

Coastline evolution at Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina

Evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita, Argentina

A Merlotta*, GR Bértola

CONICET y Centro de Geología de Costas y del Cuaternario, Universidad Nacional de Mar del Plata, C.C. 722-Correo Central, 7600 Mar del Plata, Argentina. * E-mail: amerlott@mdp.edu.ar

Abstract

This study determined coastline evolution and retreat rates at Balneario Parque Mar Chiquita (Argentina) between 1949 and 2007. The dune toe was considered the coastline indicator, and it was determined based on historical maps, aerial photographs, a satellite image, and field measurements. The analysis showed that the intensity of the erosion process has declined though it continues to be meaningful. The annual rate has decreased from 17.71 to 1.41 m yr⁻¹, corresponding to a total retreat of 299.01 m in the last 58 years. The temporal variations of the phenomenon mainly result from changes in beach nourishment by the littoral drift, which has been affected by sand mining and coastal defenses built to the south of the study area. Different spatial behaviours were also registered in the town, associated with geomorphological characteristics and dune conservation state. *Sudestada* storms have played a significant role in the coastline retreat. The results contribute to the understanding of the magnitude and dynamics of the erosion process, and should be of use in the preparation of coastal management programs and risk evaluations.

Key words: Argentina, coastal erosion, coastline, Mar Chiquita.

Resumen

El objetivo del presente estudio fue establecer la evolución de la línea de costa y las tasas de retroceso en el Balneario Parque Mar Chiquita (Argentina) entre 1949 y 2007. Se consideró como indicador de la línea de costa a la línea de pie de médano o acantilado y para su determinación se utilizaron mapas históricos, fotografías aéreas, una imagen satelital y mediciones de campo. El análisis demostró que el proceso erosivo ha disminuido su intensidad aunque continúa siendo importante, descendiendo de una tasa anual de 17.71 a 1.41 m año⁻¹ y totalizando un retroceso de 299.01 m en los últimos 58 años. Las variaciones temporales del fenómeno son consecuencia principalmente de los cambios en la alimentación de las playas por deriva litoral, la cual debido a la explotación de arena y a la construcción de defensas costeras al sur del área de estudio, ha disminuido los aportes a la misma. Especialmente dentro de la localidad, se registraron diferentes comportamientos determinados por las características geomorfológicas de cada sector y la urbanización de los médanos costeros y su alteración, ya sea porque han sido nivelados, arrasados o forestados. Asimismo, las tormentas Sudestadas han influido notoriamente en el retroceso de la línea de costa. Los resultados encontrados han permitido comprender mejor la dinámica y magnitud del fenómeno erosivo, así como contribuir a la toma de decisiones durante la elaboración de planes de manejo y evaluación de riesgo costero.

Palabras clave: Argentina, erosión costera, línea de costa, Mar Chiquita.

Introduction

Urbanized coastal areas constitute one of Earth's most fragile environments. The dynamics and interaction between the natural and socioeconomic components cause significant problems because coastal resources are subject to continuous exploitation; thus, the environment response changes and new problems emerge. Coastal erosion, for example, has become a significant environmental problem in several urban centers of Buenos Aires Province, Argentina.

The erosive process is influenced by human activities, in particular urban growth and excessive dune fixation (Bertoncello 1992, Isla *et al.* 1998, Juárez and Isla 1999), sand mining (Schnack *et al.* 1983, Marcomini and López 1999), and the construction of coastal defenses. *Sudestada* storms have

Introducción

Las costas, principalmente aquellas que han sido urbanizadas o semiurbanizadas, constituyen uno de los ambientes más frágiles del hábitat terrestre donde se producen importantes problemáticas debido a la dinámica e interacción entre sus componentes naturales y socioeconómicos. La acción del hombre sobre el medio natural somete a los recursos costeros a una explotación continua y, a medida que los cambios en el medio natural se van produciendo, se ve limitada su capacidad de respuesta alterándose el equilibrio preexistente y surgiendo nuevos problemas. Uno de ellos es la erosión costera, fenómeno natural que se manifiesta como un problema ambiental de gran importancia en numerosos centros urbanos de la Provincia de Buenos Aires, Argentina.

also been identified as one of the main natural factors of coastal erosion (Isla 1990, Marcomini and López 1997).

The eastern coastal municipalities of Buenos Aires Province have experienced significant population and tourism growth since the 1970s. Since Balneario Parque (seaside resort) Mar Chiquita was declared a biosphere reserve by UNESCO in 1996, it has become a potential regional destination due to its large natural diversity and new tourism preferences (Merlotto and Bértola 2008). Until 1983 this area presented an annual rate of coastal retreat of 6–3.5 m yr⁻¹ (fig. 1) (Schnack *et al.* 1983). This study thus aimed to determine the coastline evolution and retreat rates from 1949 to 2007. In recent years, determining the historical position of a coastline, as well as its variations and causes has become one of the main objectives in coastal zone management programs and risk evaluations.

In this analysis, the dune toe was considered the coastline indicator. For its determination, historical maps, aerial photographs, a satellite image, and field measurements were employed. These sources are widely used in shoreline evolution studies (Allan *et al.* 2003, Domínguez *et al.* 2004, Delgado-González *et al.* 2005, Romagnoli *et al.* 2006). Field work, personal communications, and additional bibliographic information have allowed the identification of natural and anthropogenic factors affecting the erosion process.

Study area

The study area is a small seaside resort located in the Municipality of Mar Chiquita, in southeastern Buenos Aires Province, 40 km to the north of the city of Mar del Plata (37°44'23.87" S, 57°26'35.31" W) (fig. 2). It is situated in the



Figure 1. Coastline retreat at Parque Balneario Mar Chiquita, in Argentina.
Figura 1. Retroceso de la línea de costa en el Parque Balneario Mar Chiquita, Argentina.

Entre las acciones humanas que han influenciado el proceso erosivo se ha considerado a la urbanización y excesiva fijación de médanos frontales (Bertoncello 1992, Isla *et al.* 1998, Juárez e Isla 1999), la extracción de arena (Schnack *et al.* 1983, Marcomini y López 1999) y la construcción de defensas costeras. Asimismo se han identificado a las tormentas Sudestadas como uno de los principales factores naturales de erosión (Isla 1990, Marcomini y López 1997).

Los partidos costeros del este bonaerense han experimentado un importante crecimiento poblacional y del turismo desde la década de 1970. Esta tendencia se ha manifestado en el Balneario Parque Mar Chiquita principalmente a partir de la década de 1990 debido a las nuevas preferencias en la actividad turística, por poseer el área una gran diversidad natural y haber sido designada reserva de biósfera por la UNESCO en 1996, perfilándose como un destino de gran potencial a nivel regional (Merlotto y Bértola 2008). Dado que en el sur del Partido de Mar Chiquita se ha registrado hasta 1983 un retroceso medio de la línea de costa de 6–3.5 m año⁻¹ (fig. 1) (Schnack *et al.* 1983), el objetivo de este estudio fue establecer la evolución de la línea de costa y la tasas de retroceso en el Balneario Parque Mar Chiquita de 1949 a 2007. En los últimos años, determinar la posición histórica de la línea de costa de una zona litoral urbanizada así como sus variaciones y causas, se han convertido en unos de los objetivos primordiales de planes de manejo integrado y evaluación del riesgo de erosión costera.

Para este análisis se consideró como indicador de la línea de costa a la línea de pie de médano o acantilado. Para su determinación se emplearon mapas históricos, fotografías aéreas, una imagen satelital y medidas de campo. Dichas fuentes han sido ampliamente utilizadas en los estudios sobre cambios históricos de la línea de costa (Allan *et al.* 2003, Domínguez *et al.* 2004, Delgado-González *et al.* 2005, Romagnoli *et al.* 2006). Asimismo, los trabajos de campo realizados, junto con información disponible, comunicaciones personales y los resultados obtenidos, permitieron identificar los factores naturales y antrópicos que han influenciado al proceso de erosión costera.

Área de estudio

El área de estudio se ubica en el Partido de Mar Chiquita, en el sudeste de la Provincia de Buenos Aires, Argentina, al sur de la desembocadura de la albufera Mar Chiquita y a 40 km al norte de la ciudad de Mar del Plata (37°44'23.87" S, 57°26'35.31" W), sobre el tramo más austral de la barrera medanosa oriental (fig. 2). Es una costa de acumulación determinada por su bajo nivel topográfico (ya que se ubica en la llanura o pampa deprimida) y la existencia de un aporte continuo de arena que ha permitido la formación de la franja de médanos y el desarrollo de playas.

