b, 2002). It is not always clear whether these variables are linked to global climate change or natural variability. It is therefore necessary to isolate seasonal, annual, decadal and multi-decadal fluctuations occurring in atmospheric circulation and wind climate over the RdIP basin and estuary (Bidegain et al., 2005; Ortega et al., 2013; Simionato et al., 2005; Verocai et al., 2015).

The aims of this article were: i) to review the background of long-term accretion-erosion processes at urban sandy beaches focused on case studies at the Uruguayan coast of the middle region of the RdIP river estuary; ii) to focus on climate teleconnections, mainly ENSO, extreme storm surges, and their relationship with coastline retreat; iii) to update the analysis of ENSO-related wind anomalies; iv) to give insight on the need of fostering the analysis, forecast and impacts of fast climate stressors of sandy beaches changes in the light of very likely future sea level rise and likely increased storminess; v) to provide further evidence to develop beach management planning and implement climate adaptation measures.

6.3.2 Background

The two main observed wind patterns related to the purpose of this article are synthesised as follows:

1. An increasing trend of the occurrence of south-eastern (SE) winds over the RdIP (Bischoff, 2005; Escobar et al., 2004; Nagy et al., 2013; Ortega et al., 2013; Simionato et al., 2005).
2. A relationship between ENSO events and anomalies of atmospheric circulation and winds was found, e.g., an increase in E-SE-SSE-N and decrease in SW winds

(called *Pamperos*) during El Niño, and increase in SW winds during La Niña from 1954-1998 (Gutiérrez, 2010).

For instance, Ortega et al. (2013) have shown in Atlantic ocean beaches near the RdIP, the existence of two variables correlated in time, the anomalies of sea surface temperature (SSTA) and wind speed (WSA) as well as an increase in S, SSE and SE wind directions for the last few decades. whereas Codignotto et al. (2012) observed an increase in wave energy from the East, which affects the erosion of ocean beaches of the province of Buenos Aires (Argentina). Recent research (Nagy et al., 2015a) on the current (1979-2014) and future climate scenarios (centred in 2030) confirm a slight increase of SE winds along the Uruguayan coast.

During the successive El Niño and La Niña events from 1998-2002 the following observations have been reported:

- The frequency of days greater than 8 m/s during October-March varied from 7.2 days per month from 1977-86 to 11 days in 2001-02 and 17.6 days per month during the moderate to strong El Niño event in 2002-03, an increase of 57 and 150 per cent respectively (Nagy et al., 2008a),
- the wind speed yearly variability varied from 5.8 m/s to 6.2 m/s during El Niño and La Niña respectively (Nagy et al., 2003), and
- the prevailing anomalies' modes were fresh (8.6 m/s) ESE winds and strong (10.9 m/s) W winds (Nagy et al., 2008b).

With regard to waves, Dragani et al. (2010) reported a possible increase in wind wave heights and relatively high inter-annual variability in the south-eastern South American continental shelf between 32°S and 40°S, including the RdIP estuary, based on short-term series of *in situ* (1996-2006) and Topex satellite (1993-2001) data. The authors suggested that this possible increase would be able to produce changes in the littoral processes and, consequently, in the erosion of the coast. The possible link between this inter-annual variability and ENSO was investigated but no apparent relationship was found.

Pereira and Klumb-Oliveira (2015) found for the coastal zone of Rio de Janeiro, Brazil, a slight reduction in significant wave height during strong El Niño years caused by the attenuation of the frequency of events from the S quadrant. The opposite pattern was observed during strong La Niña years, caused by an increase in wave incidence from the S and SW quadrants, especially in boreal winter from 1979-2013. The decrease could be attributed to the intensification of the South Atlantic High with a corresponding increase in the occurrence of subtropical jets during periods of El Niño.

This weather change causes the blocking of southern cold fronts and the consequent reduction in the percentage of waves from the south.

According to our systematic observations of the Uruguayan coast of the RdIP river estuary and Atlantic Ocean since the 1990s, the southern winds play a key role on water and coastal dynamics, but with dissimilar effects depending on the synoptic conditions and fetch associated with wind speed (EcoPlata, 1999; Gutiérrez et al., 2015; López Laborde and Nagy, 1999; MTOP/PNUD/UNESCO, 1979; Nagy et al., 2014a, 2013, 2008a, 2008b, 2007, 2005, 2002; Verocai et al., 2015).

Southerly wind called "Pampero" is associated to the entry over the RdIP of dynamical high pressure system with two different types. The first called "dry Pampero" is formed with air masses from the south-eastern Pacific Ocean, which lose their moisture by passing the Andes and whose entry over the RdIP determines a rapid decrease in cloudiness and rainfall. Its mass air origin is mainly from the W-WSW, and the fetch is weak over shallow RdIP, causing only a slight to moderate increase in water-level along the Uruguayan coast. The other type is called "wet Pampero" characterised by the trajectory over the southern Atlantic Ocean producing rainfall after its entry into the region. Associated winds in the frontal zone can exceed 100 km/hour and its origin can be both S-SSW and SSE. The fetch over the Atlantic Ocean generates a sharp rise in sea level associated with downwelling at beach level. Its prevalence is mostly during winter season (Simionato et al., 2007) including May to September, and its frequency was dominant during dry and cold periods of the Holocene (Iriondo et al., 2009; Piovano et al., 2009 and references therein).

The wind rose of tri-hourly average speeds between December 1997 and August 2008 (data from Instituto Nacional de Meteorología-InUMet, Uruguay) at Carrasco airport (**Figura 6.17**) shows that ESE direction prevailed up to 6 m/s (which is about 7 m/s at the coast), that is to say for most observations, whereas for greater speeds SW and WSW directions prevailed (Panario et al., 2008). The former were mainly related to the austral spring and summer months and the latter to mid-winter (July-August) strong "pamperos" winds, which is supported by the high frequency of storm surges greater than 1.69 m above mean sea level (AMSL) reported by Verocai et al. (2015).

Wave rose (Dec 2003 - May 2006), available for the studied region (**Figura 6.18**) generated from the wave sensor data of the Municipal Government of Montevideo closely matches the prevailing ESE to SE and S wind and swell directions: SE 35%; E 24%; S 20%; W and SW <10%; NW, NE and N <5% (Panario et al., 2008).

Eastern and south-eastern winds (E, ESE, and SE) have different impact on the coast. For instance, floodings due to ESE and SE winds varies from + ≈ 0.2 m AMSL for average

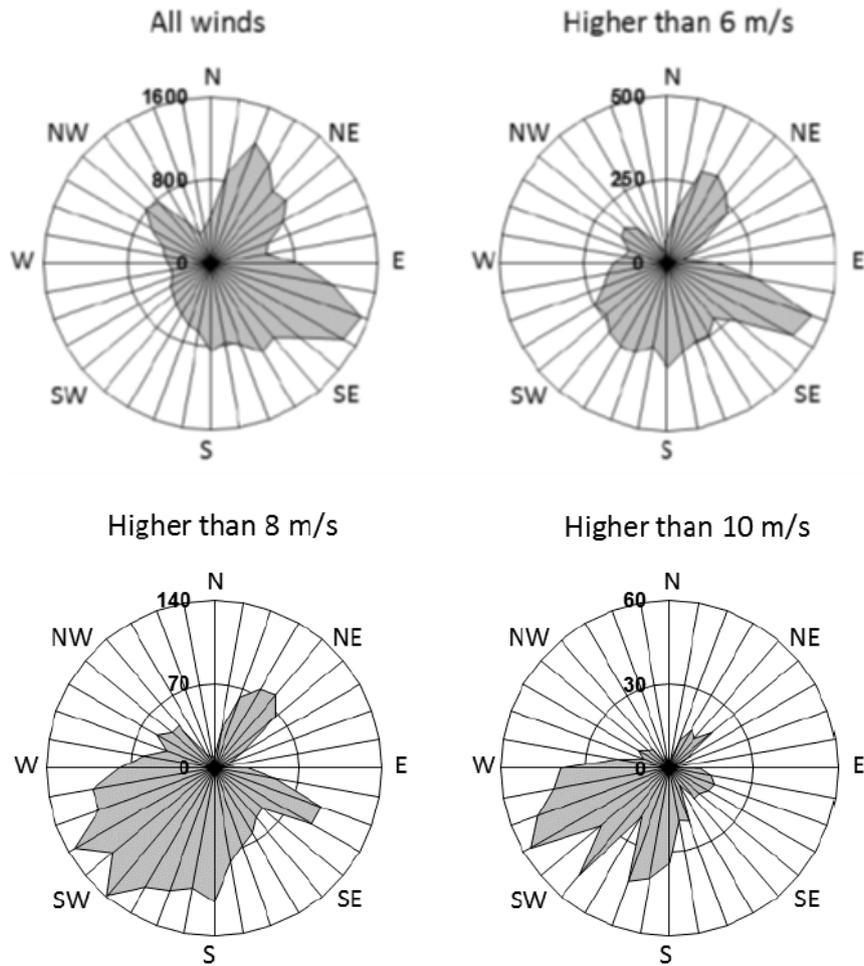


Figura 6.17. Carrasco wind rose 1998-2008. The frequency of directions is shown for all winds (top left), and for those higher than 6 m/s (top right), higher than 8 m/s (bottom left), and higher than 10 m/s (bottom right) from 1998-2008 (Panario et al., 2008).

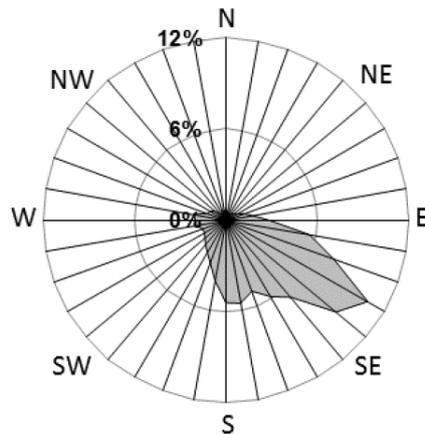


Figura 6.18. Punta Brava wave rose from 2003-2006 (between Pocitos and Ramírez beaches, see **Figura 6.16**). The prevailing direction related to swell matches quite well the prevailing E-SE winds, particularly during the austral summer (Panario et al., 2008).

wind speed (5 m/s or 18 km/h) to + \approx 1 m AMSL for strong winds of 20 m/s (72 km/h), whereas MSL (102 cm) matches weak winds speed of 2 m/s (Verocai et al., 2015). Their destructive effects are caused by a strong atmospheric low pressure to the north of Argentinean Mesopotamia (between the great Paraná and Uruguay Rivers), which fetch raises the level of RdP and adjacent sea. These very destructive events are infrequent (Barros et al., 2005; Bischoff, 2005), only 2 or 3 per year in the Uruguayan coast (Simionato et al., 2007; Verocai et al., 2015) and tend to occur mainly during the summer (Simionato et al., 2007) and mid-winter (Verocai et al., 2015) ESE winds are largely sea breeze prevailing from October to March. Their intensity is usually weak to moderate therefore produce no significant downwellings or storm surges as they only raise water height a few centimetres AMSL. These winds are associated with rebuilding of the beach prism because they generate waves that reinforce the action of the swell (see **Figura 6.18**), which is the main builder of the beach prism on the Uruguayan coast. Thus, an increase in light ESE and ENE winds, prevailing from October-April and April-September respectively (Nagy et al., 2015a) can result in cushioning the effects of SLR, while an increase in meridional winds (+) may have the opposite effect.

Assuming that current response of the winds to air temperature variations are similar to what happened during the Upper Holocene (Iriondo et al., 2009; Piovano et al. 2009 and references therein), hypotheses can be developed on the basis of trends which forces are known, to the extent that their effects on coastal systems are verified. This approach would allow establishing midterm scenarios. Sedimentological evidences indicates that during the cold periods of the Holocene, including the Little Ice Age (from 1550-1850), there was predominance of dry weather, low temperatures and low rainfall in the pampean region and surrounding areas (Bracco et al., 2011; del Puerto et al., 2013; Iriondo et al., 2011, 2009; Piovano et al., 2009 and references therein). There is also geomorphological evidence, expressed in longitudinal dunes fields, suggesting the dominance of southern winds during the cold period of the Holocene (Iriondo and Garcia, 1993; Iriondo et al., 2011, 2009).

Observations over the last century show a sea level rise (SLR) of 11 cm in Montevideo (Bidegain et al., 2005; Magrín et al., 2007; Nagy et al., 2005) and 17 cm in Buenos Aires as a result of global climate change and the regional effects of river discharge and winds (Barros et al., 2005; Magrín et al., 2007). Periods of acceleration and stabilisation have been recorded at Montevideo from 1971-2003 and 2004-2013 respectively (Nagy et al., 2014a, 2005; Verocai et al., 2015). The latter was mainly attributed to lower river discharges which could have masked the global trend.

Sea level along the Uruguayan coast fluctuates \pm 0.1–0.2 m (superimposed on SLR) due to ENSO-related anomalies in precipitation, river flow and winds. Wind-induced flooding reaches 1, 2, and 3 m AMSL on yearly, decadal, and historical timescale basis, respectively (Nagy et al., 2015b; Verocai et al., 2015).

While it is recognised that the input of fresh water can produce yearly time-scale differences in MSL of up to 20 cm (Verocai et al., 2015) the effects of atmospheric circulation is a key factor in the behaviour of most estuarine and costal variables (Gutiérrez et al., 2015; Simionato et al., 2007, 2005; Verocai et al., 2015). For instance, the retreat of pocket beaches of Montevideo seems to fit the Bruun Rule, without negative fluctuations associated with the freshwater input (Gutiérrez et al., 2015).

The well-known El Niño/La Niña - Southern Oscillation (ENSO) linked variability at the Uruguayan coast (Nagy et al., 2014a, 2008a, 2008b), and medium-term trends have been analysed, resulting in seasonal and biennial variabilities (Ortega et al., 2013; Simionato et al., 2005) linkable to Rossby waves (Simionato et al., 2007), and another one with a rate of return of 8-12 years, in addition to long cycles of between 70 and 80 years linked to the AMO (Ortega et al., 2013).

Gutiérrez et al. (2015) have suggested for pocket beaches of Montevideo, a possible relationship between ENSO and fluctuations of beach area. From all the information and assumptions presented here, it is arguable that the trends observed on the beaches of Montevideo and perhaps partly for the whole Uruguayan coast, should be analysed in terms of atmospheric circulation anomalies with effects and variations over time, likely associated with both natural variability and manmade climate change.

6.3.3 Materials and methods

This article is based on data compiled and generated by Gutiérrez (2010), as amended by Gutiérrez et al. (2015). A long-term analysis of a dense series of high definition remote sensing was performed since 1927 for four urban beaches (located in Montevideo city, and since 1937 for two tidal creek sandy mouths located few tens of km to the East of downtown.

6.3.3.1 *Geomorphological analysis*

Polygons were plotted on all analysed beach surfaces as proposed by Gutiérrez et al. (2015) to overcome the uncertainty associated with estimating changes by random transect method. In order to standardise the process, the digitalisation of shorelines was conducted at a scale of 1:3,000, as proposed by Armaroli et al. (2006), Ciavola et al. (2003), and Gutiérrez and Panario (2005). To select indicators of the shoreline, only those identified in the entire time-series of records were used. These were:

The previous high tide high - water level - PTH-WL (Boak and Turner, 2005) is used because relatively large differences between tides produce a minimal error in the horizontal cartographic translation of the coastline. This is because the segment of the beach above the high tide level is the one with greater slope in the cross section thereof (Gutiérrez et al., 2015).

Another indicator called wet/dry line or run-up maxima - WDL-RM (Boak and Turner, 2005) was used. This line indicates the erosive - constructive limit set within the maximum range of the wave, which is neatly identifiable by the difference in tone on aerial photographs. It is found where the beach changes from a concave profile to a convex one, with a clear break in the slope's angle.

Univariate statistical analyses were developed for the data sets obtained for each study site. The selected statistical indicators were: central tendency and data dispersion: mean, median, mode, standard deviation, variance, coefficient of variation and R^2 . Deviations from the trend line, the R^2 , the existence (or not) of climatic anomalies and their forcing atmospheric circulation were also analysed.

6.3.3.2 Climatic and oceanographic analysis

Meteorological, hydrological and oceanographic databases were used to establish possible correlations of the observed changes in the position of the coastline, with series of events that could explain them. This approach seeks to analyse coincident responses in all or most of the analysed shores despite the noticeable differences in the physical parameters of the beaches and the mouths of this study.

Positive changes (accretion) of coastlines in both creeks' mouths were correlated with periods of heavy rainfall. During these periods, the ideal conditions for transporting sandy sediments to RdIP estuary and the ocean are generated. These sediments were introduced into the mouths by the tidal flow or wind where there are dunes next to the mouth, or due to inputs from the watershed, as analysed by Gutiérrez and Panario (2006, 2005).

This analysis was based on maximum rainfall events (> 80 mm/24 hours) in the basins of the Pando and Carrasco creeks using the precipitation rate and precipitation database (data provided by InUMet from the local rainfall network).

The positions of the coastlines, particularly the negative changes (retreats) were compared with the elevations of the RdIP caused by the great floods of the rivers Paraná and Uruguay, together or separately (Camilloni and Barros, 2003, 2000; Menéndez and Berbery, 2006; Nagy et al., 2002). These floods are able to increase the water height of the RdIP by 10-20 cm or plus (Bidegain et al., 2005; Nagy et al., 2005; Verocai et al., 2015). Therefore, Nagy et al. (2007) raised the hypothesis that river floodings could be a cause of the retreat of the coastline.

The historical series of decadal average and yearly maximum storm surges from 1921-2008 recorded in Montevideo were also analysed focusing on the search for matches from aerial photographic surveys occurred after (from months to a year) to SSE and SSW wind-storms producing significant rise in sea levels (storm surges).

In turn, the effect on the response of the coastline (retreat or accretion) was analysed for years with ENSO events through composites of wind anomalies ¹⁶. Two methods were used: i) atmospheric reanalysis of the NCEP/NCAR (National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research, NOAA-CIRES Climate Diagnostics Center, Kalnay et al. (1996) based on the NOAA Global Circulation Model to estimate the zonal ¹⁷ (from the West: + and from the East: -) and meridional ¹⁸ (from the South: + and from the North: -) winds from 1948-2012, and ii) the Twentieth Century Reanalysis Project dataset (Version V2) lead by the Physical Sciences Division at the NOAA/ESRL (National Oceanic and Atmospheric Administration, Earth System Research Laboratory), and the CIRES at the University of Colorado, to estimate the wind vector anomaly from 1950-2010 and vector wind components anomalies at surface level from 1948-2011.

Tri-hourly average wind speed data from 36 directions were used, as well as the time-series of significant wave height and direction (Panario et al., 2008) in order to analyse and integrate results from climatic data, models and reanalyses.

These analyses were performed for the period October-March because beaches usually recover after the winter S and SW erosive winds (from July-August) and the ENSO signal is expressed from October onwards over the RdIP (Pisciottano et al., 1994; Ropelewski and Halpert, 1987). For the period 2000-2008 images are available for most of the years, so the possible relationships between the observed coastline fluctuations with Rossby waves were explored, because according to Simionato et al. (2005) they modify the position of the South Atlantic anticyclone (SA High Pressure).

ENSO events, classified as weak, moderate, strong or very strong were determined according to Climate Prediction Center, NOAA (http://www.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ensoyears.shtml) and to Severov et al. (2004) for the period before 1950.

6.3.4 Results and discussion

6.3.4.1 Joint analysis of the study cases

Pocitos and Ramírez beaches have almost opposite orientations; however, they have a similar mineralogical composition (originated from rocks of Montevideo Formation). On the other hand, their drifts are divergent, so these are two separate beaches each

^{16/} Climate anomaly - The difference between the average climate over a period of several decades or more, and the climate during a particular month or season. (http://glossary.ametsoc.org/wiki/Climate_anomaly).

^{17/} Zonal Wind - The wind or component of a wind along a particular parallel of latitude: It is positive if it blows from the West and negative if it blows from the East.

^{18/} Meridional Wind - The wind or component of a wind along a particular meridian: It is positive if it blows from the South and negative if it blows from the North.

other and the other beaches of Montevideo (Gutiérrez et al., 2015) (see **Figura 6.17**, **Tabla 6.3** and [jError! No se encuentra el origen de la referencia.](#)).

Tabla 6.3. Characterisation of four beaches.

Beach	Primary dune	Classification	Sand mineralogy	Slope	Coastal tipology	Orientation (normal to the direction tangent)	Exposure length (m)
Ramírez	No	Dissipative	Feldspathic quartz medium sands with amphibole and pyroxene	Smooth (1.9°)	Pocket	N68°E	500
Pocitos	No	Intermediate	Feldspathic quartz medium sands with amphibole and pyroxene as main accessory minerals	Smooth (1.8°)	Pocket	N43°W	1,425
Buceo	Protodune	Dissipative	Feldspar quartz sands, with very little amphibole and pyroxene, very few garnet points	Smooth (1.9 to 2.2°)	Logarithmic spirals	N28°W	887
Malvín	Partially	Dissipative to intermediate	Medium feldspathic quartz sands, and very little amphibole and pyroxene, calcite, opaque, garnet points, zircon, tourmaline, andalusite and epidote	Smooth (1.9 to 2.2°)	Logarithmic spirals	N3°E	1,072

Tabla 6.4. Characterisation of two creek mouths.

Creeks' mouth	Primary dune	Classification	Sand mineralogy	Orientation (normal to the direction tangent)	Trench length (m)
Carrasco	Degraded	Dissipative to intermediate	Feldspar quartz medium sand with very little amphibole and pyroxene, calcite, opaque, garnet points, zircon, tourmaline, andalusite and epidote	N26.3°W and N36°W	1,549
Pando	No	Dissipative to intermediate	Feldspar quartz medium sand with very little amphibole and pyroxene, calcite, opaque, garnet points, zircon and tourmaline.	N24°W and N17.3°W	3,290

These beaches have statistically significant difference in the mineralogy of the sand ($p < 0.01$) with neighbouring Buceo and Malvín beaches, while the mouths of Carrasco and Pando creeks have similar sources of sediment that Malvín beach, but differ from the others by having a recirculation of sediment by wind action and contributions of their watersheds. In turn, these beaches have different gradients of depth, making them change their typology from intermediate beach to dissipative beach. Because of all these factors it is particularly important to analyse the causes of the similarities in their behaviour through time.

6.3.4.2 *Wind, waves and storm surges*

Excluding the calm, the wind speed data at the Carrasco station (see **Figura 6.17**) fit the Weibull distribution with a tail toward higher-energy events. The so originated positive asymmetry was associated with the fact that the mean was greater than the mode of the distribution, indicating that the average wind conditions were disturbed by strong rare events linked to disturbances such as the passage of cyclone systems and cold fronts (Panario et al., 2008).

The wave rose data (see **Figura 6.18**) closely matches the prevailing wind and swell directions coinciding with modelled reanalyses. In turn, the exploratory analysis of the wave data in Punta Brava values showed that significant height (H_s , in meters) and period (T , in seconds) had a frequency distribution which fitted a log- Normal function ($p < 0.001$). The main parameters were: Average H_s (m) 0.539, T (s) 5.657427; median H_s (m) 0.46, T (s) 4.4; mode H_s (m) 0.35, T (s) 2.9; standard deviation H_s (m) 0.38121, T (s) 3.983412 (Panario et al., 2008).

Matches between records of aerial photos and previous storm surges were recorded in the years 1943, 1993 and 2005. Although there are no photos for all studied sites, the sign of the storm was present in all cases except Malvín, where the signal was only recorded in the dry sand surface, not in the full beach. This can be attributed to the fact that during strong southern wind storm surges Malvín beach receives sediments passing over the tombolo linking Malvín with Brava beach, since the height of waves exceed its maximum height, offsetting losses related to these extreme events. Three storm events coinciding with elevations of more than 2.11 m AMSL were found coinciding with average daily Southern winds (S) from 24 m/s (85 km/h) to 31 m/s (110 km/h). These events can overcome most of the prism beach in most of the study area. Their occurrence from 1921-2008 was six times (0.068), only once since 1950 (0.017). However, Verocai et al. (2015) found a slight increase of the occurrence of events greater than 1.69 and 1.89 m AMSL over the last decade.

6.4.4.3 *Exceptional rainfall*

There was no evidence of clear trends associated with extreme rainfall in the basins of Pando and Carrasco microtidal creeks and in the beaches near them.

6.4.4.4 *Floods of the tributaries of the Río de la Plata basin*

The comparison between the events of river flooding and the morphodynamics of the studied beaches showed an opposite trend to what might be expected, given that the highest recovery in all the studied sites coincided with major river floods, and relatively high water level values. These results are not consistent with the hypothesis linking high flow and erosion.

6.4.4.5 *General atmospheric circulation anomalies*

The existence of relationships between the evolution of beaches and ENSO events was analysed, showing multiple matches with photogrammetric records with the latter (**Figura 6.19**, **Figura 6.20**, and **Figura 6.21**). Several papers (Nagy et al., 2008b; Severov et al., 2004; Simionato et al., 2005), suggest the existence of a signal of ENSO events in the Southwestern Atlantic Ocean at sea level pressure (SLP) and sea surface temperature (SST) with a weakening of the Malvinas Current and strengthening of Brazil current during El Niño, and vice versa during La Niña. It is arguable, in agreement with the findings of Iriondo et al. (2009 and citation therein) for the Holocene, the existence of a higher incidence of strong winds from the South quadrant and more specifically Meridional Wind (+) during La Niña, and increased Zonal wind (-) during El Niño events.

Due to the existence of coincidences between La Niña events with coastline retreats or loss of dry area in all analysed beaches, we decided to verify the hypothesis that ENSO-related circulation anomalies could explain the observed changes. For this, the NCEP/NCAR reanalysis (Kalnay et al., 1996) and the Twentieth Century Reanalysis were used to estimate the meridional and zonal wind anomalies, and the latter was also used to estimate vector wind components at surface level respectively. These reanalyses were applied for moderate and strong ENSO events, and even weak ones, if they occurred in the context of a multi-year event (e.g., from 1973-1975).

Due to the relatively low number of moderate and strong El Niño/La Niña events from 1950-2010 (less than 20) the results of wind anomalies are not conclusive yet but allow stating a working hypothesis to depict the relationship between ENSO-related wind anomalies and beach accretion-erosion processes.

The analysis focused on the anomalies of surface winds on the Uruguayan coast, showing a positive anomaly of SW winds associated with retreats of the coastline during La Niña events as suggested by Gutiérrez et al. (2015) for Ramírez and Pocitos.

Nevertheless, if all La Niña events were considered, no significant correlation was found as either observed by Simionato et al. (2005), which could be attributed to the fact that the signal of weak ENSO events ($\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$) is poor. For instance, from October-March ESE-SE winds usually increase and a light ENSO signal can be masked.

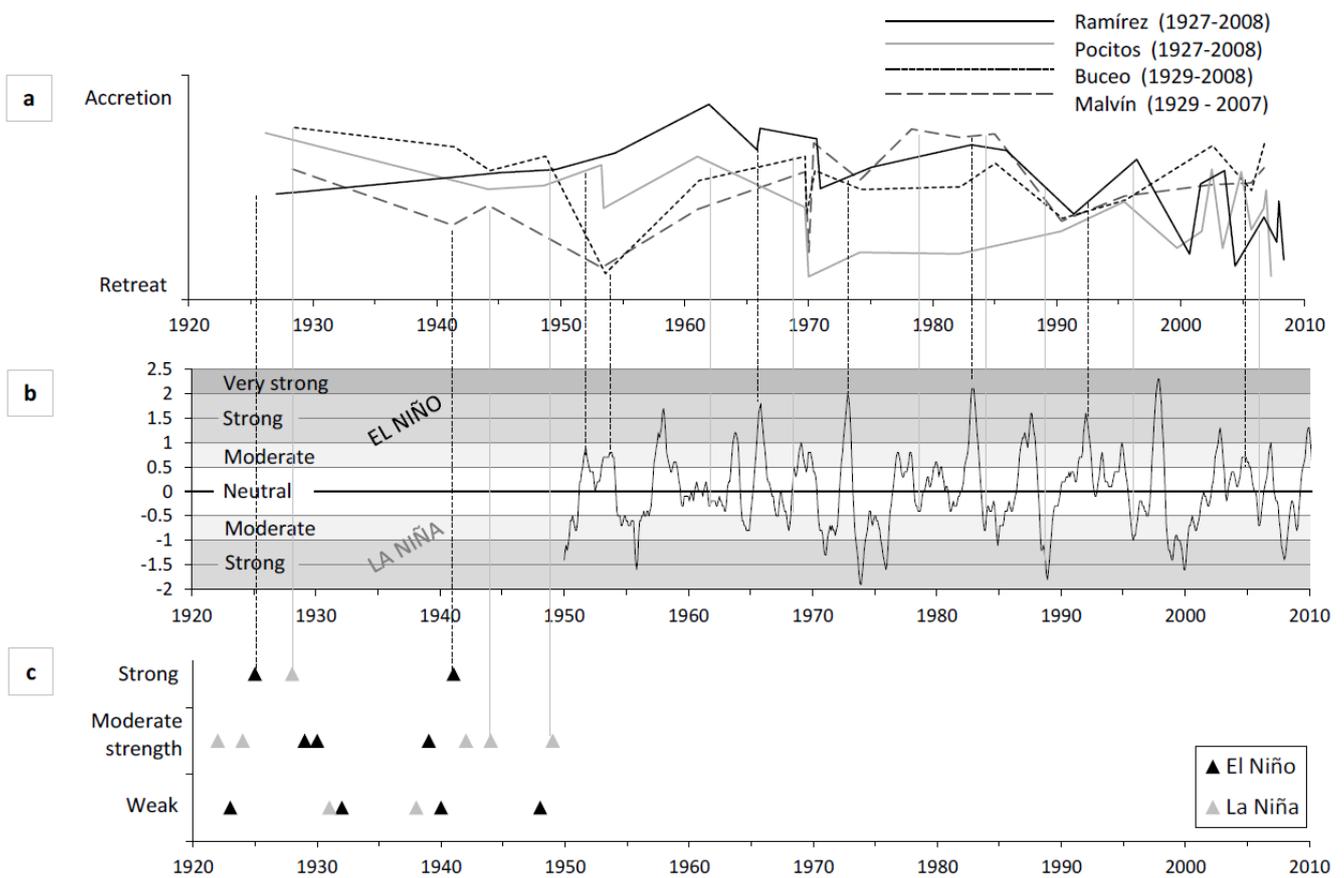


Figura 6.19. a) Historical development of the beaches Ramírez, Pocitos, Buceo and Malvín, indicated as coastal accretion or retreat process. b) ENSO events, classified as weak, moderate, strong or very strong according to Climate Prediction Center, NOAA (period 1950-2010). c) ENSO events according to Severov et al. (2004) for events before 1950. The vertical gray lines (La Niña) and the vertical dashed black lines (El Niño) suggest the links between the coastal fluctuations and teleconnections.

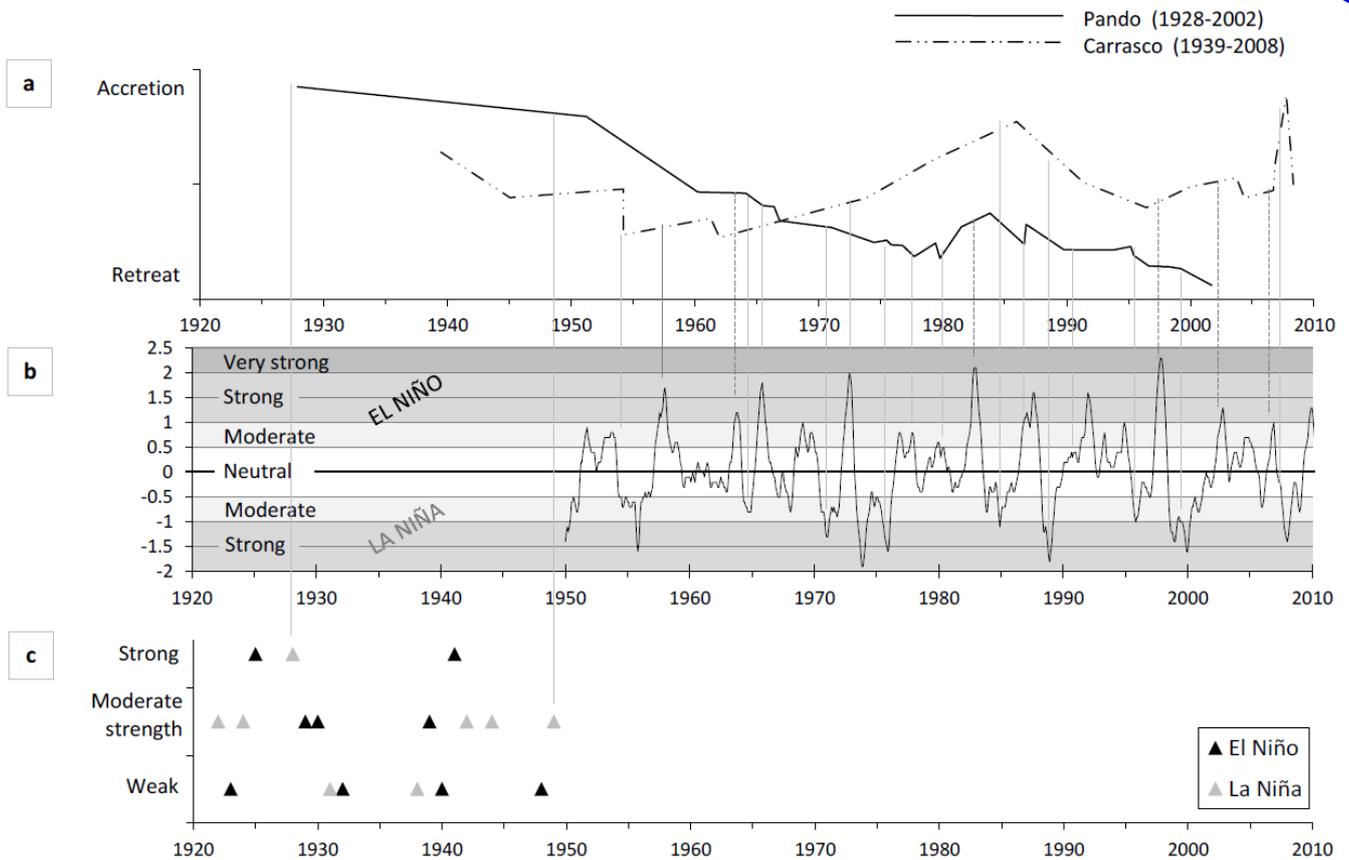


Figura 6.20. a) Historical development of the mouth tidal creeks Carrasco and Pando, indicated as coastal accretion or retreat process. b) ENSO events, classified as weak, moderate, strong or very strong according to Climate Prediction Center, NOAA (period 1950-2010). c) ENSO events according to Severov et al. (2004) for events before 1950. The vertical gray lines (La Niña) and the vertical dashed black lines (El Niño) suggest the links between the coastal fluctuations and teleconnections.

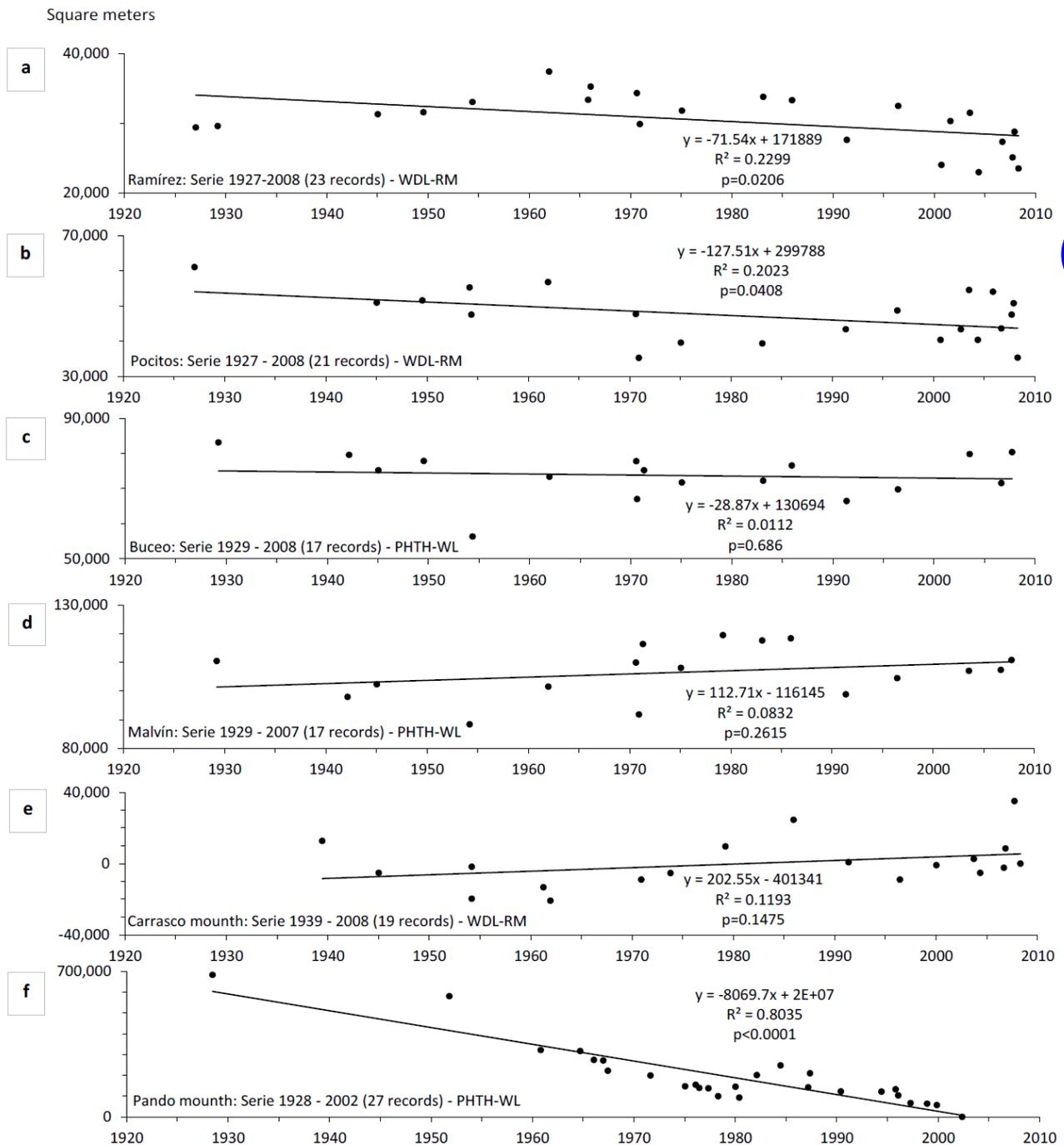


Figura 6.21. Historical trend-line of study sites. Beaches: a) Ramírez, b) Pocitos, c) Buceo, d) Malvín. Creeks' mouths: e) Carrasco, F) Pando. The series of remote sensing observations have a minimum of 17 records and a maximum of 27. Different proxy records were explored as indicators of coastline in order to interpret the responses of the system, wet/dry line or run-up maxima (WDLRM) or previous high tide high water level (PHTH-WL).

Wind anomalies were also recorded in neutral years, i.e., in 1961, 1970. In 1970 retreats were recorded in all beaches due to the observed increased frequency of southern winds.

Thus, despite the strong association between El Niño and increased river discharges, beach area was recovered during several of these events (Gutiérrez et al., 2015).

During strong ENSO events yearly sea levels (SL) at Montevideo lies outside the long-term trend line. For instance, during La Niña SL is -5 to -15 cm below MSL and during El Niño it lies +5 to +20 AMSL (Nagy et al., 2005; Verocai et al., 2015).

The observed behaviour of the coastline could be interpreted as follows: The SW winds -associated with both winter period and La Niña variability- produce short period waves, change the direction of longshore drift in the analysed beaches (except Ramírez), raise the water level (although to a lesser extent than the S and SSE winds), and also cause the retreat of the coastline. These effects are likely to be compensated during austral spring and summer, or during El Niño events, when winds anomalies are reverted intensifying the spring-summer time usual recovery. Wind climatology show that the strongest wind velocities occur in August associated with SW-WSW winds and October associated with ESE-SE winds (Nagy et al., 1997).