La barrera medanosa oriental y la albufera evolucionaron durante la fase regresiva que comenzó hace 5000 años. Por acción de los vientos y procesos de deriva litoral desde el norte, dicha barrera creció a partir de un paleocabo situado

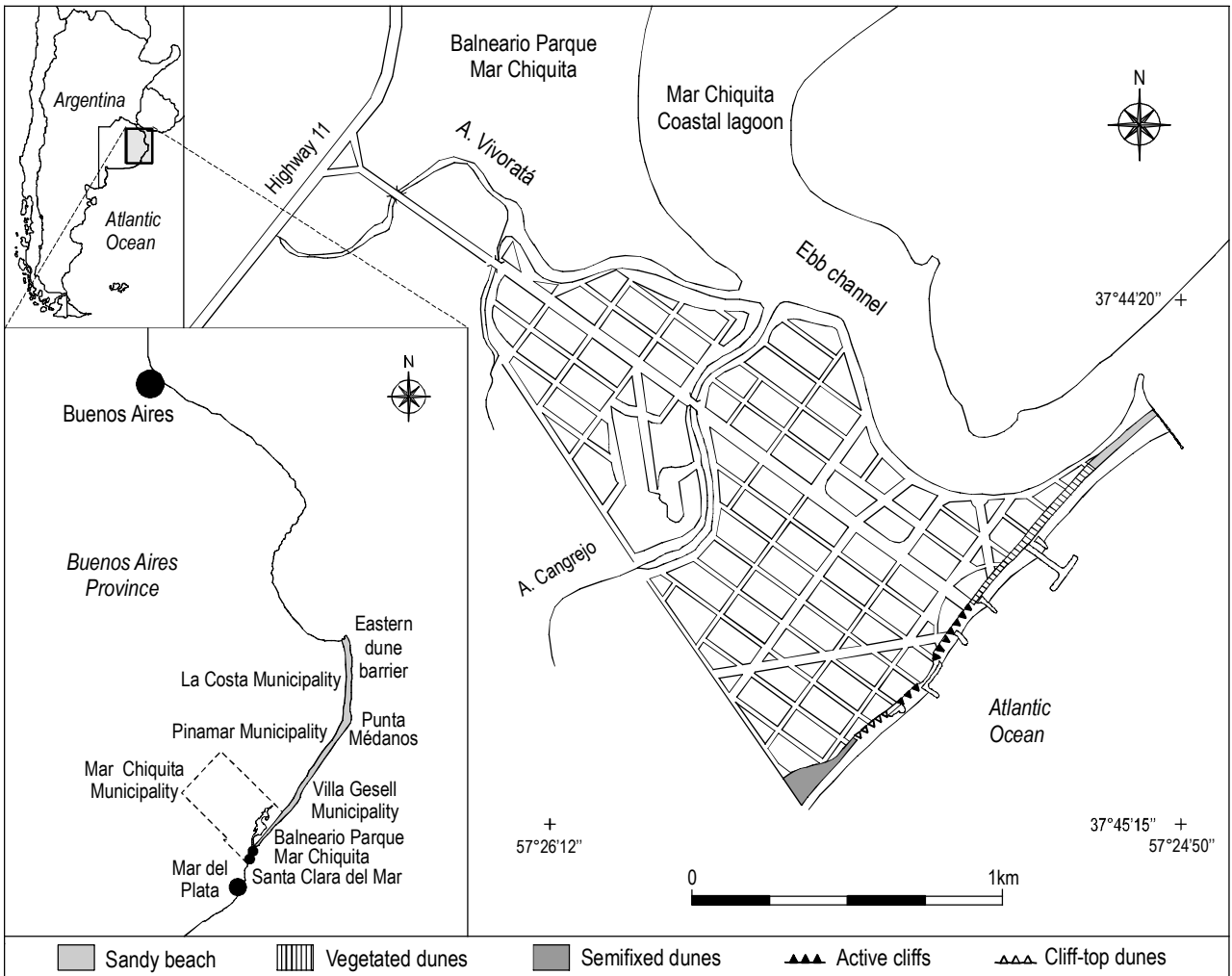


Figure 2. Location and coastal geomorphology of Balneario Parque Mar Chiquita (Argentina).

Figura 2. Ubicación y geomorfología costera del Balneario Parque Mar Chiquita (Argentina).

southern part of Mar Chiquita coastal lagoon and at the southern end of the eastern dune barrier. It is a prograding coast due to its low topographic level and continuous sand nourishment, resulting in beach and dune chain development.

The eastern dune barrier and the coastal lagoon evolved during a regressive phase 5000 years before the present, from a paleocape near the city of Villa Gesell (Isla *et al.* 2001a). Wind action and northern littoral drift processes originated the barrier and estuarine environment that later developed into a coastal lagoon (Fasano *et al.* 1982). The dune barrier extends 3.5 km inland and gradually narrows until disappearing in Mar del Plata, giving rise to cliffs that increase in height southwards. The study area thus constitutes a transition between a coast with sand accumulation in the north and a coast with cliff erosion in the south (Isla 1997). Mar Chiquita coastal lagoon is orientated NE-SW and it is connected to the sea by an ebb channel. The ebb channel fluctuated until the construction of a jetty in 1973. A 200 m yr⁻¹ migration of the ebb channel was registered based on aerial photographs (Isla 1997).

cerca de la actual ciudad de Villa Gesell (Isla *et al.* 2001a), originando los ambientes estuáricos que después dieron lugar a la formación de la laguna costera vinculada al mar (Fasano *et al.* 1982). La barrera medanosa posee en sus porciones más anchas 3.5 km de extensión y al llegar al área de estudio se va estrechando hasta desaparecer en Mar del Plata, dando lugar a acantilados que van aumentando en altura hacia el sur. Por consiguiente, el área de estudio constituye un límite o transición entre una costa arenosa, de acumulación, al norte y una costa de acantilados, erosiva, al sur (Isla 1997). La albufera Mar Chiquita se extiende en sentido NE-SW y conforma un cuerpo de agua costero que se comunica con el océano a través de su canal de desembocadura. Hasta la construcción de un espigón en 1973 la boca fluctuaba cambiando su desembocadura, con una migración que para esa fecha se determinó en 200 m año⁻¹ a partir de la interpretación de fotografías aéreas (Isla 1997).

La deriva litoral predominante se desplaza desde el sur o sudeste, pero en ocasiones de viento norte (principalmente en la estación cálida) las olas pueden dar lugar a transporte

The littoral drift moves from the south or southeast; however, northerly winds (mainly in summer) can originate a secondary southward transport. Sand transport towards the north of Pinamar was calculated to be 400,000–700,000 m³ yr⁻¹ (Framiñan 1990). Other calculations based on mathematical models, performed by the Netherlands Ministry of Transport, Public Works, and Water Management (1997), yielded values of 150,000–200,000 m³ yr⁻¹ between Mar del Plata and Santa Clara del Mar, and of 0–25,000 m³ yr⁻¹ between Santa Clara del Mar and Balneario Parque Mar Chiquita.

Mean wave height is 0.6–0.8 m, with a maximum of 2.3 m calculated for Mar del Plata. Mean wave period is 10 s (Isla 1997). Tides are semidiurnal, and amplitudes range from 0.6 to 1 m, with an average of 0.91 m. Beaches have a southeastern orientation (39° N) and their usual slope is 4–5%. Fine to medium sands prevail along the beaches. Dune grain size varies between medium to coarse sands in blowouts and fine sands in interdune depressions (Isla *et al.* 2001a). Between the study area and Punta Médanos to the north, non-consolidated sand banks extend in a 20–45° N direction. They are connected to the coast and migrate towards the north and east at 22 cm km⁻² (Parker *et al.* 1978).

The coastal geomorphology (fig. 2) shows degradation of the dunes in the northern part of the study area and the appearance of a sandy beach. In the northern-central part, the dune field is vegetated by different bush and grass species that obstruct its mobility. In the central part of the town, the fore-dune has disappeared and an active cliff, 2–3 m high, has developed. Next to it, the height of an inactive cliff-top dune descends abruptly. In the southernmost part, a dune field has developed. The vegetation over it decreases until disappearing and dune mobility increases gradually.

Materials and methods

The most widely used method to study shoreline evolution consists of two stages: determining the sources that allow the reconstruction of the coastline in previous dates, and using analytical techniques and procedures to measure the changes and calculate the erosion rates (Ojeda-Zújar 2000). For this it is necessary to define the coastline in question and evaluate the accuracy of the sources of information.

On a map, the shoreline represents a physical trait where water and land meet, though the natural variability of sandy beaches makes it difficult to define. Pajak and Leatherman (2002) mention a series of characteristics that can be used as indicators to represent the coastline in aerial photographs. For instance, the high water line is often used; however, its determination is influenced by tides, seasonal changes, and storms, and it can be confused with prior tide lines on the beach, possibly resulting in an erroneous interpretation. The dune or cliff toe, considered a good indicator of long-term changes (Ojeda-Zújar 2000), was the best indicator in the sources used for this study. Moreover, it has been used in similar studies by Isla *et al.* (1998) and Marcomini and López (1999) in Buenos Aires

secundario hacia el sur. Para Pinamar se ha evaluado un transporte neto hacia el norte de entre 400,000 y 700,000 m³ año⁻¹ (Framiñan 1990). Otros cálculos realizados a partir de modelos matemáticos por el Ministerio de Transporte, Obras Públicas y Obras Sanitarias de los Países Bajos (1997), arrojaron que el transporte litoral entre Mar del Plata y Santa Clara del Mar es de 150,000 a 200,000 m³ año⁻¹ y de Santa Clara del Mar al Balneario Parque Mar Chiquita es de 0 a 25,000 m³ año⁻¹.

El promedio de altura de la rompiente es entre 0.6–0.8 m, calculándose en Mar del Plata un máximo de 2.3 m. El promedio del período de ola es de 10 segundos (Isla 1997). El régimen de mareas es semidiurno con amplitudes que varían entre 0.6–1 m y con un promedio de 0.91 m. Las playas están orientadas hacia el sudeste (39° N), con una pendiente usual de 4–5%. Las arenas que predominan en las playas son de finas a medias, y en los médanos la granulometría se distribuye entre arenas medias y gruesas en los sectores de cubetas de deflación y finas en las depresiones intermedanosas (Isla *et al.* 2001a). Entre el área de estudio y Punta Médanos se extienden bancos submareales, dorsales de arenas no consolidadas y finas, con una orientación 20–45° N y conectados a la costa en su sección septentrional. Su dinámica registra en la zona de Punta Médanos movimientos hacia el norte y este de 22 cm km⁻² (Parker *et al.* 1978).

En cuanto a la geomorfología costera (fig. 2), en el extremo norte del área de estudio los médanos han sido degradados hasta formar una playa arenosa. En el centro-norte, la franja de médanos está vegetada por especies arbustivas y gramíneas que impiden su movilidad. En el centro del balneario el médano frontal ha desaparecido desarrollándose un acantilado activo de poca altura, entre 2–3 m de alto. Luego, un acantilado inactivo con médanos colgados desciende bruscamente en altura. En el extremo sur se desarrolla un campo de médanos sobre los cuales la vegetación va disminuyendo hasta hacerse muy escasa, aumentando su movilidad.

Materiales y métodos

El método más utilizado para estudiar la evolución de la línea de costa consta de dos fases: la obtención de las fuentes que permitan reconstruir la línea de costa en el pasado y la utilización de técnicas y procedimientos analíticos para medir los cambios y calcular las tasas de erosión (Ojeda-Zújar 2000). Para ello es necesario definir la línea de costa a utilizar y evaluar la precisión de las fuentes de información.

En un mapa la línea de costa representa el rasgo físico donde el agua y la tierra se encuentran, pero debido a la variabilidad natural de las playas arenosas es difícil definirla. Pajak y Leatherman (2002) mencionan una serie de rasgos que pueden ser utilizados como indicadores para representarla sobre fotografías aéreas. Entre ellos es ampliamente usada la línea de pleamar, pero su determinación es influida por las mareas, cambios estacionales y tormentas, pudiéndose confundir con líneas de marea previas presentes en la playa y conducir a una

Province, and by Domínguez *et al.* (2004) in Spain, among others.

Data were obtained from four sources: (1) a historical 1949 map of the resort town (land and lot chart, Inmobiliaria Venancio 1951); (2) vertical aerial photographs corresponding to 1957 (1:15,000, Geodesy Department of Buenos Aires Province), 1967 (1:20,000, Argentine National Institute of Animal Husbandry Technology [INTA]), and 1979 and 1987 (1:10,000, Geodesy Department of Buenos Aires Province); (3) a May 2003 QuickBird satellite image from Google Earth® (spatial resolution of less than 1 m); and (4) field measurements made in 2007.

Using cartography software, based on the original town map, a 1:1 scale map was obtained fitted to topographical sheet IGM N° 3757-27-3 y 1, scale 1:50,000, from the 1965 survey. The aerial photographs and historical maps were digitized by scanner at 1,200 dpi, and then georeferenced based on a minimum of 15 control points in the Gauss Krügger flat coordinate system. The same procedure was used for the satellite image. To obtain the primary data during the 2007 field survey, measurements were taken of the streets perpendicular to the coast, from the dune toe to the reference points identified in the aerial photographs. The dune or cliff toe lines of each of the sources mentioned were digitized, and the coastline evolution map was elaborated. Transects were established approximately every 80 m perpendicular to the dune or cliff toe, from the reference points to the 1949 coastline in order to capture most of the spatial variability of the erosion process. Finally, this map was used for the geometric measurements between all the dune or cliff toe lines, and the rates of shoreline retreat or advance were obtained using the end-point rate method. This consists of calculating the distance between the first and last coastline and dividing it by the number of years elapsed; however, because of the availability of several coastlines, rates were calculated between each time period (Dolan *et al.* 1991). This method has been widely used in coastal studies (Dolan *et al.* 1991, Allan *et al.* 2003) and is still in use (Forbes *et al.* 2004, Morton *et al.* 2005).

It is important to consider the accuracy of aerial photographs for coastline mapping. Several authors have analyzed the potential errors associated with them and the measuring procedures. Anders and Byrnes (1991) reported a list of potential errors, including relief-related radial distortion. An error of 0.0000756 m was determined for the present study, considered insignificant. The vertical aerial photographs used had minimum inclination, minimizing the distortions due to inclination of the camera's optical axis, and for the most part the central area of the image was used to reduce the displacement of the points (Anders and Byrnes 1991). Other potential errors are those related to measurements and interpretation. These authors consider that the potential error of mapping the position of the coastline is ± 0.25 mm and recommend comparing at least three measurements. Regarding the potential error associated with the location of the control points, Crowell *et al.* (1991) maintain that in photographs of a

interpretación errónea. La línea de pie de médano o acantilado, considerada buen indicador de los cambios a largo plazo (Ojeda-Zújar 2000), es el mejor indicador presente en las fuentes a empleadas en este estudio. Asimismo, ha sido empleada para estudios similares por Isla *et al.* (1998) y Marcomini y López (1999) en la Provincia de Buenos Aires y en España por Domínguez *et al.* (2004), entre otros.

Se obtuvieron datos de cuatro fuentes: (1) mapa histórico del plano original del balneario de 1949 (folleto del loteo, Inmobiliaria Venancio 1951); (2) fotografías aéreas verticales correspondientes a 1957 (1:15,000, Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires), 1967 (1:20,000, INTA), y 1979 y 1987 (1:10,000, Dirección de Geodesia de la Provincia de Buenos Aires); (3) una imagen satelital QuickBird del Google Earth® de mayo de 2003 (resolución espacial menor a 1 metro); y (4) mediciones obtenidas durante trabajos de campo efectuados en 2007.