The NCEP-NCAR composites of meridional and zonal wind anomalies over the RdIP and the Atlantic coast for moderate and strong ENSO events from 1950-2010 confirmed that the most important anomaly was the meridional component from October to March. During this period an increase of northerly winds (warm, moist and weak winds) expressed by an anomaly of -0.2 m/s (**Figura 6.22**) was observed. During La Niña southerly winds increased (positive anomaly of +0.2 m/s on the Atlantic coast). The zonal component showed positive anomalies in both phases although somewhat higher during El Niño when the zonal circulation, particularly the easterlies, slightly increased. Results obtained with 20th century reanalysis for the Uruguayan coastal areas were very similar.

The reanalysis of the fields of vector wind anomalies (speeds) from October-March for all moderate and strong events showed anomalies from SW of 0.8 m/s during La Niña, and 0.4 m/s from W-WNW during El Niño (**Figura 6.23**).

Summarising, climatic wind frequency and speed combines stronger speeds, e.g., in August and October with WSW-SW and ESE-SE winds respectively. La Niña events increase the frequency of SW to WNW wind directions, which typically prevail during fall-winter (April-September) and El Niño increase ESE-SE ones during spring-summer (October-March). Therefore, it is arguable that it is very likely that the effect of La Niña reinforces climatic winter loss (July-August), whereas El Niño reinforces and/or extends summer accretion from October onward.

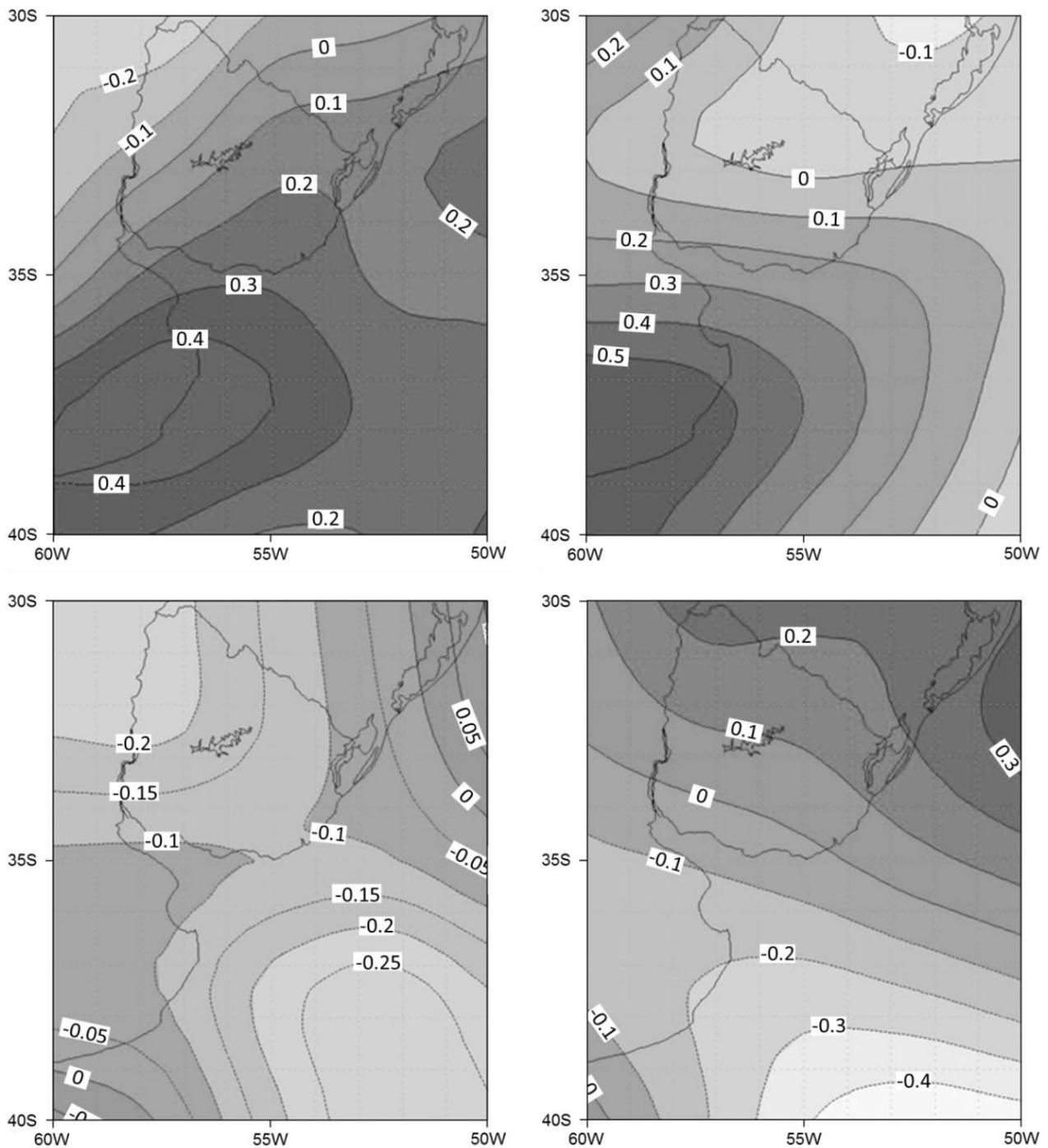


Figura 6.22. Composite of zonal and meridional wind anomalies for moderate and strong ENSO from 1950-2010 (NCEP-NCAR reanalysis). Zonal anomalies: El Niño (above left), La Niña (above right), and meridional anomalies: El Niño (below left) and Niña (below right).

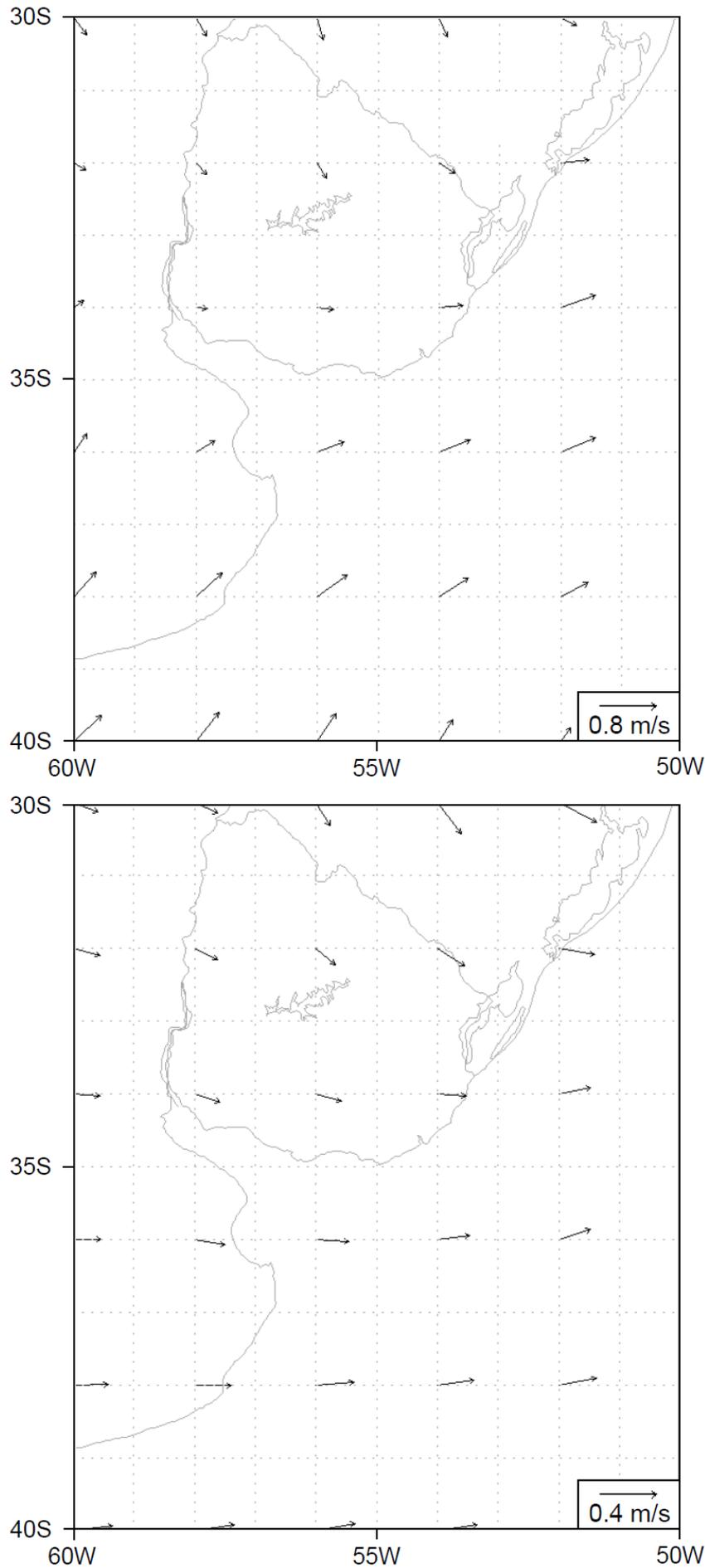


Figura 6.23. Wind Vector Anomaly (m/s) for ENSO events during Oct-Mar, from 1950-2010 (NOAA 20th Century Reanalysis Project): La Niña years (above) and El Niño years (below).

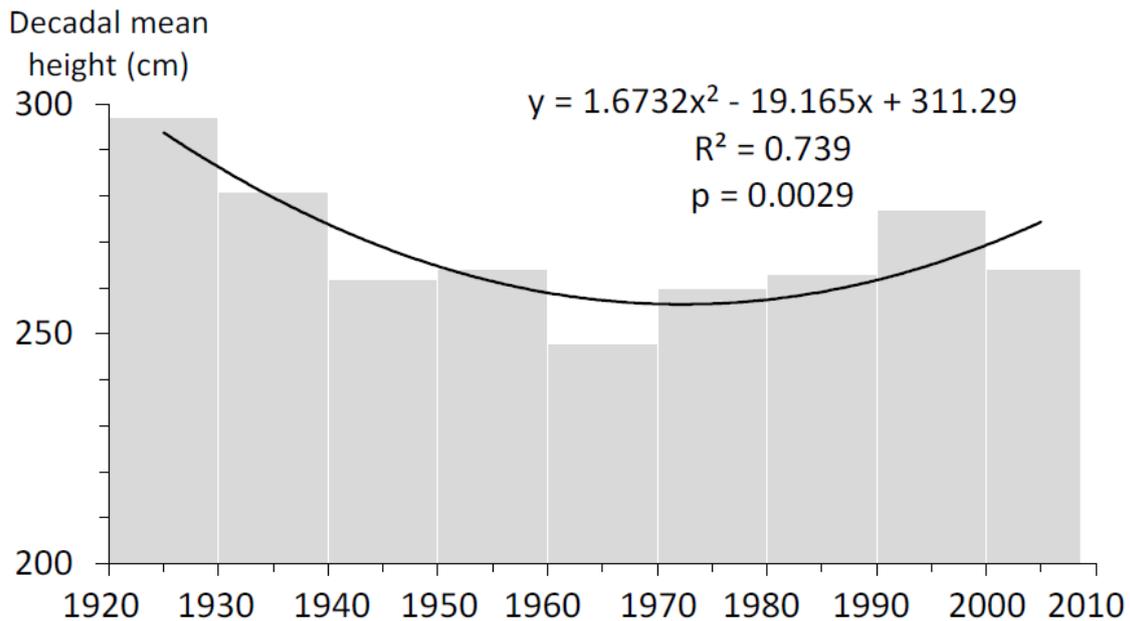


Figura 6.24. Evolution of decadal mean of the maximum yearly storm surges for de RldP.

Results of vector field anomalies' are closely associated with strong southern to western directions (WSW and SW) > 8 and > 10 m/s, whereas the meridional-zonal anomalies are closely associated with the prevailing south-eastern frequencies. The similar field anomalies during La Niña (SW to WNW) for both methods are the resultant of the coincidence of frequency and speed, whereas the differences for El Niño are related to the increased frequency of typically fresh to strong eastern to south-eastern winds (<8 m/s) and of the far less frequent but stronger (> 8 m/s and > 10 m/s) western winds (see **Figura 6.17**). Therefore, the increased frequency of fresh SE winds (> 6 m/s) is masked by the small increase of strong W winds (> 8 m/s).

This result coincide with previous observations about ENSO influence on atmospheric circulation anomalies from October-March as well as with the observed and projected increase in eastern to south-eastern winds over the Uruguayan coast. Therefore, it could serve as an analogy to foresee coastal evolution and management scenarios.

The evolution of decadal mean of the maximum yearly storm surges (**Figura 6.24**) and of the AMO (Ortega et al., 2013) showed a similar development trend which was not reflected in the evolution of the studied beaches, except partially in Ramírez. However, this effect is likely to have occurred and should be explored at lower prism height beaches in some sections of both inner and outer estuary, with cliffs that have actively retreated in the past and which nowadays are stabilised or receding more slowly.

Since 2000 yearly available images for each year show a bi-annual variation in neutral years (see last few years of **Figura 6.19**). This could be associated with the Rossby wave signal in SST and SLP in the South Atlantic reported by Simionato et al. (2005). Nonetheless, this hypothesis should be analysed using a denser and longer series of images and/or land monitoring.

Therefore, the key climatic teleconnections factor of accretion-erosion processes seem to be the occurrence of moderate to strong La Niña which are pulses of severe events, while El Niño events allow partial or full sand recovery on the short- and mid-term scales. The quantitative balance of this superimposed seasonal and interannual sedimentary budget is difficult to be made due to the parallel effects of gradual sea level rise, storm surges and human interventions.

Fisher et al. (2015) identified three specific challenges in climate change and resilience monitoring and evaluation: i) assessing attribution, ii) creating baselines, and iii) monitoring over long time horizons. This paper addressed the attribution of urban

sandy beaches accretion-erosion processes, baselines, long-term series of climate teleconnections and weather extremes, and developed an approach to monitoring and evaluation, aiming to increase beach resilience to SLR and storminess.

6.3.5 Conclusions

This article surveyed the behaviour of managed urban sandy beaches at a wave dominated coast of a large and unique microtidal system, the Río de la Plata's northern coast in Uruguay, and climate stressors such as wind extreme events and climate teleconnections, mainly ENSO-linked variability.

The working assumptions were:

The shape, size and characteristics of sandy beach and dune systems are the consequence of the particular interaction between the energy of waves and wind, with their grain size, equilibrium profile and roughness. Any change to any of these factors may result in a realignment of the beach. This flexibility and ability to work with pulses, is the reason that the sandy beaches are considered the best coastal defense.

Therefore, these systems are cyclical, with alternating periods of erosion and accretion, to give a type of position and geometry in the medium and long term.

Key findings were:

A relationship was found between the observed changes in urban beaches and teleconnections (ENSO), while it is arguable the existence of an effect of Rossby waves. No correlation was found with water level variations attributable to river discharge.

The sand surfaces of the middle estuary beaches analysed in this article have varied due to atmospheric circulation anomalies such as exceptional storm surges associated with more frequent southern winds that erode beaches or zonal winds that enable their recovery.

The studied beaches are often more eroded during strong La Niña events due to a higher frequency of typically strong SW winds than during neutral years, whereas during El Niño a decrease in the frequency of SW winds and a relative stabilisation or even gain in the exposed sand area is observed. This finding is supported by climatic reanalyses of wind anomalies for moderate and strong ENSO events from 1950-2008 besides field and remote sensing observations since 1921.

The strong surface gain of Ramírez Beach in 1961 could be correlated to a light eastern winds anomaly, which would have strengthened the swell. This was also observed, although to a lesser extent, in Pocitos, Buceo, Malvín beaches and in the Pando and Carrasco creek tidal mouth.

The main conclusion was:

These results highlight the likely existence of some degree of relationship between ENSO events and beach erosion-accretion processes.

The main question to be explored in a further study are:

Which is the response to other teleconnections e.g., Rossby waves and AMO? Will the likely increase in the frequency and/or intensity of El Niño events be a risk or an opportunity for the studied beaches?

How was the relationship between ENSO wind-anomalies and beach accretion-erosion processes from 2009/10-2015/16 (when three moderate to strong events occurred).

Some applications in Coastal Management and Climate Adaptation are:

Since ENSO seems to be a good descriptor of the status of sandy beaches of Montevideo during ENSO years and ENSO +1, it could become a useful tool to support the planning of restoration measures, coastal erosion risk-management, and climate adaptation strategies in the middle and outer RdIP estuary Uruguayan coast.

The occurrence of El Niño events could be an opportunity to foster sandy beaches' conservations and to reduce risks from the very likely gradual sea level rise provided beach management plans are implemented.

Monitoring change within the coast and estuary play an important role in understanding the impacts of climate change.

6.3.6 Acknowledgments

This research was conducted as part of the “Technical Proposal for the conservation and recovery of Buceo beach and certified beaches of Montevideo”, agreement between UNCIEP, Facultad de Ciencias, Universidad de la República and the Departamento de Desarrollo Ambiental, Intendencia de Montevideo (IdeM). We thanks especially to Gustavo Piñeiro for his collaboration in the mineralogical analysis in the context of this project.

We thank the dataset provided by the NOAA-ESRL Physical Sciences Division, Boulder Colorado from their Web site at <http://www.esrl.noaa.gov/psd/> Support for the Twentieth Century Reanalysis Project dataset is provided by the U.S. Department of Energy, Office of Science Innovative and Novel Computational Impact on Theory and Experiment (DOE INCITE) program, and Office of Biological and Environmental Research (BER), and by the National Oceanic and Atmospheric Administration Climate Program Office.

We too sincerely thank José E. Verocai for providing unpublished storm surges data and Daniela Peluffo for her language assistance.

References

- Armaroli, C., Ciavola, P., Balouin, Y., Gatti, M., 2006. An Integrated Study of Shoreline Variability Using GIS and ARGUS Techniques. *J. Coast. Res.* (ISSN 0749-0208) SI 39, 473–477.
- Barros, V., Menéndez, A., Nagy, G.J. (Eds.), 2005. El cambio climático en el Río de la Plata. Project assessments of impacts and adaptation to climate change (AIACC), Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera - CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina.
- Bidegain, M., Caffera, R.M., Blixen, F., Pshennikov, V.A., Lagomarsino, J.J., Forbes, E.A., Nagy, G.J., 2005. Tendencias climáticas, hidrológicas, y oceanográficas en el Río de la Plata y Costa Uruguaya, in: Barros, V., Menéndez, Á., Nagy, G. (Eds.), *El Cambio Climático En El Río de La Plata*. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera - CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina, pp. 137–143.
- Bidegain, M., Stella, J.L., Betolli, M.L., Quintana, J., 2015. [Regional climates] Southern South America [in “State of the Climate in 2014”]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 96, S182–S184. doi:10.1175/2015BAMSStateoftheClimate.1
- Bidegain, M., Stella, J.L., Penalba, O.C., 2014. [Regional climates] Southern South America [in “State of the Climate in 2013”]. *Bull. Am. Meteorol. Soc.* 95, S172–S173. doi:10.1175/2014BAMSStateoftheClimate.1
- Bischoff, S., 2005. Sudestadas, in: Barros, V., Menéndez, Á., Nagy, G. (Eds.), *El Cambio Climático En El Río de La Plata*. Project assessments of impacts and adaptation to climate change (AIACC), CIMA/CONICET, Buenos Aires, pp. 53–67.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *J. Coast. Res.* 21, 688–703. doi:10.2112/03-0071.1
- Bracco, R., del Puerto, L., Inda, H., Panario, D., Castiñeira, C., García-Rodríguez, F., 2011. The relationship between emergence of mound builders in SE Uruguay and climate change inferred from opal phytolith records. *Quat. Int.* 245, 62–73. doi:10.1016/j.quaint.2010.05.025
- Camilloni, I., Barros, V., 2000. The Paraná River response to El Niño 1982–83 and 1997–98 events. *J. Hydrometeorol.* 1, 412–430. doi:10.1175/1525-7541(2000)001<0412:TPRRTE>2.0.CO;2
- Camilloni, I., Barros, V., 2003. Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *J. Hydrol.* 278, 94–106. doi:10.1016/S0022-1694(03)00133-1
- Ciavola, P., Corbau, C., Cibir, U., Perini, L., 2003. Mapping of the coastal zone of the Emilia-Romagna region using geographical information systems, in: Ozhan, E. (Ed.), *Proceedings of The Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST)*, Volume III. MEDCOAST, Ravenna, Italy, pp.

2363–2374.

- Codignotto, J.O., Dragani, W.C., Martin, P.B., Simionato, C.G., Medina, R.A., Alonso, G., 2012. Wind-wave climate change and increasing erosion in the outer Río de la Plata, Argentina. *Cont. Shelf Res.* 38, 110–116. doi:10.1016/j.csr.2012.03.013
- del Puerto, L., Bracco, R., Inda, H., Gutiérrez, O., Panario, D., García-Rodríguez, F., 2013. Assessing links between late Holocene climate change and paleolimnological development of Peña Lagoon using opal phytoliths, physical, and geochemical proxies. *Quat. Int.* 287, 89–100. doi:10.1016/j.quaint.2011.11.026
- Dias, J.M.A., Cearreta, A., Isla, F.I., de Mahiques, M.M., 2013. Anthropogenic impacts on Iberoamerican coastal areas: Historical processes, present challenges, and consequences for coastal zone management. *Ocean Coast. Manag.* 77, 80–88. doi:10.1016/j.ocecoaman.2012.07.025
- Dragani, W.C., Martin, P.B., Simionato, C.G., Campos, M.I., 2010. Are wind wave heights increasing in south-eastern south American continental shelf between 32°S and 40°S? *Cont. Shelf Res.* 30, 481–490. doi:10.1016/j.csr.2010.01.002
- EcoPlata, 1999. Diagnóstico ambiental y socio-demográfico de la zona costera uruguaya del Río de la Plata. Recopilación de informes técnicos. CIID/PNUD/MVOTMA/UNESCO, Montevideo, Uruguay.
- Escobar, G., Vargas, W., Bischoff, S., 2004. Wind tides in the Rio de la Plata estuary: Meteorological conditions. *Int. J. Climatol.* 24, 1159–1169. doi:10.1002/joc.1026
- Fisher, S., Dinshaw, A., McGray, H., Rai, N., Schaar, J., 2015. Evaluating climate change adaptation: Learning from methods in international development. *Monit. Eval. Clim. Chang. Adapt. A Rev. landscape. New Dir. Eval.* 13–35. doi:10.1002/ev.20128
- Flood, S., Schechtman, J., 2014. The rise of resilience: Evolution of a new concept in coastal planning in Ireland and the US. *Ocean Coast. Manag.* 102, 19–31. doi:10.1016/j.ocecoaman.2014.08.015
- Gutiérrez, O., 2010. Dinámica sedimentaria en la costa uruguaya: evolución y tendencias de playas urbanas en el marco del Cambio Global. Thesis MSc. Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. doi:10.13140/RG.2.1.1904.4568
- Gutiérrez, O., Panario, D., 2005. Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos. *Xeográfica, Rev. Xeogr. Territ. e Medio Ambient.* (ISSN 1578-5637) 5, 107–126.
- Gutiérrez, O., Panario, D., 2006. Evolución de la desembocadura del Arroyo Pando (Canelones, Uruguay): ¿tendencias naturales o efectos antrópicos?, in: Menafrá,

- R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F., Conde, D. (Eds.), Bases Para La Conservación Y El Manejo de La Costa Uruguaya. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, pp. 391–400.
- Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Piñeiro, G., Montes, C., 2015. Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *J. Integr. Coast. Zo. Manag. - Rev. Gestão Costeira Integr.* 15, (in press). doi:10.5894/rgci553
- Holling, C.S., Gunderson, L.H., 2002. Resilience and Adaptive Cycles, in: Gunderson, L.H., Holling, C.S. (Eds.), *Panarchy, Understanding Transformations in Human and Natural Systems*. Island Press, Washington DC, U.S.A., pp. 25–62.
- Iriondo, M., Brunetto, E., Kröhling, D., 2009. Historical climatic extremes as indicators for typical scenarios of Holocene climatic periods in the Pampean plain. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 283, 107–119. doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.005
- Iriondo, M., Garcia, N.O., 1993. Climatic variations in the Argentine plains during the last 18,000 years. *Palaeogeogr. Palaeoclimatol. Palaeoecol.* 101, 209–220. doi:10.1016/0031-0182(93)90013-9
- Iriondo, M., Kröhling, D., Brunetto, E., 2011. Aridization, dune dissipation and pedogenesis in the quaternary of eastern pampean sand sea, in: Murphy, J.A. (Ed.), *Sand Dunes*. Nova Science Publishers, Inc., New York, U.S.A., pp. 1–42.
- Kalnay, E., Kanamitsu, M., Kistler, R., Collins, W., Deaven, D., Gandin, L., Iredell, M., Saha, S., White, G., Woollen, J., Zhu, Y., Leetmaa, A., Reynolds, R., Chelliah, M., Ebisuzaki, W., Higgins, W., Janowiak, J., Mo, K.C., Ropelewski, C., Wang, J., Jenne, R., Joseph, D., 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. *NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. Bull. Am. Meteorol. Soc.* 77, 437–470.
- Ledoux, L., Turner, R.K., 2002. Valuing ocean and coastal resources: a review of practical examples and issues for further action. *Ocean Coast. Manag.* 45, 583–616. doi:10.1016/S0964-5691(02)00088-1
- López Laborde, J., Nagy, G.J., 1999. Hydrography and Sediment Transport Characteristics of the Río de la Plata: A Review, in: Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C., Pino-Quivira, M. (Eds.), *Estuaries of South America. Their Geomorphology and Dynamics*. Springer, Berlin, Heidelberg, Germany, pp. 133–159. doi:10.1007/978-3-642-60131-6_7
- Luisetti, T., Turner, R.K., Jickells, T., Andrews, J.E., Elliott, M., Schaafsma, M., Beaumont, N., Malcolm, S., Burdon, D., Adams, C.A., Watts, W., 2014. Coastal Zone Ecosystem Services: from science to values and decision making; a case study. *Sci. Total Environ.* 493, 682–693. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.099

- Magrín, G.O., Gay García, C., Cruz Choque, D., Giménez, J.C., Moreno, A.R., Nagy, G.J., Nobre, C., Villamizar, A., 2007. Latin America. Climate Change 2007: impacts, adaptation and vulnerability, in: Parry, M.L., Canziani, O.F., Palutikof, J.P., Linden, P.J. van der, Hanson, C.E. (Eds.), Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press, Cambridge, United Kingdom, pp. 581–615.
- Marshall, F.E., Banks, K., 2013. Shoreline Habitat: Beaches., in: Nuttle, W.K., Fletcher, P.J. (Eds.), Integrated Conceptual Ecosystem Model Development for the Southeast Florida Coastal Marine Ecosystem. NOAA Technical Memorandum, OAR-AOML-103 and NOS-NCCOS-163, Florida, Miami, U.S.A., pp. 94–108.
- Masselink, G., Gehrels, R. (Eds.), 2014. Coastal Environments and Global Change. American Geophysical Union - Wiley-Blackwell, New York, U.S.A.
- Menéndez, A., Berbery, E.H., 2006. Tendencias hidrológicas en la Cuenca del Plata, in: Barros, V., Clarke, R., Silva Días, P. (Eds.), El Cambio Climático En La Cuenca Del Plata. CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina, pp. 81–92.
- MTOP/PNUD/UNESCO, 1979. Conservación y mejora de playas - URU. 73.007. Unesco, Montevideo, Uruguay.
- Nagy, G.J., Bidegain, M., Caffera, R.M., Norbis, W., Ponce, A., Pshennikov, V., Severov, D.N., 2008a. Fishing strategies for managing climate variability and change in the Estuarine Front of the Río de la Plata, in: Leary, N., Adejuwon, J., Barros, V., Burton, I., Kulkarni, J. (Eds.), Climate Change and Adaptation. Routledge, London, United Kingdom, pp. 353–370.
- Nagy, G.J., Bidegain, M., de los Santos, B., Verocai, J.E., 2015a. Base climatology (1979-2014) and future (2030-2050) RCP scenarios for Uruguay. Project URU/11/g31: “Institutional strengthening for the elaboration of the Uruguayan 4th National Communication to the UNFCCC”. Working Paper. Montevideo, Uruguay.
- Nagy, G.J., Gómez-Erache, M., Fernández, V., 2007. El aumento del nivel del mar en la costa uruguaya del Río de la Plata. Tendencias, vulnerabilidades y medidas para la adaptación. Medio Ambient. y Urban. (ISSN 0326-7857) 67, 77–93.
- Nagy, G.J., Gómez-Erache, M., Kay, R., 2015b. A risk-based and participatory approach to assessing climate vulnerability and improving governance in coastal Uruguay, in: Glavovic, B., Kelly, M., Kay, R., Travers, A. (Eds.), Climate Change and the Coast Building Resilient Communities. CRC Press, Boca Raton, Florida, U.S.A., pp. 357–378. doi:10.1201/b18053-23
- Nagy, G.J., Gómez-Erache, M., López, C.H., Perdomo, A.C., 2002. Distribution patterns of nutrients and symptoms of eutrophication in the Rio de la Plata River Estuary System. Hydrobiologia 475-476, 125–139. doi:10.1023/A:1020300906000

- Nagy, G.J., Martínez, C.M., Caffera, R.M., Pedrosa, G., Forbes, E.A., Perdomo, A.C., López Laborde, J., 1997. The Hydrological and Climatic Setting of the Rio de la Plata, in: Wells, P.G., Daborn, G.R. (Eds.), *The Rio de La Plata: An Environmental Overview. An EcoPlata Project Background Report*. Dalhousie University, Halifax, Nueva Escocia, Canada, pp. 17–68.
- Nagy, G.J., Muñoz, N., Verocai, J.E., Bidegain, M., Seijo, L., 2014a. Adjusting to current climate threats and building alternative future scenarios for the Rio de la Plata coast and estuarine front, Uruguay. *J. Integr. Coast. Zo. Manag. - Rev. Gestão Costeira Integr.* 14, 553–568. doi:10.5894/rgci472
- Nagy, G.J., Ponce, A., Pshennikov, V.A., Silva, R., Forbes, E.A., Kokot, R., 2005. Desarrollo de la capacidad de evaluación de la vulnerabilidad costera al Cambio Climático: Zona Oeste de Montevideo como caso de estudio, in: Barros, V., Menéndez, Á., Nagy, G. (Eds.), *El Cambio Climático En El Río de La Plata*. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera - CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina, pp. 173–180.
- Nagy, G.J., Pshennikov, V.A., Robatto, P., 2003. Monthly variability of salinity at Montevideo, Rio de la Plata's frontal zone, in response to ENSO fluctuations and to the River Uruguay Flow (1998-2000), in: Vizziano, D., Puig, P., Mesones, C., Nagy, G.J. (Eds.), *Río de La Plata: Research to Manage the Environment, Fish Resources and the Fishery in the Saline Front*. Montevideo, Uruguay, pp. 21–31.
- Nagy, G.J., Seijo, L., Verocai, J.E., Bidegain, M., 2014b. Stakeholders' climate perception and adaptation in coastal Uruguay. *Int. J. Clim. Chang. Strateg. Manag.* 6, 63–84. doi:10.1108/IJCCSM-03-2013-0035
- Nagy, G.J., Seijo, L., Verocai, J.E., Brugnoli, E., Bidegain, M., 2013. Enfoque, conocimiento y medidas para enfrentar las amenazas del clima presente en la zona frontal del Río de la Plata, Uruguay. *Costas Rev. Iberoam. manejo costero Integr.* (ISSN 2304-0963) 2, 67–87.
- Nagy, G.J., Severov, D.N., Pshennikov, V.A., De los Santos, M., Lagomarsino, J.J., Sans, K., Morozov, E.G., 2008b. Rio de la Plata estuarine system: Relationship between river flow and frontal variability. *Adv. Sp. Res.* 41, 1876–1881. doi:10.1016/j.asr.2007.11.027
- Nicholls, R.J., Cazenave, A., 2010. Sea-level rise and its impact on coastal zones. *Science* 328, 1517–1520. doi:10.1126/science.1185782
- Ortega, L., Celentano, E., Finkl, C., Defeo, O., 2013. Effects of climate variability on the morphodynamics of Uruguayan sandy beaches. *J. Coast. Res.* 29, 747–755. doi:10.2112/JCOASTRES-D-13-00003.1
- Panario, D., Gutiérrez, O., 2005. La vegetación en la evolución de playas arenosas. El caso de la costa uruguaya. *Ecosistemas. Rev. la Asoc. Española Ecol. Terr.* 14,

150–161.

- Panario, D., Gutiérrez, O., Piñeiro, G., 2008. Propuesta técnica para la conservación recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe final. Convenio UNCIEP, Facultad de Ciencias y Departamento de Desarrollo Ambiental, Intendencia Municipal de Montevideo. Setiembre. Montevideo, Uruguay. doi:10.13140/RG.2.1.2508.8725
- Panario, D., Piñeiro, G., 1997. Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay. *Clim. Res.* 9, 67–72. doi:10.3354/cr009067
- Pereira, N.E. da S., Klumb-Oliveira, L.A., 2015. Analysis of the influence of ENSO phenomena on wa (Brazil). *J. Integr. Coast. Zo. Manag. - Rev. Gestão Costeira Integr.* 15, 353–370. doi:10.5894/rgci570
- Piovano, E.L., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M., Sylvestre, F., 2009. Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka, in: Vimeux, F., Sylvestre, F., Khodri, M. (Eds.), *Past Climate Variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding Regions. From the Last Glacial Maximum to the Holocene, Developments in Paleoenvironmental Research.* Springer, Netherlands, pp. 323–351. doi:10.1007/978-90-481-2672-9_14
- Pisciottano, G., Díaz, A., Cazess, G., Mechoso, C.R., 1994. El Niño-Southern Oscillation Impact on rainfall in Uruguay. *J. Clim.* 7, 1286–1302. doi:10.1175/1520-0442(1994)007<1286:ENSOIO>2.0.CO;2
- Ropelewski, C.F., Halpert, M.S., 1987. Global and regional scale precipitation patterns associated with the El Niño/Southern Oscillation. *Mon. Weather Rev.* 115, 1606–1626. doi:10.1175/1520-0493(1987)115<1606:GARSPP>2.0.CO;2
- Severov, D.N., Mordecki, E., Pshennikov, V.A., 2004. SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/Southern oscillation. *Adv. Sp. Res.* 33, 343–347. doi:10.1016/S0273-1177(03)00479-4
- Simionato, C.G., Meccia, V.L., Guerrero, R.A., Dragani, W.C., Nuñez, M.N., 2007. Rio de la Plata estuary response to wind variability in synoptic to intraseasonal scales: 2. Currents' vertical structure and its implications for the salt wedge structure. *J. Geophys. Res.* 112, C07005. doi:10.1029/2006JC003815
- Simionato, C.G., Vera, C.S., Siegmund, F., 2005. Surface wind variability on seasonal and interannual scales over Río de la Plata area. *J. Coast. Res.* 21, 770–783. doi:10.2112/008-NIS.1
- Stevens, S., Milstead, B., Albert, M., Entsminger, G., 2005. Northern coastal and barrier network vital signs monitoring plan. Technical Report NPS/NER/NRTR-2005/025. U.S. Department of the Interior, National Park Service, Northeast Region, Boston,

MA, U.S.A.

Verocai, J.E., Gómez-Erache, M., Nagy, G.J., Bidegain, M., 2015. Addressing climate extremes in Coastal Management: The case of the Uruguayan coast of the Rio de la Plata System. *J. Integr. Coast. Zo. Manag. - Rev. Gestão Costeira Integr.* 15, 91–107. doi:10.5894/rgci555

Young, I.R., Zieger, S., Babanin, A.V., 2011. Global trends in wind speed and wave height. *Science* 332, 451–455. doi:10.1126/science.1197219

Capítulo 6.4

El ciclo de la arena y el comportamiento de las desembocaduras... un proceso descuidado. La necesidad de cuantificar (para la gestión costera)

Ofelia Gutiérrez^{@, 1}, Daniel Panario¹, Gustavo J. Nagy², Carlos Montes³

[@] Autor corresponsal

1 - UNCIEP, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Gutiérrez: oguti@fcien.edu.uy and gutierrez.ofelia@gmail.com, Panario: panari@fcien.edu.uy and daniel.panario@gmail.com

2 - Grupo de Cambio Ambiental y Gestión Costero-Marina, Instituto de Ecología y Ciencias Ambientales (IECA), Facultad de Ciencias, Universidad de la República, Uruguay. e-mail: Nagy: gnagy@fcien.edu.uy and gustavo.nagy56@gmail.com

3 - Departamento de Ecología, Facultad de Ciencias, Universidad Autónoma de Madrid, España. e-mail: Montes: carlos.montes@uam.es

Manuscrito

6.4. EL CICLO DE LA ARENA Y EL COMPORTAMIENTO DE LAS DESEMBOCADURAS... UN PROCESO

DESCUIDADO. LA NECESIDAD DE CUANTIFICAR (PARA LA GESTIÓN COSTERA)

Resumen

Las desembocaduras de cursos fluviales en el estuario del Río de la Plata deben considerarse subestuarios que desembocan en playas arenosas. Las barras de estos cursos son ambientes que rápidamente responden con procesos de erosión y/o migración del cauce cuando el “ciclo de la arena” (balance sedimentario costero) sufre modificaciones, tanto por efecto de la fijación de sedimentos (dunas) por forestación con especies exóticas, como por la construcción de obras de infraestructura.

Fueron analizadas dos desembocaduras en Uruguay, la del Arroyo Pando (Departamento de Canelones) y la del Arroyo Carrasco (límite entre Departamentos de Montevideo y Canelones) que han recibido impactos diversos, y como consecuencia registraron modificaciones, no sólo en el flujo de sedimentos, sino también en su régimen hidrológico.

Fue realizado un análisis multitemporal a partir de una extensa serie de fotos aéreas y cartografía desde el año 1928, y el apoyo de documentos y crónicas. Los datos obtenidos fueron analizados estadísticamente, resultando en el Pando, en pérdida significativa de superficie de playa y en el Carrasco en aumento de la misma a partir de obras de canalización de un humedal ubicado aguas arriba, cuyo canal queda discurriendo sobre sedimentos arenosos.

Son discutidas y cuantificadas las relaciones que se establecen entre los sistemas dunares y el tramo final de los cursos fluviales, aspecto que no ha recibido la debida atención en la literatura científica, en la que es frecuente la disociación entre el análisis de la dinámica eólica y la fluvial.

Fue realizado un balance sedimentario para cada uno de los sistemas sobre base de datos empíricos y de revisión.

Se discuten las relaciones más probables entre actividades antrópicas y los procesos observados, así como con los procesos naturales involucrados en las fluctuaciones. Los resultados permitirán establecer medidas de mitigación realistas a los impactos del cambio global sobre estos complejos sistemas.

Palabras clave: Ciclo de la arena, desembocaduras, balance sedimentario, Río de la Plata.

6.4.1 Introducción

En la zona costera se concentra la mayor parte de la población del planeta (Small y Cohen, 2004; Woodroffe, 2002), desarrollándose actividades de residencia, agropecuarias, pesquería, industriales, turismo, minería, puertos, etc., en el marco de "políticas de desarrollo", que conciben al ambiente como una fuente ilimitada de recursos (Jonge et al., 2002; Nicholls et al., 2008). Esta interpretación ha llevado a que se alcance un punto tal de transformaciones, que torna difícil evitar la pérdida definitiva de servicios ambientales de los ecosistemas costeros (Crossland et al., 2005; Luisetti et al., 2014). A su vez, muchas de estas inversiones o infraestructuras ya han perdido su valoro funcionalidad, al no haberse realizado un manejo integrado de los recursos, lo que demuestra que los conceptos de desarrollo actuales no son sustentables, incluso a veces, ni siquiera desde el punto de vista económico.

En las últimas décadas se ha dado la mayor alteración de las áreas costeras alrededor del mundo y como resultado de ello, gran parte de los ecosistemas costeros ya están bajo una intensa y creciente presión, independientemente de los cambios relacionados con el clima (Klemas, 2011; Turner et al., 1996). Cuando se suma a lo anterior, el cambio inducido por el clima, se generan interrelaciones y retroalimentaciones muy complejas, entre el hombre, el ambiente, los efectos de los impactos producidos y el cambio climático (Turner et al., 1996). La humanidad está amenazando el medio ambiente costero a través de la sobreexplotación de recursos naturales (Luisetti et al., 2014).