Utilizando un programa informático de diseño cartográfico, a partir del plano original del balneario se obtuvo un mapa a escala 1:1 ajustado a la hoja topográfica IGM N° 3757-27-3 y 1, a escala 1:50,000, del levantamiento de 1965. Las fotografías aéreas y los mapas históricos se digitalizaron mediante un escaner a 1,200 dpi y luego se georreferenciaron a partir de un mínimo de 15 puntos de control en el sistema de coordenadas planas Gauss Krügger. El mismo procedimiento se practicó con la imagen satelital. Para obtener los datos primarios durante los trabajos de campo en 2007 se realizaron mediciones sobre las calles perpendiculares a la costa, desde el pie de médano hasta los puntos de referencia identificados en las fotografías aéreas. Se procedió a digitalizar las líneas de pie de médano o acantilado de cada una de las fuentes mencionadas elaborándose el mapa de evolución de la línea de costa. Se trazaron transectas aproximadamente cada 80 m, perpendiculares a la línea de pie de médano o acantilado, desde los puntos de referencia hasta la línea de costa de 1949, con el fin de poder captar la mayor variabilidad espacial del proceso erosivo. Finalmente, sobre dicho mapa se realizó la medición geométrica entre todas las líneas de pie de médano o acantilado, y se obtuvieron las tasas de retroceso o avance de la línea de costa a partir del método de tasa de punto final. Éste consiste en calcular la distancia entre la primera y la última línea de costa y dividirla entre el número de años transcurridos. Sin embargo, gracias a la disponibilidad de varias líneas de costa, se calcularon tasas entre cada período de tiempo (Dolan *et al.* 1991). El método de tasa de punto final es el más utilizado históricamente en los estudios costeros (Dolan *et al.* 1991, Allan *et al.* 2003) y continúa vigente (Forbes *et al.* 2004, Morton *et al.* 2005).

Un aspecto esencial a considerar sobre la utilización de las fotografías aéreas para determinar la línea de costa es su precisión. Diversos autores han analizado los errores potenciales asociados a éstas y a los procedimientos de medición. Anders y Byrnes (1991) indican un listado de errores potenciales como la distorsión radial debido al relieve. Para el presente trabajo se ha determinado un error de 0.0000756 m, que se considera

scale of 1:10,000 it is usually less than 1 m if at least four points are used. These authors consider two groups of errors, those caused by image distortion and those associated with the interpretation and digitization of the coastline; in the worst of cases an error of 6–9 m is estimated but it is usually much less. These values are similar to those calculated for the topographic sheets.

Finally, due to the lack of certain data for the cameras used to obtain the photographs, it was not possible to accurately estimate some of the errors mentioned, though these were minimized by taking into consideration the explicit recommendations. Also, when comparing photograms of different time periods for an area where important coastline changes occur, the error is small relative to those changes, and the rates obtained are considered highly reliable (Crowell *et al.* 1991). The use of the coastline indicator selected also minimizes the variations that can be recorded due to seasonal effects (summer–winter) and the meteorological conditions of days prior to the taking of the photographs, aspects that have been considered by other authors (Isla *et al.* 1998, Marcomini and López 1999, Ojeda-Zújar 2000).

Results

Figure 3 shows the position of the coastline in 1949, 1957, 1967, 1979, 1987, 2003, and 2007. During the period 1949–1957, the most significant erosion process occurred in the study area. The northern part was the most affected, with values above 141.88 m and even of 161.88 m, while shoreline retreat in the southern half was from 130.45 to 137.25 m (table 1). The mean retreat rate for that period for all the area was 17.71 m yr⁻¹ (table 2).

During the period 1957–1967, the erosion process decreased significantly throughout the study area. The values were almost half those of the previous period, with an average of 67.72 m, and the mean annual rate decreased to 6.77 m. The northern part of the study area was again the most affected by shoreline retreat though the difference was less pronounced.

During the period 1967–1979, the movement of the dune toe line continued to decline. The least affected sector was that of the transects on both sides of the central part and the most affected was the northernmost part. The lowest rates ranged from 2.83 to 3.86 m yr⁻¹ and the highest from >4 to 5.61 m yr⁻¹ (table 2).

The erosion process decreased notably throughout the area during the period 1979–1987. Very low, even negative values were recorded for the northern part, indicating shoreline advancement. Note that in 1973 the jetty that stabilized the ebb channel was built, and a low wall was constructed parallel to the coast comprising the first two transects, considered in this study the dune toe as of that year. The values for the rest of the study area continued to decrease, except that for the southernmost transect (61.68 m, table 1). To the west of that transect, the 1987 aerial photograph showed housing construction, which may have modified the morphology of the neighbouring

despreciable. Se han utilizado fotos aéreas verticales con la mínima inclinación minimizando las distorsiones por inclinación del eje óptico de la cámara y se ha trabajado mayormente en la porción central de las mismas para reducir el desplazamiento de los puntos (Anders y Byrnes 1991). Otra fuente de error son los errores de interpretación y medición. Estos autores consideran que el error potencial al determinar la posición de la línea de costa a partir de su trazado es de ± 0.25 mm y recomiendan la comparación de al menos tres mediciones. En cuanto al error por la localización de los puntos de control, Crowell *et al.* (1991) sostienen que en fotografías con una escala 1:10,000 es usualmente menor a un metro si se utilizan al menos cuatro puntos. Dichos autores agrupan los errores en dos grupos, los ocasionados por distorsiones de las fotografías y los asociados a la interpretación y digitalización de la línea de costa, estimando en el peor de los casos un error de 6 a 9 m, pero que usualmente es mucho menor. Estos valores son similares a los calculados para las hojas topográficas.

Por último, debido a la inexistencia de ciertos datos de las cámaras que obtuvieron las fotografías, no ha sido posible estimar con precisión algunos de los errores mencionados aunque se considera que éstos se han minimizado al tener en cuenta las recomendaciones explicitadas. Asimismo, al comparar fotogramas distantes en el tiempo en un área donde los cambios de la línea de costa son importantes, el error cometido es pequeño en relación a dichos cambios, por lo que se estima que las tasas obtenidas son altamente confiables (Crowell *et al.* 1991). De esta forma, al utilizar además el indicador de la línea de costa seleccionado, también se minimizan las variaciones que pueden registrarse debido a efectos estacionales (verano–invierno) y a las condiciones meteorológicas de los días previos a la toma de fotografías, aspectos que han sido considerados por otros autores (Isla *et al.* 1998, Marcomini y López 1999, Ojeda-Zújar 2000).

Resultados

La figura 3 representa la posición de la línea de costa en 1949, 1957, 1967, 1979, 1987, 2003 y 2007. En el período 1949–1957 se registró el proceso erosivo más importante en el área de estudio, siendo la mitad norte de la misma la más afectada, con valores superiores a los 141.88 m y hasta 161.88 m; mientras que en la mitad sur el retroceso de la línea de costa fue entre 130.45 y 137.25 m (tabla 1). La tasa media de retroceso del período para el conjunto del área fue de 17.71 m año⁻¹ (tabla 2). En el siguiente período se observó una disminución importante del proceso erosivo en todo el balneario, ya que el mismo se redujo a valores próximos a la mitad de los obtenidos para el período anterior, resultando en un promedio de 67.72 m y disminuyendo la tasa media anual a 6.77 m. Se mantuvo la tendencia de la mitad norte a verse más afectada por el retroceso de la línea de costa, aunque la diferencia con la parte sur fue de menor magnitud.

Para 1967–1979 el desplazamiento de la línea de pie de médano continuó disminuyendo. El sector menos afectado fue

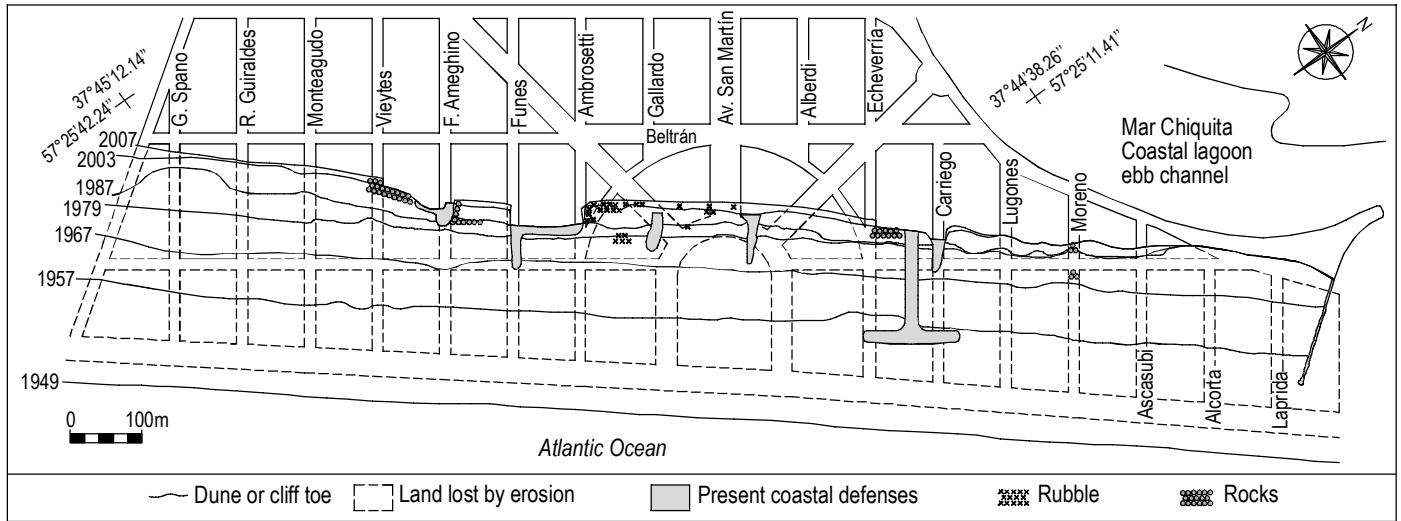


Figure 3. Coastline evolution map of Balneario Parque Mar Chiquita for the period 1949–2007.

Figura 3. Mapa de evolución de la línea de costa en el Balneario Parque Mar Chiquita durante el período 1949–2007.

dunes. In this period, the southern sector of the study area was the most affected, with values between 34.7 and 17.99 m, whereas values between 19.87 and 11.99 m were recorded for the central transects (table 1). Mean annual rates thus decreased, except in two transects of the southern sector that had higher values than in the previous period. The sector showing shoreline advance had rates of 0.16 and 0.27 m yr⁻¹, and nearby retreat rates were less than 0.87 m yr⁻¹ (table 2).

el de las transectas a ambos lados de la parte central y el más afectado el extremo norte. Las menores tasas van de 2.83 a 3.86 m año⁻¹ y las mayores por encima de los 4 y hasta 5.61 m año⁻¹ (tabla 2).

El proceso erosivo disminuyó notablemente en el área en su conjunto entre 1979 y 1987. La mitad norte del balneario registró valores muy bajos e incluso negativos, indicando un avance de la línea de costa. Es necesario destacar que en 1973

Table 1. Coastline retreat or advance (negative numbers) for each transect for each period (meters per period).

Tabla 1. Retroceso o avance (en números negativos) de la línea de costa en cada transecta para cada período (metros por período).

Transect	1949–1957	1957–1967	1967–1979	1979–1987	1987–2003	2003–2007	1949–2007
Laprida	145.79	73.96	61.78	0.00	0.00	0.00	281.53
Alcorta	147.71	73.87	67.32	0.00	0.00	0.00	288.90
Ascasubi	145.84	69.63	55.45	-1.25	13.17	0.00	282.84
Moreno	144.96	79.99	46.37	0.43	12.83	0.00	284.58
Lugones	151.68	65.98	42.85	2.66	22.67	0.00	285.84
Carriego	149.44	68.47	43.47	6.99	16.67	6.99	292.03
Echeverría	161.68	53.52	49.27	-2.16	24.54	8.81	295.66
Alberdi	145.80	65.27	50.47	11.99	22.04	8.54	304.11
San Martín Ave.	141.88	67.55	48.19	17.46	16.20	14.79	306.07
Gallardo	136.80	72.52	43.14	16.48	23.79	9.18	301.91
Ambrosetti	137.25	72.98	35.12	19.87	23.15	2.16	290.53
Funes	134.61	71.10	33.97	16.74	20.48	7.61	284.51
F Ameghino	136.07	58.59	47.15	20.79	18.89	5.65	287.14
Vieytes	135.71	64.88	51.37	17.99	33.78	11.76	315.49
Monteagudo	130.45	70.83	49.52	34.7	31.05	9.43	325.98
R Guiraldes	131.38	64.20	51.80	33.47	40.65	3.77	325.27
G Spano	132.04	57.82	58.54	61.68	13.42	7.26	330.76
Mean	141.71	67.72	49.16	15.17	19.61	5.64	299.01

During the period 1987–2003, the study area showed a different behaviour, and the tendency observed in the previous period regarding the southern sector being the most affected and the northern the least was less marked. The erosion process began to intensify in the northern part and the annual rates increased five-fold, from retreat rates (or shoreline advance) of less than 0.33 to 1.53 m yr⁻¹ (table 2). The central and southern transects showed lower values than in the previous period, some even decreasing to less than half. The overall area experienced a retreat rate of 1.23 m yr⁻¹, compared with 1.9 m yr⁻¹ in the previous period (table 2).

During the period 2003–2007, shoreline retreat was not observed to the north. The rest of the transects showed dissimilar values and no sector in particular stood out in terms of greater degree of impact. The annual rates for the rest of the area indicate a significant increase in values, from several centimeters to 2.7 m yr⁻¹ in the central transect. Therefore, even though the annual rate in this period for all the study area increased slightly relative to the previous period, with a value of 1.41 m yr⁻¹, it masks important differences between the northernmost part and the rest of the area.

The overall behaviour of the study area throughout the period analyzed (1949–2007) revealed a mean shoreline retreat of 299.01 m, with minimum and maximum values of 281.53 and 330.76 m in the northernmost and southernmost transects, respectively (table 1). The mean retreat rate for all the study area was 5.16 m yr⁻¹ for the last 58 years (table 2).

se construyó el espigón que estabilizó el canal de desembocadura de la albufera y un muro de baja altura en sentido paralelo a la costa que abarca las dos primeras transectas, y que fue considerado desde entonces como pie de médano para el análisis. Los valores del resto del área continuaron su descenso con excepción de la transecta más austral (61.68 m, tabla 1). Hacia el oeste de dicha transecta, de acuerdo a lo observado en la fotografía aérea de 1987, se hallaba en construcción una vivienda, hecho que posiblemente haya modificado la morfología de los médanos circundantes. En este período el sector más afectado fue el sur, ya que registró los valores más altos, dejando de lado el mencionado previamente, entre 34.7 y 17.99 m, mientras que los de las transectas centrales alcanzaron valores entre 19.87 y 11.99 m (tabla 1). Las tasas medias anuales, por consiguiente, muestran un descenso en sus valores a excepción de dos transectas en el sector sur, con tasas mayores que en el período anterior. El sector que experimentó avance de la línea de costa arrojó tasas de 0.16 y 0.27 m año⁻¹ y en sus cercanías las tasas de retroceso fueron menores a 0.87 m año⁻¹ (tabla 2).

Entre 1987 y 2003 el área mostró un comportamiento diferencial, atenuándose la tendencia del período anterior de ser el sector sur el más afectado y el norte el menos. El proceso erosivo comenzó a aumentar en la mitad norte del área con tasas anuales de retroceso (o de avance) de la línea de costa que se quintuplicaron de menos de 0.33 m año⁻¹ hasta 1.53 m año⁻¹ (tabla 2). Las transectas del centro y sur arrojaron valores

Table 2. Coastline retreat or advance (negative numbers) rates for each transect for each period (meters per year).

Tabla 2. Tasas de retroceso o avance (en números negativos) de la línea de costa en cada transecta para cada período (metros por año).

Transecta	1949–1957	1957–1967	1967–1979	1979–1987	1987–2003	2003–2007	1949–2007
Laprida	18.22	7.40	5.15	0.00	0.00	0.00	4.85
Alcorta	18.46	7.39	5.61	0.00	0.00	0.00	4.98
Ascasubi	18.23	6.96	4.62	-0.16	0.82	0.00	4.88
Moreno	18.12	8.00	3.86	0.05	0.80	0.00	4.91
Lugones	18.96	6.60	3.57	0.33	1.42	0.00	4.93
Carriego	18.68	6.85	3.62	0.87	1.04	1.75	5.04
Echeverría	20.21	5.35	4.11	-0.27	1.53	2.20	5.10
Alberdi	18.23	6.53	4.21	1.50	1.38	2.14	5.24
San Martín Ave.	17.74	6.76	4.02	2.18	1.01	3.70	5.28
Gallardo	17.10	7.25	3.60	2.06	1.49	2.30	5.21
Ambrosetti	17.16	7.30	2.93	2.48	1.45	0.54	5.01
Funes	16.83	7.11	2.83	2.09	1.28	1.90	4.91
F Ameghino	17.01	5.86	3.93	2.60	1.18	1.41	4.95
Vieytes	16.96	6.49	4.28	2.25	2.11	2.94	5.44
Monteagudo	16.31	7.08	4.13	4.34	1.94	2.36	5.62
R Guiraldes	16.42	6.42	4.32	4.18	2.54	0.94	5.61
G Spano	16.51	5.78	4.88	7.71	0.84	1.82	5.70
Mean	17.71	6.77	4.10	1.90	1.23	1.41	5.16

Discussion

Shoreline retreat rates

The shoreline retreat rate obtained for all the study area between 1957 and 1979 was 5.31 m yr^{-1} , similar to the value ($6\text{--}3.5 \text{ m yr}^{-1}$) calculated by Schnack *et al.* (1983) based on aerial photographs of Mar Chiquita/Mar de Cobo. Isla (1997) recorded erosion values of about 7 m yr^{-1} for 1980.