La problemática es cada día más compleja, demandando una nueva concepción de la interacción humana con un medio especialmente frágil (Martínez et al., 2013; Silva et al., 2014), por tratarse de la transición entre los ecosistemas continentales y los marítimos. A su vez resulta difícil interpretar la incidencia de cada impacto/actividad en esa estrecha franja arenosa denominada playa (Muñoz-Vallés y Cambrollé, 2014), y menos aún la responsabilidad de cada intervención en los procesos observados. Los efectos de una intervención pueden manifestarse mucho tiempo después de producida y estar enmascarados por otras intervenciones, e incluso por procesos naturales tendenciales de largo plazo, cuya dinámica es aún poco conocida y/o por los efectos del cambio climático asociado a cambios en el clima de olas o a la subida del nivel medio del mar (SLR) (Gutiérrez et al., 2015; Verocai et al., 2015).

Los paisajes costeros de playas con dunas, son sistemas geomorfológicos de respuesta y son muy sensibles a los cambios ambientales (Hansom, 2001). La sensibilidad de respuesta de las formas del relieve puede ser definida como la capacidad del paisaje

de someterse a un cambio reconocible como respuesta a cambios en las variables de control externas (Hanley et al., 2014). La naturaleza de la respuesta puede variar dependiendo de la intensidad y dirección del cambio, de la complejidad del sistema y del tiempo de relajación requerido para alcanzar un nuevo equilibrio dinámico (Chorley y Kennedy, 1971). Las costas arenosas son representativas de un sistema de respuesta que se ajusta rápidamente en una forma lábil a condiciones ambientales cambiantes (Hansom, 2001).

Este trabajo pretende avanzar en el estudio y conocimiento de las costas arenosas del Uruguay, a partir del análisis de desembocaduras, enfoque elegido por ser estos ambientes particularmente dinámicos. A estos efectos, se propone realizar un balance sedimentario relacionando las diferentes fuentes de sedimentos presentes y su contribución al equilibrio (desequilibrio) de los sectores de playa próximos a desembocaduras.

Se procura además, realizar una aproximación a las relaciones causales que determinan las modificaciones observadas, y en la medida de lo posible, establecer relaciones entre los impulsores de cambios naturales y humanos en las fluctuaciones de la línea de costa. Estos resultados permitirían prever tendencias asociadas al cambio climático y establecer algunas medidas de adaptación. Al mismo tiempo se pretende contribuir a dimensionar una de las componentes del ciclo de la arena (arena aportada por los sistemas dunares activos) a partir del análisis de desembocaduras de vías de drenaje con y sin dunas activas en su situación original. La relación entre dunas móviles aledañas a desembocaduras es un aspecto poco tenido en cuenta en la bibliografía y que sin embargo, podría presentar particular relevancia en lugares donde esta conexión es o ha sido activa como lo ha sugerido MTOP/PNUD/UNESCO (1979) para Uruguay, teniendo en cuenta que en estos lugares suelen presentarse extensos campos dunares activos.

En la literatura existen numerosos trabajos que analizan el balance sedimentario en playas (Clayton, 1980; Inman y Masters, 1991; Norris, 1964; Pasternack y Brush, 1998; Vinther et al., 2004; Willis et al., 2002), o abordan el estudio de la dinámica de los sistemas dunares costeros (De Lillis et al., 2004) también ha sido estudiada la evolución de desembocaduras y sus intercambios de sedimentos (Carter y Bartlett, 1990; FitzGerald et al., 2000; Gelfenbaum et al., 2001, 1999). Si bien en algunos casos se menciona la existencia en estos sitios de sistemas dunares degradados, no se analizan los intercambios de sedimentos entre dunas, desembocaduras y playas aledañas. En

trabajos de revisión (e.g. French y Burningham, 2011; Stephenson y Brander, 2004, 2003), tampoco se citan trabajos que hagan relación a estos intercambios.

Cuantificar los aportes y salidas de sedimentos litorales permite tener una idea de la importancia de las fuentes de sedimentos individuales y los sumideros que afectan la estabilidad de las playas y a su vez, dar respuestas útiles para las agencias y los responsables políticos que gestionan el medio ambiente costero (Limber et al., 2008).

6.4.2 Área de estudio y caracterización

Para abordar esta el estudio de las interrelaciones entre la sistemas dunares y el curso inferior de las vías de drenaje en los balances sedimentarios costeros, fueron analizadas las desembocaduras de los Arroyo Pando y Carrasco, que desembocan en el estuario del Río de la Plata (RdIP), Uruguay (**Figura 6.25**). La desembocadura del Arroyo Pando (Departamento de Canelones, Uruguay), ha recibido impactos diversos, y como

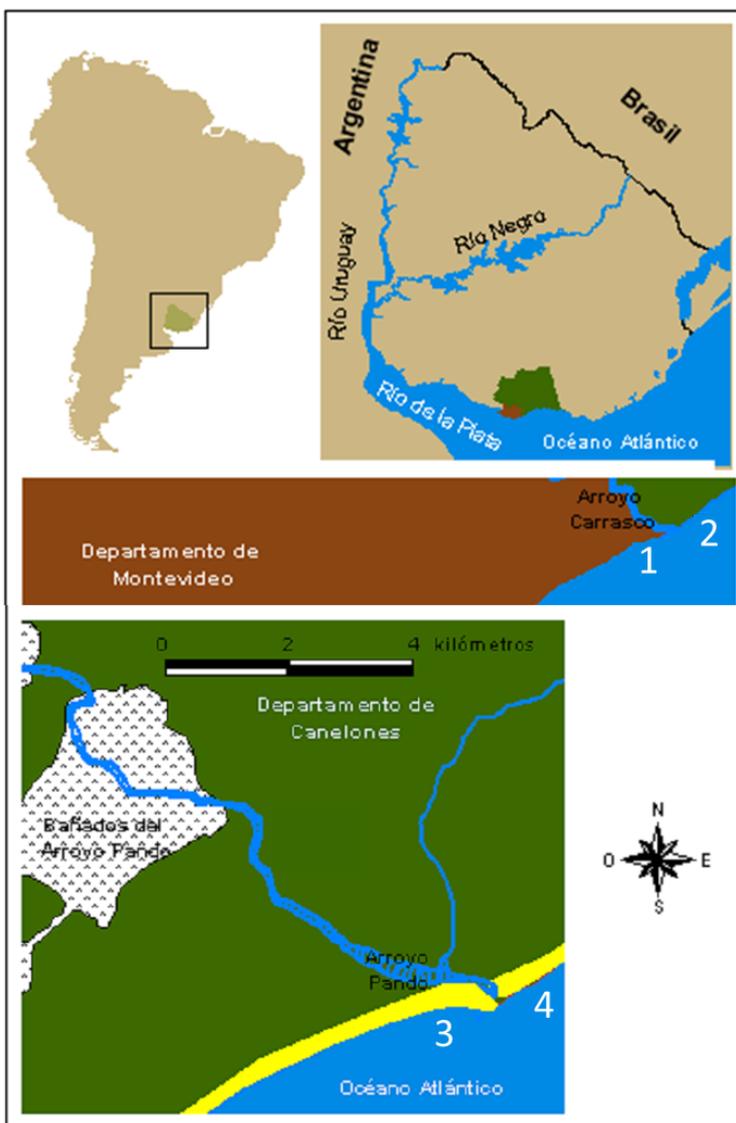


Figura 6.25. Ubicación del área de estudio. *Arriba Izquierda:* América del Sur. *Arriba derecha:* Uruguay, Departamento de Montevideo (marrón), Departamento de Canelones (verde). *Centro:* Desembocadura del Arroyo Carrasco y playas adyacentes, 1) Carrasco, 2) San José de Carrasco. *Abajo:* Desembocadura del Arroyo Pando y playas adyacentes: 3) El Pinar, 4) Neptunia.

consecuencia de ellos ha registrado modificaciones, no sólo en el flujo de sedimentos, sino también sobre su régimen hidrológico (Gutiérrez y Panario, 2006, 2005; Gutiérrez, 2010). La otra desembocadura es la del Arroyo Carrasco (límite de los Departamentos de Montevideo y Canelones, Uruguay) sobre la que no se han registrado mayormente impactos negativos sobre el ciclo de la arena, y que a su vez, por obras realizadas en su cuenca, ha recibido nuevos aportes de sedimentos arenosos (Gutiérrez, 2010).

El área de estudio pertenece al estuario exterior del Río de la Plata caracterizable como micromareal (amplitud 0,5 m, Nagy et al., 1997; Verocai et al., 2015) y las desembocaduras de los cursos fluviales en estudio pueden definirse por su comportamiento como subestuarios del mismo. Para esta categorización se tiene en cuenta la dimensión del estuario del RdIP y que la pendiente en estos tramos finales de los cursos fluviales es casi nula, por lo cual están normalmente sometidos al ingreso de agua salobre por efectos de las mareas y/o los vientos.

Las playas en las que desembocan pueden caracterizarse como en “equilibrio dinámico” (*sensu* Short, 1999), dependiendo este, de que el ingreso de sedimentos (arena) por distintas vías, sea equivalente al egreso principalmente por deriva litoral (Gutiérrez y Panario, 2006; Panario y Gutiérrez, 2006, 2005). Así, una componente fundamental de la dinámica sedimentaria litoral (**Figura 6.26**) sería la existencia de campos dunares que movidos por el viento, vuelcan significativos volúmenes de arena a las vías de drenaje, las que cuando aumenta su capacidad de transporte (en épocas de precipitaciones), aportan estos sedimentos al mar o al estuario y pasan entonces a ser transportados por deriva litoral, alimentando a las playas en el sentido de la deriva dominante (Gutiérrez y Panario, 2005; Panario, 2000, 1999), que en términos generales la dirección dominante desde Cabo Polonio es hacia el W con pocas excepciones (Gutiérrez y Panario, 2016).

Una costa con un balance sedimentario próximo a cero indica que los procesos de erosión y sedimentación están compensados, oscilando de forma dinámica en torno a una situación de equilibrio dinámico. Por el contrario, si el balance sedimentario es negativo indica que predomina la erosión y si es positivo, indica que predomina la sedimentación (Correa et al., 2009). La costa se erosiona cada año de forma natural, debido principalmente a los temporales, y se suele compensar con periodos de sedimentación a lo largo del mismo año (Wright y Short, 1984). Sólo cuando el balance sedimentario muestra una tendencia erosiva a largo plazo, debido por ejemplo al ascenso del nivel medio del mar o el aumento de la energía de los temporales (Correa et al., 2009), o cuando los aportes de sedimentos han sido interrumpidos por la acción

humana o agotamiento del stock, la erosión costera puede generar impactos severos, con costos ambientales, sociales y económicos (Muñoz-Vallés y Cambrollé, 2014).

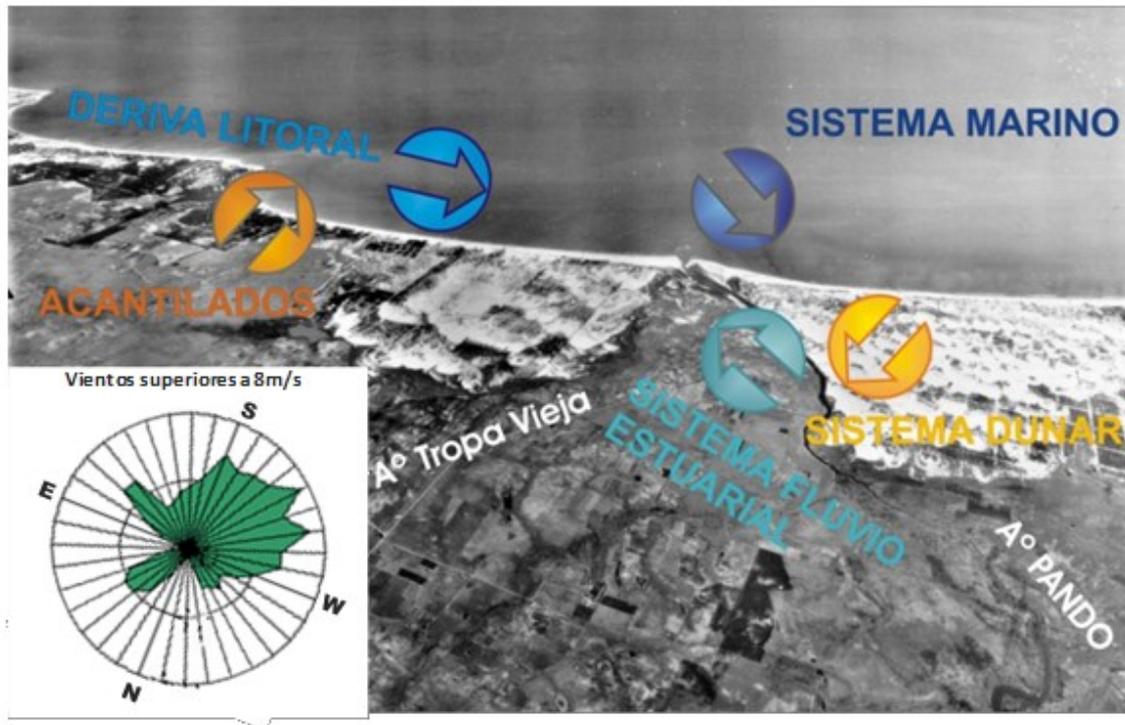


Figura 6.26. Ciclo de la arena y fuentes de aportes de sedimentos, graficados sobre foto del año 1945, vuelo del Trimetrogón. La rosa de los vientos fuertes (superiores a 8m/s) que mueven cantidades significativas de arena se grafica invertida para facilitar la comprensión de la dinámica dunar en la desembocadura del Arroyo Pando. Foto: Servicio Geográfico Militar (SGM).

6.4.3 Antecedentes

La separación de factores naturales y antrópicos en dinámica costera es una tarea difícil debido a que la misma está sujeta a fluctuaciones periódicas que van desde ciclos diarios o estacionales, a fluctuaciones decadales como el *Pacific Decadal Oscillation* (PDO); o multidecadales como el *Atlantic Multidecadal Oscillation* (AMO), a las que se le deben agregar movimientos aperiódicos fruto de variaciones climáticas, de corrientes marinas, de reserva de sedimentos subacuáticos, etc. Cuyos orígenes pueden ser pretéritos y desencadenarse en determinado momento por efectos inerciales (Panario, 2000). En efecto, el balance sedimentario en la costa de la región del estuario exterior del RdIP, depende en gran medida de la deriva litoral (Gutiérrez y Panario, 2016) y esta a su vez del balance de vientos de direcciones opuestas cuya prevalencia se altera con el tiempo (Gutiérrez et al., 2015), más la acción del *swell* que puede *a priori* considerarse relativamente constante.

En la actualidad la componente de vientos fuertes del sector S y SW ha disminuido (Bidegain et al., 2005) lo que permite argumentar, apoyado además por la documentación histórica y paleoclimática (Iriondo y Kröhling, 2008; Politis, 1984), que con anterioridad al siglo XIX, su frecuencia habría sido mayor. Numerosos autores sostiene que durante el siglo XVIII, para la región pampeana ocurrió una variación climática denominada “Pequeña Edad del Hielo”, y como consecuencia de ella un aumento de la aridización (Bracco et al., 2014, 2011; del Puerto et al., 2013; Iriondo et al., 2011, 2009; Piovano et al., 2009 and references therein), mientras que desde mediados del siglo XX y hasta la actualidad se registra un incremento de las precipitaciones medias anuales (Nagy et al., 2015). Además y consecuente con ello según (Iriondo y Kröhling, 2008) en ese período más frío y seco que el actual, había una mayor frecuencia de vientos secos del SW en gran parte de la costa, siendo la componente W a E de la deriva litoral mayor de lo que es actualmente.

Entre los impulsores de cambios de origen antropogénico se destaca la introducción de especies exóticas. La vegetación en la costa juega un rol fundamental en la dinámica de las playas arenosas. Positivo a partir de las interacciones de la vegetación nativa en la construcción del cordón dunar o duna primaria; o negativo cuando la forestación o la invasión de especies exóticas (ej. *Carpobrotus edulis*, *Acacia longifolia* entre otras) interrumpe el flujo normal de sedimentos entre las dunas y las playas o entre las dunas y las desembocaduras de los cursos fluviales (Panario y Gutiérrez, 2006, 2005).

En la costa uruguaya fueron forestadas a partir de la década de 1940 las dunas situadas en zonas próximas a las desembocaduras de los cursos de agua en la costa marina y los campos de dunas que pasaban por detrás de los cabos (Gutiérrez y Panario, 2016; Panario y Gutiérrez, 2005). Esta forestación, al interrumpir la recirculación de la arena, podría ser considerada como uno de los impactos más fuertes que contribuyeron con la erosión generalizada de las playas del estuario exterior. Esta erosión desencadenó a partir de la década de 1970 numerosas obras civiles, como la construcción de espigones, que para nuestras condiciones, no resultaron adecuados (Gutiérrez y Panario, 2016, 2005; Panario y Gutiérrez, 2005) al igual que en su implantación en otras situaciones similares (Marshall y Banks, 2013). La forestación, en general ha sido punto de partida de una urbanización extendida y de la consecuente construcción de infraestructuras (casas, costaneras, calles, muros de contención), que fijaron la zona de dunas ubicada por detrás del cordón dunar primario, interrumpiendo definitivamente los aportes de sedimentos desde este componente del ciclo de la arena.

6.4.4 Metodología

Fueron seleccionados dos sitios, 1) desembocadura del Arroyo Pando (playas El Pinar y Neptunia, ubicadas respectivamente al E y W), con evidencias de interacciones entre el sistema dunar y la costa, y 2) desembocadura del Arroyo Carrasco (playas de Carrasco y San José de Carrasco ubicadas respectivamente al E y W), sin aportes significativos de arena eólica (donde no se registra presencia de dunas activas desde el primer registro obtenido).

Fue realizado un análisis multi-temporal usando sensores remotos, técnicas de SIG e información histórica. El archivo de sensores remotos analizados para el Arroyo Pando fue de 27 registros (período 1928–2002) y para el Arroyo Carrasco de 19 registros (período 1939-2008) (**Tabla 6.5**), obtenido de los archivos de la Intendencia de Montevideo (IdeM), Intendencia Municipal de Canelones (IMC), la Dirección Nacional de Medio Ambiente (DINAMA), Dirección Nacional de Hidrografía (DNH), Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea (SSRFAU), el Servicio Geográfico Militar (SGM), imágenes satélite de Google Earth, así como un recubrimiento aerofotogramétrico realizado para el estudio de la desembocadura del Arroyo Pando. Las imágenes obtenidas tienen diferente escala original, la mayoría son en blanco y negro y las más recientes en color. También fueron obtenidas algunas imágenes oblicuas que fueron usadas como referencia de la evolución del sistema.

Las series de fotos aéreas fueron escaneadas con una resolución de 1.200 dpi, y las imágenes de Google Earth fueron descargadas con la mejor resolución disponible. Para la geo-referenciación y el análisis fue usado ArcGIS 10[®]. Se utilizó la proyección UTM (Universal Transverse Mercator) Zona 21S y el datum WGS84.

La geo-referenciación de las imágenes para el Arroyo Carrasco, fue realizada usando una cartografía de detalle de la costanera que bordea las playas de Montevideo, realizada por el Departamento de Geomática de la IdeM. Esta carta fue realizada por ortorectificación y puntos de control con GPS diferencial con una precisión relativa decimétrica, lo que permitió minimizar el error en la geo-referenciación entre imágenes. Fue asumido por tanto, un margen de error en el entorno de $\pm 0.50\text{m}$ en la geo-referenciación relativa entre imágenes. En el Arroyo Pando se utilizó como base la cartografía del SGM, para la geo-referenciación de las imágenes, y para minimizar errores entre imágenes se comenzó por la de 1987 que fue usada como la base de la cartografía, a partir de la cual, se buscaron puntos de referencia con la foto inmediata anterior. La secuencia de referenciación se hizo tomando siempre la imagen

Tabla 6.5. Metadatos de la cartografía y sensores remotos obtenidos para la desembocadura del Arroyo Pando.

Fecha	Fuente	Escala	Pando	Carrasco
1937, mayo19	SSRFAU	--		
1939	IdeM	1/5.000		
1943, marzo14	SGM	1/40.000		
1945, enero	IdeM	1/10.000		
1951, octubre22	SSRFAU	1/20.000		
1954, mayo 14	IdeM	1/15.000		
1954, mayo 17	IdeM	1/30.000		
1960, octubre25	SSRFAU	1/20.000		
1961, abril 10	IdeM	1/15.000		
1961, diciembre 21	IdeM	1/15.000		
1964, setiembre14	SSRFAU	1/20.000		
1966, enero27	SGM	1/20.000		
1966, diciembre 26	SGM	1/20.000		
1967, junio 13	SGM	1/40.000		
1970, diciembre 07	IdeM	1/10.000		
1971, enero 26	SSRFAU	1/10.000		
1971, agosto 26	SSRFAU	1/10.000		
1973, octubre 27	IdeM	1/10.000		
1975, enero 21	SSRFAU	1/20.000		
1976, febrero 06	SSRFAU	1/10.000		
1976, junio 17	SSRFAU	1/20.000		
1977, mayo 13	SSRFAU	1/20.000		
1978, abril 26	SSRFAU	1/20.000		
1979, marzo 29	IdeM	1/10.000		
1980, enero 12	SSRFAU	1/50.000		
1980, mayo 25	SSRFAU	1/20.000		
1982, febrero 13	SSRFAU	1/20.000		
1984, diciembre 4	SSRFAU	1/10.000		
1985, diciembre	IdeM	1/10.000		
1987, marzo	SGM	1/40.000		
1990, junio 2	SPOT XS	pixel 25 m		
1991, mayo	IdeM	1/5.000		
1994, mayo-junio	DINAMA	1/5.000		
1995, octubre 23	SSRFAU	1/10.000		
1996, enero 22	SSRFAU	1/5.000		
1996, junio	IdeM	1/40.000		
1997, abril	DINAMA	1/5.000		
1998, diciembre 1	CCG	pixel 0.75 m		
1999, noviembre 16	SSRFAU	1/20.000		
2000, abril 25	SSRFAU	1/10.000		
2003, octubre 23	IdeM	1/10.000		
2000, noviembre 24	SSRFAU	1/20.000		

Continuación Tabla 6.5.

Fecha	Fuente	Escala	Pando	Carrasco
2001, enero 21	SSRFAU	s/d		
2001, noviembre 21	SSRFAU	1/25.000		
2002, marzo	DINAMA	s/d		
2002, mayo	Pyke y Cia	pixel 0.20 m		
2004, mayo	IdeM	s/d		
2006, septiembre 6	Google Earth			
2006, noviembre 12	IMC	s/d		
2007, septiembre 29	IdeM	s/d		
2008, abril 30	Google Earth	1/10.000		

Abreviaturas: CCG: Comisión de Cambio Global, DINAMA: Dirección Nacional de Medio Ambiente, IdeM: Intendencia de Montevideo, IMC: Intendencia Municipal de Canelones, SSRFAU: Servicio de Sensores Remotos Aeroespaciales de la Fuerza Aérea, SGM: Servicio Geográfico Militar.

más próxima en el tiempo, lo cual se repite hacia el presente (Gutiérrez y Panario, 2005). Con esta metodología se logró referenciar toda la serie de imágenes sobre la misma base cartográfica, minimizando de este modo las deformaciones y errores en términos comparativos entre las mismas. En todos los casos, un error relativo promedio de $\pm 3m$ máximo fue asumido para el proceso de geo-referenciación relativa entre imágenes.

Fueron incorporados mapas del Siglo XVIII y el XX para colaborar a la interpretación de los procesos geomorfológicos de largo plazo. Fue recabada la historia de las intervenciones antrópicas significativas en ambas cuencas a partir de informantes calificados y documentación de época.

Para estandarizar los procesos de digitalización de las líneas de costa, fue realizada a escala 1:3.000, como fue propuesto por Armaroli et al. (2006), Ciavola et al. (2003), Gutiérrez y Panario (2005) y Gutiérrez et al. (2015) Fueron seleccionados como indicadores de la posición de la línea de costa aquellos *proxies* que podrían ser identificados a lo largo de toda la serie de imágenes. Ellos fueron:

Arroyo Pando: **línea de marea alta previa - LMAP** (*previous high tide high - water level* - PHTH-WL, Boak y Turner, 2005) el que es usado porque diferencias relativamente grandes entre mareas produce un error mínimo en la traslación cartográfica horizontal de la línea de costa. Esto se explica porque la línea por encima de la marea alta es la que está ubicada en una zona de mayor pendiente en el perfil transversal de la costa (Gutiérrez et al., 2015).

Arroyo Carrasco: **línea seca/húmeda** o **zona actual de alcance de la ola - LSH-ZAIO** (*wet/dry line or runup maxima* -WDL-RM, Boak y Turner, 2005). Esta línea indica el límite erosivo – constructivo del máximo alcance de la ola, el que es fácilmente identificable por diferencias de tonos en las fotos aéreas. Este indicador es identificado en la propia playa, por un cambio en la forma de perfil cóncavo a perfil convexo, con un quiebre claro en el ángulo de la pendiente.

Fueron usados polígonos para representar las variaciones de las playas como fue propuesto por Gutiérrez y Panario (2005) y Gutiérrez et al. (2015) para disminuir la incertidumbre asociada al método de cálculo por transectas, particularmente en desembocaduras debido a las migraciones de su barra.

Para medir los avances - retrocesos de las **líneas de costa** de ambas desembocaduras, se optó por usar un artefacto para determinar las pérdidas y ganancias entre una posición de la línea de costa considerada como año base y los polígonos que la excedían o le restaban área por retroceso en relación a dicho año. A esos efectos, sobre la línea de costa más reciente, fueron dibujadas dos transectos perpendiculares, una sobre cada playa, que fungieran como límite externo, para entre ellas medir la evolución histórica de la costa, intersectando entre los dos transectos perpendiculares, cada una de las líneas de costa generadas, a efectos de analizar la superficie ganada o pérdida respecto al presente (**Figura 6.27**). La ubicación de los transectos delimita el área con indicios de modificaciones sustantivas durante el período analizado. A los efectos de determinar tendencias los resultados fueron graficados como una función acumulativa de ganancias-pérdidas entre períodos.

Fueron analizados los aportes de arena eólica al cauce del arroyo usando el modelo de Fryberger (1979) ajustado para las condiciones locales por Panario and Piñeiro (1997), relacionando la longitud de la zona de contacto entre dunas y el cauce, con el caudal anual de arena por metro lineal. Para estimar los volúmenes aportados en ese frente, se realizaron los cálculos a partir de la ecuación de Fryberger (1979) ajustada por Panario and Piñeiro (1997) a las condiciones locales a partir de datos de vientos (ver **Figura 6.26**) de las estaciones meteorológicas de Carrasco del Instituto Nacional de Meteorología (INuMet) y Punta Brava del Servicio de Oceanografía, Hidrografía y Meteorología de la Armada (SOHMA).

$$UV = [V^2(V-V_t)]/100 \times t$$

UV = unidades vectoriales,

V = velocidad del viento,

V_t = umbral de velocidad requerido para comenzar a mover arena

t = número de mediciones en un tiempo dado.

Las unidades vectoriales son convertidas a $m^3 m^{-1} año^{-1}$ con la relación propuesta por Fryberger et al. (1984) donde 14 UV son equivalentes a $1 m^3 m^{-1} año^{-1}$.

A su vez, fueron analizados los aportes de arena desde la cuenca, estimados a partir de datos obtenidos en embalses en cuencas de similares características en la zona, como es la del Canelón Grande (MTOPI/PNUD/UNESCO, 1979) y ajustados por el tamaño de la cuenca, el caudal en m^3/s y el porcentaje de carga de fondo del total de sedimentos producidos.

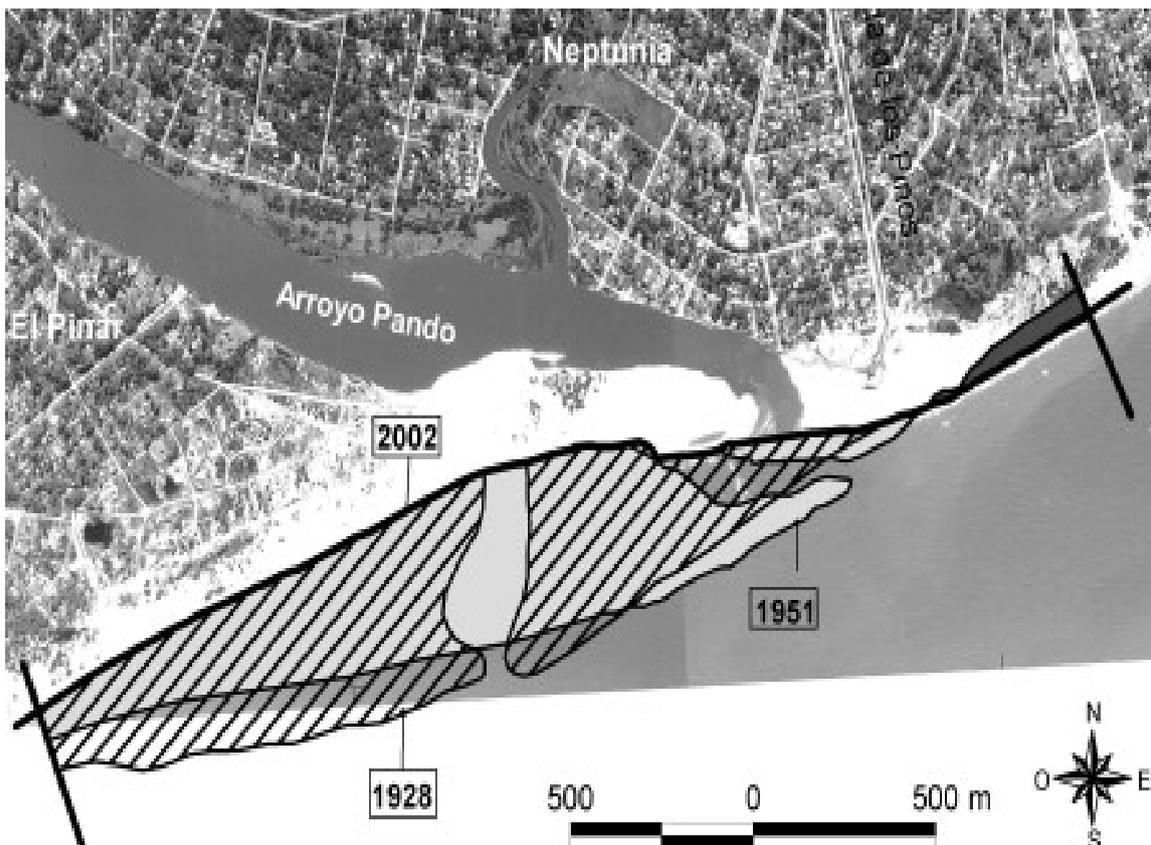


Figura 6.27. La línea negra gruesa señala la línea de base de mayo de 2002 con los dos transectos perpendiculares utilizados como artefacto para estimar las fluctuaciones, al intersecar con cada línea de costa. El área rayada muestra la posición de la desembocadura del Aº Pando para el año 1928. Por debajo, en color sólido gris claro se presenta el área que para el año 1951 se encontraba situada por delante de la línea de costa actual, y sobre la playa de Neptunia en color gris oscuro se indica la zona que para 1951 se posicionaba por detrás. Aerofotografía: mayo del 2002, Pyke & Cia. S.A.

Fue realizado un muestreo de los sedimentos de fondo del tramo inferior del Arroyo Pando, los que fueron analizados por tamizado y Método Internacional de la Pipeta (Laboratorio de Dirección de Suelos del MGAP).

El caudal de arena circulante por deriva fue estimado a partir de información del MTOP/PNUD/UNESCO (1979) sobre volumen de arena captado por los espigones a montante de la deriva inmediatamente después de su construcción.

Se realizaron además transeptos, a los efectos de determinar el volumen del prisma de playa para determinar los volúmenes de pérdida de arena en el período analizado y la relación de estas pérdidas con la fijación del campo dunar por forestación y urbanización.

Univariate statistical analysis was developed for data input range of the data sets obtained for each study site. The selected statistical indicators were: central tendency and data dispersion: mean, median, mode, standard deviation, variance, coefficient of variation and R^2 .

6.4.5 Resultados y discusión

6.4.5.1 Desembocadura del Arroyo Pando

Las playas *El Pinar* y *Neptunia* ubicadas al W y E respectivamente de la desembocadura del Arroyo Pando son ambientes micromareales caracterizables como disipativas, evolucionando de disipativa a intermedia en El Pinar al alejarse de la desembocadura. En su condición original, esta franja costera estaba asociada mayoritariamente a ambientes de dunas activas o con cobertura de vegetación rala.

En la cartografía de 1789 (**Figura 6.28**) se observa una laguna ubicada en la desembocadura del Arroyo Pando, presentando por esa fecha su barra cerrada (National Maritime Museum, 1789), propio de las condiciones climáticas de esa época ("*Pequeña Edad del Hielo*" de 1550-1850). Los delgados sedimentos de dicha laguna son observables hoy por debajo de una cobertura de espesor variable de arenas eólicas, indicando una breve permanencia de la misma. Esta carta es la primera referencia sobre el hecho, aunque por tradición oral se ha mantenido memoria del evento. El Arroyo Pando, hasta comienzos de la década de 1920, desembocaba en un humedal conformado por la colmatación de otra laguna de mayor dimensión, situada aguas arriba de la anterior (presumiblemente de edad holocénica), que en esa época desaguaba en el RdIP a través de un canal (llamado Pando del Plata). Entre 1912 y 1920, el humedal fue canalizado y el arroyo represado por detrás del mismo, para

mantener la altura del pelo de agua. Esta pequeña obra de infraestructura no presenta evidencia de haber retenido sedimentos, como lo hacía el humedal previo a su canalización.

Esta intervención generó un cambio significativo en la hidrología del canal, al perder el poder regulador de un humedal de 900 hectáreas. Su desembocadura, entre pulsaciones de crecidas producidas por precipitaciones torrenciales, pasó a ser dominada por la deriva litoral. La carta del Servicio Geográfico Militar (1923) registra los bañados y las obras de canalización realizadas (**Figura 6.29**).

- Caracterización física

La granulometría de las playas de El Pinar y Neptunia es similares, con arena fina a media, proveniente de la deriva del E. La misma es recirculada parcialmente en la desembocadura del Arroyo Pando entre las dunas del arroyo y la playa, como se analizará más adelante. En el tramo de playa de El Pinar la arena es ligeramente más gruesa hacia la berma que en la playa baja, en tanto en Neptunia la granulometría no varía sustancialmente por su posición.



Figura 6.28. Carta levantada en el año 1789. El círculo amarillo señala la ubicación de una laguna en la desembocadura del Arroyo Pando, y la barra cerrada. Fuente: National Maritime Museum (1789).



Figura 6.29. En esta cartografía antigua, puede observarse la canalización realizada para desecar los bañados del Arroyo Pando (flecha roja), y la orientación de la desembocadura en el año 1920 (fecha del relevamiento). Fuente: Servicio Geográfico Militar (1923).

La orientación de la playa de Neptunia ha variado con el tiempo al retroceder el tramo de la desembocadura del Arroyo Pando, mientras que para el año 1928 las direcciones normales a las tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura eran N9,2°W y N27,3°W respectivamente; para el año 1960 las direcciones normales a las tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura eran N14,5°W y N31,2°W respectivamente. En la actualidad es de N17,3°W lo que implica que las olas de mar de fondo lleguen en ese tramo casi paralelas a la costa. En el tramo de playa de El Pinar la orientación varía a N24°W generando un mayor ángulo de incidencia del *swell*, lo que implica una aceleración del tránsito de sedimentos en dirección W, no obstante esto, la barra de la desembocadura del Arroyo Pando y de otras vías de drenaje presentes en el mismo arco, como el Arroyo Carrasco, tienen un sentido E. La pérdida de regularidad del flujo del arroyo trajo aparejado que comenzaron a formarse en la desembocadura dos barras arenosas con direcciones opuestas, respondiendo a direcciones también contrarias de la deriva que se producen con diferentes alturas de mar sobre el nivel medio, dado que la altura del nivel del mar difiere según la dirección del viento. Cuando la deriva es hacia el Este, respondiendo a los vientos moderados a fuertes del S o SW, la barra se proyecta a partir de la margen W, avanzando en dirección E, con un perfil transversal de mayor pendiente y conformando una playa más angosta y de

mayor altura, formándose una berma alta que empuja a la vía de drenaje contra la costa. Luego la deriva se invierte a partir de la acción del *swell* con menor energía de ola y se reconstruye una segunda barra desde la margen E, en dirección W, por delante de la anterior, de menor altura y pendiente, obligando al arroyo a generar un meandro en la propia playa (**Figura 6.30**).



Figura 6.30. Vista panorámica de la desembocadura del Arroyo Pando de fecha 19 de mayo de 1937. Fuente: Servicio de Sensores Remotos de las Fuerzas Aérea de Uruguay (SSRFAU).

- *Evolución reciente de la desembocadura del Arroyo Pando y su dinámica*

Para 1930, Legrand (1959) describe la existencia en la margen izquierda del Arroyo Pando de dos importantes sistemas dunares (ver **Figura 6.30**). En El Pinar este campo de dunas tenía un frente transgresivo de varios kilómetros de longitud que se dirigía tierra adentro, avanzando paralelo al arroyo. La forestación de El Pinar interrumpió el flujo de arena de este frente transgresivo limitando el aporte de arena eólica a los cordones dunares, con excepción de unos pocos lóbulos (*blowout*).

En las fotos aéreas de 1943 se observa el inicio de la forestación con la implantación de cercos de acacias (especie exótica invasora) con el fin de posteriormente implantar árboles del género *Pinus* en los sistemas dunares de El Pinar. Esta forestación se torna notoria en la zona de estudio a partir de la década de 1950 y se la observa masivamente implantada en las imágenes en la década de 1960, en la cual también la urbanización se ha consolidado.

En la década de 1940 comenzó también la forestación con eucaliptos y pinos en Neptunia, la cual fue realizada incluso sobre el propio cordón dunar. Los árboles de alto porte, dado que producen un reparo a barlovento, promovieron la formación de

nuevos cordones por delante, generando entonces un nuevo espacio, que también fue forestado. Este proceso redundó en que se programara urbanizar lo que antes era playa (**Figura 6.31**). Durante las tormentas, al alcanzar las olas un cordón forestado, las raíces de los árboles mantienen la verticalidad del corte producido en la duna y con ello provocan un cambio en la dinámica, el cual se manifiesta por un retroceso acelerado del cordón, vinculado a la friabilidad de las arenas del sustrato (la duna). Esto facilita el traslado de la barra hacia el continente, afectando rápidamente la zona con urbanización proyectada.

Ante la constatación de que se estaba produciendo a montante de la deriva una severa erosión de la playa en una urbanización consolidada ubicado al E (Atlántida), fue impulsada por el Ministerio de Transporte y Obras Públicas (MTO), la construcción de espigones a partir del año 1970, la que continuó hasta comienzos de la década de 1980. Sin embargo, estas obras contribuyeron a acelerar el proceso erosivo. A partir del penúltimo espigón construido y por efecto de las pérdidas de arena que generan las corrientes de retorno que ellos producen, una barranca sedimentaria de 7 metros de altura (de origen cuaternario, ubicado a continuación del penúltimo espigón) tuvo

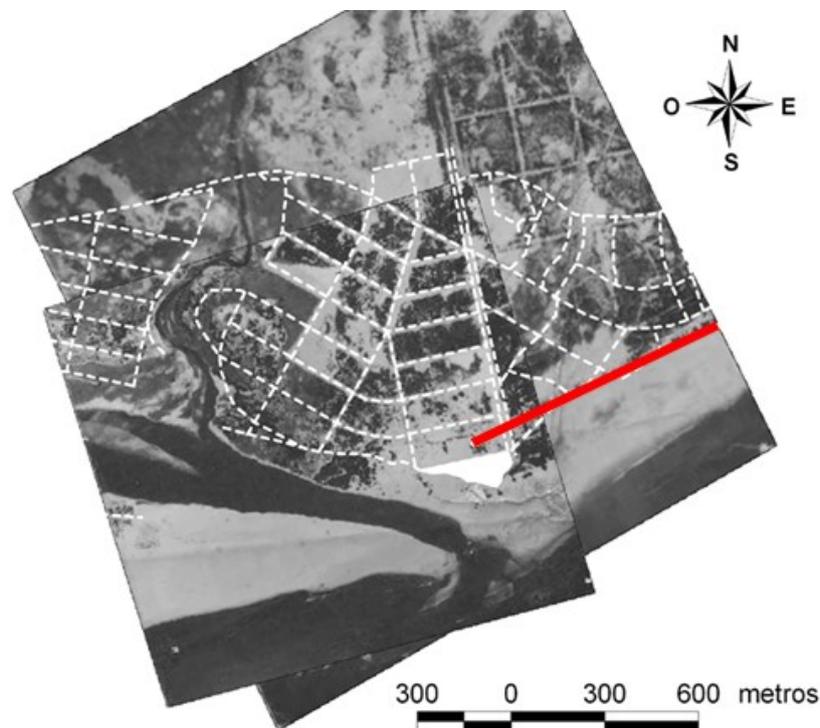


Figura 6.31. Por encima de la foto del 22 de octubre de 1951 (escala 1:20.000), en la que puede observarse la ubicación original del cordón dunar (señalado en trazo grueso rojo), se despliega la foto del 25 de octubre de 1960 (escala 1:20.000), en la que se había forestado en la propia playa. En línea punteada blanca se indica la urbanización realizada; la manzana más próxima al mar (en blanco) ya ha desaparecido, así como parte de la calle de la manzana siguiente y la costanera del arroyo. Fuente: aerofotografías, SSRFAU.

un retroceso de más de 11 metros entre 1985 y el 2003 (Gutiérrez y Panario, 2006, 2005).