Within the region, erosion rhythms of $1\text{--}2.3 \text{ m yr}^{-1}$ were reported for the Municipality of Pinamar (Isla *et al.* 2001b) obtained by a comparison of aerial photographs for the years 1957 and 1980. Villa Gesell showed less significant values and beach stability or slight accumulation, while generalized erosion was observed to the south (Isla *et al.* 1998). In Mar del Plata, to the south of Mar Chiquita, rates ranged from 0.2 to 1.4 m yr^{-1} , with values of 5 m yr^{-1} in certain sectors of the southern cliffs (Schnack *et al.* 1983).

The results obtained show that the erosion process decreased notably at Balneario Parque Mar Chiquita especially after 1979. There was a period of greater erosion between 1949 and 1957, and one of lesser erosion between 1987 and 2003. The overall values mask important differences among the transects evaluated, indicating that the phenomenon behaves differently in the local space, since the southern sector was the most affected by the erosion process. The shoreline retreat rates also indicated spatial and temporal variability between 1975 and 1999 in southern Brazil (Esteves *et al.* 2002).

Natural and anthropogenic factors causing coastal degradation

The factors causing coastal degradation and erosion can be of natural and/or anthropogenic origin. Natural factors produce greater effects and changes along the coastline when human activities augment them or interrupt the natural processes of beach reconstruction. Coastal erosion is a very dynamic and changing phenomenon, and its causes can vary in temporal and spatial scales thus hindering its detection, since it often has a regional rather than a local origin.

Regional changes are those experienced globally by the coast and they determine the total sediment balance, acting in a time scale of decades or more (Sánchez-Arcilla and Jiménez 1994). They are produced by variations in sediment input and sea level, and by urban growth and coastal dune fixation. The evolutionary trend of a stretch of coast in several years and in a space of several kilometers indicates medium-term changes. The agents are wave action and variations in longitudinal sediment transport. On the other hand, short-term changes are those undergone by the beach profile and related primarily to waves and winds, considering their seasonal action in a time of less than one year. Episodic changes are of considerable magnitude and originate from the action of highly energetic agents with a long period of recurrence. They occur randomly and are very localized (Sánchez-Arcilla and Jiménez 1994).

menores que en el período anterior, incluso algunas disminuyeron a menos de la mitad. En conjunto el área experimentó una tasa de retroceso de 1.23 m año^{-1} mientras que en el período anterior ésta fue de 1.9 m año^{-1} (tabla 2).

En el último período analizado (2003–2007) no se registró retroceso de la línea de costa al norte y las demás transectas mostraron valores disímiles. No se observó ningún sector en particular con mayor grado de afectación. Sin embargo, las tasas anuales del resto del área muestran un incremento significativo en sus valores desde varios centímetros a 2.7 m año^{-1} en la transecta central. Por lo tanto, a pesar de que la tasa anual del período para todo el balneario aumentó levemente con respecto al anterior, con un valor de 1.41 m año^{-1} , la misma oculta diferencias importantes entre el extremo norte y el resto del área.

En cuanto al comportamiento global del balneario en todo el período analizado, se registró un retroceso medio de la línea de costa de 299.01 m , con valores mínimo y máximo de 281.53 y 330.76 m en la transectas extremas norte y sur, respectivamente (tabla 1). La tasa media de retroceso para todo el balneario arrojó un valor de 5.16 m año^{-1} para los últimos 58 años (tabla 2).

Discusión

Tasas de retroceso de la línea de costa

La tasa de retroceso de la línea de costa obtenida para el balneario en su conjunto entre 1957 y 1979 fue de 5.31 m año^{-1} , valor similar al de $6\text{--}3.5 \text{ m año}^{-1}$ para 1980 calculado por Schnack *et al.* (1983) a partir de fotografías aéreas para Mar Chiquita-Mar de Cobo. Isla (1997) registró valores de erosión de alrededor de 7 m año^{-1} para 1980.

Dentro de la región, el partido de Pinamar ha experimentado ritmos de erosión de $1\text{--}2.3 \text{ m año}^{-1}$ (Isla *et al.* 2001b) de acuerdo a la comparación de fotografías aéreas de 1957 y 1980. El partido de Villa Gesell ha arrojado valores menos significativos y estabilidad de las playas o leve acumulación, mientras que hacia el sur registró una erosión generalizada (Isla *et al.* 1998). Al sur del área de estudio, Mar del Plata ha experimentado tasas de entre 0.2 y 1.4 m año^{-1} , con valores de 5 m año^{-1} en sectores puntuales de los acantilados del sur (Schnack *et al.* 1983).

Los resultados obtenidos muestran que el proceso erosivo disminuyó notablemente en el Balneario Parque Mar Chiquita principalmente a partir de 1979. Existió un período de mayor erosión entre 1949 y 1957 y otro menor entre 1987 y 2003. Asimismo, los valores globales encubren importantes diferencias entre las transectas evaluadas, evidenciando que el fenómeno se manifiesta en forma desigual en el espacio local ya que el sector sur fue el más afectado por el proceso erosivo. Las tasas de retroceso de la línea de costa también arrojaron variabilidad espacial y temporal entre 1975 y 1999 en el sur de Brasil (Esteves *et al.* 2002).

The study area has undergone significant changes in beach nourishment. As the dunes have for the most part been stabilized, littoral drift is primarily responsible for sand input. This supply has also been altered by processes producing sand loss such as reaccommodation (sand not returned to the beach), sand exploitation, and construction of coastal defenses (breakwaters, jetties, etc.) that interrupt the littoral drift. These factors have led to a decrease in the sand supplied by littoral drift, producing medium- and long-term changes not just in the study area but also at a regional level. Similar effects have been observed in southern Brazil (Esteves *et al.* 2002). The breakwaters in the port of Mar del Plata have almost completely obstructed the littoral drift. From there to Balneario Parque Mar Chiquita, inputs to the drift current are practically nonexistent since contributions due to rivers and dunes are minimum, and the amount of material that could reach the study area and be retained there is very scarce.

The natural local factors producing short-term and episodic shoreline changes are the summer and winter cycles and storms. Seasonal cycles have been recorded for both sediment balances and beach morphology, and they are superposed by smaller cycles due to episodic storms (Isla 1990). The storms that mainly affect Buenos Aires Province originate in the South Atlantic and reach it from the south and southeast. Locally they are called *Sudestadas* (southeasters, D'Onofrio *et al.* 2008) and their effects have mainly been studied for Río de la Plata due to the flooding and serious socio-economic impacts that they cause to the city of Buenos Aires and surrounding areas (Celemín 1984, Escobar *et al.* 2004, D'Onofrio *et al.* 2008). Little detailed information is available for their effects on beaches.

Sudestadas are characterized by episodes of strong winds, with speeds of 20–50 km h⁻¹ when less intense but greater than 75 km h⁻¹ when most intense (Celemín 1984), often accompanied by rainfall. They usually last for approximately 24–72 h but occasionally for 144 h (Celemín 1984), though their duration has been found to increase (D'Onofrio *et al.* 2008). According to a statistical analysis of *Sudestadas* conducted by Escobar *et al.* (2004), their annual distribution indicates that they are more frequent in the summer than in winter, with two maxima in early spring and summer. These authors observed an increase in the frequency of storms, from 44 in the period 1961–1970 to 79 in 1990–2000.

Sudestadas cause important storm surges (rise in sea level above the predicted astronomical tide). Lanfredi *et al.* (1998) recorded storm surges reaching 1.5 m in Buenos Aires Province. In southern Brazil, southerly and southeasterly winds produce surge heights of 1–1.3 m (Esteves *et al.* 2002). Similar values have been reported by Forbes *et al.* (2004) for northeastern Canada, where the erosion rates are also similar to those of Balneario Parque Mar Chiquita.