Estos espigones fueron construidos ante la constatación de una fuerte erosión costera en Atlántida. Esta urbanización está ubicada sobre un cabo que era permeable al tránsito de arena entre sus dos arcos de playa, por tierra hacia el E a partir de un campo de dunas móviles y por el mar hacia el W. La forestación del mismo, consolidada en la década de 1940, interrumpió la alimentación de la playa ubicada al E denominada “Brava”, ubicada a montante de la deriva, generando a su vez un fuerte déficit de arena en el arco de playa que se iniciaba a partir del W de dicho cabo.

A comienzos de la década de 1990, se autorizó la extracción de arena de las dunas ubicadas en la propia barra ubicada al E de la desembocadura, la cual se realizó en algunos sitios hasta tal profundidad que en superficie asomaba la napa freática. A partir del año 1995, comienza un fuerte retroceso de la playa.

Los análisis tendenciales de la desembocadura del Arroyo Pando para el período 1928-2002 realizados con el proxy **línea de marea alta previa (LMAP)**, denotan que el área de playa en el sector analizado, disminuyó 683.357m² para una línea de costa de 3.220 m que representa 9.234 m²/año, lo que se acerca al valor teórico de superficie anual perdida de 8.069 m²/año calculado por regresión con una tendencia altamente significativa (p <0,0001) (**Figura 6.32**), lo que origina un impacto importante por pérdida de territorio, sobre todo en la playa de Neptunia (ubicado hacia el E).

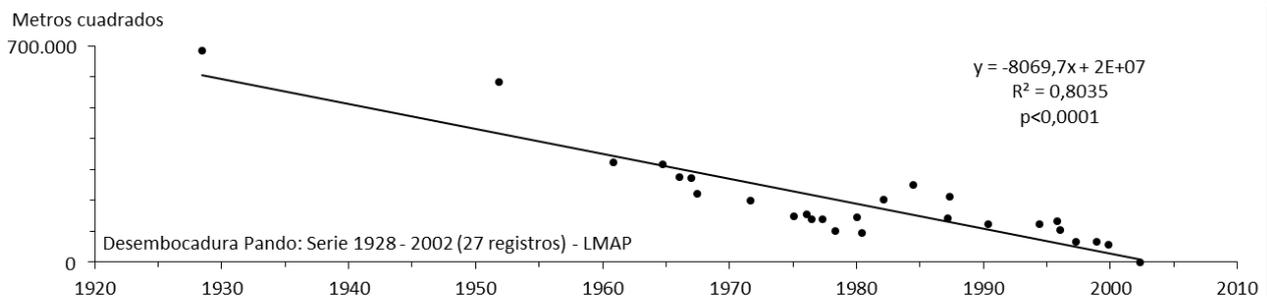


Figura 6.32. Evolución histórica del retroceso de la línea de costa, entre el año 1928 y mayo del 2002, confeccionado a partir de todos los registros obtenidos para esta desembocadura (27 registros), realizado usando como proxy **línea de marea alta previa (LMAP)**, siendo la pérdida de territorio en este caso altamente significativa con una p < 0,0001.

De la comparación de las imágenes y cartografía existente desde 1928 al presente, puede apreciarse un retroceso de 480m de la línea de costa de la playa de El Pinar para el período en estudio, tal como señalaran Gutiérrez y Panario (2005); aunque este

retroceso se hace notorio y persistente a partir de 1950. Sin embargo, la orientación del tramo inferior del Pando que entre 1928 y 1936 era N-S, ya en 1943 se había comenzado a desplazar contrariamente a lo que era dable esperar, hacia el Este, en dirección contraria a la deriva litoral predominante, la que según Panario and Gutiérrez (2006) tiene una dirección predominante E-W desde Cabo Polonio hasta la Ciudad de Colonia.

- *Balance sedimentario*

La cuenca del Pando tiene una superficie de 973 Km² se puede asumir que realiza un aporte de 240 Toneladas/Km²/año de sedimentos (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979). Si bien del trabajo de Syvitski et al. (2005), se desprende que el promedio mundial de sedimentos arenosos aportados desde las cuencas puede ser estimado en el 1,1 % del total de sedimentos que llegan a las mismas; para los grandes ríos uruguayos este volumen ha sido estimado en el orden del 2 % (Urien, 1967) y para las vías de drenaje más pequeñas de Uruguay, ha sido estimado que puede alcanzar del orden del 2,5 al 10 % (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979). Por tanto, de ese volumen total de sedimentos de tamaño arena aportados desde la cuenca, considerando que el Pando tiene un pequeño dique emplazado donde comenzaba el humedal, se consideró parsimonioso utilizar el valor menor. El tamaño medio de la cuenca del Arroyo Pando y sus características (relieve ondulado, suelos profundos, uso agrícola ganadero), refuerzan el asumir un valor en el orden del 3 %, valor ligeramente superior al medido en la Cuenca del Canelón Grande, por tratarse esta de una cuenca de mayor área.

Del total de arena aportada por esta cuenca (3 %), se determinó a partir del análisis de los sedimentos de fondo el 5,6 % (**Tabla 6.6**) era arena de diámetro mayor a muy fina y su densidad aparente era 1,6, a partir de lo cual se deduce que el aporte por esta vía tendría un rango en el entorno de 245 m³/año.

Tabla 6.6. Análisis de los sedimentos del fondo del canal del Arroyo Pando. El recuadro en turquesa señala los porcentajes de arena de diámetro mayor a muy fina.

Arena (mm)	%	Limo (μ)	%	Totales	%
2,0 - 1-0	--	50 - 20	5,6	Arena total	62,8
1,0 - 0,5	0,4	20 - 2	6,1	Limo total	11,7
0,5 - 0,25	5,2			Arcilla > 2 μ	25,5
0,25 - 0,1	47,0			Clase Textural	FACAr
0,1 - 0,05	10,2				

% en peso de las diferentes fracciones

A los efectos de determinar la importancia de la contribución del sistema dunar en contacto directo con el cauce del Arroyo Pando, primero se determinó la longitud de este contacto, a partir de fotointerpretación, dando un resultado de 3.100 metros lineales de contacto con el campo dunar.

El transporte potencial es provocado por vientos de intensidad fuerte (10 a 12 m/s) y muy fuertes (15 a 20 m/s) en forma bimodal, resultante del hecho de combinar el decaimiento exponencial de las frecuencias con el aumento potencial cúbico del peso, que el modelo atribuye a esos vientos poco frecuentes pero intensos. Similar bimodalidad ha sido observada en otras zonas del litoral atlántico como Cabo Polonio, La Paloma y Punta del Este, de ello se deduce que buena parte del transporte puede ser generado en el curso de unos pocos días al año (6 o 7) (Panario et al., 2008).

Utilizando el perfil de vientos de las estaciones meteorológicas del INuMet de Carrasco y Punta Brava (Piñeiro, 2010) situadas a menos de 30 Km de distancia, se seleccionaron los volúmenes transportados por aquellas direcciones que aportaban arena directamente al arroyo, siendo las mismas, S, SW, W y NW (**Tabla 6.7**), resultando en un transporte por metro lineal de contacto de 22 m³/año. Multiplicando el volumen transportado por los 3.100 m de contacto, se obtiene un aporte neto anual desde el sistema dunar de 68.200 m³. Para estimar el período desde el cual el sistema no contó más con ese aporte, fue analizado el proceso de forestación de la zona, dado que la fijación de las dunas por forestación fue comenzada por la década del año 1940, y para El Pinar se encontraban totalmente fijadas en 1960, fecha en que tuvo un fuerte impulso la urbanización que llegó hasta la

Tabla 6.7. Volúmenes transportados de arena según direcciones agrupadas de viento, calculado a partir de datos de las estaciones meteorológicas Carrasco (InuMet) y Punta Brava (SOHMA) (Piñeiro, 2010).

Rumbo	m ³ /m/año
N	2
NE	3
E	3
SE	4
S	7
SW	7
W	6
NW	2

margin del arroyo; por tanto se consideró que a partir de esta última fecha pasaron a ser negligibles los aportes eólicos en ese tramo. Tomando entonces para el cálculo los 42 años entre 1960 y el año 2002 (fecha de la imagen tomada como año cero para el cálculo), se obtuvo un volumen de 2.864.400 m³ de aporte total perdido por esta componente del ciclo sedimentario costero en la desembocadura del Arroyo Pando.

Dado que para ese mismo período (1960-2002) el retroceso de la playa efectivamente medido implicó una pérdida de 312.524 m². Considerando una altura del prisma de playa promedio de 3 metros (incluyendo berma y protodunas), se pueden estimar en unos 964.74 m³ de respuesta directa del sistema mediante retroceso de la línea de costa

Por lo tanto, si restamos 964.574 m³ a la cifra de aportes directos no efectuados por el sistema dunar, quedaría aun por explicar un faltante de aportes de 1.899.826 m³, que el sistema debe reponer de otras fuentes, o el retroceso de la línea de costa debería haber sido mayor, de no haber tenido un aporte adicional de 45.234 m³/año.

Para comprender porque no hubo un retroceso mayor de la línea de costa, visto el faltante anual estimado de 45.234 m³/año y para conocer las posibles fuentes de aportes compensatorios de arena al sistema, debe analizarse los otros componentes del ciclo de la arena:

1) Aportes desde las barrancas: No es de desestimar la posibilidad de un aumento del tránsito de la deriva litoral para esta zona, por los aportes del retroceso de la barranca costera de más de 11 metros por 7 de altura situada a montante de la deriva.

2) La intensa erosión de la margen E (Neptunia) debida a la migración del último tramo del Pando.

3) También puede considerarse el ingreso del *stock* que según Gutiérrez and Panario (2005) acumulado en forma de abanico subacuático frente a la desembocadura, mientras estuvieron activos los aportes del sistema dunar.

4) Aportes desde el mar: El caudal de arena en tránsito subacuático (valor resultante de la deriva litoral) fue medido para la zona en 70.000 m³/año (MTOPI/PNUD/UNESCO, 1979).

Esta última estimación de aportes desde el mar fue realizada por el MTOPI/PNUD/UNESCO (1979) a partir de medidas realizadas para el mismo arco de playa determinando la carga que retuvieron los espigones (ubicados a montante de la deriva) luego de su construcción. Este tránsito de sedimentos es el que justifica la existencia de sistemas dunares en la costa W de la desembocadura. De estos sedimentos en tránsito, se estima que en el entorno a 48.860 m³/año son sacados a la playa por el oleaje y luego retransportados por los vientos de direcciones E, SE y W, que son las direcciones a partir de las cuales se transporta arena hacia el vallado. Para

las condiciones del RIdP, no fue considerado el transporte de vientos del S y SW, porque la elevación del nivel del mar que producen impide el transporte de arena por viento en la playa. Este valor (48,860) fue verificado empíricamente, con la arena retenida por un vallado en la playa de Neptunia (1 setiembre de 2005 y 21 de enero de 2006).

Por tanto, si multiplicamos el aporte potencial transportado por la deriva y retomado por el viento de 48.860 m³/año por los 42 años del período en análisis, obtenemos una cifra de 2.052.120 m³, que resultan en un aporte superavitario de 152.294 m³ para el período, que significan 3.626 m³/año. Si bien puede considerarse un ajuste de excesiva precisión debe tenerse en cuenta que no toda la arena que transporta el viento queda en la playa, ni toda la arena que saca el mar es retomada por el viento.

6.4.5.2 Desembocadura del Arroyo Carrasco

Los terrenos que circundan ambas márgenes del arroyo eran descritos en la cartografía de 1920 del SGM como “terrenos arenosos” (**Figura 6.33**), y no como arenales o médanos como se denomina usualmente a las dunas móviles en este tipo de cartas. En las fotos aéreas previas a la urbanización tampoco se observan estructuras de dunas. Lo que permite asumir que no recibía en su cauce inferior arena transportada por el viento.

El denominado Arroyo Carrasco (Carrasco del Plata en la cartografía antigua) puede caracterizarse geomorfológicamente como un canal natural que desaguaba los bañados del mismo nombre. Estos bañados estaban conformados por la colmatación de una laguna presumiblemente holocénica que recibía las aguas de los Arroyos Toledo y Manga.

- Caracterización física

Las playas Carrasco (ubicada al W) y San José de Carrasco (E) de la desembocadura del Arroyo Carrasco son disipativas a intermedias; y forman parte del mismo arco que El Pinar y Neptunia (estando ubicadas a montante de la deriva y separadas por menos de 15 km), compartiendo la caracterización física. Están ubicadas al W y E Las direcciones normales a las tangentes de los tramos de playa ubicados adyacentes al W y E de la desembocadura son N26.3°W y N36°W respectivamente.

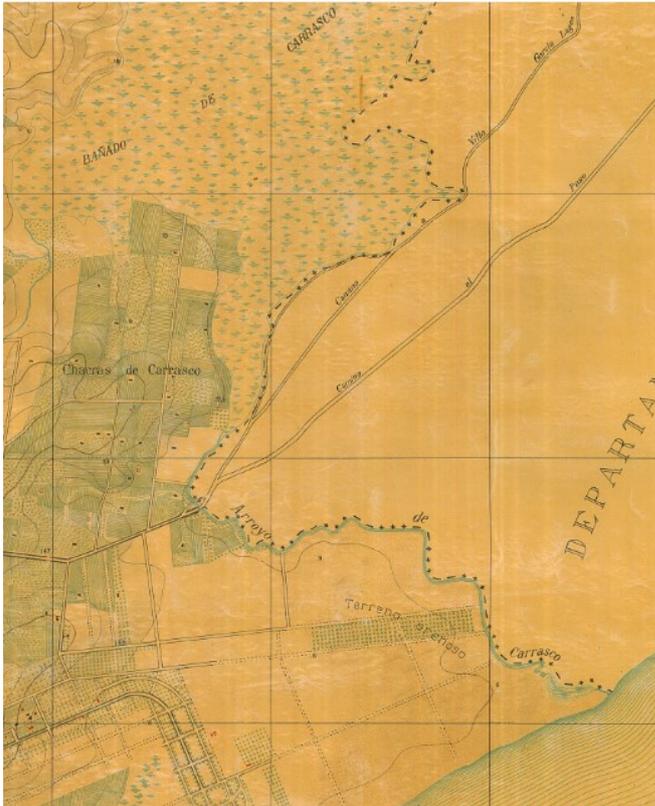


Figura 6.33. Carta de 1920, donde pueden observarse los humedales de Carrasco antes de las obras de desecación y la presencia de terrenos arenosos en ambos márgenes. Fuente: Mapoteca, SGM.

Como en el caso del Arroyo Pando los vientos fuertes del SE desplazan la barra hacia el E, en dirección contraria de la débil deriva litoral dominante, al generar una berma más alta y de dirección contraria al *swell*.

En el sector de la desembocadura del Arroyo Carrasco la playa está orientada al SE, por lo cual el oleaje más persistente del *swell* -al igual que en el Pando- incide casi normal a su costa produciendo un transporte litoral de sentido E-W de poca entidad.

- Evolución reciente de la desembocadura del Arroyo Carrasco y su dinámica

Si bien hacia 1970 el arroyo desembocaba perpendicular a la línea de costa, hasta esa fecha los registros lo muestran migrando en diferentes posiciones hacia el E y entre los años 1938 y 1945 se produjo un desplazamiento paralelo a la costa de 1.350 metros. En 1972, la Dirección de Hidrografía del MTOP construye una estructura en su desembocadura sobre la margen E, que interceptaba el curso y cortaba la barra, abriendo una salida directa, ubicándola nuevamente perpendicular a la playa, en un intento infructuoso de evitar sus migraciones (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979). Hacia el 2000 el arroyo vuelve a migrar hacia el E, quedando ubicado el resto del muro de contención dentro de la barra de la margen W.

Para su análisis se toma como fecha inicial el año 1939, correspondiente al primer registro fotográfico de la desembocadura del Arroyo Carrasco. Los análisis tendenciales de la desembocadura del Arroyo Carrasco fueron realizados con una serie de 19 imágenes (período 1939-2008) las que denotan que la evolución del área de playa tiende a crecer 202 m²/año con una tendencia significativa al 85% (**Figura 6.34**), usando el *proxy* **línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola - LSH-ZAIO**

(Gutiérrez et al., 2015). Del análisis de la serie multitemporal obtenida para la desembocadura del Arroyo Carrasco, puede observarse que si bien existe una tendencia al crecimiento del área de playa, en la gráfica se expresan claramente las fluctuaciones de la ubicación de la línea de costa respecto al año tomado como cero.

La evolución del sector de playa asociado a la desembocadura ha fluctuado con el patrón característico de las playas de Montevideo situadas a corta distancia hacia el W (Gutiérrez et al., 2015), sin embargo se diferencia de éstas en que hasta 1970 las fluctuaciones muestran una cierta preeminencia hacia la pérdida de playa, que luego se revierte, presumiblemente según el informe del MTOP/PNUD/UNESCO (1979) al comenzar a recibir volúmenes significativos de sedimentos como consecuencia de las obras de canalización realizadas en esa época.

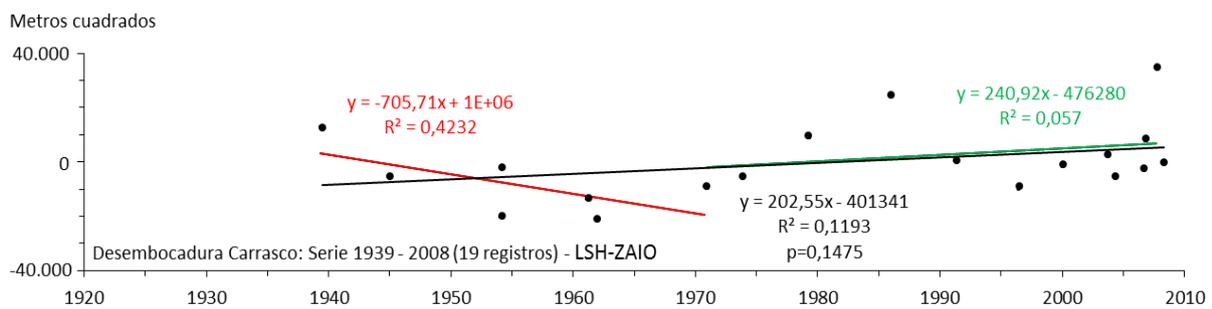


Figura 6.34. Evolución histórica del avance-retroceso de la línea de costa período 1939-2008 (19 registros), realizado usando como proxy la línea seca/húmeda o zona actual de infiltración de la ola (LSH-ZAIO). Para toda la serie de fotos, la línea de tendencia por regresión lineal indica un leve incremento de la superficie de playa, significativo estadísticamente (85%), si la tendencia se realiza para el período 1939-1970 la misma tiene una tendencia a la pérdida (línea roja), en cambio si se realiza para el periodo 1970-2008, tiene una tendencia a incrementarse (línea verde) con una pendiente ligeramente más acentuada que la tendencia cuando se considera todo el período.

Si bien fue realizada una primera canalización para la desecación del Arroyo Carrasco en la década de 1940 que fracasó en el año 1973 fueron retomadas las obras, realizando un canal más ancho y profundo que alcanzó un nivel de arenas holocénicas, las que pasaron a ser transportados hacia la desembocadura, lo que claramente se manifiesta en el cambio de tendencia observable para el periodo 1970-2008, en que tiende a crecer 240 m²/año (ver **Figura 6.34**). En el caso de las playas aledañas a esta desembocadura queda claro que con anterioridad a la década de 1970 se había producido un retroceso de la superficie de playa.

- Balance sedimentario

La cuenca del Carrasco tiene una superficie de 205 Km², e igual que para el Arroyo Pando se puede asumir un aporte de 240 Toneladas/Km²/año de sedimentos (MTOPI/PNUD/UNESCO, 1979). Al igual que para la cuenca del Pando, se asume que el promedio mundial de sedimentos arenosos aportados desde las cuencas puede ser estimado en un valor en el orden del 3 %.

Del total de arena aportada por esta cuenca (3 %), se estimó que igual que para la Cuenca del Arroyo Pando el 5,6 % de ese valor (ver **Tabla 6.6**) era arena de diámetro mayor a muy fina y su densidad aparente era 1,6 a partir de lo cual se deduce que el aporte por esta vía tendría un valor de 51 m³/año.

Debe tenerse en consideración que previo a la canalización del humedal los aportes debieran haber sido negligibles dado que el total de los sedimentos arenosos se depositaban al ingreso de la cuenca en el humedal.

A partir de 1973, cuando la canalización del arroyo permite que el mismo transporte los sedimentos del fondo y márgenes del canal, pasa a aportar de esta nueva fuente un estimado de 189 m³/año.

Los aportes eólicos se recirculan totalmente entre la barra y el mar y para este tramo del arco de playa los aportes desde el mar se pueden considerar constantes para el período al no haberse constatado erosión a montante de la deriva en el tramo en estudio.

6.4.7 Conclusiones

Las intervenciones antrópicas suelen manifestarse en el sistema costero con retardos variables lo que dificulta establecer relaciones causales claras.

Se pone de manifiesto la importancia de la interacción entre campos de dunas y vías de drenaje en la costa uruguaya, a partir que los aportes de sedimentos arenosos desde estos son de más dos órdenes de magnitud respecto a los provenientes de las cuencas.

La forestación de dunas móviles en la costa uruguaya ha significado una de las principales causas de disminución de los volúmenes de arena circulantes en la costa del Río de la Plata, colaborando en aumentar los procesos de erosión de playas.

Otras intervenciones como la desecación de humedales, si bien tiene efectos ambientales indeseables, en los casos de estudio, en particular en el Arroyo Carrasco, han colaborado en reducir la erosión costera.

En el caso del Arroyo Pando (y presumiblemente en otros arroyos de similares características, sistemas dunares activos), los altos volúmenes de transporte eólico permiten inferir que con tareas de reconstrucción de dunas que impidan el escape de arena hacia el continente o su retorno al mar por *downwelling* se podrían reducir los procesos de erosión en curso.

Las políticas de manejo de playas han de conciliar intereses muchas veces antagónicos, por ello creemos que es una herramienta de particular importancia en el ordenamiento territorial de zonas costeras, el realizar un balance sedimentario tan preciso como sea posible, para realizar urbanizaciones, parqueización de dunas, puertos, los que podrían generar erosión costera severa, al interrumpir el tránsito y con ello disminuir el stock activo de arena costera en circulación.

Agradecimientos

Al Coronel Av. (R) Antonio Ruik (*Pyke & Cia S.A.*) por el relevamiento aerofotográfico de mayo del 2002.

Referencias

- Armaroli, C., Ciavola, P., Balouin, Y., Gatti, M., 2006. An Integrated Study of Shoreline Variability Using GIS and ARGUS Techniques. *Journal of Coastal Research* (ISSN: 0749-0208) SI 39, 473-477.
- Bidegain, M., Caffera, R.M., Blixen, F., Pshennikov, V.A., Lagomarsino, J.J., Forbes, E.A., Nagy, G.J., 2005. Tendencias climáticas, hidrológicas, y oceanográficas en el Río de la Plata y Costa Uruguaya, en: Barros, V., Menéndez, Á., Nagy, G. (Eds.), *El Cambio Climático en el Río de la Plata*. Centro de Investigaciones del Mar y la Atmósfera - CIMA/CONICET, Buenos Aires, Argentina, pp. 137-143.
- Boak, E.H., Turner, I.L., 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research* 21, 688-703. doi:10.2112/03-0071.1
- Bracco, R., del Puerto, L., Inda, H., Panario, D., Castiñeira, C., García-Rodríguez, F., 2011. The relationship between emergence of mound builders in SE Uruguay and climate change inferred from opal phytolith records. *Quaternary International* 245, 62-73. doi:10.1016/j.quaint.2010.05.025
- Bracco, R., Inda, H., del Puerto, L., Capdepon, I., Panario, D., Castiñeira, C., García-Rodríguez, F., 2014. A reply to «Relative sea level during the Holocene in Uruguay». *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology* 401, 166-170. doi:10.1016/j.palaeo.2013.10.012
- Carter, R.W.G., Bartlett, D.J., 1990. Coastal Erosion in Northeast Ireland—Part I: Sand beaches, dunes and river mouths. *Irish Geography* 23, 1-16. doi:10.1080/00750779009478762
- Chorley, R.J., Kennedy, B.A., 1971. *Physical geography: a systems approach*. Prentice-Hall, London, United Kingdom.
- Ciavola, P., Corbau, C., Cibin, U., Perini, L., 2003. Mapping of the coastal zone of the Emilia-Romagna region using geographical information systems, en: Ozhan, E. (Ed.), *Proceedings of The Sixth International Conference on the Mediterranean Coastal Environment (MEDCOAST), Volume III*. MEDCOAST, Ravenna, Italy, pp. 2363-2374.
- Clayton, K.M., 1980. Beach sediment budgets and coastal modification. *Progress in Physical Geography* 4, 471-486. doi:10.1177/030913338000400401
- Correa, I.D., Ferreira, Ó., Alcántara-Carrió, J., 2009. Introducción a los riesgos geológicos litorales, en: Alcántara-Carrió, J., Correa Arango, I.D., Isla Mendy, F.I., Alvarado Ortega, M., Klein, A.H.F., Cabrera Hernández, A., Sandoval Barkow, R. (Eds.), *Métodos en Teledetección Aplicada a la Prevención de Riesgos Naturales en el Litoral*. Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo,

pp. 9-27.

Crossland, C.J., Baird, D., Ducrotoy, J.-P., Lindeboom, H., Buddemeier, R.W., Dennison, W.C., Maxwell, B.A., Smith, S. V., Swaney, D.P., 2005. The coastal zone - a domain of global interactions, en: Crossland, C.J., Kremer, H.H., Lindeboom, H., Crossland, J.I.M., Tissier, M.D.A. Le (Eds.), *Coastal Fluxes in the Anthropocene: The Land-Ocean Interactions in the Coastal Zone Project of the International Geosphere-Biosphere Programme*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, pp. 1-37. doi:10.1007/3-540-27851-6_1

De Lillis, M., Costanzo, L., Bianco, P.M., Tinelli, A., 2004. Sustainability of sand dune restoration along the coast of the Tyrrhenian sea. *Journal of Coastal Conservation* 10, 93-100. doi:10.1652/1400-0350(2004)010[0093:SOSDRA]2.0.CO;2

del Puerto, L., Bracco, R., Inda, H., Gutiérrez, O., Panario, D., García-Rodríguez, F., 2013. Assessing links between late Holocene climate change and paleolimnological development of Peña Lagoon using opal phytoliths, physical, and geochemical proxies. *Quaternary International* 287, 89-100. doi:10.1016/j.quaint.2011.11.026

FitzGerald, D.M., Buynevich, I.V., Fenster, M.S., McKinlay, P.A., 2000. Sand dynamics at the mouth of a rock-bound, tide-dominated estuary. *Sedimentary Geology* 131, 25-49. doi:10.1016/S0037-0738(99)00124-4

French, J.R., Burningham, H., 2011. Coastal geomorphology. *Progress in Physical Geography* 35, 535-545. doi:10.1177/0309133311414606

Fryberger, S.G., 1979. Dune forms and wind regime, en: McKee, E.D. (Ed.), *A study of global sand seas*. Geological Survey Professional Paper 1052. United States Government Printing Office, Washington DC, U.S.A., pp. 137-169.

Fryberger, S.G., Al-Sari, A.M., Clisham, T.J., Rizvi, S.A.R., Al-Hinai, K.G., 1984. Wind sedimentation in the Jafurah sand sea, Saudi Arabia. *Sedimentology* 31, 413-431. doi:10.1111/j.1365-3091.1984.tb00869.x

Gelfenbaum, G., Buijsman, M., Sherwood, C.R., Moritz, H.R., Gibbs, A.E., 2001. Coastal Evolution and Sediment Budget at the Mouth of the Columbia River, USA, en: Hanson, H., Larson, M. (Eds.), *Coastal Dynamics '01*. Fourth Conference on Coastal Dynamics. American Society of Civil Engineers, Lund, Sweden, pp. 818-827. doi:10.1061/40566(260)84

Gelfenbaum, G., Sherwood, C.R., Peterson, C.D., Kaminsky, G.M., Buijsman, M., Twichell, D.C., Ruggiero, P., Gibbs, A.E., Reed, C., 1999. The Columbia River Littoral Cell: A Sediment Budget Overview, en: Kraus, N.C., McDougal, W.G. (Eds.), *Proceedings of Coastal Sediments '99*. (4th International Symposium on Coasting

- Engineering and Science of Coastal Sediment Processes; June 21-23, 1999). American Society of Civil Engineers, Hauppauge, New York, U.S.A., pp. 1660-1675.
- Gutiérrez, O., 2010. Dinámica sedimentaria en la costa uruguaya: evolución y tendencias de playas urbanas en el marco del Cambio Global. (MSc). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay. doi:10.13140/RG.2.1.1904.4568
- Gutiérrez, O., Panario, D., 2005. Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos. Xeográfica, Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente (ISSN: 1578-5637) 5, 107-126.
- Gutiérrez, O., Panario, D., 2006. Evolución de la desembocadura del Arroyo Pando (Canelones, Uruguay): ¿tendencias naturales o efectos antrópicos?, en: Menafrá, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F., Conde, D. (Eds.), Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, Uruguay, pp. 391-400.
- Gutiérrez, O., Panario, D., 2016. Caracterización y dinámica de la costa uruguaya, una revisión, en: Muniz, P., Conde, D., Venturini, N., Brugnoli, E. (Eds.), Ciencias Marino-Costas en el Umbral del Siglo XXI, desafíos en Latinoamérica y el Caribe. Editorial AGT Editorial S.A, México DF, México, p. (In press).
- Gutiérrez, O., Panario, D., Nagy, G.J., Piñeiro, G., Montes, C., 2015. Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. Journal of Integrated Coastal Zone Management - Revista de Gestão Costeira Integrada 15, (in press). doi:10.5894/rgci553
- Hanley, M.E., Hoggart, S.P.G., Simmonds, D.J., Bichot, A., Colangelo, M.A., Bozzeda, F., Heurtefeux, H., Ondiviela, B., Ostrowski, R., Recio, M., Trude, R., Zawadzka-Kahlau, E., Thompson, R.C., 2014. Shifting sands? Coastal protection by sand banks, beaches and dunes. Coastal Engineering 87, 136-146. doi:10.1016/j.coastaleng.2013.10.020
- Hansom, J.D., 2001. Coastal sensitivity to environmental change: a view from the beach. Catena 42, 291-305. doi:10.1016/S0341-8162(00)00142-9
- Inman, D.L., Masters, P.M., 1991. Budget of Sediment and Prediction of the Future State of the Coast, Coast of California Storm and Tidal Waves Study, State of the Coast Report, Coastal Morphology Group. Los Angeles, USA.
- Iriondo, M., Brunetto, E., Kröhling, D., 2009. Historical climatic extremes as indicators for typical scenarios of Holocene climatic periods in the Pampean plain. Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology 283, 107-119.

doi:10.1016/j.palaeo.2009.09.005

Iriondo, M., Kröhling, D., 2008. Cambios ambientales en la cuenca del río Uruguay: desde dos millones de años hasta el presente. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fé, Argentina.

Iriondo, M., Kröhling, D., Brunetto, E., 2011. Aridization, dune dissipation and pedogenesis in the quaternary of eastern pampean sand sea, en: Murphy, J.A. (Ed.), Sand Dunes. Nova Science Publishers, Inc., New York, U.S.A., pp. 1-42.

Jonge, V.N. de, Elliott, M., Orive, E., 2002. Causes, historical development, effects and future challenges of a common environmental problem: eutrophication. *Hydrobiologia* 475-476, 1-19. doi:10.1023/A:1020366418295

Klemas, V., 2011. Remote Sensing Techniques for Studying Coastal Ecosystems: An Overview. *Journal of Coastal Research* 27, 2-17. doi:10.2112/JCOASTRES-D-10-00103.1

Legrand, C.D., 1959. Comunidades psamófilas de la Región de Carrasco (Uruguay). *Anales del Museo de Historia Natural de Montevideo, Segunda Serie* 6, 1-64 y láminas.

Limber, P.W., Patsch, K.B., Griggs, G.B., 2008. Coastal Sediment Budgets and the Littoral Cutoff Diameter: A Grain Size Threshold for Quantifying Active Sediment Inputs. *Journal of Coastal Research* 24, 122-133. doi:10.2112/06-0675.1

Luisetti, T., Turner, R.K., Jickells, T., Andrews, J.E., Elliott, M., Schaafsma, M., Beaumont, N., Malcolm, S., Burdon, D., Adams, C.A., Watts, W., 2014. Coastal Zone Ecosystem Services: from science to values and decision making; a case study. *Science of The Total Environment* 493, 682-693. doi:10.1016/j.scitotenv.2014.05.099

Marshall, F.E., Banks, K., 2013. Shoreline Habitat: Beaches., en: Nuttle, W.K., Fletcher, P.J. (Eds.), *Integrated Conceptual Ecosystem Model Development for the Southeast Florida Coastal Marine Ecosystem*. NOAA Technical Memorandum, OAR-AOML-103 and NOS-NCCOS-163, Florida, Miami, U.S.A., pp. 94-108.

Martínez, M.L., Gallego-Fernández, J.B., Hesp, P.A. (Eds.), 2013. Restoration of Coastal Dunes, en: *Springer Series on Environmental Management*. Springer Berlin Heidelberg, Berlin, Heidelberg, Germany, p. 347. doi:10.1007/978-3-642-33445-0

MTOP/PNUD/UNESCO, 1979. Conservación y mejora de playas - URU. 73.007. Unesco, Montevideo, Uruguay.

Muñoz-Vallés, S., Cambrollé, J., 2014. Successes and failures in the management of coastal dunes of SW Spain: Status analysis nine years after management

- decisions. *Ecological Engineering* 71, 415-425. doi:10.1016/j.ecoleng.2014.07.042
- Nagy, G.J., Bidegain, M., de los Santos, B., Verocai, J.E., 2015. Base climatology (1979-2014) and future (2030-2050) RCP scenarios for Uruguay. Project URU/11/g31: "Institutional strengthening for the elaboration of the Uruguayan 4th National Communication to the UNFCCC". Working Paper. Montevideo, Uruguay.
- National Maritime Museum, 1789. «Carta esférica del Río de la Plata desde su desembocadura hasta Buenos-Ayres». Levantada de Orden del Rey en 1789 y rectificada en 1794, por varios oficiales de su Real Armada. Presentada a S.M. por mano del Exmo. Sr. Juan de Langaran en el año 1798 [WWW Document]. ID: K0886. URL <http://www.nmm.ac.uk/collections/explore/chartzoom.crm/imageID/K0886/x/6063/y/36/zoomlevel/2/#content> (accedido 10.6.09).
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V., Woodroffe, C.D., Hay, J., 2008. Climate change and coastal vulnerability assessment: scenarios for integrated assessment. *Sustainability Science* 3, 89-102. doi:10.1007/s11625-008-0050-4
- Norris, R.M., 1964. Dams and beach-sand supply in Southern California, en: Miller, R.L. (Ed.), *Papers in Marine Geology: Shepard Commemorative Volume*. New York, pp. 154-171.
- Panario, D., 1999. Dinámica de la costa atlántica uruguaya., en: Hernández, J. (Ed.), *Seminario: Costa Atlántica. Estado actual del conocimiento y estrategia de investigación de la costa y sus barras lagunares* (Rocha, marzo de 1997). PROBIDES, Rocha, Uruguay, pp. 23-54.
- Panario, D., 2000. Las playas uruguayas. Su dinámica, diagnóstico de situación actual y tendencias a mediano plazo., en: Domínguez, A., Prieto, R. (Eds.), *Perfil ambiental del Uruguay - 2000*, Ecoteca Series. Editorial Nordan-Comunidad, Montevideo, Uruguay, pp. 111-125.
- Panario, D., Gutiérrez, O., 2005. La vegetación en la evolución de playas arenosas. El caso de la costa uruguaya. *Ecosistemas. Revista de la Asociación Española de Ecología Terrestre* 14, 150–161.
- Panario, D., Gutiérrez, O., 2006. Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas, en: Menafra, R., Rodríguez-Gallego, L., Scarabino, F., Conde, D. (Eds.), *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya. Vida Silvestre Uruguay*, Montevideo, Uruguay, pp. 21-34.
- Panario, D., Gutiérrez, O., Piñeiro, G., 2008. Propuesta técnica para la conservación recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe final. Convenio UNCIEP, Facultad de Ciencias y Departamento de Desarrollo

- Ambiental, Intendencia Municipal de Montevideo. Setiembre. Montevideo, Uruguay. doi:10.13140/RG.2.1.2508.8725
- Panario, D., Piñeiro, G., 1997. Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay. *Climate Research* 9, 67-72. doi:10.3354/cr009067
- Pasternack, G.B., Brush, G.S., 1998. Sedimentation cycles in a river-mouth tidal freshwater marsh. *Estuaries* 21, 407-415. doi:10.2307/1352839
- Piñeiro, G., 2010. Transporte eólico de arena en playas urbanizadas: modelos-realidad. (MSc). Universidad de la República, Montevideo, Uruguay.
- Piovano, E.L., Ariztegui, D., Córdoba, F., Cioccale, M., Sylvestre, F., 2009. Hydrological variability in South America below the Tropic of Capricorn (Pampas and eastern Patagonia, Argentina) during the last 13.0 ka, en: Vimeux, F., Sylvestre, F., Khodri, M. (Eds.), *Past climate variability from the Last Glacial Maximum to the Holocene in South America and Surrounding regions. From the Last Glacial Maximum to the Holocene, Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer, Netherlands, pp. 323-351. doi:10.1007/978-90-481-2672-9_14
- Politis, G., 1984. Climatic variations during historical times in Eastern Buenos Aires Pampas, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula* 2, 133-161.
- Servicio Geográfico Militar, 1923. «La Unión». Hoja IX-29. Cartas del Uruguay al 1:50.000. Levantamientos efectuados antes de 1920.
- Short, A.D., 1999. *Handbook of Beach and Shoreface Morphodynamics*. Wiley, Chichester.
- Silva, R., Martínez, M.L., Hesp, P.A., Catalan, P., Osorio, A.F., Martell, R., Fossati, M., Miot da Silva, G., Mariño-Tapia, I., Pereira, P., Cienguegos, R., Klein, A., Govaere, G., 2014. Present and Future Challenges of Coastal Erosion in Latin America. *Journal of Coastal Research* 71, 1-16. doi:10.2112/SI71-001.1
- Small, C., Cohen, J.E., 2004. Continental Physiography, Climate, and the Global Distribution of Human Population. *Current Anthropology* 45, 269-277. doi:10.1086/382255
- Stephenson, W.J., Brander, R.W., 2003. Coastal geomorphology into the twenty-first century. *Progress in Physical Geography* 27, 607-623. doi:10.1191/0309133303pp398pr
- Stephenson, W.J., Brander, R.W., 2004. Coastal geomorphology. *Progress in Physical Geography* 28, 569-580. doi:10.1191/0309133304pp426pr

- Syvitski, J.P.M., Vörösmarty, C.J., Kettner, A.J., Green, P., 2005. Impact of Humans on the Flux of Terrestrial Sediment to the Global Coastal Ocean. *Science* 308, 376-380. doi:10.1126/science.1109454
- Turner, R.K., Subak, S., Adger, W.N., 1996. Pressures, trends, and impacts in coastal zones: Interactions between socioeconomic and natural systems. *Environmental Management* 20, 159-173. doi:10.1007/BF01204001
- Urien, C.M., 1967. Los sedimentos modernos del Río de la Plata Exterior. *Boletín del Servicio de Hidrografía Naval*. Buenos Aires 4, 113-213.
- Verocai, J.E., Gómez-Erache, M., Nagy, G.J., Bidegain, M., 2015. Addressing climate extremes in Coastal Management: The case of the Uruguayan coast of the Rio de la Plata System. *Journal of Integrated Coastal Zone Management - Revista de Gestão Costeira Integrada* 15, 91-107. doi:10.5894/rgci555
- Vinther, N., Nielsen, J., Aagaard, T., 2004. Cyclic Sand Bar Migration on a Spit-platform in the Danish Wadden Sea—Spit-platform Morphology Related to Variations in Water Level. *Journal of Coastal Research* 20, 672-679. doi:10.2112/1551-5036(2004)20[672:CSBMOA]2.0.CO;2
- Willis, C.M., Lockwood, B., Sherman, D., 2002. Impediments to fluvial delivery of sediment to the shoreline, en: Coyne, M., Sterrett, K. (Eds.), *California Beach Restoration Study*. California Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, Sacramento, California, USA, pp. 1-48.
- Woodroffe, C.D., 2002. *Coasts: form, process and evolution*. Cambridge University Press, California, United Kingdom.
- Wright, L.D., Short, A.D., 1984. Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology* 56, 93-118.

Capítulo 6.5

Propuesta de indicadores
cuali-cuantitativos
de estado de playas

6.5. PROPUESTA DE INDICADORES CUALI-CUANTITATIVOS DE ESTADO DE PLAYAS

A los efectos de relativizar los cambios que se produjeron en todos los tramos de costa analizados fue necesario proponer indicadores cuali-cuantitativos que permitieran comparar resultados y tendencias obtenidos para playas con distinta longitud de la línea de costa, extensión de la serie temporal, y magnitud de la fluctuación en los procesos de erosión / acreción.

6.5.1. Playa Ramírez

El **Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP)** que relativiza la pérdida - ganancia por el largo de la línea de costa, tipifica a los cambios como **moderados**, y como **fuertes** cuando se analiza la playa a partir de 1945 (**Tabla 6.8**). Debe señalarse que a partir del registro fotográfico de 1927, se produce un proceso de crecimiento de la superficie del arco de playa, con una expresión máxima en el año 1961, a partir del cual se producen varias fluctuaciones hasta llegar a la situación actual. Lo que es marcado también por el **Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie (ITBSP relativizado por tiempo)**, que caracteriza como **fuertes** las pérdidas de superficie para las series 1945-2007 y 1945-2008.

El **Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior (IDMaSPA)** indica un porcentaje de variación con respecto al presente para ese registro de -37,1%. Mientras el **Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior (IDMeSPA)** indica un porcentaje de variación con respecto la peor situación de la que existe registro de 2,3%.

6.5.2. Playa Pocitos

Comparando para todo el período entre los resultados de los índices obtenidos para **L27** y el **L08** (ver **Capítulo 6.2**), los valores son siempre más altos usando el primer artefacto, aunque analizando respecto al conjunto de los otros sitios de estudio, Pocitos es quien presenta valores más bajos y por tanto una mayor estabilidad relativa. Sin embargo el **Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior (IDMaSPA)**, indica un porcentaje de variación respecto al registro fotográfico donde se presenta la mayor extensión de superficie de -42,2% para el **L27** y de -32,6% para el

Tabla 6.8. Resultados obtenidos de los Índices de balance (retroceso - avance) de la línea de costa. Con *negrita* en *proxies* se señalan los valores positivos y en probabilidad estadística los resultados con grados de significación >90%. En el Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP) la celda *blanca* indica valores leves, *celeste* los moderados y *verde* los fuertes. En el Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa (ITBSP) en *lila* se distinguen los procesos fuertes, y en el Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie (ITBSP relativ. por tiempo) en *naranja* se señalan los procesos fuertes.

Sitio	Período	Nº de Registros	Pérdida en m2/año según proxies			Probabilidad estadística	IG/PP m2/m LC	Índice DMaSPA %	Índice DMeSPA %	ITBSP %	ITBSP relativ. por t	
			LMAP	LSH-ZAIO	ALMA							
Playa Ramírez	1927-2007	15	-52,7	-	-	0,19	-0,11	- 37,1%	2,3%	-13,1%	-2	
	1927-2007	15	-	-44,6	-	0,19	-0,09			-10,7%	-1	
	1945-2007	14	-111,6	-	-	0,01	-0,22			-20,6%	-3	
	1927-2008	23	-	-71,5	-	0,02	-0,14			-17,1%	-2	
	1945-2008	21	-	-126,7	-	0,001	-0,25			-22,5%	-4	
Pocitos	L27	1927-2007	-89,4	-	-	0,24	-0,06	- 42,2% (L27)	0,2% (L27)	-14,9%	-2	
		1927-2007	-	-128,9	-	0,1	-0,09			-19,2%	-2	
		1927-2008	21	-	-127,5	-	0,04			-0,09	-19,2%	-2
		1954-2008	18	-	-64,0	-	0,46			-0,04	-7,2%	-1
	L08	1927-2007	15	-	40,8	-	0,61	0,03	- 32,6% (L08)	0,0% (L08)	4,7%	1
		1927-2008	21	-	5,8	-	0,93	0,004			0,7%	0
		1954-2008	18	-	-58,4	-	0,56	-0,04			-4,5%	-1
Playa Buceo	1929-2007	17	-28,9	-	-	0,68	-0,03	- 3,3%	42,7%	3,0%	0	
	1929-2007	17	-	-	48,4	0,54	0,05			37,5%	5	
Playa Malvín	1929-2007	17	112,7	-	-	0,26	0,11	- 7,3%	25,4%	8,0%	1	
	1929-2007	17	-	-	-200,8	0,25	-0,19			-22,6%	-3	
Playa Brava de Malvín	1939-2007	17	-90,0	-	-	0,001	-0,27	- 39,3%	0,0%	-24,8%	-4	
	1939-2007	17	-	-	-51,9	0,19	-0,15			-30,5%	-4	

IG/PP - Índice de Ganancia/Pérdida de Playa; IDMaSPA - Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior; ITBSP - Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa; IDMaSPA - Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior; IDMeSPA - Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior; ITBSP relativizado por tiempo - Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie.

L08, lo que indica que más allá de los resultados estadísticos, el estado actual de la playa presenta en esta los valores porcentuales más altos de pérdida de superficie respecto a estados anteriores. Por otra parte el **Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior (IDMeSPA)**, indica un porcentaje de variación respecto al registro fotográfico donde se expresa la menor extensión de superficie de 0,2% para el **L27** y de 0,0% para el **L08**, dado que el año 2008 coincide con el registro de la menor extensión de esta playa.

En la hipótesis de que la configuración más similar a la playa actual (de la que tenemos registro fotográfico), comienza con la imagen de mayo del 1954, los resultados indicarían que respecto a la superficie de playa analizando el período en que ya han sido realizadas las principales modificaciones en el “diseño” de la playa Pocitos, se observa una relativa estabilidad del sistema, y las fluctuaciones responden a la dinámica natural de la playa y/o al manejo (redistribución de arena con maquinaria). Coincidentemente el **Índice Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP)** que relativiza el balance por el largo de la línea de costa, tipifica para el análisis de toda la serie a estos valores como **moderados**, pero cuando se analiza la serie a partir del registro del año 1945, estima el cambio como **leve**.

6.5.3. Playa Pocitos

El **Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior (IDMaSPA)** es -3,3%, que presenta el porcentaje de variación más bajo de todas las playas respecto al mejor escenario (real) pasado, mientras el **Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior (IDMeSPA)** es 42,7%, que presenta el porcentaje de variación más alto de todas las playas respecto al peor escenario (real) pasado. A su vez el **Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP)** que relativiza el balance por el largo de la línea de costa, tipifica a los cambios como **leves**, el **Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie (ITBSP relativizado por tiempo)**, caracteriza como **nulos** los resultados del *proxy* **LMAP**; sin embargo, caracteriza como **fuertes** las variaciones de superficie de arena seca, dado que más allá de que los volúmenes son muy bajos, la fluctuación es muy alta.

El **Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP)** que relativiza el balance por el largo de la línea de costa, tipifica a estos cambios como **moderados**, pero cuando se analiza la playa Brava usando como *proxy* **LMAP** estima el cambio como **fuerte**.

6.5.4. Playa Malvín-Brava

El **Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie (ITBSP relativizado por tiempo)**, caracteriza como fuertes las variaciones de superficie para Brava, y para Malvín para las fluctuaciones que ha tenido de superficie de arena seca.

El **Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior (IDMaSPA)** es de -7,3% para Malvín, pero es de -39,3% para Brava, lo que indica una disminución importante de superficie de playa respecto al mejor escenario (real) pasado. Por otra parte el **Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior (IDMeSPA)**, indica un porcentaje de variación respecto al registro fotográfico donde se expresa la menor extensión de superficie de 25,4% para Malvín y de 0,0% para Brava, dado que el año 2007 coincide con el registro de la menor extensión de esta playa.

6.5.4. Desembocadura Arroyo Pando

El **Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP)** que relativiza el balance por el largo de la línea de costa, tipifica a los cambios como **fuertes**, con un resultado por metro lineal de playa un orden de magnitud por encima que los valores del resto de los sitios en estudio (**-2,45 m²** de pérdida de arena por metro lineal de costa).

6.5.4. Desembocadura Arroyo Carrasco

El **Índice de Ganancia/Pérdida de Playa (IG/PP)** que relativiza el balance por el largo de la línea de costa tipifica a los cambios como **moderados**.

Capítulo 7.

Conocer para avanzar. Consideraciones complementarias de los casos de estudio a modo de discusión



INTRODUCCIÓN

Por la estructura de la tesis, la discusión particular de los resultados ha sido incorporada en los artículos que componen el **Capítulo 6**.

Sin embargo a la luz de los resultados obtenidos y bajo el marco de los objetivos de la tesis, en un primer apartado se incluyen consideraciones complementarias de los casos de estudio con respecto a su evolución y tendencias para cada una de las playas y desembocaduras estudiadas, a través de la historia que ha condiciona su situación actual y analizando las relaciones con las modificaciones de la superficie de playa.

Un segundo apartado discute los resultados del balance sedimentario, y la importancia de la comprensión del ciclo de la arena.

Un tercer apartado discute los casos en conjunto y analiza la similitud de las respuestas a los impulsores de cambios climáticos.

Un cuarto apartado analiza la resiliencia y las variables que la condicionan en los casos de estudio.

7.1 LAS PLAYAS, SABER DE DÓNDE SE VIENE, PARA SABER A DÓNDE SE VA. ANÁLISIS HISTÓRICO

• 7.1.1. Playa Ramírez

La cartografía de los años 1849¹⁹ y 1883²⁰ de la Marina Inglesa y de 1867²¹ (con recubrimiento parcial) de la Marina Francesa, representan a playa Ramírez con una forma más abierta que la presente y extendida hacia el NW (con unos 800 metros de largo, aproximadamente el doble que lo actual), y exhibiendo una ensenada en ese extremo. A su vez en una carta topográfica de 1846²², se puede observar la existencia de dos cursos fluviales (**Figura 7.1**), el principal de ellos denominado de la Estanzuela.

Esta cartografía de 1849 y 1883, confirma los agresivos procesos a los que estuvieron sometidas las playas montevidéanas, en una época en que seguramente se las veía principalmente como una fuente de áridos para la construcción.

Si bien para Ramírez, no se han ubicado aun relatos que lo atestigüen, es posible que esta playa haya sido utilizada como una de las primeras fuentes de arena para la construir el casco antiguo de Montevideo, como lo fue con posterioridad Pocitos, una vez que la expansión de la ciudad llegó a sus cercanías.

La línea de costa de Ramírez en 1849, tomada la medida en el centro de lo que hoy es esa playa, se encontraba progradada en el orden de los 200 metros. Esta hecho se confirma por la existencia en algunos catastros de la IdeM (archivo *manzanas.dwg* del 25/07/2007), de padrones para esta playa, situados en el presente bajo el agua, situados sobre ambas márgenes de la desembocadura de un curso fluvial que fue canalizado y cuyo cauce pasaría ahora por debajo del actual parque de diversiones

^{19/} *Montevideo Bay*, surveyed by C.H. Dillon Master R.N. and other Officers of Her Majesty's Navy, 1849. Hydrographic Office of the Admiralty. London. (Archivo personal Dr. Loïc Menanteau).

^{20/} *Montevideo Bay*, surveyed by Captain W.J.L. Wharton, R.N. and Officers of H.M.S. Sylvia, 1883. Hydrographic Office of the Admiralty. London. (Archivo personal Dr. Loïc Menanteau).

^{21/} *Plano de la ciudad de Montevideo, capital de la República Oriental del Uruguay y de sus alrededores hasta el paso del Molino, el camino de Larrañaga y el arroyo de los Pozitos. Aumentado con los planos de los pueblos del Cerro y de la Victoria*. Levantado y publicado en 1867 por el Agrimensor de número que suscribe, ex-oficial de la Marina de Guerra Francesa. (Archivo Geográfico, Ministerio de Transporte y Obras Públicas, MTOP).

^{22/} *Plano topográfico de la ciudad y cercanías de Montevideo*. En el que se demuestra las posiciones de las fuerzas de la plaza y las del ejército sitiador. Levantado por el Agrimensor D. Pedro Pico, 1846. (Mapoteca, SGM).

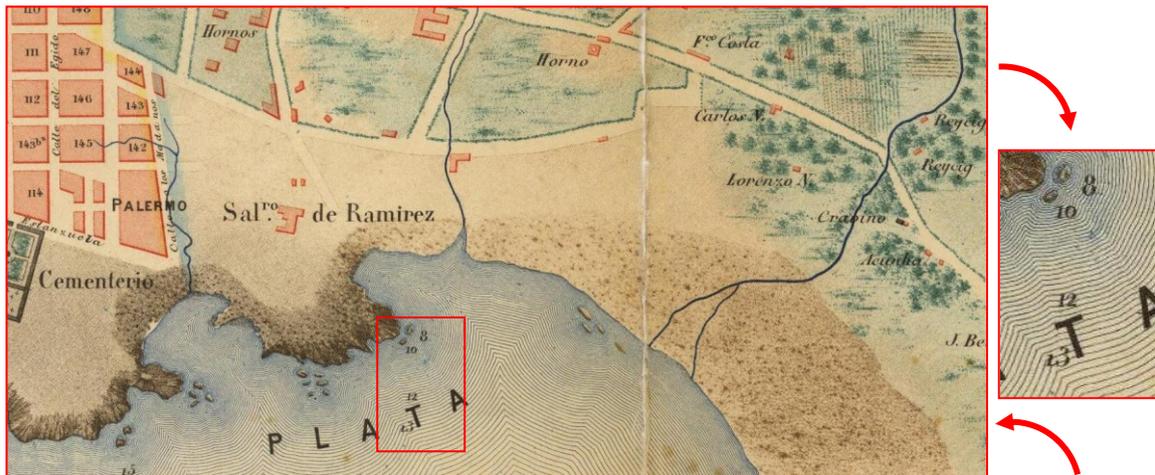


Figura 7.1. Detalle de la cartografía de 1867 de la Marina Francesa, obsérvense los dos cursos de agua que desembocaban en la playa Ramírez y la profundidad de la batimetría frente a la punta rocosa. Las medidas de las sondas están expresadas en pies franceses (equivalente a 0,3248 m). Fuente: carta francesa, MTOP.



(ubicado en las adyacencias de la misma) (**Figura 7.2**). Para los registros fotográficos de 1927 y 1929, ya el retroceso de la línea de costa se había producido. La carta del SGM de 1929²³, realizada con relevamientos en el año 1920, registra la playa también después de la construcción de la rambla de Ramírez. El hiato de documentación existente entre 1886 y el 1920 no ha permitido generar aún una reconstrucción de los ritmos de esta evolución, pero esta situación explicaría, la temprana construcción de espigones y rompeolas, y la pendiente extremadamente baja de la playa subacuática, que en realidad era subaérea hasta finales del siglo XIX, en tanto, la actual ubicación está por detrás de la playa de ese siglo.

Los dos arroyos que desembocaban en la Playa Ramírez, contribuirían a la recirculación de la arena del campo de médanos existente en la zona, cuya existencia aún está presente en la toponimia de la ciudad (calle Médanos), que en planos antiguos se denominaba “Camino a los Médanos”. Esta recirculación fue interrumpida a fines del siglo XIX, cuando sobre el propio arco de playa se construyó la costanera que la circunvala, y a su vez, se realizó un relleno, que permitió ganar al mar dos manzanas, sobre las que fue emplazado el Parque Hotel (actual sede del Mercosur) y unos galpones de grandes dimensiones.

^{23/} La Barra. Cartas del Uruguay al 1:50.000. Hoja X-29 Servicio Geográfico Militar. Levantamientos efectuados antes de 1920. Edición 1929. (Mapoteca, SGM).

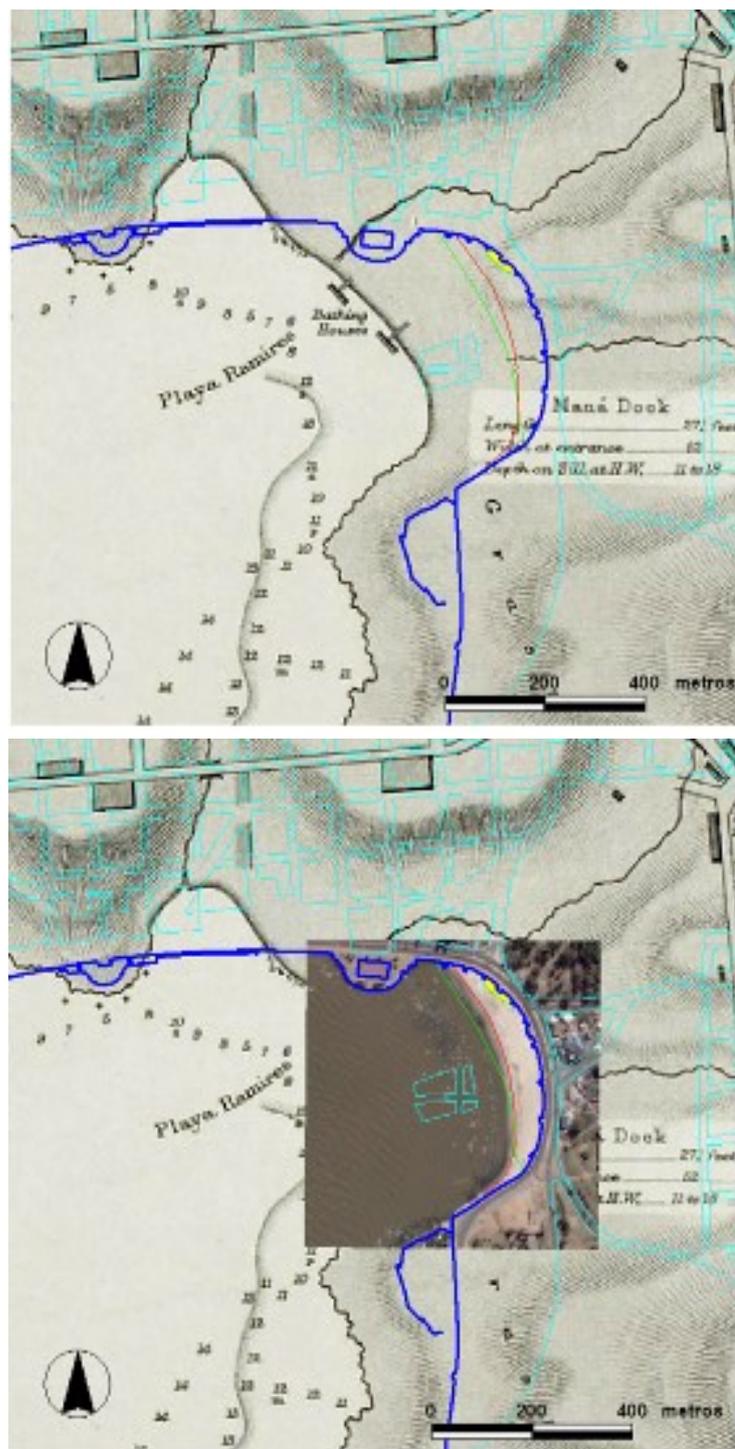


Figura 7.2. Sobre la carta de 1849 de la Marina Inglesa, se superponen los archivos de amanzanamiento (turquesa), de ubicación actual de la rambla (azul), las líneas de costa trazadas por LSH-ZAIO de 1927 (verde) y de 2008 (roja), el antiguo descanso de principios de siglo XX (amarillo). Imagen superior: se ven las antiguas construcciones para baños. En la carta de 1883 del mismo origen, el arroyo desemboca en la propia playa pasando entre los padrones. Imagen inferior: se superpone también la foto de 2008. Obsérvese la ubicación de los padrones, hoy en el agua. Nótese el retroceso que ha tenido la playa, el cambio de forma y orientación. El círculo naranja indica la ubicación del actual parque de diversiones. Fuentes: Archivos cad y foto 2008, IdEM; carta inglesa (archivo personal de Loïc Menanteau); líneas de costa (elaboración propia).

Concomitantemente fueron entubados los arroyos, uno de ellos a su vez fue represado, y por donde corría su cauce actualmente se encuentra emplazado el denominado “Lago del Parque Rodó”. Este primer trazado de la rambla en Ramírez (**Figura 7.3**), confinó la playa a un arco con forma de medialuna, con la presencia de un gran descanso sobre la propia playa (que luego fue retirado); quedando aislada como una pequeña playa (observable aún en una carta del SGM de 1920²⁴), y presumiblemente fue en ese momento que se produjo el retroceso de la línea de costa.

Estas acciones impactaron sobre la playa Ramírez, al dividir lo que originalmente era una unidad funcional consistente en un arco de playa con un pequeño tómbolo transparente a la circulación de arena. Luego el sector NW de playa fue eliminado, quedando tapado por la construcción de la Rambla Sur, por el año 1930. Para el relleno de esta zonas ganadas al Río de la Plata, fue utilizada arena refulada ubicada en las cercanías, lo que disminuyó el stock de sedimentos subacuáticos disponibles, alterando por tanto el ciclo de la arena.

- Evolución de la superficie de playa Ramírez y su dinámica

La playa Ramírez se encuentra actualmente, confinada entre el “nuevo” gran descanso al NW y los espigones que la cierran a ambos lados del arco, lo que la ha transformado en una playa caracterizada por un funcionamiento de *pocket beach* (playa de bolsillo), y por tanto las pérdidas de sedimentos son casi exclusivamente hacia la costanera en los sitios donde se emplazan las escaleras. El arco en su parte externa no se acompasa a la forma típica de un espiral logaritmo, como era su configuración natural, sino que tiene en planta una curvatura mayor, de donde los temporales lo afectan principalmente en ambos extremos.

La playa Ramírez en la rompiente manifiesta una tendencia a granos más finos en el sentido NS, acompañada por igual tendencia en la berma, lo que indicaría un dominio de la dirección de la deriva asociado a los vientos fuertes (del SW) lo que sumado a su resguardo de las olas de mar de fondo (del SE, ver **Figura 5.3**), hace que casi no tenga olas en condiciones de vientos locales calmos.

^{24/} Cerro. Carta del Depto. de Montevideo. Escala 1:20.000. Hoja D. Servicio Geográfico Militar. Levantamientos efectuados para la zona de interés entre 1918-1919. Edición 1920. (Mapoteca, SGM).



Figura 7.3. Arriba: La playa Ramírez en la década de 1890, donde existían grandes construcciones para los baños sobre la propia playa (ver Figura 16). Abajo: Vista de la playa Ramírez en el año 1919, al fondo puede observarse el muro de la primera rambla. Foto: CMDF-IdeM.

De lo anterior se deduce que actualmente recoge la arena existente entre el Puerto de Montevideo y las inmediaciones de Punta Brava, mientras el intercambio con Pocitos es al menos muy escaso en la medida que por delante de Punta Brava o De Las Carretas, las isobatas de 3 y 5 metros respectivamente están muy próximas entre sí y a la costa.

Del análisis multitemporal de Ramírez, dependiendo del período considerado, surge como resultado principal, que el área tiende a disminuir, entre 44 m²/año (1927-2007) con una tendencia de baja significación estadística ($p = 0,19$) y 126 m²/año (1945-2008) con una tendencia altamente significativa estadísticamente ($p = 0,001$). El coeficiente de variación indica poca variabilidad de los datos, que puede relacionarse a un efecto limitado por su orientación a los eventos climáticos extraordinarios, y este coeficiente se reduce aún más al quitar del análisis las fotos anteriores a 1945 (**capítulo 6.2**).

En el **capítulo 6.2**, para Ramírez los análisis estadísticos permiten observar que la mayor significación estadística se obtiene al retirar del análisis las fotos de 1927 y 1929, lo que sustenta la hipótesis de que ellas corresponden a otro estado de configuración de la playa. Esto se vincula a las modificaciones realizadas en Ramírez a comienzos del siglo XX, lo que nos sugirió que para analizar la tendencia actual resultaba más confiable utilizar la primer imagen (año 1945) en la cual ya existen las construcciones que le confieren la actual estructura. A su vez, con anterioridad a 1945, sumado a los impactos por minería y obras de infraestructura que se realizaron en esta playa, debe considerarse la posible sinergia de los temporales extraordinarios de 1923 y 1924, aspecto claramente documentado en la iconografía existente.

Además de la pérdida de superficie de arena expuesta (con significación estadística) y el retroceso de la línea de costa, la playa Ramírez también ha sufrido una rotación en sentido horario, teniendo como eje aproximadamente su parte media (**Figura 7.4**). Una posible causa de esta rotación, es el descanso ubicado al NW construido como parte de las obras de la Rambla Sur (por el año 1930), y la posterior instalación de dos espigones (uno en cada extremo), seguramente para intentar corregir una erosión en su extremo norte. De estos dos espigones, el que se encuentra ubicado al S de dicha playa ha resultado exitoso, funcionando como un rompeolas, y para ese sector se ha ampliado y consolidado la playa; sin embargo el espigón ubicado al N, a pesar que tuvo una corrección de diseño entre los años 1949 y 1954, provoca difracción de olas y genera un foco que mantiene erosionada y húmeda la playa en ese sector.

Por otra parte, Ramírez desde al menos la década de 1927, está sometida a removilización de arena -inicialmente en carretas y luego con maquinaria-, que era llevada desde la playa alta (arena acumulada contra el muro de la rambla) a la zona de

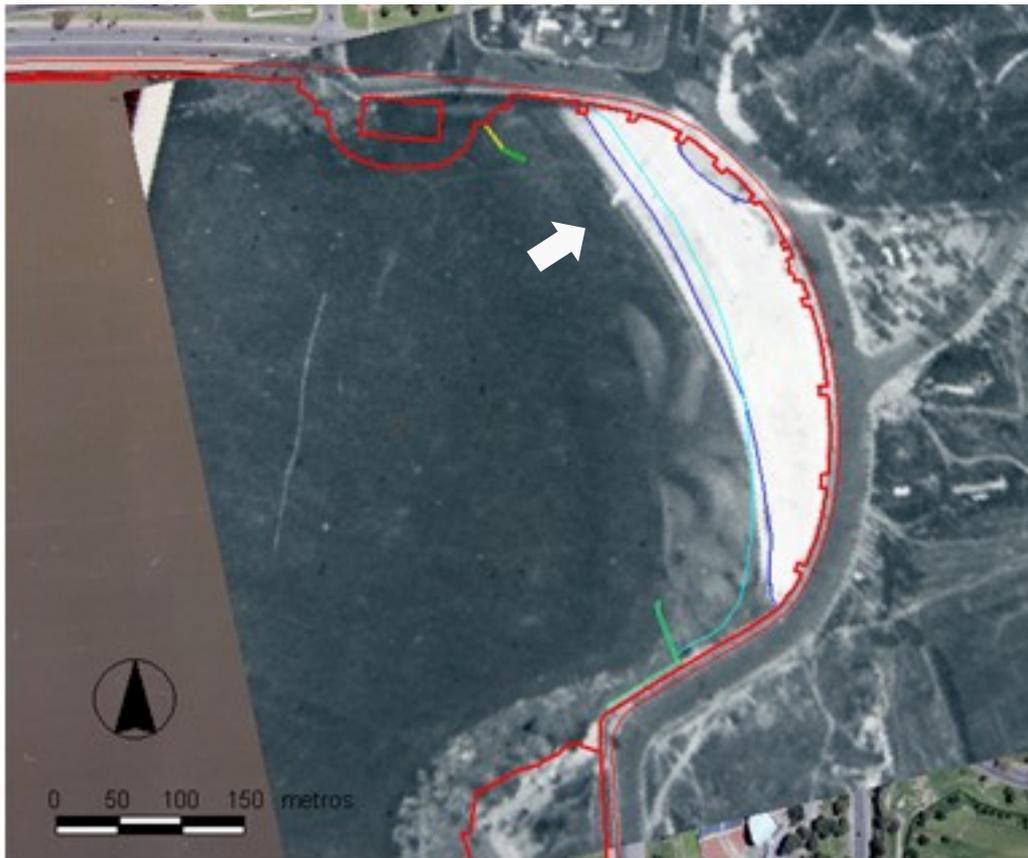


Figura 7.4. La foto pancromática es del año 1927, la foto color (fondo) es del 29 de setiembre de 2007. En turquesa la LMAP correspondiente a 2007, en azul la del 1927. Notesé la rotación que ha sufrido la playa. Ubicado al S en verde está dibujado el espigón que funciona como “rompeolas”, y al N en amarillo y verde el espigón que genera problemas de difracción de olas (amarillo, primer etapa; verde, ampliación). La línea roja gruesa es la ubicación actual de la rambla. La flecha blanca señala una prominencia de la playa originada en las tareas de retirar arena de la playa y trasladarla a la zona de *surf*, práctica corriente desde aquella época. Fotos: Archivo DINAMA, año 1927; Archivo IdeM, año 2007.

surf (aprovechando condiciones de marea baja), por los registros, puede suponerse que se lo realizaba presumiblemente al inicio y fin de cada temporada veraniega (**Figura 7.5**). Esa movilización artificial, rompe las estructuras disipativas de la playa, y la deja frágil ante eventos de tormenta al bajar la cota de la zona de berma.

El retransporte de sedimentos hacia la rompiente realizado en playas reflectivas e intermedias, deja disponibles materiales que son removidos por las olas durante los procesos de *downwelling*, pudiendo favorecer las pérdidas hacia el mar que ocurren durante las tormentas de vientos del Sur. En Ramírez, la existencia de un gradiente extremadamente suave en la playa subacuática podría justificar una baja frecuencia de



Figura 7.5. Izquierda: La flecha blanca señala las acumulaciones artificiales de arena realizadas en las tareas de limpieza (28 de junio de 2001). Derecha: Las flechas celestes indican los lugares en que la arena es depositada en la zona de "surf" (8 de agosto de 2001). Imágenes: Digital Globe, *Google Earth 5*.

tal fenómeno, el que se restringiría a tormentas excepcionales. Los movimientos de arena con maquinaria pesada, se intensificaron entre el año 2000 y el 2009 (fecha en que dejaron de efectuarse); y coincidentemente la ubicación de la línea de costa en esos años muestra fuertes fluctuaciones.

Por otra parte, esta playa fue utilizada además, como zona de préstamo para la recarga de la playa Pocitos con anterioridad a 1975 (MTOPI/PNUD/UNESCO, 1979). Coincidentemente el año 1961, corresponde al registro de mayor superficie de la playa para todo el período en estudio, decayendo abruptamente en el siguiente registro del año 1965.

Como fue analizado en el **capítulo 6.3** existe una clara relación entre los eventos ENSO y las fluctuaciones en el avance (ganancia en superficie) y retroceso (erosión) de la línea de costa.

- 7.1.2. Playa Pocitos

Para el caso de Pocitos también han sido drásticos los cambios documentados. En efecto a comienzos del siglo XX, aún tenía dunas de gran altura y un prisma de playa de mayor volumen que el actual, a su vez en ella desembocaban varios arroyos. Según Ros (1923), Barrios Pintos (1971) y García Moyano (1969) hacia la mitad del siglo XIX existían en Pocitos dunas de hasta 10 metros de altura.

Ros (1923, pág. 17 y 18) afirmaba que a mitad del siglo XIX, el área delimitada por las actuales calles Buxareo (lugar de ubicación del Arroyo Grande de los Pocitos) por el E, el mar por el S y SE, y por las actuales calles Ellauri y 21 de setiembre, “... era un vasto y desierto arenal con altos médanos como montículos de arena voladora y juncos, con alturas que alcanzaban cinco y siete metros, y alguno, como el que ocupaba el lugar donde actualmente está edificado el Hotel Pocitos, alcanzaba una altura como de 10 metros, según la gente de 70 a 80 años de edad, que son viejos vecinos del lugar...”.

Esas dunas fueron retiradas junto con arena de la propia playa, para ser utilizadas para la construcción edilicia, fenómeno este que habría afectado severamente a la playa, dado que las estructuras (especie de corrales) desde donde se extraía arena son visibles hasta 1927, y según los cronistas de ellas se retiraban muchas carretas por día (García Moyano, 1969). En las diferentes fuentes consultadas, se señala que en una gran bajante de principios del siglo XX, se vieron los cimientos de casas “... que durante varios años estuvieron habitadas...” (Ros, 1923).

Como se mencionó es probable que este proceso haya comenzado en playas más próximas al casco urbano, como Ramírez y las que desaparecieron por la construcción de la rambla, sin embargo a la fecha sólo se dispone de testimonio documental para Pocitos. Aun así, como puede observarse en la [Figura 7.6](#), dibujada sobre la base del antiguo plano del “Proyecto de saneamiento de la Cuenca de los Pocitos” (García, 1908), anterior al trazado de la rambla, la playa era aun sensiblemente más ancha (entre un máximo de 80 y un mínimo de 40 metros aproximadamente), y con hasta 2 metros más de altura del prisma de playa que en el presente.

En la cartografía de principio de 1900 aparecen los tres cursos de agua. El Arroyo Pocitos Chico fue entubado por 1912, cuando se construyó el tramo sur de la rambla y sobre su desembocadura se construye el Hotel de los Pocitos. Para la foto de 1927, sólo es visible en la playa el Aº Grande de los Pocitos, el cual en la siguiente imagen disponible de 1945 también ha sido entubado.



Figura 7.6. Digitalización de las curvas de nivel cada 1 metro, realizadas en 1906 para el Proyecto de Saneamiento de la Cuenca de los Pocitos (García, 1908), superpuesta a una imagen del 29 de setiembre de 2007. La línea roja es la ubicación de la rambla actual. En turquesa se indica la línea de marea alta previa (LMAP), para el año de la foto. Nótese la mayor altura y ancho de la playa de la línea de costa antigua respecto a la actual. Foto: Archivo IdEM, año 2007.

La extracción de arena tanto de los médanos como de la propia playa y el entubamiento de los arroyos, igual que en Ramírez, cambiaron la dinámica del ciclo de la arena, y produjeron un fuerte retroceso de la línea de costa, al menos a partir de comienzos del siglo XX.

Entre mayo de 1927 y el presente, se observa una rotación horaria del arco de playa, con ganancias de playa seca en el extremo Norte y pérdida de la misma en el Sur (**Figura 7.7**), situación similar a la analizada en la playa Ramírez. Este fenómeno en el caso de Pocitos, parece relacionarse a la demolición y retiro de las principales construcciones e intervenciones realizadas a comienzos del siglo XX, tales como: el hotel instalado en la playa, viviendas y un amplio paseo pavimentado sobre la propia playa construido *a posteriori* del año 1927 y retirada antes de 1954 (**Figura 7.8**).

- Evolución de la superficie de playa Pocitos y su dinámica

La playa Pocitos presenta tendencias granulométricas opuestas en la berma y en la rompiente. En la primera el tamaño de grano tiende a aumentar hacia el NE, mientras en la rompiente se insinúa una tendencia en sentido contrario. Estas observaciones indicarían derivas opuestas, la primera originada por los vientos fuertes provenientes del SSE a SW y la segunda a las olas dominantes en el tiempo de mar de fondo proveniente del SE. La deriva dominante si bien débil, es en dirección Norte, al igual que en Ramírez y se ve reforzada por transporte eólico en la misma dirección. La confirmación de una playa más ancha a montante de la deriva, cuando aún se encontraba sobre la playa el edificio del “Hotel de los Pocitos” (**Figura 7.9**) y la observación del corrimiento en igual sentido de la desembocadura del Arroyo Grande de los Pocitos (denominado Arroyo Silva, a principios del siglo XIX) antes de ser entubado, apoyan la tesis de una dirección de deriva dominante hacia el Norte (ver **Figura 5.3**).

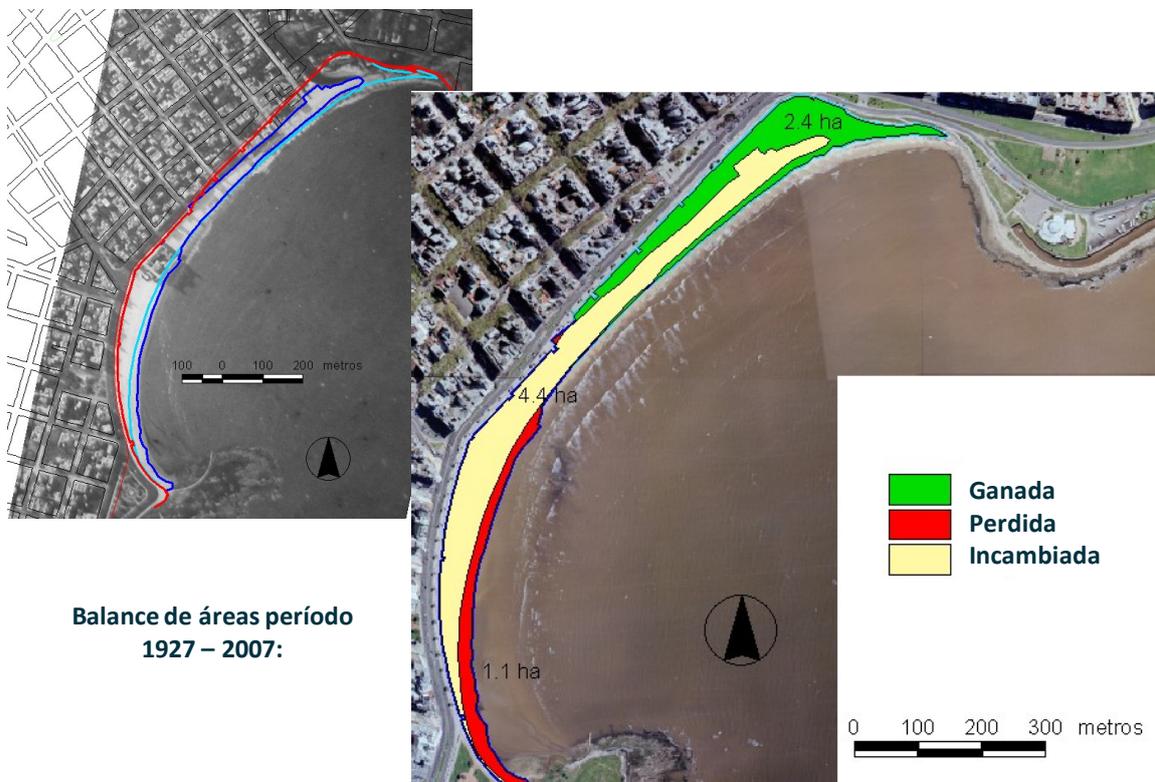


Figura 7.7. Arriba izquierda: En turquesa la línea de marea alta previa (LMAP), correspondiente a 2007, y en azul la del 1927. La línea roja gruesa es la ubicación actual de la rambla. Nótese la rotación que ha sufrido la playa. Derecha: Los polígonos sobre la playa indican las ganancias y pérdidas netas que han ocurrido en un período de 80 años. Fotos: Archivo DINAMA, año 1927; Archivo IdEM, año 2007.



Figura 7.8. La línea roja, indica la posición actual del muro de la rambla. Obsérvese la superficie ocupada en 1945 por la rambla, con una escalera que bajaba en plena línea de marea alta. Foto: Archivo IdeM, 1945.



Figura 7.9. Hotel de los Pocitos en 1930, la línea roja punteada señala la ubicación de la berma a cada lado del edificio. El temporal de 1923 ya había destruido su terraza. Foto: CMDF.