At the study area, during winter *Sudestadas* cross over a narrow sand bank and converge perpendicularly on the beaches. In spring and summer, the predominant northeasterly winds induce divergent waves that cross over submarine banks

Factores naturales y antrópicos que originan degradación del área costera

Los factores que causan procesos erosivos y degradación del área costera pueden ser de origen natural y/o antrópico. Los factores naturales producen cambios y ocasionan efectos mayores en las costas cuando las acciones del hombre los potencian o interrumpen los procesos naturales de reconstrucción de las playas. La erosión costera es un fenómeno muy dinámico y cambiante, por lo tanto sus causas pueden variar en las escalas temporal y espacial dificultándose su detección, ya que no siempre tienen un origen local, sino muchas veces regional.

Los cambios regionales son los que experimenta la costa de forma global y determinan el balance total de sedimentos, actuando en una escala temporal de décadas o superior (Sánchez-Arcilla y Jiménez 1994). Son producidos por variaciones en el aporte de sedimentos y en el nivel del mar, la expansión de la urbanización y la fijación de los médanos costeros. La tendencia evolutiva de un tramo costero en varios años y de varios kilómetros corresponde a cambios a mediano plazo. Sus agentes son el oleaje y las variaciones en el transporte longitudinal de sedimentos. Los cambios a corto plazo, en cambio, son los experimentados en el perfil de playa y sus principales factores causantes son el oleaje y el viento considerando su acción estacional en un tiempo menor a un año. Los cambios episódicos son de gran magnitud y se originan a partir de la acción de agentes altamente energéticos con un largo período de recurrencia; son aleatorios y muy localizados (Sánchez-Arcilla y Jiménez 1994).

El área de estudio ha sufrido importantes cambios en la alimentación de sus playas. Debido a que los médanos han sido mayormente estabilizados, la deriva litoral constituye el principal aporte de arena a las playas. Dicho suministro también ha sido alterado principalmente por procesos de pérdida de arena por reacomodamiento (al no ser devuelta a la playa), explotación y construcción de defensas costeras (espigones, escolleras) que interrumpen la deriva litoral. Estos factores han ocasionado una disminución de los aportes de sedimentos por deriva a las playas, produciendo cambios a mediano y largo plazo y no sólo en el área de estudio sino también a nivel regional. Se han observado efectos similares en el sur de Brasil (Esteves *et al.* 2002). Las escolleras del puerto de Mar del Plata han obstruido casi totalmente la deriva litoral y desde allí hasta el área de estudio los aportes a esta corriente son prácticamente inexistentes ya que hay mínimas contribuciones por cursos fluviales y médanos; por consiguiente, el material en tránsito que puede llegar hasta el balneario y quedarse en él es muy escaso.

Los factores naturales que producen cambios en la línea de costa a corto plazo y episódicos, son los ciclos de verano e invierno y las tormentas. Se han observado ciclos estacionales tanto en los balances sedimentarios como en la morfología de las playas, y ciclos menores originados por tormentas episódicas que se superponen a los anteriores (Isla 1990). Las tormentas que afectan principalmente a la Provincia de Buenos

(Isla 1997), causing the external sand bank formed in autumn and winter at the mouth of the lagoon to nourish the closest beaches (Lanfredi *et al.* 1987). According to Isla (1990), the effect of the storms is followed by beach recovery as indicated by the migration of bars and ridges, located behind the back-beach; however, when a series of storms occur in a short period of time, the beach is unable to recover since the sand is deposited too far offshore and significant erosion can occur (Isla 1994). At the seaside resort, the foredune has disappeared or is fixed by vegetation, so waves can remove a greater volume of sand from the backbeach resulting in shoreline retreat. Erosion scarps, uncovered abrasion platform, and construction debris have thus been found on the beaches (fig. 4). As shoreline retreat has occurred in the study area, the storms have increased their erosive action due to the diminishing beach protection. This factor is considered one of the most significant natural causes of erosion in the study area, as well as in southern Brazil (Esteves *et al.* 2002). *Sudestadas* have also been found to cause important variations in beach profiles at Villa Gesell (Marcomini and López 1997) and in most of the eastern part of Buenos Aires Province (Bértola 2006).

Regarding anthropogenic factors, the presence of buildings and transportation infrastructure along the coastal band has proved harmful to the environment, since they were located on the foredunes whose main function is to provide the beach with sediment, maintain its dynamic equilibrium, and serve as an area to retain rainwater. In 1949 (date of foundation of the town), the resort's streets and blocks were delimited and the dunes were removed, levelled, or fixed by vegetation. There has been rapid alteration of the natural dynamics since then, and these actions contributed to the strong erosion observed between 1949 and 1957. Until 1979, live dunes were still found in the southern sector of the resort, whereas in the rest of the area they had been fixed, coinciding with the lower erosion rates found for that part. In 1979 the vegetation and urbanization began to extend to the southern sector and the erosion rates began to increase and are now amongst the highest recorded (Merlotto and Bértola 2008). Similar actions have also played a fundamental role in shoreline retreat in southern Brazil (Esteves *et al.* 2002).

Excessive foredune fixation is another factor that alters the natural dynamics of a beach because it induces the entrapment of fine sands within a time scale of several years. Beaches cede sand to the sea and dunes, but as the latter are forested it is not returned (Isla 2006). This action was identified as one of the causes that indirectly provoked shoreline erosion at Villa Gesell (Juárez and Isla 1999) and other beaches to the south of Querandí Lighthouse (Isla *et al.* 1998). Another aspect is sand transport to the urbanized area, which is not returned to the beach by the westerly winds. Until a few years ago, live dunes were removed by municipal authorities when they impeded traffic circulation or when they were moved by winds and threatened houses. Dune degradation as a result of deflation basins is also important, and recreational activities and vehicle transit also contribute to the natural damage and possible

Aires se originan en el Atlántico sur y llegan a la misma con dirección sur y sudeste. Se denominan localmente *Sudestadas* (*southeasters*, D'Onofrio *et al.* 2008) y sus efectos han sido estudiados principalmente para el Río de la Plata debido a las inundaciones con graves impactos socio-económicos que ocasionan en la Ciudad de Buenos Aires y sus alrededores (Celemin 1984, Escobar *et al.* 2004, D'Onofrio *et al.* 2008). Poco se ha profundizado en el estudio de sus efectos con relación a las playas.

Las *Sudestadas* comprenden episodios de vientos fuertes con velocidades de 20–50 km h⁻¹ las leves y más de 75 km h⁻¹ las más intensas (Celemin 1984), acompañados frecuentemente con precipitaciones. Duran aproximadamente de 24 a 72 horas y algunos eventos de menor recurrencia pueden extenderse hasta por 144 horas (Celemin 1984), aunque se ha detectado un incremento en su duración (D'Onofrio *et al.* 2008). De acuerdo con el análisis estadístico de las *Sudestadas* realizado por Escobar *et al.* (2004), su distribución anual indica que son más frecuentes en el verano que en invierno, con dos máximos, uno a comienzos de la primavera y otro durante el verano. Estos autores observaron un aumento en la frecuencia de ocurrencia de tormentas, de 44 en 1961–1970 a 79 en 1990–2000.

Las *Sudestadas* ocasionan importantes elevaciones del nivel del mar sobre la marea astronómica pronosticada (*storm surges*). Lanfredi *et al.* (1998) señalan que se han registrado este tipo de fenómenos, de hasta 1.5 m, en la Provincia de Buenos Aires. En el sur de Brasil, vientos del S-SE las ocasionan de alrededor de 1 m pudiendo llegar a 1.3 m (Esteves *et al.* 2002). Forbes *et al.* (2004) han hallado valores similares en el noreste de Canadá, donde las tasas de erosión también son semejantes a las del Balneario Parque Mar Chiquita.