Tal como se analiza en el **capítulo 6.2**, a partir de la evolución que ha tenido la playa de Pocitos usando el "*límite continental: playa año 2008*" (**L08**) queda de manifiesto una tendencia levemente creciente del área de playa de $6 \text{ m}^2/\text{año}$, aunque no significativa estadísticamente, lo que confirmaría que el efecto de las ampliaciones artificiales que ha tenido esta playa, enmascaran las tendencias a la disminución de superficie que quedan de manifiesto cuando se analiza la evolución utilizando el "*límite continental: playa año 1927*" (**L27**).

Para profundizar en este análisis, y confirmar o descartar las evidencias relevadas en el análisis anterior, en una segunda etapa se completó un registro que comprende 21 imágenes (cubriendo el período 1927-2008),-que confirma lo insinuado por el análisis anterior (usando la serie de 15 registros), la línea de tendencia por regresión lineal indica un retroceso de la superficie de playa estadísticamente significativa al 96%. Sin embargo, usando el límite **L08** obtenemos un resultado estadísticamente no significativo, indicando incluso una levísima tendencia al crecimiento del área de playa de $6 \text{ m}^2/\text{año}$, lo que confirmaría que el efecto de las ampliaciones artificiales que ha tenido esta playa, enmascaran las tendencias a la disminución de superficie.

La superficie seca de Pocitos en el periodo 1927-2008 se ha incrementado en 2,4 hectáreas rotando en sentido horario (ver **Figura 7.7**), y este incremento es sólo atribuible a las obras de recuperación producidas por la IdeM a partir de la década de 1930, por tanto como se analiza en el **capítulo 6.2**, los análisis temporales deben

hacerse como en Ramírez, tomando como comienzo de la serie a la imagen en que la playa se encuentre con la configuración más parecida a la actual.

Al analizar la playa Pocitos usando para ello las 18 imágenes posteriores al año 1954, el coeficiente de variación para el Límite del año 27 (**L27**), disminuye respecto a cuando se analiza la serie completa de 21 imágenes, pudiendo explicarse esta disminución de la variabilidad de los datos, porque a partir del año 1954 la playa presenta en todos los registros la actual configuración. Sin embargo analizando la serie de 18 imágenes usando como límite continental el Límite del año 2008 (**L08**), este coeficiente se incrementa dado que se está analizando los diferentes incrementos en área y las diversas modificaciones que de la playa se han realizado por parte de la Intendencia.

Por lo tanto, del análisis de la serie multitemporal obtenida para Pocitos, que abarcan un período desde 1927 hasta setiembre de 2008, se puede apreciar que en principio ha ganado en superficie seca, a pesar de caberle las mismas consideraciones que fueron hechas para Ramírez, en lo atinente al transporte mecánico de sedimentos, con el agravante de que esta playa tiene en algunos sectores, menos de 0,60 metros de espesor de arena de playa sobre sedimentos presumiblemente pleistocénicos. Por lo tanto, la aparente estabilidad actual de la playa Pocitos se puede relacionar a una “construcción” de área seca de playa por parte de la Intendencia (**capítulo 6.2**). Como puede apreciarse en los resultados gráficos tendenciales del **capítulo 6.3** la playa de Pocitos, sufrió menor impacto del temporal del año 1923 que Ramírez, presumiblemente debido a una altura mayor de la playa en ese momento, no obstante, sufre el impacto del temporal del 1944 (aprox. 2 msnm) y los temporales del año 2005 (del 29-31 de enero y del 23-24 de agosto).

Por otra parte, el relleno que se ha ido realizando a partir de la década de 1970 en la Punta de Trouville, para ganar terreno al mar, ha cambiado la dinámica de esta parte de la playa, que incluso en la primera mitad del siglo XX (**Figura 7.10**), era usada como sitio de desembarco, mientras ahora es una zona de muy escasa profundidad.

Al igual que para Ramírez, existe una clara relación entre los eventos ENSO y las fluctuaciones en el avance (ganancia en superficie) y retroceso (erosión) de la línea de costa (**capítulo 6.3**).

- 7.1.3. Playa Buceo

Fue realizada una búsqueda de documentos históricos sobre esta playa con escasos resultados. La razón de la falta de crónicas quizás esté en el temprano deterioro ambiental, relacionado con la ubicación contigua del basurero municipal que estaba

ubicado al costado del Cementerio del Buceo (donde hoy nace Bulevar Propios), en donde para 1917 según Ellis (1969) había depositadas verdaderas montañas de desperdicios. Dicho basurero ya estaba operativo para 1883, según crónicas bajo el seudónimo de Sansón Carrasco de quien fuera el primer Intendente de Montevideo (Muñoz, 1883), y la playa y alrededores estaba ocupada por manadas de cerdos, “millares de ratas” y gaviotas, todos alimentándose de los desperdicios, y algunos grupos de personas que vivían del reciclaje de la basura. En el declive del terreno hacia la playa estaba instalada una grasería que funcionaba procesando los desechos animales de la basura. Los restos del propio basural hoy funcionan como relleno de la “bajadita” a la rambla situada donde nace la Avenida denominada Propios (límite del período colonial para las tierras “propias”, o dehesas del Cabildo donde pastaba el ganado).

La descripción de Muñoz (1883), puede relacionarse con la existencia de *cusp* en esta playa para la época: “En torno todo era arena, festoneada la costa con graciosas curvas, terminadas en promontorios que se internaban en el agua...”, hecho inusual al presente en esta playa, lo que denota una mayor disponibilidad de arena y una granulometría más gruesa que la actual.

En la playa aún hoy persisten parte de los cimientos de lo que la tradición oral establece que fue una antigua fábrica de vidrio (**Figura 7.11**), instalada junto a la fuente de materia prima. Posteriormente en 1914, se instaló otra en las inmediaciones. Ambas presumiblemente aprovechando las características



Figura 7.10. Pocitos visto desde la Punta de Trouville, en el año 1917. Los barcos amarrados indican una relativa profundidad para la época en esa zona. Foto: CMDF-IdEM.

mineralógicas de esta playa, como materia prima. Si bien estos datos, no son concluyentes, podría interpretarse que la fábrica ubicada sobre la propia playa, estuvo ubicada ahí hasta el agotamiento de un *stock* sin capacidad de reposición.

En una carta de 1920²⁵ se constata la existencia de una cañada con agua permanente que desembocaba en la propia playa (**Figura 7.12**). Para este momento, el trazado de la mayor parte de su rambla figuraba como proyectada. Para el año 1939, ya la playa adquirió una configuración muy similar a la actual, con una superficie importante de arena húmeda, y con el talud que la bordea con vegetación arbórea, posiblemente con transparentes (*Myoporum laetum*), de los cuales aún existe algún relicto (**Figura 7.13**).

- Evolución de la superficie de playa Buceo y su dinámica

Esta playa si bien está parcialmente resguarda del oleaje del W, como su dirección normal a su tangente es N28°W está expuesta al oleaje de mar de fondo dominante (SE) y en menor medida al oleaje y vientos fuertes del S (ver **Figura 5.2**).

La granulometría de Buceo es fina con selección moderada a muy bien



Figura 7.11. Restos atribuidos a la fábrica de vidrio situados al pie del talud de la playa Buceo.



Figura 7.12. En esta cartografía de 1920, se observa la existencia de un curso de agua permanente que fue posteriormente entubado, y su importancia puede deducirse de que el puente era de mampostería (según la leyenda de la carta). Las curvas generales son cada 5 m y las principales cada 20 m. Fuente: Mapoteca, SGM.

^{25/} Carrasco. Carta del Depto. de Montevideo. Escala 1:20.000. Hoja E. Servicio Geográfico Militar. Levantamientos efectuados para la zona de interés en 1917. Edición 1920. (Mapoteca, SGM).

seleccionada, ligeramente más gruesa en dirección E, lo que sugiere una deriva dominante débil en esa dirección, reforzada por el transporte del viento en el mismo sentido. Así, la zona de mayor energía y tamaño de grano está en la zona de rompiente bajo el agua, único lugar en que esta playa tiene granulometría tamaño arena gruesa. Las muestras son progresivamente más asimétricas (asimetría negativa) a medida que se aproximan al extremo W, exhibiendo un padrón inverso al marcado por el tamaño medio, similar al resto de las playas. Buceo es una playa de arenas mucho más finas y mejor clasificadas que el resto de las playas analizadas (Panario et al., 2008a, 2008b).



Figura 7.13. La playa Buceo por el año 1939. Obsérvese que para ese momento ya la configuración de la playa es similar a la actual, presentando una pendiente suave y poca superficie de arena seca. Foto: CMDF-IdeM.

Ello es interpretado, considerando que puede recibir los finos y livianos provenientes de Malvín que escapan por la Punta Gomensoro, mediante corrientes de retorno que no tienen energía suficiente para retornar gruesos o densos, y por tanto, su procedencia sería mayoritariamente una selección de finos provenientes del Este, en la medida que los provenientes del W difícilmente podrían superar el canal de entrada del puerto del Buceo.

Para su análisis se toma como fecha inicial la imagen del año 1929, correspondiente al primer registro fotográfico en el cual ya el arco de playa se encuentra con una configuración similar a la actual, y los análisis tendenciales de Buceo, denotan que la evolución del área de playa, aunque tiende a disminuir $29 \text{ m}^2/\text{año}$, es tendencia no es estadísticamente significativa (**capítulo 6.3**), usando como indicador de línea de costa la **línea de marea alta previa (LMAP)** porque aparecía bien expresado en las fotos, debido a que estas playas reciben un menor impacto de tareas “mantenimiento”, y además por las propias características de la playa. También fue utilizado como *proxy* de línea de costa, el **antiguo límite de marea alta (ALMA)**, vistas las fluctuaciones que en esta playa tiene la superficie de arena seca, teniendo en cuenta que este indicador se traza precisamente separando arena seca de húmeda. Del análisis resulta que la superficie recubierta por arena seca tiende a aumentar $49 \text{ m}^2/\text{año}$ con una tendencia que no es estadísticamente significativa.

A partir de 1970, las fluctuaciones de la superficie de arena seca en la playa se acentúan y la arena seca se comporta en forma inversa a la superficie total,

apareciendo totalmente húmeda en la mayoría de las fotos que no pertenecen al período estival, e incrementando su superficie seca con excepción del 1985 y 2003, cuando disminuye su área total (**Figura 7.14**), lo cual puede interpretarse como que durante los temporales se produce incorporación a la playa de la duna o la escarpa. Debe señalarse, que en los últimos dos registros (2006 y 2007) la arena seca ha alcanzado los valores de registro más bajos de toda la serie (menores aun que el 1970), y explicables por los temporales de febrero y agosto del 2005 (**capítulo 6.3**), así como una clara relación entre los eventos ENSO de las fluctuaciones de la línea de costa.

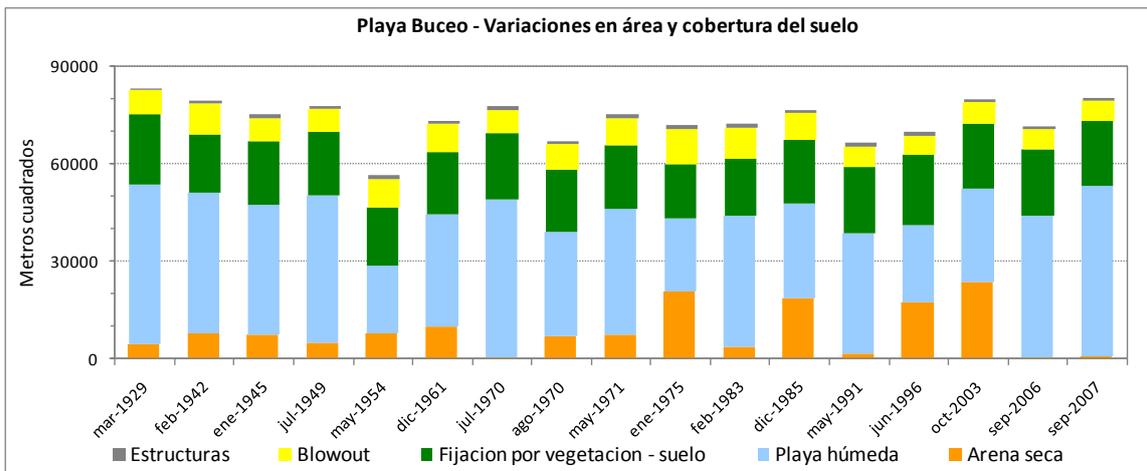


Figura 7.14. En la gráfica se presentan las fluctuaciones que ha tenido la superficie de la playa Buceo en el período 1929-2007, clasificadas en: arena seca, playa húmeda, área parquizada, estructuras y dunas parabólicas (*blowout*), entre el año 1929 y 2007. Nótese la variabilidad de los valores a lo largo del período, así como la disminución de la arena seca a partir de 2006.

• 7.1.4. Playa Malvín-Brava

Según Ellis (1969) la playa de Malvín presentaba enormes médanos blancos de hasta 20 metros de altura, que se extendían hasta donde hoy está ubicada Avenida Italia, a la altura de la calle Veracierto.

Las modificaciones que ha tenido esta zona, si bien son también intensas, comienzan más tarde que las de Pocitos y Ramírez. Es recién en 1896 que se lotea esa zona de playas, para establecer a las lavanderas que eran desplazadas de la zona de los Pocitos, de ahí el primer nombre de esta zona: "Lavaderos del Este".

Por tratarse de una playa muy alejada del casco urbano no se encontraron casi referencias anteriores al siglo XX, fecha en que ya se comenzó a poblar como lugar de veraneo, inaugurando su rambla circa de 1920, por tanto es a partir de esta fecha que

adquiere su actual configuración, es así que puede utilizarse la totalidad de registros disponibles a partir de marzo de 1929.

En cartografía de 1920²⁶ se observa que desde esta playa hacia el Arroyo Carrasco, era una zona cubierta por arenales (no dunas), indicada en esta carta como “terrenos arenosos” (Figura 7.15).

A su vez, en esta cartografía aparecen

dos lagunas cerca de la desembocadura del Arroyo Malvín, estructuras que son restos de anteriores migraciones de su curso. En un plano cercano al 1850²⁷ a este arroyo se refieren como “Balvín”, quien fue el propietario de un saladero ubicado sobre esta playa a fines del 1700, lo que indica la persistencia de este curso fluvial, incluso durante la “Pequeña Edad del Hielo”.

La denominada playa Brava de Malvín, aún presenta construcciones remanentes de la instalación de un cine sobre la playa (Figura 7.16) y un colector de saneamiento, construcciones ambas que por interferir el tránsito de sedimentos eólicos la primera y por reflejar la energía de la ola al quedar descubierto el segundo, aún producen severas consecuencias sobre el arco de playa.

- Evolución de la superficie de playa Malvín - Brava y su dinámica

En la playa Malvín la dirección normal a su tangente es N3E (ver Figura 5.2), y está orientada oblicua al oleaje dominante (*swell* y vientos del SSE). Mientras en la playa

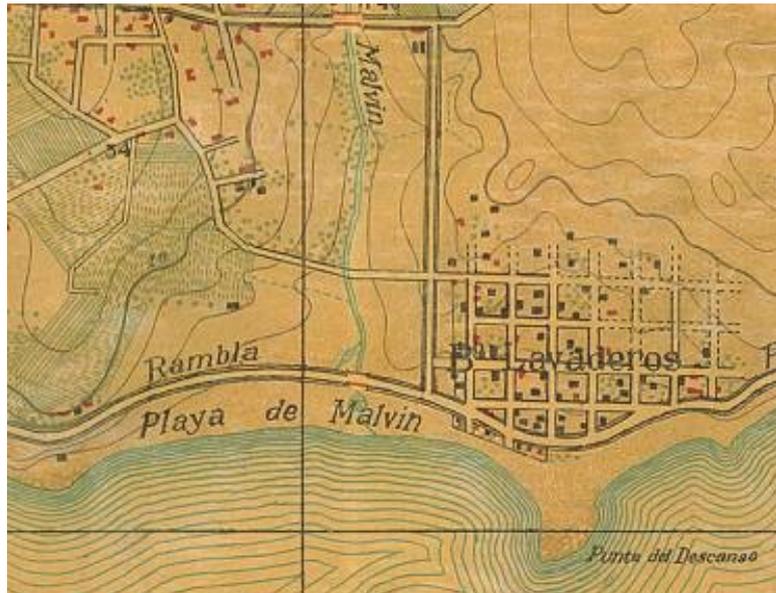


Figura 7.15. En esta cartografía de 1920, se observa la existencia de lagunas ubicadas en la desembocadura del Arroyo Malvín, que son relictos de anteriores migraciones de su cauce. Nótese el ancho de la playa en la Brava, ubicada a la derecha de la Punta del Descanso. Fuente: Mapoteca, SGM.

^{26/} Carrasco. Carta del Depto. de Montevideo. Escala 1:20.000. Hoja E. Servicio Geográfico Militar. Levantamientos efectuados para la zona de interés en 1917. Edición 1920. (Mapoteca, SGM).

^{27/} Plano topográfico y curvas de profundidad de la costa del Río de la Plata desde Punta Espinillo hasta Punta Gorda. Escala 1:20.000. Sin fecha ni datos de autores. (Mapoteca, SGM).

Brava de Malvín la dirección normal a su tangente es N37W, es decir, está orientada oblicua al oleaje dominante (*swell* y vientos del SSE) en una situación intermedia entre la playa de Pocitos, donde este llega casi paralelo a la playa, y Malvín, en la cual llega muy oblicuas.



Figura 7.16. Cine al aire libre ubicado sobre la playa Brava, año 1945. Foto: CMDF-IdeM.

La granulometría de la playa Malvín y Brava es media, cerca del límite con las arenas finas. La variación lateral es insignificante en la porción subacuática de la playa, en cambio en la porción subaérea, las muestras en la berma y rompiente tienden claramente a ser más gruesas, o hacia el W o hacia el E, según el régimen de olas anterior al momento del muestreo, acompañadas de una tendencia a la granoselección en sentido inverso según la situación. La simetría de las muestras tiende a ser negativa hacia el W y positiva hacia el E. No es raro encontrar muestras bimodales (Panario et al., 2008a, 2008b); de estos resultados se deduce la presencia de deriva litoral en Malvín de sentidos opuestos, uno originado por vientos del SW (fuertes) y otro originado presumiblemente por el mar de fondo, dominante del SE. La deriva de la desembocadura del Arroyo Malvín (antes de su canalización) tanto en una como en otra dirección (a partir de la estructura de sus barras), reafirma la misma conclusión. Como se señala anteriormente, la componente del E que sería la dominante se confirma con su distintiva composición mineralógica. La Brava tiene en cambio deriva dominante hacia el W, concordante con la dirección del *swell*, tornándose casi reflectiva en el sector próximo al tómbolo donde las olas de mar de fondo llegan casi paralelas.

Para su análisis se toma como fechas iniciales la imagen del año 1929 para Malvín y la del año 1939 para la Brava, correspondientes respectivamente a los primeros registros fotográficos, en los cuales ambos arcos de playa se encontraban con una configuración similar a la actual. Los análisis tendenciales de la playa Malvín-Brava (**capítulo 6.3**) fueron realizados con una serie de 17 imágenes para cada una, que abarcan los períodos 1929-2007 y 1939-2007 respectivamente, usando como *proxy* de línea de costa la **línea de marea alta previa (LMAP)**, dado que aparecía bien expresada en las

fotos, debido a que estas playas reciben un menor impacto de tareas “mantenimiento”.

El análisis multitemporal de la playa de Malvín, no indica cambios muy importantes en la superficie de arena expuesta para el período, insinuando una leve tendencia de crecimiento de la superficie de playa de 112 m²/año, que si bien indica una ligera recuperación, su significación estadística es baja (74%). Esta tendencia se mantiene constante a partir de 1991, fecha en que se comienzan a establecer vallados para la recuperación de duna primaria en la playa, luego de un fuerte retroceso de la línea de costa ocurrido a partir de 1985. Del análisis multitemporal de la playa Brava de Malvín, surge como resultado principal que el área de playa tiende a disminuir unos 90 m²/año, con una tendencia altamente significativa estadísticamente ($p = 0,001$) (capítulo 6.3).

Del análisis resulta que la superficie recubierta por arena seca presenta una tendencia a disminuir en Malvín de 200 m²/año con una significación estadística muy baja (75%) y en Brava de 52 m²/año con una significación estadística baja (81%). En Malvín está relacionado al crecimiento de áreas parquizadas y en Brava al aumento de playa húmeda (Figura 7.17, Figura 7.18 y Figura 7.19).

Los retrocesos observados no guardan relación en el caso de Malvín con los temporales registrados, no obstante denota la misma señal de retroceso en el año

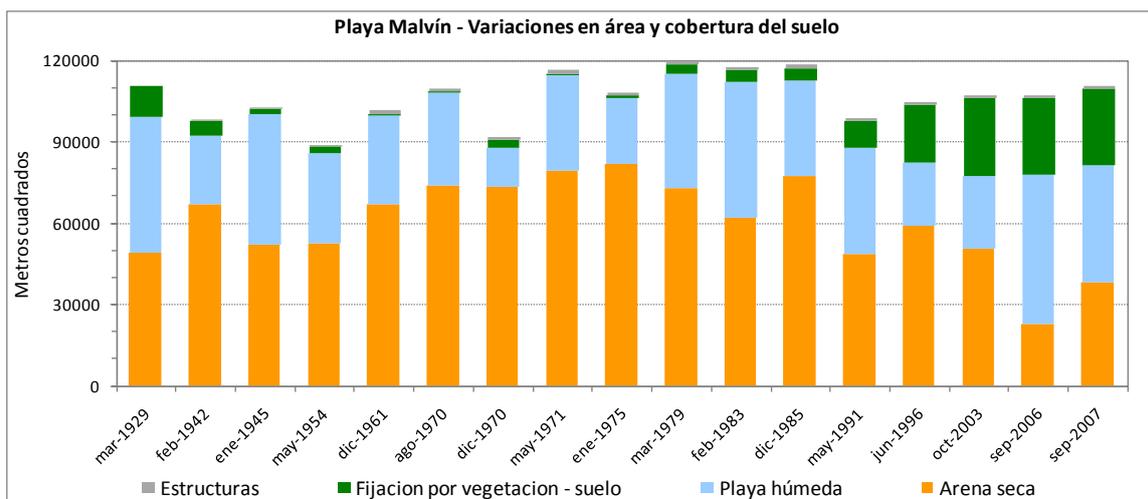


Figura 7.17. En la gráfica se presenta las fluctuaciones que ha tenido la superficie de la playa Malvín, período 1929-2007, clasificadas en: arena seca, playa húmeda, área parquizada, estructuras. Nótese la variabilidad de los valores. En Malvín el área parquizada aumenta en los últimos años en detrimento de la arena seca.

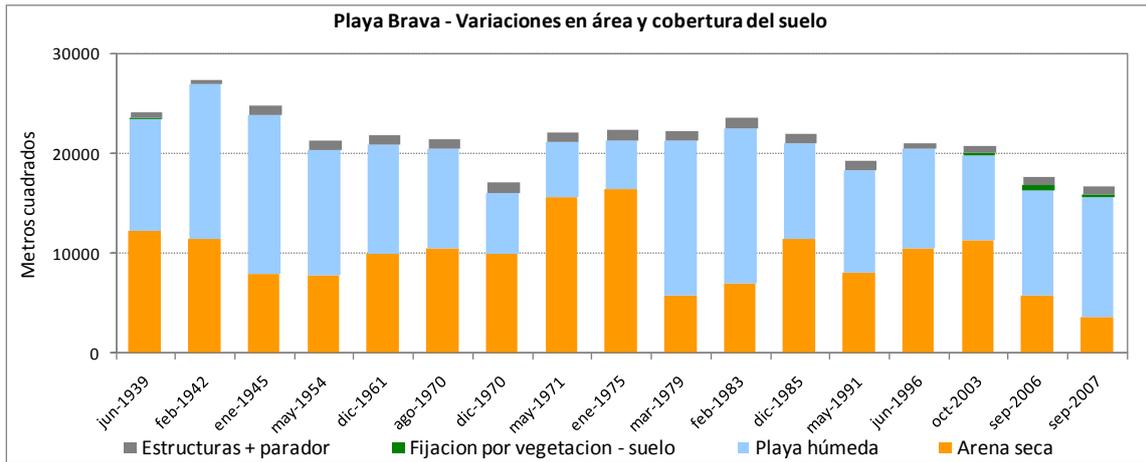


Figura 7.18. En la gráfica se presentan las fluctuaciones que ha tenido la superficie de la playa Brava de Malvín, período 1939-2007, clasificadas en: arena seca, playa húmeda, área parquizada, estructuras. Nótese la variabilidad de los valores. En Brava aumenta la zona de playa húmeda en detrimento también de la arena seca.

1970 (entre agosto y diciembre) que el resto de las playas analizadas (**capítulo 6.3**) y se diferencia de las mismas por no registrar significativamente los efectos de los temporales del 2005, sin embargo el sector de la playa de Malvín, denominado Brava si lo registra. Si bien, usando el *proxy antiguo límite de marea alta (ALMA)*, tanto Malvín como Brava, muestran en los registros posteriores al 2005, una disminución de la arena seca lo que puede relacionarse a los procesos erosivos que dicha playa está sufriendo relacionado a los efectos que las olas a partir de vientos fuertes del SW provocan sobre la superficie de arena seca.



Figura 7.19. En la foto aérea de de mayo de 1991 se observa la distribución de los vallados. La trama roja indica la ubicación de los parches de parquización en 2007, que se observan en la foto panorámica color. La trama verde indica la posición de la vegetación presente en la imagen de 1929 (fundamentalmente conformada por arboles). La ubicación actual de la rambla en azul. Fuentes: Archivos vectoriales y foto 1991, IdeM.

A partir del año 1954, comienza una tendencia a la colonización por vegetación de la Punta del Descanso, con una tendencia altamente significativa, lo que puede explicarse por una desaturación en sedimentos del flujo (Panario et al., 2008a, 2008b), asociada a los procesos erosivos evidenciados en la playa Brava de Malvín. Esta zona del tómbolo que une a ambos sectores de playa, tenía un mayor grosor del prisma de playa para la primera mitad del siglo XX, así como un mayor sector de arena seca (**Figura 7.20 y Figura 7.21**).

También para la playa Malvín-Brava existe una clara relación entre los eventos ENSO y las fluctuaciones en el avance (ganancia en superficie) y retroceso (erosión) de la línea de costa (**capítulo 6.3**).

7.2 RELACIONES ENTRE EL SISTEMA FLUVIAL, EL SISTEMA DUNAR Y LAS PLAYAS

Los arroyos que desembocan en el estuario exterior del Río de la Plata presentan en general retrocesos de la línea de costas muy significativos afectando obras de infraestructura, no ocurre lo mismo en las vías de drenaje y barras de lagunas costeras que desembocan en la costa oceánica, a excepción del arroyo Valizas (**capítulo 6.1**). Esta diferencia se puede relacionar con el hecho por detrás de unos pocos cientos de metros de la línea de costa existe el denominado “tapón de barro” del Río de la Plata proveniente de los ríos Paraná y Uruguay, que recubre las arenas subactuales del estuario exterior (MTOPI/PNUD/UNESCO, 1979), mientras en la costa atlántica existe abundancia de provisión de sedimentos subactuales en la playa subacuática los que aún alimentan a las playas oceánicas. Por ello, al no tener esta fuente, las playas aledañas a las desembocaduras en el estuario exterior son playas en equilibrio inestable, que dependen para su estabilidad de arenas provenientes por deriva de playas a montante, o provenientes de la alta cuenca y/o de recirculación entre dunas móviles y el cauce cuando ellas se encuentran presentes.

7.2.1. DESEMBOCADURA DEL ARROYO PANDO

Así en el caso del Arroyo Pando (**capítulo 6.4**) ha quedado de manifiesto la importancia de los aportes de los sistemas dunares al ciclo de la arena y a la conservación de las playas aledañas a las desembocaduras, y también sus presumibles efectos en otras playas ubicadas en la dirección de la deriva litoral. En efecto, del balance sedimentario realizado, a partir del año 1960 en que las dunas ya estaban totalmente fijadas queda en evidencia que el aporte realizado por acción eólica era de dos órdenes de magnitud que el de las arenas provenientes de la alta cuenca, siendo la pérdida parcialmente



Figura 7.20. Sobre la imagen del año 2006, se superpone el *shape* de la rambla (azul), y la línea de costa trazada por LMAP para el año 1939 (rojo). A la izquierda, obsérvese sobre la playa de Malvín el lugar de la desembocadura del arroyo del mismo nombre. A la derecha de la Punta del Descanso, puede observarse el retroceso, cambio de forma y orientación que ha tenido la playa Brava. A diferencia de la imagen mostrada en la Figura 67, el tómbolo ha disminuido en arena seca y ha sido colonizado por macrófitas (señalado en verde). Fuentes: Archivos vectoriales, IdeM; foto 2006, *Google Earth 5*.



Figura 7.21. Vista panorámica de la Punta del Descanso. En primer plano la playa Brava, pudiendo apreciarse su ancho y la importante componente de arena seca. Al fondo la playa Malvín con el arroyo del mismo nombre (que fuera entubado en el período 1945-1961), y parcelas con forestación y construcciones ubicadas en la propia playa. Foto: 14 de enero de 1942, SSRFAU.

compensada por aportes provenientes desde el mar, los cuales, generaron el campo de dunas actualmente fijado, y por tanto la mayor parte de la arena aportada actualmente queda confinada entre la urbanización y el mar. Debe tenerse en cuenta que una parte importante de esta arena, previo a la forestación, funcionaba como un sistema de dunas transgresivas que avanzaban tierra adentro, por tanto se perdían del sistema.

A partir de los resultados obtenidos en el **capítulo 6.4** puede analizarse que si bien las migraciones de las desembocaduras son procesos naturales, muchas veces estos procesos, se retroalimentan con las intervenciones antrópicas. A su vez, queda de manifiesto una clara relación entre anomalías de vientos fuertes relacionados al ENSO (**capítulo 6.3**), y las fluctuaciones importantes de la línea de costa, tanto negativas (La Niña) como positivas (El Niño).

En la desembocadura del Arroyo Pando, a su vez se produjeron una serie de modificaciones que forzaron su comportamiento migratorio. A comienzos de la década de 1990, se autorizó la extracción de arena a partir de las dunas ubicadas sobre la barra de la margen E de la desembocadura, la cual fue realizada hasta tal profundidad que en superficie asomaba la freática. Como respuesta a partir del año 1995, comienza otro fuerte retroceso atribuible al menos en parte a dicha extracción de arena y a procesos asociados (formación de *blowout*) que forman lóbulos de arena que van haciendo migrar la barra y empujando el canal contra la margen de Neptunia. A partir de ese período se intensifican nuevamente las migraciones de la barra y se recobra una intensidad (velocidad de pérdida de playa) que se aproxima a la del período 1951-1967, el que estuvo relacionado a la consolidación de la forestación y urbanización del área de dunas móviles.

- 7.2.1. Desembocadura del Arroyo Carrasco

En el caso de la desembocadura del Arroyo Carrasco, las fluctuaciones observadas en la línea de costa, no guardan relación con los temporales que han dejado señales en la mayoría de las playas urbanas de Montevideo (**capítulo 6.3**), por ejemplo no existe señal de retroceso en el año 1970 y se diferencia al igual que Malvín de las otras playas analizadas, por no registrar significativamente los efectos de los temporales del 2005., Sin embargo los retrocesos observados guardan relación en el caso de Carrasco con las anomalías de vientos fuertes relacionados a La Niña.

Los procesos de migración de la desembocadura del Arroyo Carrasco, también parecen retroalimentarse con las intervenciones antrópicas, habiendo llegado a migrar hacia el E más de un kilómetro para el período de análisis.

A diferencia del Arroyo Pando y de otros arroyos como Solís Grande y Solís Chico situados en el estuario exterior del RdIP (a algunos kilómetros hacia el E), el Arroyo Carrasco se mantuvo más estable y su retroceso es comparable en magnitud, al registrado por las playas del departamento de Montevideo situadas al W (**capítulos 6.2 y capítulo 6.3**), retrocesos que en algunos casos (playas de bolsillo) se pueden explicar por el incremento del nivel medio del Río de la Plata, siendo también parcialmente explicable por el aumento de los caudales de los ríos Paraná y Uruguay, y/o por la subida del NMM durante el siglo XX (Nagy et al., 2015a, 2014, 2013).

La diferencia con el Arroyo Pando parece radicar en que en el Carrasco no existían relaciones de intercambio y dunas móviles ni un déficit notorio de sedimentos provenientes a montante de la deriva dominante. A partir de 1973 comienza a hacerse sentir el efecto de las obras de canalización del humedal del mismo nombre y ese incremento en el flujo de sedimentos más que compensa las pérdidas sufridas en el período anterior como se expresa en el **capítulo 6.4**. El balance sedimentario desarrollado denota la importancia y magnitud de cada una de las fuentes de arena de esta desembocadura, que para el caso, se trata de un depósito holócenico que es puesto en recirculación a partir de la canalización para el drenaje de un humedal en dicha cuenca.

7.3 COMPORTAMIENTO DEL CONJUNTO DE LOS CASOS DE ESTUDIO

A efectos de explicar las oscilaciones frecuentes en términos de pérdida-ganancia de superficie de playa, fueron explorados diversos impulsores de cambios climáticos, que pudieran explicar los cambios observados en la mayoría de los casos de respuestas coincidentes en todas o la mayoría de las playas, a pesar de las notorias diferencias en los parámetros físicos de los arcos analizados. En efecto, entre las playas, se observan diferencias notorias en orientación y composición mineralógica, de lo que se desprende diversidad de fuentes de sedimentos. Ramírez y Pocitos tienen orientaciones casi opuestas, sin embargo, presentan composición mineralógica similar (origen principalmente del atrito de rocas de la Fm. Montevideo); pero sus derivas son divergentes, constituyendo dos playas independientes entre sí y de las demás playas de Montevideo (ver **Figura 5.3**).

Ramírez tiene diferencia estadísticamente significativa en la mineralogía de su arena con $p < 0,01$ con Buceo y Malvín, pero no con Pocitos. Pocitos con igual nivel de

significación se diferencia de Malvín y Buceo (ver **capítulo 5**). Dado que Carrasco y Pando tienen similar fuentes de sedimentos que Malvín, seguramente también se diferencian de Pocitos y Ramírez. De lo expuesto se deduce, que las playas en estudio tienen al menos dos fuentes de sedimentos diferentes, más allá de la diferencia que implica para las desembocaduras (fundamentalmente para la del Arroyo Pando) el aporte desde la propia vía de drenaje, estos sedimentos por ser mayormente de recirculación, no se expresan claramente en su mineralogía.

Las playas en estudio presentan además diferentes orientaciones: Malvín netamente orientada al S, Ramírez al W, Pocitos al E, teniendo el resto orientaciones intermedias; tienen a su vez diferentes gradientes de profundidad, que las hacen variar de disipativas a intermedias, y casi reflectiva en parte de la Brava de Malvín, en razón de todo ello resulta particularmente relevante analizar las causas de las coincidencias en su comportamiento a través de los años.

Se exploraron períodos de precipitaciones particularmente intensas en las cuencas de los arroyos Pando y Carrasco, a los efectos de determinar si el aporte de sedimentos de estos, se manifestaba rápidamente en el área de playa expuesta en sus desembocaduras.

Se exploraron coincidencias de relevamientos aerofotográficos posteriores y cercanos en el tiempo (entre meses a un año) con eventos excepcionales de tormentas del SSE que producen crecientes significativas del nivel del mar (sudestadas), encontrándose tres eventos de coincidencia con elevaciones de más de 2 msnm o más. Es de señalar, que los temporales de más de 2 msnm son los que superan el prisma de las playas en estudio, en la mayor parte de su superficie (**capítulo 6.2**).

En efecto estas playas tienen muy poca expresión espacial por encima de 1,70 msnm que es la altura de la crecienete extraordinaria media (MTOP/PNUD/UNESCO, 1979), y por tanto, dado que los grandes impactos actuales se producen con subidas de 2 m, bastaría una subida del nivel medio de 0,30 msnm, para que alcancen un punto crítico.

También se exploró la existencia de relación entre las crecientes de los ríos Paraná y Uruguay, en forma individual y conjunta, dado que se sabe provocan subidas del nivel medio del Río de la Plata (Bidegain et al., 2005; Nagy et al., 2015b, 2005), y con ello la eventualidad del retroceso de la línea de costa.

Menéndez y Re (2005), sostuvieron que la contribución de las crecientes de los ríos Paraná y Uruguay al nivel medio del Río de la Plata podía ser casi imperceptible a la altura de Montevideo estimándola por modelos; más recientemente otros autores,

sostienen que estas crecientes pueden realizar una contribución mayor. Así, sobre la base de datos empíricos sostienen que el estuario del Río de la Plata entre 1902 y el 2003, ascendió en su nivel medio en el entorno de los 11 cm en Montevideo y 17 cm en Buenos Aires (Forbes, 2002; Bidegain et al., 2005; Nagy et al., 2005; Magrin et al., 2007; Bidegain y Nagy, 2008), como consecuencia del Cambio Global (Bidegain et al., 2005). La comparación entre estos eventos y la situación de estas playas del estuario medio, contrariamente a lo esperable, muestra que el período en que Pocitos, Ramírez y también Malvín, presentan la mayor recuperación, resulta coincidente con las mayores crecientes de los ríos Paraná y Uruguay, y por tanto con las mayores alturas del nivel medio del Río de la Plata. De lo que se desprende que no existe correlación negativa entre la superficie de playa y estos eventos.

Fueron encontradas coincidencias entre las crecientes extraordinarias del RdIP de los años 1943, 1993 y 2005, y el registro de retrocesos de playas, la señal estuvo presente en todos los casos en que hubo coincidencia si exceptuamos a Malvín (sí se registra para la Brava de Malvín). Sin embargo, Malvín tuvo señal en la superficie de arena seca, pero no en la playa total, lo que puede ser interpretado que durante las *sudestadas* recibe sedimentos del cuello del tómbolo (que la une a Brava), al superar las olas su altura máxima, y con eso compensa las pérdidas vinculadas a estos eventos.

Analizadas los registros de precipitaciones excepcionales, no se detectaron tendencias claras vinculadas a eventos de precipitaciones extraordinarias en las cuencas de los arroyos Pando y Carrasco, inferidas a partir de registros en las estaciones meteorológicas ubicadas en sus cuencas.

- 7.3.1. Anomalías de circulación atmosférica general

Finalmente, se analizó la existencia de relaciones de la evolución de las playas y eventos como El Niño y La Niña, habiéndose comprobado como fuera mencionado anteriormente, una fuerte correlación entre el ENSO y las fluctuaciones observadas en la línea de costa (**capítulo 6.3**). De los trabajos de Severov et al. (2004), Nagy et al. (2007, 2008) y Bidegain y Nagy (2008) se desprende que existe señal en el Océano Atlántico sud occidental de los eventos El Niño y La Niña. Ocurriendo un debilitamiento de la corriente de Malvinas y un fortalecimiento de la corriente de Brasil para El Niño, y lo inverso para La Niña. De ello puede deducirse la hipótesis, de que podrían asociarse a La Niña una mayor incidencia de vientos fuertes del cuadrante Sur y más específicamente de los vientos del SW; y asociarse a los años de El Niño un incremento de los vientos provenientes del N y de las direcciones comprendidas del E al SE.

Habiendo coincidencia entre eventos de La Niña y retrocesos de la línea de costa en todas las playas analizadas, se decidió probar estas hipótesis de que anomalías de circulación podrían explicar los retrocesos observados (**capítulo 6.3**).

Para realizar el reanálisis, se consideraron los eventos de ocurrencia de La Niña de intensidad media o intensa, o eventualmente débil si ocurrió en el marco de una serie (como por ejemplo: 1973C+, 1974C- 1975C+); focalizando como variable las anomalías a nivel de vientos zonales de superficie, se observa en la zona costera Uruguaya, una anomalía positiva de vientos del cuadrante SW. Si el reanálisis se realiza sobre los eventos El Niño, la anomalía es inversa con dominio de vientos provenientes del N y de direcciones que comprenden del E al SE en la zona costera, con independencia que se tome sólo los eventos de El Niño fuerte, o todos los reportados desde 1950 al 2004.

El comportamiento observado puede ser interpretado en el sentido de que los vientos del SW que generan olas de corto período e invierten la deriva en la mayoría de las playas analizadas (excepto Ramírez), y aunque elevan menos el nivel de las aguas que los del SSE, producen retrocesos de la línea de costa, los que luego son compensados durante períodos normales o eventos El Niño, en los cuales se invierte la **anomalía de vientos**.

En el caso particular de Ramírez, playa en que la deriva coincide con los vientos del SW, si bien esta no se modifica, la playa al quedar enfrentada directamente a estos vientos, igual recibe el impacto de los mismos si ocurren con una frecuencia mayor a la normal.

Durante la ocurrencia de los eventos de La Niña, el Río de la Plata a la altura de Montevideo, se encuentra entre -5 a -10 cm por debajo de su nivel medio climático y durante los eventos El Niño se encuentra entre +5 a +10 cm por encima del mismo (Gustavo Nagy *com. pers.*), sin embargo, las playas son más impactadas durante los eventos La Niña, debido a una mayor frecuencia de ocurrencia de vientos del SW, mientras que durante los eventos de El Niño una disminución en la frecuencia de vientos del SW, se expresa en las playas analizadas por su relativa estabilización o por su ganancia en área expuesta (**capítulo 6.3**).

7.4. CONOCER PARA PREVENIR. LAS PLAYAS URBANAS

Un análisis del conjunto del sistema estudiado, las playas urbanas de Montevideo, debiera permitir poder identificar en él, las variables rápidas (sociales o físicas) y las variables lentas, a los efectos de poder prever la proximidad de un colapso, o sea, que

contribuyan a la comprensión del *fenómeno*, en lugar de centrar el análisis solamente en los *efectos*.

Cuando se piensa en la evolución cultural requerida para enfrentar al Cambio Climático y la velocidad de las respuestas al mismo, por ejemplo, la subida del nivel del mar; no queda tan claro *a priori*, cuál puede ser considerada la variable lenta y cuál la variable rápida. Si hablamos de respuestas a nivel global, todo indica que la variable lenta es la social, pero si se trata de respuestas a nivel local, quizás la variable lenta sea el Cambio Climático.

No obstante, como se desprende de los casos estudiados, al menos algunos de ellos han pasado por etapas diversas de colapso y reorganización por fuertes intervenciones de la administración municipal, donde la variable reestabilizadora fue la social.

Para el caso particular de las playas en estudio, la sociedad montevideana fue generando experiencia de los desastres, como el del temporal de 1923, que hizo se demolieran los barrios bajos del casco histórico y se realizara la costanera amurallada (**Rambla**) de 4 km de longitud que la bordea. Luego, como respuesta a otros eventos extraordinarios, se retiraron edificios y se cambió de ubicación parte de la rambla de Pocitos, hecho que permitió compensar parte del área perdida de esta playa. No obstante, puede observarse en la actualidad una respuesta lenta de la administración municipal encargada del manejo del sistema en relación a los cambios de circulación atmosférica que se presentan como variables rápidas, ejemplo: aumento en la frecuencia de eventos climáticos extremos provocados por El Niño y La Niña.

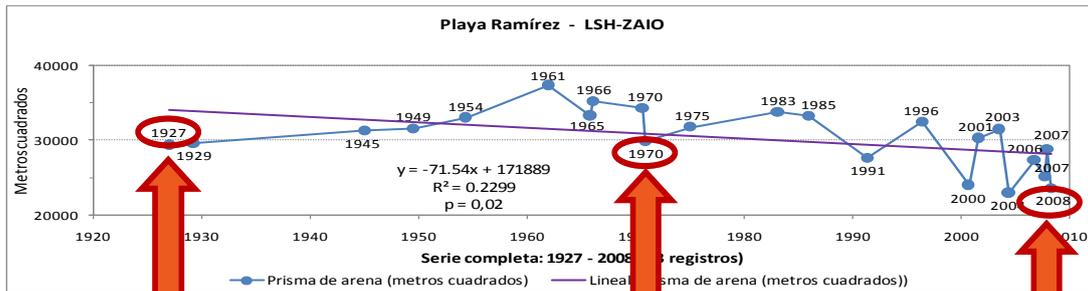
Los procesos de desorganización severa y posterior reorganización, se fueron trasladando de las proximidades del casco antiguo hacia zonas más alejadas, a medida que estas se iban urbanizando. Así, las playas ubicadas en la bahía de Montevideo, contiguas a la ciudad amurallada colonial, han desaparecido totalmente. Ramírez, sufrió el impacto de la construcción temprana de la costanera, que le hizo perder las tres cuartas partes de su superficie original, a pesar de ser un “paseo” muy apreciado ya en el Siglo XIX; en tanto Pocitos, como era una localidad alejada del casco urbano, su playa sufrió la explotación de arena hasta al menos 1930, lo que redujo considerablemente su superficie.

Debe destacarse que desde 1929, las medidas de manejo incluían aspectos tan perjudiciales para el sistema, como retirar la arena que se depositaba contra el muro y llevarla al *swash*, o directamente depositarla dentro del agua, aprovechando las bajantes, acciones que se mantuvieron hasta el 2008. A su vez, las operaciones de

limpieza, implican el retiro de varios camiones de “basura”, de la cual más del 80% es arena.

Además, toda la arena que vuela desde la playa a la costanera, no es devuelta al sistema, de lo que desprende que con una gestión y manejo adecuado, algunas de estas playas pueda tener una cierta recuperación, que necesariamente habrá de revertirse luego, en la medida en que continúe subiendo el nivel de mar por efecto del Calentamiento Global.

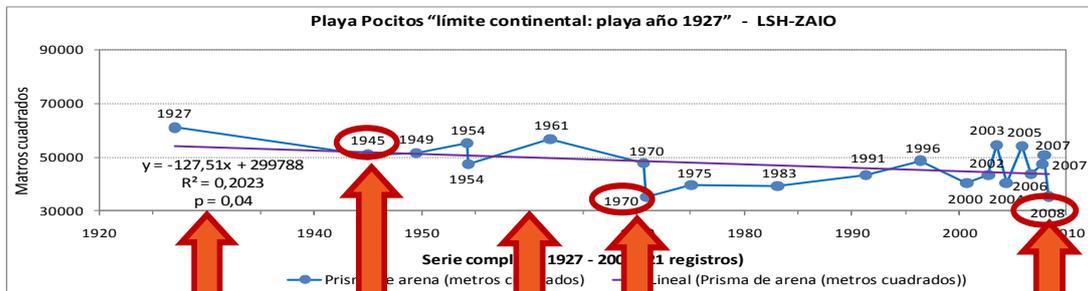
En los hechos, analizadas las decisiones de restauración, acciones mitigatorias, o proyectos de investigación, que se han implementado para las tres playas urbanas en las cuales se han realizado actividades de gestión importantes, como puede observarse en la **Figura 7.22**, las mismas siempre se producen como respuesta a períodos de erosión o retroceso severos de playa (mayoritariamente concomitantes con eventos fuertes de La Niña).



Obras civiles:
retiro descanso,
espigones, etc.

Proyecto
MTOPI/
PNUD/
UNESCO

Convenio
IMM-FC



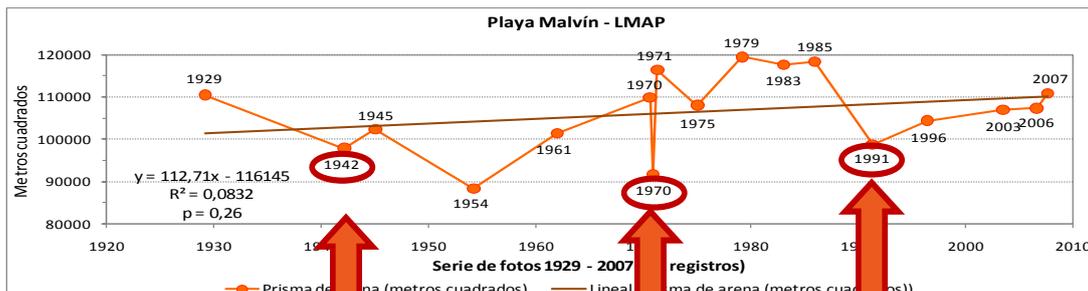
Desvío
del Arroyo
Pocitos

Comienzo obras
de rectificación
de la rambla

Recarga
con
arena de
Ramírez

Proyecto
MTOPI/
PNUD/
UNESCO

Convenio
IMM-FC



Canalización del
Arroyo Malvín

Proyecto
MTOPI/
PNUD/
UNESCO

Construcción de
vallados

Figura 7.22. En las gráficas superiores, las flechas indican los momentos en que se tomaron acciones de investigación, restauración y/o mitigación en las playas por parte de la administración, realizadas como respuesta a periodos de erosión o retroceso severos de playa (mayoritariamente concomitantes con eventos de La Niña fuertes).

Capítulo 8.

Recomendaciones para la gestión



8.1. COMO RESPONDER EN TÉRMINOS DE ESCENARIOS CLIMÁTICOS A LAS MODIFICACIONES DE LAS PLAYAS URBANAS

En la planificación de la resiliencia costera, Beatley (2009) sostiene que frente a este tipo de amenazas, toda futura planificación y gestión costeras deben reflejar un compromiso con el concepto de resiliencia. Sostiene que la resiliencia costera debe convertirse en el diseño principal y el principio de planificación para orientar todo el desarrollo futuro y todas las decisiones futuras de infraestructura; estando implícito en esa idea, dar un énfasis en la adopción de medidas para aumentar la capacidad de adaptación, para estar listos para una futura crisis o desastre. Gestionar la resiliencia es la clave, es anticipación, consciente y deliberada. La resiliencia costera es la capacidad de recuperación que va más allá de las medidas reactivas para prevenir o manejar un desastre. Se necesita un enfoque global sobre lo que hace a una comunidad resiliente, incluyendo factores tales como el ahora denominado “capital social” y el sentido que una sociedad le da a un sitio en particular.

La situación actual de estas playas urbanas, ya es de manejo con intervenciones moderadas, tales como la reposición parcial de la arena que se retira junto con los desperdicios, la construcción de vallados que -sin impedirlo- han minimizado las pérdidas de arena hacia la costanera, entre otras.

A estas medidas, en el corto plazo se pueden aun a bajo costo incorporar otras, tales como re-vegetar el cordón dunar con las especies nativas características, eliminar especies exóticas que han edafizado espacios que corresponden a la ubicación del cordón dunar secundario.

Esta situación plantea la necesidad de tomar medidas a corto plazo y de diseñar estrategias de largo plazo, que permitan fortalecer la resiliencia del sistema, y por tanto su persistencia como playas con arena seca el mayor tiempo posible. La certeza con la que se cuenta, es que se arribará a una situación límite, dado que ya el sistema no tiene posibilidades de trasladarse continente adentro, manteniendo sus estructuras como ocurre con playas con un grado de naturalidad mayor. El proponer medidas de ordenamiento territorial que impliquen la remoción de la **rambla** (costanera), serían fuertemente impopulares, dada la identificación de la sociedad montevideana con esa obra de infraestructura considerada un paseo democrático, de encuentro y socialización sin discriminaciones (Remedi, 2005).

Aun así, reconociendo el valor y la importancia de la rambla, y defendiéndola como un derecho social desde el imaginario de los habitantes de la ciudad, que la consideran un

valioso activo social y cultural, una herramienta para el cambio, y un símbolo de inspiración, también se debe estar alerta, para no ser víctima de su hechizo, que también puede ser una causa de pérdida de memoria, de contacto con la realidad, conformismo, nostalgia, y falta de visión y sensibilidad social (Remedi, 2005) y ambiental.

En el largo plazo, no habrá otra solución que reforzar el amurallamiento de la actual costanera, y preparar playas más distantes, donde aún sea posible realizar un ordenamiento territorial, que incluya un manejo integrado costero, de forma de permitir que frente a las perturbaciones el sistema se reestructure con todos sus componentes continente adentro. Para ello, debiera preverse la no urbanización mediante dejar áreas verdes, de todo o parte del espacio costero comprendido por debajo de la cota de +5 m por sobre el NMM que aún no esté consolidado como ciudad. Esta cota se corresponde al nivel máximo de ingesión marina holocénica, lo que da un nivel de seguridad razonable.

Como se observar de los escenarios generados por el IPCC (**Figura 8.1**) y lo confirmado por datos empíricos, se puede inferir que el componente del cambio climático - subida del nivel del mar, se comporta acorde al escenario más pesimista, entonces de mantenerse las actuales tendencias, en algo más de treinta años se estaría alcanzando la situación límite para las más afectadas de estas playas.

8.2 RECOMENDACIONES PARA LA GESTIÓN MUNICIPAL DE LAS PLAYAS URBANAS DE MONTEVIDEO

Visto que las playas urbanas de Montevideo manifiestan una pérdida tanto de superficie como de volumen a lo largo del tiempo, en algunos casos de carácter significativo, y que las causas de este retroceso de la línea de costa pueden atribuirse mayoritariamente a acciones antrópicas; y que el aumento observado del nivel del estuario no parece explicar las variaciones observadas, puede esperarse que con un manejo adecuado incluso puedan revertirse las tendencias de degradación, por lo menos en el corto plazo (5 a 10 años).

Como consecuencia de su escaso espesor se constata la susceptibilidad de: la playa Ramírez, el sector SW de Pocitos, la playa Buceo, la porción E de la playa Malvín y la playa Brava, al impacto de riesgos naturales como fuertes temporales de mar o de viento (estos eventos extraordinarios pueden remover en horas toda su arena).

Teniendo en cuenta que estas playas en su mayor parte exponen perfiles cóncavos, y por tanto son vulnerables a la acción de los temporales, en particular teniendo en consideración el escaso espesor del prisma de arena (que oscila entre 40cm y 2m), y

que la porción subaérea tiene pendientes bajas, con valores situados en el entorno de los 2º, sería necesario mantener un ancho de por lo menos 86 m, para que el prisma sedimentario tenga una cota superior al alcance del temporal anual promedio (1,70m).

Como además las playas han sido sometidas artificialmente a modificaciones críticas de su configuración, las que han producido cambios morfológicos y funcionales importantes, que las condujo a estados distantes de su condición natural y/o deseable; al presente son muy vulnerables a los temporales extraordinarios.

Se recomiendan algunas medidas:

* Se deben eliminar las numerosas estructuras que propician la pérdida de arena (escaleras, rampas y construcciones anexas a la costanera).

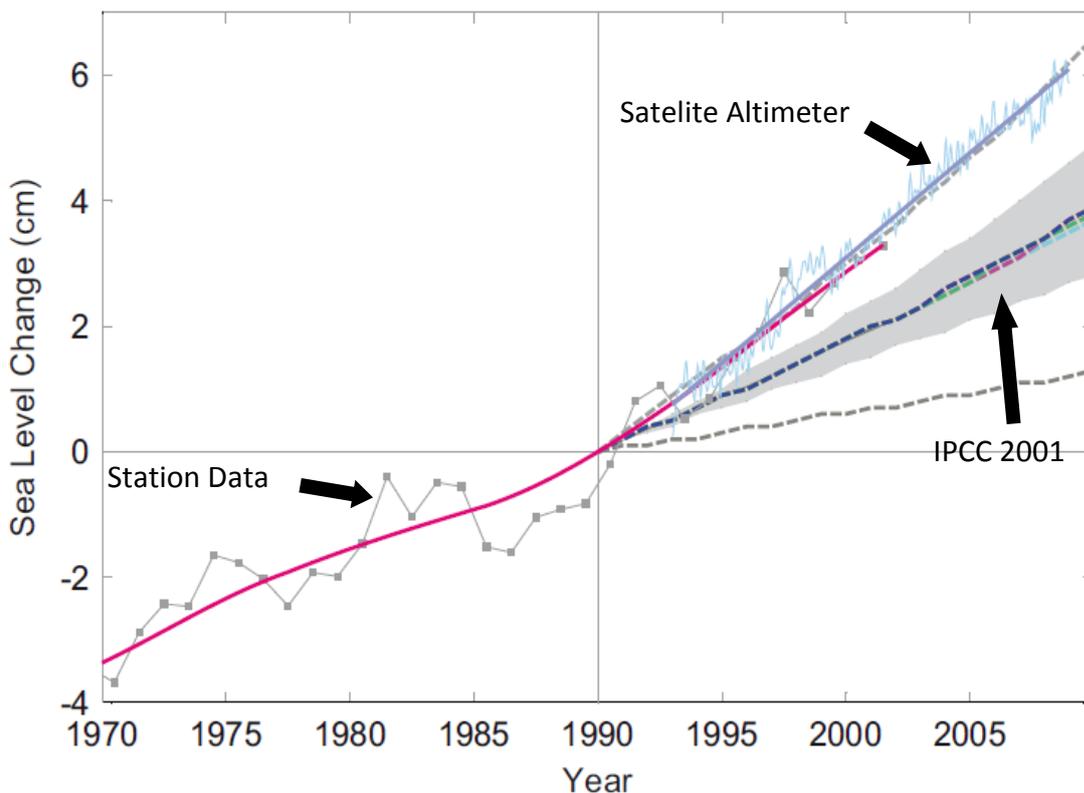


Figura 8.1. Cambio en el nivel del mar desde 1970 hasta 2008, en relación con el nivel del mar en 1990. Las líneas continuas están basadas en observaciones suavizadas para eliminar los efectos de la variabilidad interanual (las líneas claras conectan puntos de datos). Los datos de los últimos años se obtienen a través de sensores de los satélites. La línea envolvente de las previsiones del IPCC se muestra a efectos de comparación; incluye las líneas discontinuas, que marcan cada previsión y el sombreado, que representa la incertidumbre sobre las previsiones (Rahmstorf *et al.*, 2007).

* Las actividades particularmente delicadas como los movimientos de arena con maquinaria pesada, no debieran realizarse sin la supervisión de un técnico, y se debiera limitar el ingreso de maquinaria pesada a la playa, siempre que sea posible, sustituyéndolas por actividades manuales de recolección de residuos, y maquinaria liviana para el retransporte de arena y otros materiales (basura, herramientas, etc.).

* Se recomienda el establecimiento de vallados para la restauración del cordón dunar primario. En principio, en todas aquellas áreas cuya cota supere los 2 m sobre el nivel del mar, y su extensión a las otras áreas, en la medida que se vaya produciendo la recuperación del sistema. Dicho vallado debe realizarse de forma continua y ubicado de forma paralela a la línea de costa, y se deberán realizar pasarelas elevadas para permitir el pasaje de las personas, sin que destruyan ni alteren estos cordones en reconstrucción.

* Los cordones generados deben inmediatamente ser colonizados con especies nativas como *Juncus sp.*, *Panicum racemosum*, *Senecio selloi*, *Cakile maritima*, *Spartina sp.*, etc.) controlando la aparición de especies exóticas, en especial la *Carpobrorus edulis* (garra o uña de león). A su vez se debe realizar una remoción paulatina de exóticas de las zonas dunares actualmente parquizadas de las playas. Se recomienda retirar del cordón dunar primario todas las especies arbóreas, arbustivas o gramíneas exóticas (ej. acacias, pinos, *Cynodon dactylon*, etc.), y en el caso de existir vegetación exótica sobre los otros cordones, sustituirlas por especies nativas como *Dodonea viscosa* (candela).

* Las políticas de manejo de playas han de conciliar intereses muchas veces antagónicos, situación que ha llevado en algunos países (UE en particular) a establecer foros de discusión, información, debate y divulgación. La población debe ser involucrada en diversos niveles. El nivel de participación, también determina que técnicas deben usarse para ayudar a la población de todas las edades a integrarse en el proceso de manejo. El más básico es informarla de las tareas y planes en ejecución, pero el nivel deseable, para lograr la resiliencia es establecer una relación entre gestores y usuarios con participación en las decisiones. Hay muchos ejemplos de actividades de gestión que fracasaron, no debido a que la población discrepara con la iniciativa, sino debido a que la sociedad no estuvo involucrada o ni siquiera fue informada (Nordstrom, 2004).

Capítulo 9.

Conclusiones



9.1. CONCLUSIÓN GENERAL

La costa uruguaya del Río de la Plata se encuentra sometida a fuertes impulsores de cambio vinculados a diversos factores, entre los que se destacan: *a)* un proceso acelerado de urbanización espacialmente continua, *b)* el efecto de obras de infraestructuras mal planificadas, *c)* inercias del pasado tanto naturales como de intervenciones antrópicas, *d)* el efecto del cambio climático sobre el clima de olas y la subida del NMM, entre otras, mientras la sociedad uruguaya no parece estar preparada para anticiparse a la acción de estos impulsores de cambio.

9.2. CONCLUSIONES PARTICULARES

Respecto al objetivo número **1) Realizar una caracterización dinámica de la zona costera**; se concluye:

- 1) La caracterización realizada permitió analizar en contexto las playas y desembocaduras seleccionadas como áreas de estudio.
- 2) Para la caracterización realizada se eligió como unidad de análisis unidades funcionales (celdas) de circulación de sedimentos. Esta categorización se considera que es un marco adecuado para actividades de planificación y gestión futuras de la costa.

Respecto al objetivo número **2) Conocer la dinámica actual y tendencias evolutivas de playas urbanas del área metropolitana de Montevideo, Uruguay**; se concluye:

- 3) Como se desprende de los casos de estudio, estas playas se encuentran en una situación altamente inestable, observándose tendencias que permiten avizorar su colapso antes de fines del presente siglo por efecto del Cambio Climático y el concomitante aumento del nivel del mar, bajo cualquiera de los escenarios propuestos por el IPCC.
- 4) El colapso que se avizora, se vincula a que el prisma de playa actual apenas sobrepasa la altura de las crecientes con una tasa de retorno bianual, y a su vez, su superficie se encuentra en forma total o parcial, situada por debajo de máximas históricas de crecientes en todas las playas estudiadas.

5) Las playas urbanas analizadas, son en la actualidad más sensibles al manejo de las mismas y a otros efectos antropogénicos directos, que a la elevación del nivel medio del Río de la Plata.

Respecto al objetivo número **3) Analizar las fluctuaciones de la línea de costa en relación a los impulsores de cambios climáticos (ascenso del nivel del mar, régimen de vientos, precipitaciones), permitiendo prever su resiliencia en relación a escenarios futuros de Cambio Climático;** se concluye:

6) Las fluctuaciones negativas (procesos erosivos) observadas en las playas analizadas, serían en principio respuesta a tempestades del SSE de más de 2 metros de elevación en el nivel de las aguas, y/o de años con anomalías positivas de vientos del SW, mayoritariamente asociados a eventos La Niña fuerte.

7) La aparente resiliencia de las estructuras físicas (bermas) de la mayoría de las playas de Montevideo, puede estar asociada a los cambios de circulación atmosféricos acaecidos fundamentalmente en los últimos cuarenta años, en los que se constata una disminución en la frecuencia de grandes tempestades del SSE (dos años con estos eventos desde 1975 a la fecha), y a un incremento de la frecuencia y velocidad de los vientos moderados del ESE, concomitante con disminución de los del N y un aumento de periodos de calma.

8) Las fluctuaciones positivas (procesos constructivos) observadas en las playas analizadas, serían en principio respuesta a vientos moderados del ESE, mayoritariamente asociados a eventos El Niño.

9) De los resultados de esta tesis, si bien puede desprenderse que las playas Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín, aún son resilientes en sus estructuras físicas, y por tanto, no estarían sufriendo en lo inmediato cambios sustanciales en su conformación espacial; un llamado de atención merecen los cambios que pueden ocurrir con alta probabilidad en el mediano plazo.

10) De mejorarse el manejo y la gestión, no es descartable que se pueda obtener una recuperación de algunas de las playas analizadas, o al menos frenar por un tiempo su retroceso.

11) De los resultados de esta tesis, si bien puede desprenderse que las playas Ramírez, Pocitos, Buceo y Malvín, se encuentran aún en un estado de resiliencia, y por tanto, no estarían sufriendo en lo inmediato cambios sustanciales en su

conformación; un llamado de atención merecen los cambios que pueden ocurrir con alta probabilidad en un mediano plazo. En efecto estas playas tienen muy poca expresión espacial por encima de 1,70 msnm que es la altura de la creciente extraordinaria media y por tanto, dado que los grandes impactos actuales se producen con subidas de 2 m, bastaría una subida del nivel medio de 0,30 msnm, para que alcancen un punto crítico.

12) La mencionada poca expresión en superficie de estas playas por encima de los 2 m, restringe las posibilidades de recuperación de estructuras (cordón dunar) mediante procedimientos de tablaestaqueados o vallados u otras medidas blandas como la repoblación con especies vegetales formadoras de dunas, al quedar expuestas a su removilización por crecientes de ocurrencia frecuente.

13) La toma paulatina de conciencia a nivel social y de la administración municipal de la importancia de su gestión y manejo sobre bases científicas, mejoran el pronóstico a mediano plazo, no obstante el ascenso del NMM, probablemente las hará colapsar antes del final del presente siglo.

Respecto al objetivo número **4) Evaluar cuantitativamente el impacto sobre la dinámica sedimentaria costera, de la forestación de dunas con especies exóticas y la urbanización en zonas de fuerte intercambio de arena entre estas y la playa, a través del curso inferior de vías fluviales**; se concluye:

14) A partir de los datos obtenidos en el balance sedimentario primario, se corrobora la importancia en el ciclo de la arena del rol de las vías de drenaje que reciben aportes significativos de arenas provenientes de dunas o de otras fuentes, y su relación con los cambios en los sectores de arcos de playa asociados a ellas.

9.3. CONCLUSIONES METODOLÓGICAS

Respecto al objetivo número **5) Generar indicadores que permitan relativizar y comparar las tendencias detectadas en los análisis multitemporales de imágenes**; se concluye:

15) Los índices generados permitieron relativizar los valores obtenidos, demostrándose pertinentes para esta clase de análisis, al permitir examinar los procesos particulares que ocurren en cada playa, en una perspectiva de

comparación entre procesos y playas, que expresa mejor las magnitudes de los fenómenos. Estos índices deben ser contrastados en futuras investigaciones en otras condiciones ambientales.

Respecto al objetivo número **6) Evaluar la consistencia en el estudio de playas urbanas, de los análisis por secuencias cartográficas a través de S.I.G. y la complementación de los mismos con otras fuentes documentales;** se concluye:

16) Para el análisis de sistemas tan frágiles como los costeros, se entiende pertinente retroceder tanto como sea posible en el tiempo para comprender los procesos a los que el mismo ha sido sometido así como, que inercias puede tener del pasado, usando para ello todos los registros disponibles incluidos también las crónicas de viajeros y cartas antiguas. Esto facilita seleccionar *a posteriori* con conocimiento de causa, cual es el período a partir del cual se pueden hacer los análisis de significancia estadística; o sea poder conocer el devenir del sistema para poder diferenciar entre estados del mismo, en estudios que abarcan escalas de tiempo prolongadas que incluyen el período en que se produce el Cambio Global.

17) Para interpretar correctamente las tendencias actuales, y por tanto la capacidad de resiliencia, se comprueba que las series de documentos gráficos conviene restringirlas para el análisis estadístico a una serie en que el sistema presente una configuración general similar a su estado actual. Lo dicho no obsta a que si se quiere tener clara noción del funcionamiento actual y su perspectiva futura, en un escenario de Cambio Global, se deba tener un registro tan completo como posible de la historia anterior incluso del Holoceno, pues parte de lo que ocurre en el presente puede ser aún inercia de un pasado más o menos remoto.

18) La utilización de los modelos NCEP/NCAR y *Twentieth Century Reanalysis Project dataset* (Version V2) de la NOAA, para la realización de un reanálisis de los cuadros sinópticos pretéritos relacionándola a series de datos ambientales, resultó ser una herramienta potente, incluso para prever transformaciones ecosistémicas vinculadas al Cambio Climático.

19) Los análisis retrospectivos, si no son realizados en un marco de rigurosidad metodológica, conocimiento de los archivos (ordenamiento, procesos de catalogación, etc.), adecuado relevamiento de metadatos, y conocimiento del

funcionamiento de los sistemas en estudio, pueden inducir a errores de interpretación de los resultados obtenidos.

9.4. OTRAS CONCLUSIONES

Habiéndose detectado la incidencia de eventos El Niño y La Niña asociados a anomalías de circulación atmosférica que pueden repercutir, no sólo en la estabilidad de las playas, sino además en el comportamiento de todo el ecosistema, se concluye:

20) Comprobado el efecto, es dable esperar que estos procesos afecten a todo el área de playas del atlántico sur, que por su ubicación y orientación estén sujetas a temporales del SW, en particular, a las playas urbanas que por sus propias constricciones, presentan poca capacidad de resiliencia.

21) Dada la incidencia de la circulación atmosférica en todos los compartimentos del ecosistema, puede estimarse que estas anomalías a nivel del Río de la Plata, afecten no sólo a la superficie de playa, sino además a los componentes bióticos del ecosistema, tanto subaéreos como subacuáticos, por modificaciones directas de otras variables como puede ser: salinidad, temperatura, turbidez, velocidad y dirección de corrientes.

9.4 PERSPECTIVAS FUTURAS DE INVESTIGACIÓN

Los resultados de esta tesis permiten resaltar como futuras líneas de investigación:

i) Ampliar el análisis realizado en el **capítulo 6.2** y **capítulo 6.4** a otras playas de la zona costera uruguaya, a efectos de contrastar los resultados de la tendencia a la erosión costera con nuevos casos de estudio, explorando las alertas detectadas ante la subida del NMM.

ii) Continuar explorando la relación entre los eventos ENSO y los procesos de erosión / acreción de playa que fuera explicitada en el **capítulo 6.3**, incluyendo más casos de estudio, ampliando el período de análisis hasta el presente, y explorando relaciones con otras teleconexiones.

iii) Chequear la utilidad y potencia de los indicadores cuali-cuantitativos presentados en el **capítulo 6.5** en nuevos casos de estudio.

Referencias bibliográficas ²⁸

- Allen, J.R.L. 2000. Morphodynamics of Holocene salt marshes: A review sketch from the Atlantic and southern North Sea coasts of Europe. *Quaternary Science Reviews*, 19, 1155–1231.
- Álvarez, S., P.L. Lomas, B. Martín-López, M. Rodríguez, C. Montes. 2006. *La Síntesis Emergética (“Emergy Synthesis”)*. *Integrando Energía, Ecología y Economía*. Fundación Interuniversitaria Fernando González Bernáldez, Madrid. 77 p. (Serie Monografías Nº 2).
- Anders, F.J., M.R. Byrnes. 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore and Beach*, 59: 17-26.
- Angulo, R.J., P.C.F. Giannini, K. Suguio, L.C.R. Pessenda. 1999. Relative sea-level changes in the last 5500 years in southern Brazil (Laguna-Imbituba region, Santa Catarina State) based on vermetid ¹⁴C ages. *Marine Geology*, 159: 323-339.
- Azzimonti, R.J.C. 2003. *Bioestadística aplicada a Bioquímica y Farmacia*. Ed. Universitaria de la UNAM, México. (2a Edición). Disponible on-line en: <http://www.fceqyn.unam.edu.ar/bio>. Fecha de consulta 16-7-2003.
- Barrios Pintos, A. 1971. *Montevideo, Los Barrios I*. Editorial Nuestra Tierra. Impresora Rex S.A., Montevideo.
- Barton, C.C., J.S. Dismukes, R.A. Morton. 2003. Complexity analysis of the change in shoreline position at Duck, NC. *Proceedings Coastal Sediments, '03*, 7p.
- Beatley, T. 2009. *Planning for Coastal Resilience: Best Practices for Calamitous Times*. Island Press, Washington. 181 p.
- Bertalanffy, L. Von. 1976. *Teoría General de los Sistemas. Fundamentos, desarrollos, aplicaciones*. Fondo de Cultura Económica, México. 312 p.
- Bidegain, M., G. Nagy. 2008. *Reporte Final del proyecto “Building capacity in Coastal Climate Change and Variability: PRECIS-based climate models downscaling in Uruguay”*. Facultad de Ciencias, UdelaR; Unidad de Cambio Climático, MVOTMA; British Embassyen Uruguay. 34 pp.
- Bidegain, M.; F.R.M. Caffera, F. Blixen, V. Pshennikov, J.J. Lagomarsino, E.A. Forbes, G.J. Nagy. 2005. Tendencias climáticas, hidrológicas, y oceanográficas en el Río de la Plata y Costa Uruguaya. En: Barros, V., A. Menéndez, G. Nagy. (Eds): *El Cambio climático en el Río de la Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, cap. 14, pp. 137-143.

²⁸/ En el **Capítulo 6 – Resultados**, cada apartado incluye su bibliografía particular.

- Bischoff, S. 2005. Sudestadas. En: Barros, V., A. Menéndez, G. Nagy. (Eds.): *El Cambio climático en el Río de la Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, cap. 6, pp. 53-69.
- Boak, E.H., I.L. Turner. 2005. Shoreline Definition and Detection: A Review. *Journal of Coastal Research*, 21(4): 688–703.
- Bracco, R., C. Ures. 1998. Las variaciones del nivel del mar y el desarrollo de las culturas prehistóricas del Uruguay. *Revista do Museu de Arqueologia e Etnologia*, Universidade de São Paulo, Brasil. 8: 109-115.
- Bracco, R., L. del Puerto, H. Inda, D. Panario, C. Castiñeira, F. García-Rodríguez. 2010. The relationship between emergence of moundbuilders in SE Uruguay and climate change inferred from opal phytolith records. *Quaternary International*, Doi: 10.1016/j.quaint.2010.05.025.
- Brand, F.S., K. Jax. 2007. Focusing the meaning(s) of resilience: resilience as a descriptive concept and a boundary object. *Ecology and Society*, 12(1): 23. Disponible on-line en: <http://www.ecologyandsociety.org/vol12/iss1/art23/>
- Brazeiro A., O. Defeo. 1999. Effects of harvesting and density-dependence on the demography of sandy beach populations: the yellow clam *Mesodesma mactroides* of Uruguay. *Marine Ecology Progress Series*, 182: 127-135.
- Brazeiro, A. 2000. Biodiversidad en hábitats costeros: playas y puntas rocosas de Uruguay. En: Domínguez, A. R.G. Prieto. (Eds.): *Perfil ambiental del Uruguay 2000*. Editorial Nordan-Comunidad, Montevideo, 127-141 pp.
- Brazeiro, A., S. Méndez, G. Ferrari. 1997. The first toxic bloom of *Alexandrium tamarense* in Uruguay: associated environmental factores. *Atlántica*, 19: 19-29.
- Brunn, P. 1962. Sea-level rise as a cause of shore erosion. *Journal of Waterways and Harbors Division, Proc. ASCE*, 88(WW1): 117-130.
- Brunsdon, D., R. Moore. 1999. Engineering geomorphology on the coast: lessons from west Dorset. *Geomorphology*, 31: 391-409.
- Butt, T., P. Russell. 2000. Hydrodynamics and cross-shore sediment transport in the swash zone of natural beaches: a review. *Journal of Coastal Research*, 16, 255–268.
- Camilloni, I. 2009. *Primer Informe "Escenarios de Inundaciones"*. Reporte de Argentina al proyecto Estudio Regional de la Economía del Cambio Climático en Sudamérica (ERECC_SA, CEPAL).
- Camilloni, I., V. Barros. 2000. The Paraná River response to the 1982-83 and 1997-98 ENSO events. *Journal of Hydrometeorology*, 1: 412-430.
- Camilloni, I., V. Barros. 2003. Extreme discharge events in the Paraná River and their climate forcing. *Journal of Hydrology*, 278: 94-106.
- Capra, F. 1982. *El punto crucial: Ciencia, sociedad y cultura naciente*. Editorial Troquel S.A., Buenos Aires, 514 p.

- Carranza, A., F. Scarabino, L. Ortega. 2008. Distribution of Large Benthic Gastropods in the Uruguayan Continental Shelf and Río de la Plata Estuary. *Journal of Coastal Research*, 24(1): 161-168.
- Casciani, M., M. Musso. 1995. *Caracterización sedimentológica y geomorfológica de la playa de Kiyú. Departamento de San José, Uruguay*. Trabajo monográfico del curso de Geomorfología, Facultad de Ciencias. 33 p.
- Castiñeira, C., D. Panario, R. Bracco Boksar, O. Gutiérrez. Concheros en la costa atlántica uruguaya y su vinculación con la dinámica litoral. En: *Arqueología argentina en los inicios de un nuevo siglo, Anales del XIV Congreso Nacional de Arqueología Argentina, Rosario, 2001*. Laborde Libros, Rosario, Argentina, 635–644. pp.
- Crosara, A., G. Acosta, N. García, J. Hernández, C. Calandre, M. Bergstein, F. Fabiano, M. Calosso (Equipo Redactor). 1989. *Plan de Ordenación turística de la costa oceánica*. Instituto de Cooperación Iberoamericana de España - Ministerio de Turismo Uruguay. 213 p.
- Crowell, M., S.P. Leatherman, M.K. Buckley. 1991. Historical shoreline change; Error analysis and mapping accuracy. *Journal of Coastal Research*, 7: 839-852.
- Crowell, M., S.P. Leatherman, M.K. Buckley. 1993. Shoreline change rate analysis: Long-term versus shortterm. *Shore and Beach*, 61(2): 13-20.
- Crowell, M., S.P. Leatherman. (Eds.). 1999. Coastal erosion mapping and management. *Journal of Coastal Research*, Special Issue 28: 196 pp.
- Crutzen, P.J., E.F. Stoermer. 2000. The “Anthropocene”. *Global Change Newsletter*, 41: 12-13.
- Davies, J.H.L. 1964, A morphogenic approach to world shorelines. *Zeitschrift für Geomorphologie*, 8: 127-142.
- De Alava, D. (Coord.). 1994. *Estudios para la Propuesta de un Manejo Integrado de la Zona Costera del Departamento de Rocha*. Montevideo, UNCIEP, Facultad de Ciencias. 72 p, 2 anexos, 10 láminas
- De Álava, D., D. Panario. 1996. La Costa Atlántica: ecosistemas perdidos y el nacimiento de un monte de pinos y acacias. En: *Almanaque Banco de Seguros del Estado*. Montevideo. 44-51 pp.
- De Lillis, M., L. Costanzo, P.M. Bianco, A. Tinelli. 2004. Sustainability of sand dune restoration along the coast of the tyrrhenian sea. *Journal of Coastal Conservation*, 10(1): 93-100.
- Dean, R.G. 1982. *Models for beach profile response*. Technical Report N° 30. University of Delaware, Newark.

- Defeo, O., A. Brazeiro. 1994. Distribución, estructura poblacional y relaciones biométricas de la vieira *Zygochlamys patagonica* en aguas Uruguayas. *Comunicaciones de la Sociedad Malacológica del Uruguay*, 66-67(7): 362-367.
- Defeo, O., D. Lercari, A. De Álava, J. Gómez, G. Martínez, E. Celentano, J.P. Lozoya, S. Saucó, D. Carrizo, E. Delgado. 2006. Ecología de playas arenosas de la costa uruguaya: una revisión de 25 años de investigación. En: Menafra, R., L. Rodríguez, F. Scarabino, D. Conde. (Eds.): *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, 363-370 pp.
- Defeo, O., E. Ortiz, J.C. Castilla. 1992. Grow, mortality and recruitment of the yellow clam *Mesodesma macrtoides* in Uruguayan beaches. *Marine Biology*, 114: 429-437.
- Díaz Pineda, F., M.F. Schmitz. 2003. Tramas espaciales del paisaje. Conceptos, aplicabilidad y temas urgentes para la planificación territorial. En: García Mora, M.R. (Coord.): *Conectividad ambiental: Las áreas protegidas en la Cuenca Mediterránea*. Junta de Andalucía, Sevilla. pp. 9-28.
- Díez, J.J. 2000. A review of some concepts involved in the sea-level rise problem. *Journal of Coastal Research*, 16, 1179–1184.
- Domínguez, F., J. Gracia, G. Anfuso. 2004. Tasas de avance/retroceso de la línea de costa mediante morfometría fotogramétrica en el sector Sanlúcar de Barrameda – Rota (Provincia de Cádiz). *Revista de la Sociedad Geológica, España*, 17(1-2): 71-86.
- Duarte, C. M. (Coord.), J.C. Abanades, S. Agustí, S. Alonso, G. Benito, J.C. Ciscar, J. Dachs, J.O. Grimalt, I. López, C. Montes, M. Pardo, A.F. Ríos, R. Simó, F. Valladares. 2009. *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. (Edición ampliada y revisada). Colección Divulgación. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. 251 p.
- Duarte, C. M. (Coord.), S. Alonso, G. Benito, J. Dachs, C. Montes, M. Pardo, A. F. Rios, R. Simó, F. Valladares. 2006. *Cambio global. Impacto de la actividad humana sobre el sistema Tierra*. Colección Divulgación. Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Madrid. 106 p.
- Elfrink, B., T. Baldock. 2002. Hydrodynamics and sediment transport in the swash zone: a review and perspectives. *Coastal Engineering*, 45: 149–167.
- Etcheverry, N. 2007. El verano y las playas de Montevideo. (19.12.2007) Disponible on line en: http://nw.espectador.com/1v4_contenido.php?id=111638&sts=1 (consultado el 2/12/2009)
- Ferrari, G., S. Méndez, A. Brazeiro. 2000. *Dinophysis acuminata associated to diarrhetic shellfish poisoning reports in Uruguay*. Publicación de la Comisión Técnica Mixta del Frente Marítimo, 18: 91-95.
- Folke, C. 1995. Ecologist and economist can find common ground. *Bioscience*, 45(4): 283-294.

- Forbes, E. 2002. Variabilidad del Nivel Medio del Mar en Montevideo (1902-2000). *En: Proceeding of AIACC Río de la Plata regional Workshop*, (Montevideo, 25-29 de setiembre de 2002).
- Fryberger, S.G., A.M. Al-Sari, T.J. Clisham, S.A.R. Rizvi, K.G. Al-Hinai. 1984. Wind sedimentation in the Jafurah sand sea, Saudi Arabia. *Sedimentology*, 31: 413-431.
- Galzerano, J., G. Piñeiro, E. Ramos, D. Panario. 1993. *Dinámica de las playas: Costa Azul, Bello Horizonte y Guazuvira. Propuesta de manejo*. Montevideo, UNCIEP. Facultad de Ciencias. Informe realizado a solicitud de la Comisión de Fomento del Balneario de Costa Azul. 22 p. y anexos.
- García Moyano, G. 1979. *Pueblo de los Pocitos*. (2da. ed.) Montevideo, Ediciones de la Banda Oriental, 100 p.
- García, V. 1908. Proyecto de saneamiento de la Cuenca de los Pocitos. *Revista de la Asociación de Ingenieros y Arquitectos del Uruguay*, vol. 10.
- Gelfenbaum, G., C.R. Sherwood, C.D. Peterson, G.M. Kaminsky, M. Buijsman, D.C. Twichell, P. Ruggiero, A.E. Gibbs, C. Reed. 1999. The Columbia River Littoral Cell: A Sediment Budget Overview. *En: Kraus, N.C., W.G. McDougal. (Ed.), Coastal Sediments (Proceedings of the 4th International Symposium on Coasting Engineering and Science of Coastal Sediment Processes held in Hauppauge, New York)*, 1660-1675 pp.
- Georescu-Roegen, N. 1971. *The entropy law and the economic process*. Cambridge, Mass. Harward University Press. 450 p.
- Giménez, J.L., B. Yannicelli. 2000. Longshore paterns of distribution of macroinfauna on a uruguayan sandy beach: an analysis at different spatial salesand of their potential causes. *Marine Ecology y Progress Series*, vol. 1999: 111-125.
- Gómez Pivel, M.A. 2001. *A costa atlântica uruguaia como um sistema geomorfológico*. Tesis, Maestría en Oceanografía Física, Química y Biológica, Universidad Federal do Rio Grande, Brasil.
- González, V., F. Pesce, F. Quintans, A. Rodríguez, S. Zerbino. 2003. *Diagnóstico Ambiental Parque Lacustre Garzón. Departamento de Rocha*. Curso Diagnóstico Ambiental, Maestría en Ciencias Ambientales, Facultad de Ciencias. Montevideo, Uruguay, 60 p., anexos y cartografía.
- Gunderson, L.H., C.S. Holling (Eds.) 2002. *Panarchy, umderstanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington DC, 507 p.
- Gutiérrez, O., D. Panario. 2005. Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando, Uruguay. Geografía histórica y SIG, análisis de tendencias naturales y efectos antrópicos sobre sistemas dinámicos. *Xeográfica. Revista de Xeografía, Territorio e Medio Ambiente*, 5: 107-126.

- Gutiérrez, O., D. Panario. 2006. Evolución de la desembocadura del Arroyo Pando (Canelones, Uruguay): ¿tendencias naturales o efectos antrópicos. En: Menafrá, R., L. Rodríguez, F. Scarabino, D. Conde. (Eds.). *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, 391-400 pp.
- Hammer, Ø., D.A.T. Harper, P.D. Ryan. 2001. PAST: Paleontological Statistics Software Package for Education and Data Analysis. *Paleontologia Electronica*, 4(1): 9 pp. Disponible on-line en: http://palaeo-electronica.org/2001_1/past/issue1_01.htm
- Herzig, M. 1993. *Informe preparado a partir de la Misión Técnica de Ramsar, enmarcada dentro de las acciones de seguimiento a la aplicación del Procedimiento de Monitoreo al Sitio Ramsar "Bañados del Este y Franja Costera", Uruguay*. Responsable en Jefe de la Misión Técnica, Dr. Hiraldo Cano, F. Gland, Suiza.
- Hesp, P.A. 2002. Foredunes and blowouts: Initiation, geomorphology and dynamics. *Geomorphology*, 48: 245–268.
- Hesp, P.A., M.J. Shepherd, K. Parnell. 1999. Coastal geomorphology in New Zealand, 1989–99. *Progress in Physical Geography*, 23: 501–524.
- Hinton, A.C. 1997. Tidal changes. *Progress in Physical Geography*, 21: 425–433.
- Hinton, A.C. 1998. Tidal changes. *Progress in Physical Geography*, 22: 282–294.
- Holling, C. S., L.H. Gunderson. 2002. Resilience and Adaptive Cycles. En: Gunderson, L.H., C.S. Holling (Eds.): *Panarchy, understanding transformations in human and natural systems*. Island Press, Washington DC, pp. 25-62.
- Holling, C.S. 1973. Resilience and stability of ecological systems. *Annual Review of Ecology and Systematics*, 4: 1-24.
- Hooke, J.M. 1999. Decades of change: contributions of geomorphology to fluvial and coastal engineering and management. *Geomorphology*, 31:373-389.
- Horn, D.P. 1997. Beach research in the 1990s. *Progress in Physical Geography*, 21: 454-470.
- Horn, D.P. 1999. Synergy and co-operation: collaborative. *Physical Geography*, 23: 115-133.
- Horn, D.P. 2002. Mesoscale beach processes. *Progress in Physical Geography*, 26: 271-289.
- IMFIA. 1998. *Estudio de las obras de navegación en el Arroyo Cufre y sus impactos sobre la zona costera. Informe final*. Convenio Dirección Nacional de Hidrografía y Facultad de Ingeniería. Montevideo, abril. 59 p.
- IMM (2005) Rambla Sur; La mayor obra del país. *Montevideo en la mano*. Octubre, 2. Disponible on-line en: <http://www.montevideo.gub.uy/montevideoenlamano/02/ramblasur.pdf>. (consultado el 6/8/2008).

- Inman, D.L., P.M. Masters. 1991. *Budget of sediment and prediction of the future state of the coast: State of the Coast Report, San Diego Region, Coast of California Storm and Tidal Waves Study*. U.S. Army Corps of Engineers, Los Angeles District, Ch 9, 105 pp. Disponible on-line en: <http://repositories.cdlib.org/sio/cmng/10/>
- Jackson, N.L., K.F. Nordstrom, I. Eliot, G. Masselink. 2002. 'Low energy' sandy beaches in marine and estuarine environments: a review. *Geomorphology*, 48: 147–162.
- Jones, C.G., J.H. Lawton, M. Shachak. 1994. Organisms as ecosystem engineers. *Oikos*, 69: 373-386.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, S. Saha, G. White, J. Woollen, Y. Zhu, M. Chelliah, W. Ebisuzaki, W. Higgins, J. Janowiak, K.C. Mo, C. Ropelewski, J. Wang, A. Leetmaa, R. Reynolds, R. Jenne, D. Joseph. 1996. The NCEP/NCAR 40-year reanalysis project. NCEP/NCAR 40-Year reanalysis project. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 77(3): 437–470.
- Kench, P.S. 1999. The geomorphology of Australian estuaries: review and prospects. *Australian Journal of Ecology*, 24: 367–38.
- Kennedy, D.M., C.D. Woodroffe. 2000. Holocene lagoonal sedimentation at the latitudinal limits of reef growth, Lord Howe Island, Tasman Sea. *Marine Geology*, 169: 287–304.
- Legrand, C.D. 1959. Comunidades psamófilas de la región de Carrasco (Uruguay). *Anales del Museo de Historia Natural de Montevideo*, 2da. Serie, 7(7): 1-64 y láminas.
- Magrin, G., C. Gay García, D. Cruz Choque, J. C. Giménez, A. R. Moreno, G. J. Nagy, C. Nobre, A. Villamizar. 2007. Latin America. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. En: Parry, M.L., O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden, C.E. Hanson. (Eds.): *Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 581-615.
- Margalef, R. 1977. *Ecología*. Ed. Omega, Barcelona. 966 p.
- Margalef, R. 1980. La biosfera: entre la termodinámica y el juego. Ed. Omega, Barcelona. 236 p.
- Mason, T., T.T. Coates. 2001. Sediment transport processes on mixed beaches: a review for shoreline management. *Journal of Coastal Research*, 17: 645–657.
- McBride, R., M.R. Byrnes, M.W. Hiland. 1995. Geomorphic response-type model for barrier coastlines: a regional perspective. *Marine Geology*, 126: 143-159.
- McGwynne, L., A. McLachlan. 1992. *Ecology and Management of Sandy Coasts*. Institute for Coastal Research, UPE, South Africa, Report, N° 30, 83 p.

- Menafra, R., L. Rodríguez-Gallego, F. Scarabino, D. Conde (Eds). 2006. *Bases para la conservación y el manejo de la costa uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay. Montevideo, i-xiv+668 pp.
- Menendez, A., E.H. Berbery. 2006. Tendencias hidrológicas en la Cuenca del Plata. En: Barros, V., R. Clarke, P. S. Días. (Eds): *El Cambio climático en la Cuenca del Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, cap. 14, pp. 137-143.
- Menendez, A., M. Re. 2005. Escenarios de inundación. En: Barros, V., A. Menéndez, G. Nagy. (Eds): *El Cambio climático en el Río de la Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, cap. VI, pp. 81-92.
- Montes, C., F. Borja, M.A. Bravo, J.M. Moreira. 1998. *Doñana. Una aproximación ecosistémica*. Consejería de Medio Ambiente. Junta de Andalucía, Sevilla. 311 p.
- Moore, L., P. Ruggiero, J. List. 2006. Comparing mean high water and high water line shorelines: Should proxy-datum offsets be incorporated in shoreline change analysis?. *Journal of Coastal Research*, 22(4): 894-905.
- Moore, L.J. 2000. Shoreline mapping techniques. *Journal of Coastal Research*, 16: 111-124.
- MTOP/PNUD/UNESCO. 1979. *Conservación y mejora de playas - URU. 73.007*. Montevideo. 593 p.
- Muñoz, D. 1883. *La Basura*. Montevideo, Agosto, 2 de 1883. Disponible on-line en: http://www.archivodeprensa.edu.uy/munoz_d/docs/articulos/Basura.htm (consultado el 6/11/2009)
- Murray, J.M.H., A. Meadows, P.S. Meadows. 2002. Biogeomorphological implications of microscale interactions between sediment geotechnics and marine benthos: a review. *Geomorphology*, 47: 15–30.
- Nagy G.J., A. Ponce, V. Pshennikov, R. Silva, E.A. Forbes, R. Kokot. 2005. Desarrollo de la Capacidad de Evaluación de la Vulnerabilidad Costera al Cambio Climático: Zona Oeste de Montevideo como Caso de Estudio. En: Barros, V., A. Menéndez, G. Nagy. (Eds): *El Cambio climático en el Río de la Plata*. Buenos Aires, CIMA/CONICET, cap. 14, pp. 173-180.
- Nagy, G.J., D.N. Severov, V.A. Pshennikov, M. De los Santos, J.J. Lagomarsino, K. Sans, E.G. Morozov. 2008. Río de la Plata Estuarine System: Relationship between River Flow and Frontal Variability. *Advances in Space Research*, 41: 1876-1881.
- Nagy, G.J., M. Gómez-Erache, V. Fernández. 2007. El Aumento del Nivel del Mar en la costa uruguaya del Río de la Plata: Tendencias, vulnerabilidades y medidas para la adaptación. *Revista Medio Ambiente y Urbanización*, Cambio climático: Vulnerabilidad y Adaptación en ciudades de América Latina, 67: 77-93.
- Nordstrom, K. F. (2004). *Beaches and dunes of developed coasts*. Cambridge: Cambridge University Press.

- Norris, R.M. 1964. Dams and beach sand supply in Southern California. *Papers in Marine Geology*, R. L. Miller (Ed.), New York: Macmillan, cap. 9: 154-171.
- O.E.A. 1987. *Proyecto plurinacional de desarrollo turístico; Desarrollo Turístico del Uruguay*. 158 p.
- Orford, J., A. Cooper, B. Smith. 1997. LOICZ: the Human Factor as an Influence on the Irish Coast. *En: Sweney, J. (Ed.): Global Change and the Irish Environment*. Royal Irish Academy, cap. 9: 88-107 pp.
- Panario, D. 2000. Las playas uruguayas. Su dinámica, diagnóstico de situación actual y tendencias a mediano plazo. *En: Domínguez, A., R. Prieto (Coord.): Perfil ambiental del Uruguay - 2000*. Montevideo, Edinor, 111-125 pp.
- Panario, D. 1999. Dinámica de la costa atlántica uruguaya. *En: Seminario: Costa Atlántica. Estado actual del conocimiento y estrategia de investigación de la costa y sus barras lagunares (Rocha, marzo de 1997)*. Rocha, PROBIDES. 23-54 pp. (Serie Documentos de Trabajo Nº 21)
- Panario, D., G. Piñeiro. 1997. Vulnerability of oceanic dune systems under wind pattern change scenarios in Uruguay. *Climatic Research Special Issues*, 9(1-2): 67-68.
- Panario, D., O. Gutiérrez, G. Piñeiro. 2008a. *Propuesta técnica para la conservación recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe de Avances*. Convenio UNCIEP (Unidad de Ciencias de la Epigénesis), Facultad de Ciencias y Departamento de Desarrollo Ambiental, Intendencia Municipal de Montevideo. Enero, 56 pp. (Correspondiente al cuarto mes del convenio)
- Panario, D., O. Gutiérrez, G. Piñeiro. 2008b. *Propuesta técnica para la conservación recuperación de la playa del Buceo y playas certificadas de Montevideo. Informe final*. Convenio UNCIEP (Unidad de Ciencias de la Epigénesis), Facultad de Ciencias y Departamento de Desarrollo Ambiental, Intendencia Municipal de Montevideo. Setiembre, 76 pp. y anexos.
- Panario, D., O. Gutiérrez, G. Piñeiro. 2008c. Hacia una restauración ambiental en la playa Brava de Montevideo. *Revista de la Sociedad Uruguaya de Geología*, 15: 81-83.
- Panario, D., O. Gutiérrez. 2003. *Dinámica geomorfológica de la desembocadura del Arroyo Pando. Origen de los impactos en las playas de El Pinar y Neptunia, y propuesta de mitigación*. UNCIEP, Facultad de Ciencias. 68 p.
- Panario, D., O. Gutiérrez. 2005. La vegetación en la evolución de playas arenosas. El caso de la costa uruguaya. *Ecosistemas, Revista de la Asociación Española de Ecología Terrestre*. XIV Nº 2, mayo - agosto. Disponible on-line en: www.revistaecosistemas.net.
- Panario, D., O. Gutiérrez. 2006. Dinámica y fuentes de sedimentos de las playas uruguayas. *En: Menafrá, R., L. Rodríguez, F. Scarabino, D. Conde (Eds.): Bases para*

- la conservación y manejo de la costa Uruguaya*. Vida Silvestre Uruguay, Montevideo, 21-34 pp.
- Pasternack, G.B., G.S. Brush. 1998. Sedimentation Cycles in a River-Mouth Tidal Freshwater Marsh. *Estuaries*, 21(3): 407-415.
- Piñeiro, G. 2010. *Transporte eólico de arena en playas urbanizadas: modelos-realidad*. Tesis de Maestría en Ciencias Ambientales. Facultad de Ciencias. Montevideo. 114 p.
- Piñeiro, G., D. Panario. 1993. *Dinámica sedimentaria y geomorfológica de dunas y playas en Cabo Polonio, Rocha*. Montevideo, UNCIEP, Facultad de Ciencias, 35 p. y anexos.
- Politis, G. 1984. Climatic variations during historical times in Eastern Buenos Aires Pampas, Argentina. *Quaternary of South America and Antarctic Peninsula*, 2: 133-161.
- Preciozzi, F., J. Spoturno, W. Heinzen, P. Rossi. 1985. *Memoria explicativa de la carta geológica del Uruguay a escala 1:500.000*. Montevideo, DINAMIGE, Dirección Nacional de Minería y Geología, Ministerio de Industria, Energía y Minería. 72 p.
- Prigogine, I, I. Stenger, 1983. *La nueva alianza, Metamorfosis de la Ciencia*. Alianza Editorial. 315 p.
- Rahmstorf, S., A. Cazenave, J.A. Church, J.E. Hansen, R.F. Keeling, D.E. Parker, R.C.J. Somerville. 2007. Recent climate observations compared to projections. *Science*, 316(5825): 709-709.
- Remedi, G.A. 2005. The Beach Front (la rambla): Reality, Promise and Illusion of Democracy in Today's Montevideo. *Journal of Latin American Cultural Studies*, 14(2): 131-159.
- Riestra, G., O. Defeo, A. Brazeiro. 1996. Dinámica de la zonación de gasterópodos en una playa disipativa micromareal. *Comunicaciones de la Sociedad Malacológica del Uruguay*, 70-71(8): 1-6.
- Ros, F.J. 1923. *Pleito - Pocitos. Su historia y el dictamen profesional que a pedido de los propietarios demandados produjo el Agrimensor D. Francisco J. Ros*. Editor M. García, Montevideo, Imprenta El Siglo Ilustrado, 253 p. (Colección Estudio)
- Severov, D.N., E. Mordecki, V.A. Pshennikov. 2004. SST anomaly variability in Southwestern Atlantic and El Niño/Southern oscillation. *Advances in Space Research*, 33(3): 343-347.
- Shand, R.D., D.G. Bailey. 1999. A review of net offshore bar migration with photographic illustrations from Wanganui, New Zealand. *Journal of Coastal Research*, 15: 365-378.

- Sherman, D.J., B.O. Bauer. 1993. Coastal geomorphology through the looking glass. *Geomorphology*, 7: 225–249.
- Short, D. (Ed.) 1999. *Handbook of beach and shoreface morphodynamics*. New York, Wiley, 379 p.
- Soutullo, A., E.K.W Chan, J. Maughan, S. Preuss, J.C. Ruiz Guajardo. 2003. Distribution of endangered vertebrates in Bañados del Este Biosphere Reserve, Uruguay. *Comunicaciones Zoológicas, Museos Nacionales de Historia Natural y Antropología*, 201(XVIII): 1-12.
- Spencer, T., H. Viles. 2002. Bioconstruction, bioerosion and disturbance on tropical coasts: coral reefs and rocky limestone shores. *Geomorphology*, 48: 23–50.
- Stafford Smith, D.M., J.F. Reynolds. 2002. Desertification: A new paradigm for an old problem. *En: Reynolds, J. F., D. M. Stafford Smith (Eds.): Global Desertification: Do Humans Cause Deserts?*, Dahlem Workshop Report 88, Dahlem University Press, Berlin, pp. 403-424.
- Stephenson, W.J. 2000. Shore platforms: remain a neglected coastal feature. *Progress in Physical Geography*, 24: 311–327.
- Stephenson, W.J., R.W. Brander. 2003. Coastal geomorphology into the twenty-first century. *Progress in Physical Geography*, 27(4): 607–623.
- Stephenson, W.J., R.W. Brander. 2004. Progress reports. Coastal geomorphology, *Progress in Physical Geography*, 28(4): 569–580.
- Taylor, M., G.W. Stone. 1996. Beach-ridges: a review. *Journal of Coastal Research*, 12: 612–621.
- Thom, R. 1985. *Parábolas y catástrofes*. Barcelona, Ed. Tusquets. 197 p.
- Thurman H.V. 1994. *Introductory oceanography*. New York, Macmillan Publishing Co.
- Thurman, H. V., Burton, E. A. 2003. *Introductory oceanography* (10.a ed.). Prentice Hall. 624 p.
- Trenhaile, A.S. 2002. Rock coasts, with particular emphasis on shore platforms. *Geomorphology*, 48: 7–22.
- Uncles, R.J. 2002. Estuarine physical processes research: some recent studies and progress. *Estuarine, Coastal and Shelf Science*, 55: 829–856.
- Van Wellen, E., A.J. Chadwick, T. Mason. 2000. A review and assessment of longshore sediment transport equations for coarsegrained beaches. *Coastal Engineering*, 40: 243-275.
- Vinther, N., T. Aagaard, J. Nielsen. 2004. Cyclic sand bar migration on a spit-platform in the Danish Wadden Sea—spit-platform morphology related to variations in water level *Journal of Coastal Research*, 20: 672-679.

Willis, C.M. 2002. Impediments to fluvial delivery of sediment to the shoreline. *En*: Coyne, M., K. Sterrett (Eds.): *California Beach Restoration Study*, California Department of Boating and Waterways and State Coastal Conservancy, Sacramento, California, p. 130-177. Available on-line at: <http://www.dbw.ca.gov/beachreport.asp>

Anexos

ANEXO 1.

SUPPORTING INFORMATION - Capítulo 6.2. Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SLI - Results of Anderson-Darling normality test performed on surface value series. Ramírez beach.

a) First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records), PHTH-WL; **b)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records), WDL-RM; **c)** Complete series: 1927-2008 (23 records), WDL-RM; **d)** Complete series (without 1927 and 1929 images), WDL-RM.

Ramírez				
	a)	b)	c)	d)
Alpha	0.05	0.05	0.05	0.05
P-value	0.05782	0.18740	0.41723	0.22106
Statistic	0.72761	0.51894	0.37371	0.48982
N	16	16	23	21
Conclusion	Probably normal	Probably normal	Probably normal	Probably normal

Supporting Information

SLII - Results of Anderson-Darling normality test performed on surface value series. Pocitos beach.

L27: **a)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); **c)** Complete series: 1927-2008 (21 records); **e)** Complete series: (without 1927, 1945 and 1949 images). **L08:** **b)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); **d)** Complete series: 1927-2008 (21 records); **f)** Complete series: (without 1927, 1945 and 1949 images). For all series with WDL-RM.

Pocitos						
	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Alpha	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05	0.05
P-value	0.93844	0.55187	0.75839	0.59152	0.50749	0.73427
Statistic	0.16691	0.31155	0.24577	0.29691	0.33486	0.25315
N	15	15	21	21	18	18
Conclusion	Probably normal					

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SI.III - Estimated model parameters from the regression model. Ramírez beach.

a) First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records), PHTH-WL; **b)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records), WDL-RM; **c)** Complete series: 1927-2008 (23 records), WDL-RM; **d)** Complete series (without 1927 and 1929 images), WDL-RM. Note the symbols for statistical significance values below the table.

a)

Residuals:						
Min	1Q	Median	3Q	Max		
-57.556	-6.749	2.255	15.672	32.064		
Coefficients:						
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code	
(Intercept)	2.042e+03	4.950e+01	41.258	5.05e-16	***	
SURF_Ramírez b	-2.259e-03	1.643e-03	-1.375	0.191		

Residual standard error: 22.95 on 14 degrees of freedom						
Multiple R-squared: 0.119, Adjusted R-squared: 0.05605						
F-statistic: 1.891 on 1 and 14 DF, p-value: 0.1907						

b)

Residuals:						
Min	1Q	Median	3Q	Max		
-53.190	-9.991	3.483	16.022	28.933		
Coefficients:						
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code	
(Intercept)	2.059e+03	6.153e+01	33.472	9.18e-15	***	
SURF_Ramírez b	-2.695e-03	1.948e-03	-1.383	0.188		

Residual standard error: 22.93 on 14 degrees of freedom						
Multiple R-squared: 0.1202, Adjusted R-squared: 0.05734						
F-statistic: 1.912 on 1 and 14 DF, p-value: 0.1884						

c)

Residuals:						
Min	1Q	Median	3Q	Max		
-54.812	-6.344	3.757	15.975	28.400		
Coefficients:						
	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code	
(Intercept)	2.076e+03	3.922e+01	52.944	<2e-16	***	
SURF_Ramírez c	-3.214e-03	1.284e-03	-2.504	0.0206	*	

Residual standard error: 23.17 on 21 degrees of freedom						
Multiple R-squared: 0.2299, Adjusted R-squared: 0.1933						
F-statistic: 6.27 on 1 and 21 DF, p-value: 0.0206						

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

d)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-35.527	-5.376	0.408	12.223	23.638

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	2.091e+03	2.760e+01	75.756	< 2e-16	***
SURF_Ramírez d	-3.514e-03	9.002e-04	3.904	0.000955	***

Residual standard error: 16.21 on 19 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.4451, Adjusted R-squared: 0.4159

F-statistic: 15.24 on 1 and 19 DF, p-value: 0.0009549

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SI.IV - Descriptive statistics of Ramírez beach.

a) First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records), PHTH-WL; **b)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records), WDL-RM; **c)** Complete series: 1927-2008 (23 records), WDL-RM; **d)** Complete series (without 1927 and 1929 images), WDL-RM.

	Ramírez			
	a)	b)	c)	d)
Mean	29923.8503	31439.0505	30321.9033	30400.9016
Std. error	901.5045	759.6913	802.3464	878.6000
Median	30757.9545	31676.0975	31288.3190	31477.5510
Mode	N/D	N/D	N/D	N/D
Std. deviation	3606.0181	3038.7653	3847.9179	4026.2512
Sample variance	13003366.88	9234094.28	14806472.35	16210698.62
Kurtosis	-0.019160	0.417413	-0.388472	-0.571760
Skewness	-0.492858	-0.346383	-0.428029	-0.478816
Range	13627.797	12294.295	14421.614	14421.614
Minimum	22913.96	25100.698	22973.444	22973.444
Maximum	36541.757	37394.993	37395.058	37395.058
Sum	478781.604	503024.808	697403.777	638418.933
Count	16	16	23	21
CV (%)	12.0506	9.6656	12.6902	13.2439

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SI.V - Estimated model parameters from the regression model. Pocitos beach.

L27: a) First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); **e)** Complete series: 1927-2008 (21 records); **e)** Complete series (without 1927, 1945 and 1949 images). **L08: b)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); **d)** Complete series: 1927-2008 (21 records); **f)** Complete series (without 1927, 1945 and 1949 images). Note the symbols for statistical significance values below the table.

a)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-26.344	-19.127	-3.703	17.438	40.176

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	2.047e+03	4.180e+01	48.977	3.92e-16	***
SURF_Pocitos a	-1.540e-03	8.584e-04	-1.794	0.0961	.

Residual standard error: 22.96 on 13 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.1984, Adjusted R-squared: 0.1367

F-statistic: 3.217 on 1 and 13 DF, p-value: 0.09614

b)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-42.158	-21.170	3.809	20.786	34.484

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	1.939e+03	6.675e+01	29.040	3.3e-13	***
SURF_Pocitos b	5.025e-04	9.628e-04	0.522	0.61	

Residual standard error: 25.38 on 13 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.02053, Adjusted R-squared: -0.05482

F-statistic: 0.2724 on 1 and 13 DF, p-value: 0.6105

c)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-32.950	-18.961	3.381	16.879	34.832

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	2.057e+03	3.436e+01	59.858	<2e-16	***
SURF_Pocitos c	-1.587e-03	7.228e-04	-2.19	0.0408	*

Residual standard error: 23.3 on 19 degrees of freedom

Multiple R-squared: 0.2023, Adjusted R-squared: 0.1603

F-statistic: 4.819 on 1 and 19 DF, p-value: 0.04078

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

d)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-54.749	-21.286	9.258	22.597	26.893

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	1.978e+03	5.362e+01	36.887	<2e-16	***
SURF_Pocitos d	6.679e-05	7.798e-04	0.086	0.933	

Residual standard error: 26.08 on 19 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.0003859, Adjusted R-squared: -0.05223
 F-statistic: 0.007335 on 1 and 19 DF, p-value: 0.9326

e)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-33.90	17.52	8.70	15.63	21.42

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	2.014e+03	3.298e+01	61.071	<2e-16	***
SURF_Pocitos e	-5.396e-04	7.133e-04	-0.757	0.46	

Residual standard error: 19.88 on 16 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.03454, Adjusted R-squared: -0.0258
 F-statistic: 0.5724 on 1 and 16 DF, p-value: 0.4603

f)

Residuals:

Min	1Q	Median	3Q	Max
-34.687	-17.695	8.645	16.287	21.424

Coefficients:

	Estimate	Std. Error	t value	Pr(> t)	Signif. code
(Intercept)	2.014e+03	4.251e+01	47.376	<2e-16	***
SURF_Pocitos f	-3.601e-04	6.143e-04	-0.586	0.566	

Residual standard error: 20.02 on 16 degrees of freedom
 Multiple R-squared: 0.02102, Adjusted R-squared: -0.04017
 F-statistic: 0.3435 on 1 and 16 DF, p-value: 0.566

Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SI.VI - Descriptive statistics of Pocitos beach.

L27: **a)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); **c)** Complete series: 1927-2008 (21 records); **e)** Complete series (without 1927, 1945 and 1949 images). **L08:** **b)** First aerial photographic series: 1927-2007 (15 records); **d)** Complete series: 1927-2008 (21 records); **f)** Complete series (without 1927, 1945 and 1949 images).

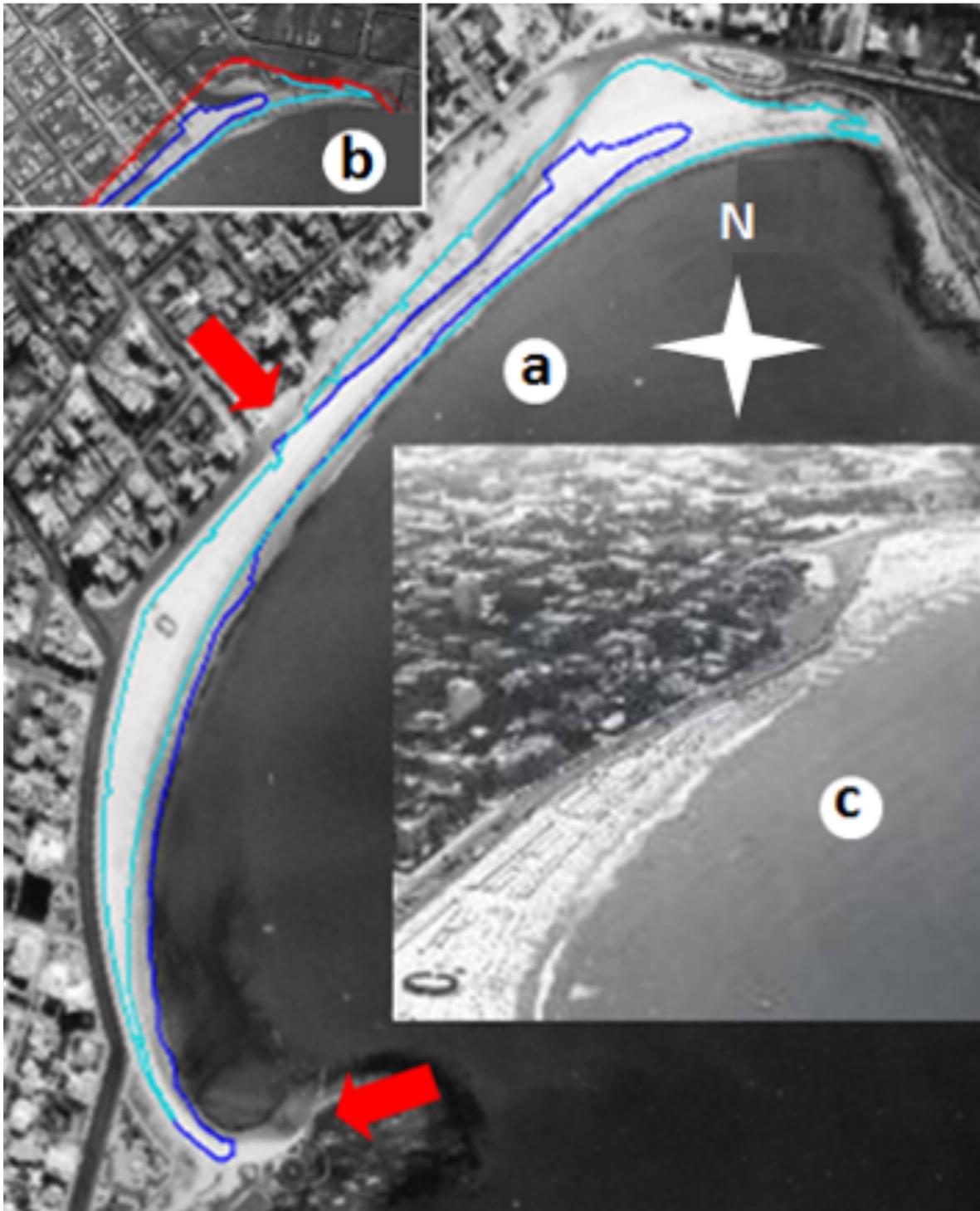
	Pocitos					
	a)	b)	c)	d)	e)	f)
Mean	48205.7503	68995.1681	47018.3665	68364.7280	45764.4267	68772.8796
Std. error	1845.5540	1818.8923	1573.0627	1632.1420	1593.6541	1863.2827
Median	47730.6080	68623.6140	47526.8270	68059.5450	45587.2070	68180.0690
Mode	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D	N/D
Std. deviation	7147.8000	7044.5396	7208.6790	7479.4142	6761.3018	7905.2391
Sample variance	51091045.10	49625538.87	51965052.73	55941636.96	45715201.47	62492805.57
Kurtosis	-0.482737	-0.052939	-0.796489	-0.637048	-1.049300	-0.878239
Skewness	-0.062148	0.408702	0.067662	0.263071	0.104681	0.144512
Range	25824.295	25811.213	25824.295	26935.155	21581.824	26935.155
Minimum	35240.001	56930.821	35240.001	55806.879	35240.001	55806.879
Maximum	61064.296	82742.034	61064.296	82742.034	56821.825	82742.034
Sum	723086.255	1034927.522	987385.697	1435659.287	823759.681	1237911.832
Count	15	15	21	21	18	18
CV (%)	14.8277	10.2102	15.3316	10.9405	14.7741	11.4947

Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SI.1 - Pocitos Beach

a) Picture of 1945 showing the path of the waterfront (“La Rambla”) of Pocitos beach. The blue line indicates the beach area in 1927 (L27). The turquoise thick line indicates the location of the waterfront in its current path (2008). Red arrows indicate the ends of the stretch of boulevard that has remained unchanged in its location for the entire series of photos (Source: Image-1945, SSRFAU). Photo inderters detail (Source: Image CMDF-IdeM): **b)** The mouth of the Pocitos creek in 1927. **c)** The 1930 panoramic view shows the original waterfront protruded into a section of the beach and divided it into two sections, which was maintained in 1945.

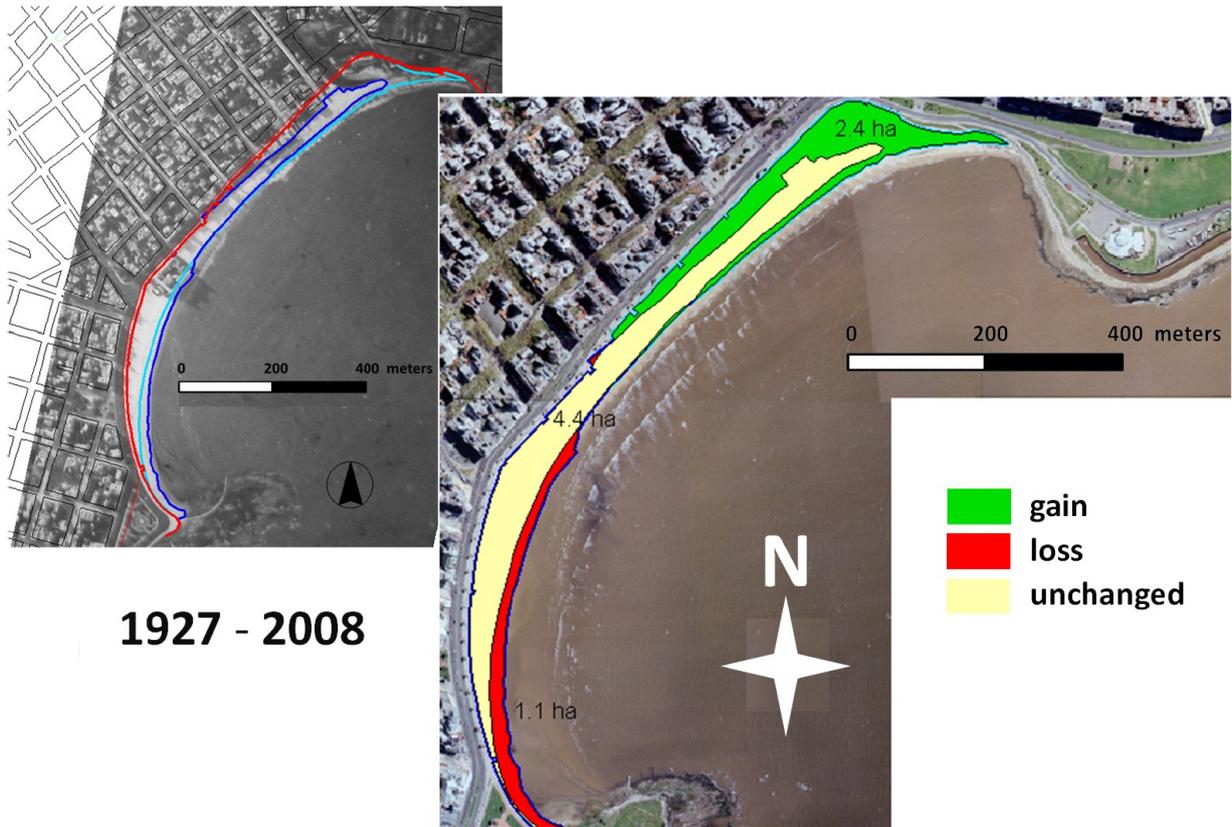


Gutiérrez *et al.* (2015) - Long-term morphological evolution of urban pocket beaches in Montevideo (Uruguay): impacts of coastal interventions and links to climate forcing. *Journal of Integrated Coastal Zone Management / Revista de Gestão Costeira Integrada*, 15(4):467-484. DOI: 10.5894/rgci553 [Supporting Information]

Supporting Information

SI.2 - Pocitos Beach

Left: Previous high tide high water (PHTH-WL)-2007 (Turquoise) and 1927 (blue). Present location of the waterfront (red line). Right: The polygons on the beach indicate net gains and losses in area that have occurred over 80 years. Photo: File DINAMA, 1927; IdeM File, 2007.



ABREVIATURAS

Indicadores de Línea de Costa:

LMAP - línea de marea alta previa

LSH-ZAIO - línea seca/húmeda o zona actual de alcance de la ola

ALMA - antiguo límite de marea alta

Artefactos Playa Pocitos

L27 - "límite continental: playa año 1927"

L08 - "límite continental: playa año 2008"

Índices

IG/PP - Índice de Ganancia/Pérdida de Playa

IDMaSPA - Índice de Diferencia con la Mayor Superficie de Playa Anterior

IDMeSPA - Índice de Diferencia con la Menor Superficie de Playa Anterior

ITBSP - Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa

ITBSP relativizado por tiempo - Índice Teórico de Balance de Superficie de Playa relativizado por la longitud temporal de la serie

Siglas instituciones

FAU - Fuerza Aérea Uruguaya

SSRFAU – Servicios de Sensores Remotos de la Fuerza Aérea Uruguaya

IdeM - Intendencia Municipal de Montevideo

NCEP/NCAR - National Center for Environmental Prediction/National Center for Atmospheric Research

NMM - National Maritime Museum

SGM - Servicio Geográfico Militar

UNCIEP - Unidad de Ciencias de la Epigénesis

Otras

msnm - metros sobre el nivel medio del mar