En el área de estudio, durante el invierno, las *Sudestadas* atraviesan un banco de arena angosto y convergen perpendicularmente en las playas. Durante la primavera y el verano, los vientos predominantes del noreste inducen olas divergentes que atraviesan el campo de bancos submarinos (Isla 1997) y ocasionan que el banco de arena exterior formado en otoño e invierno en la boca de la desembocadura de la albufera alimente a las playas más inmediatas (Lanfredi *et al.* 1987). Isla (1990) sostiene que el efecto de las tormentas es sucedido por una recuperación de la playa evidenciada por la migración de barras y dorsales, adosadas posteriormente a la playa distal. Sin embargo, cuando una serie de tormentas ocurren en un período corto de tiempo, la playa no puede recuperarse ya que la arena se deposita demasiado lejos mar adentro produciéndose una importante erosión de la misma (Isla 1994). En el balneario, el médano frontal ha desaparecido o está fijado por vegetación, por lo tanto la acción del oleaje puede retirar un mayor volumen de arena de la zona distal provocando el retroceso de la línea de costa. Como consecuencia, se ha observado la plataforma de abrasión al descubierto, escarpas de erosión y construcciones destruidas sobre las playas (fig. 4). Por consiguiente, a medida que en el área de estudio fue retrocediendo la línea de costa, las tormentas han incrementado su acción erosiva debido a la cada vez menor protección con que han



Figure 4. Cliff retreat to the left of San Martín Ave. during *Sudestada* storms in (a) May 2006, (b) October 2006, and (c) January 2007. (d) Collapsed building on the beach next to San Martín Ave. in May 2006.

Figura 4. Retroceso del acantilado a la izquierda de la Av. San Martín durante *Sudestadas* de (a) mayo de 2006, (b) octubre de 2006 y (c) enero de 2007. (d) Derrumbe de construcción balnearia próxima a la Av. San Martín en mayo de 2006.

disappearance of dunes (Bértola and Cortizo 2005). Such activities currently occur in the southern part of the study area.

Even though storm drainage systems flowing directly onto the beaches have not been built in the area, the streets perpendicular to the coast and slanted towards it act as such. The rainwater runs down them and onto the beaches, where it forms channels or gullies that carry the sand out to sea. When the storm has passed, the channels can be leveled off by waves only to reappear with the next rains, once again eroding the beach. If the channels persist after the runoff, they provide an access for the seawater when it rises during high tides or other storms. This situation has been observed along San Martín Avenue, which is the only paved road (fig. 5). This factor, together with storm action, would explain the higher rates of erosion in this transect in the last period analyzed.

Beach erosion is considered an immediate consequence of sand extraction, since the littoral drift transport is affected by a lack of material as a result of the extraction of equal sand volumes as those inputted (Schnack *et al.* 1983). Sand extraction not only affects the areas where it is performed but also increments the erosion of beaches to the north (Marcomini and López 1999), its impact becoming apparent in the medium

contado las playas. Este factor constituye para el área de estudio una de las causas naturales más significativas de erosión, considerada su acción importante además en el sur de Brasil (Esteves *et al.* 2002). Asimismo se estima que las *Sudestadas* causan importantes variaciones en los perfiles de playa en Villa Gesell (Marcomini y López 1997) y en gran parte de la zona este de la provincia (Bértola 2006).

Entre los factores antrópicos, la presencia de edificaciones y vías de comunicación en la franja costera origina situaciones perjudiciales al medio natural ya que, en gran medida, éstas se han realizado sobre los médanos frontales cuya principal función es la de proveer sedimento a la playa, mantener su equilibrio dinámico y ser el área de reserva de aguas de lluvia. En 1949 (fecha de fundación del pueblo) se trazaron manzanas y calles para el loteo del balneario y para ello los médanos fueron retirados, nivelados y fijados a partir de su forestación. A partir de esas acciones se alteró rápida y bruscamente la dinámica natural, constituyendo una de las causas de la fuerte erosión entre 1949 y 1957. Hasta 1979 en el sector sur del balneario se encontraban médanos vivos mientras que en el resto del área se habían fijado, lo cual coincide con las menores tasas de erosión en aquel sector. A partir de esa fecha la urbanización y la



Figure 5. San Martín Ave. viewed from the beach: (a) January 2007 and (b) April 2007. Observe the rubble and the decrease in beach level.

Figura 5. Vista de la Av. San Martín desde la playa: (a) enero de 2007 y (b) abril de 2007. Obsérvense los restos de escombros y el descenso del nivel de playa.

term. The growth of coastal cities during the 1970s and 1980s strongly increased the demand for sand, which was also supplied to inner parts of the province. Sand extraction has been considered one of the most important causes of coastal deterioration in Mar Chiquita (Fundación CEPA-Municipalidad de Mar Chiquita 1991), and was banned here and elsewhere in 1977 (Law Decree N° 8,758); however, in reality it is permitted by state entities and was carried out along the southern beaches of the Municipality of Mar Chiquita in the 1980s and 1990s (Merlotto 2007). Sand is currently being extracted along the southern breakwater of Mar del Plata to make it more effective.

Finally, coastal defenses obstruct the littoral drift since they retain sand on their southern side thus decreasing the supply northward. Their negative effect intensifies the more they extend offshore reaching the closure depth, such as the Mar del Plata breakwaters. Construction of these breakwaters finished in 1914 and 1919 and, since then, all the beaches to the north of them have undergone erosion problems, while excessive accumulation has occurred to the south. Jetties were conducted between the 1920s and 1970s with positive results, but the regional sediment balance was modified and erosion increased in unprotected areas (Schnack *et al.* 1983) in a medium- to long-term time scale. Erosion processes have been evident at Santa Clara del Mar since it was founded in 1949, and seven jetties were constructed in 1983 in order to retain sand (Orensanz 1986). In the 1990s, three breakwaters were built in Mar de Cobo, a seaside resort located 9 km to the south of Balneario Parque Mar Chiquita (Álvarez 2005). All the above coastal defenses have thus contributed to reduce the sediment transport northwards, affecting sand input to the beaches of Mar Chiquita.

The above situation can be considered another cause of the intense erosion process undergone in the study area between 1949 and 1979. Numerous coastal defenses were built after 1979 and they have contributed to reduce shoreline retreat. From 1982 to 1985, structures were erected along the coastline

vegetación se extendieron hacia el sector sur y las tasas de erosión comenzaron a incrementarse, ubicándose entre las más altas del balneario (Merlotto y Bértola 2008). Esto también jugó un rol fundamental en el retroceso de la línea de costa en el sur de Brasil (Esteves *et al.* 2002).

La excesiva fijación de los médanos frontales es otro factor que altera la dinámica natural de la playa al inducir el entrapamiento de las arenas finas, en una escala temporal de varios años. Las playas ceden arena hacia el mar y hacia los médanos, pero como éstos están forestados, ya no la devuelven a las playas (Isla 2006). Ésta fue identificada como una de las causas indirectas de la erosión de la línea de costa en Villa Gesell (Juárez e Isla 1999) y en playas situadas al sur del Faro Querandí (Isla *et al.* 1998). Otro aspecto es el transporte de arena hacia el área urbanizada, arena que no es devuelta a la playa por los vientos del oeste. Hasta hace pocos años los médanos vivos eran eliminados por la municipalidad cuando impedían la circulación o cuando el viento los trasladaba y cubrían viviendas. La degradación de los médanos a partir de las cubetas de deflación también es importante así como por las actividades recreativas y el tránsito de vehículos, acciones que intensifican el daño natural a los médanos y pueden ocasionar su desaparición (Bértola y Cortizo 2005). Estas actividades se realizan actualmente en el sector sur del área de estudio.

A pesar de que en el área no se han construido desagües pluviales hacia las playas, las calles perpendiculares a la costa con declive hacia ella y con menor altura que las manzanas actúan como tales, ya que por ellas escurren las precipitaciones originando “cauces” en la playa y arrastrando la arena hacia el mar. Al pasar la tormenta, el cauce puede desaparecer al nivelarse por la acción de los vientos, pero con las siguientes precipitaciones éste vuelve a formarse, erosionando nuevamente la playa. Asimismo si las cárcavas perduran luego de la escorrentía, se constituyen en una vía de acceso del agua de mar cuando crece por pleamares o tormentas. Esto se ha observado principalmente en la Av. San Martín que es la única vía pavimentada

using diverse materials (prefabricated concrete, rocks, rubble, tractor covers). In the early 1990s, the piers and jetties that currently protect the resort were built, and the first of three projected breakwaters was recently finished. In addition to this project, the existing structures were reconditioned and endangered sections were protected with rocks. Nevertheless, visual deterioration of the landscape is evident in some parts due to the presence of construction material and debris scattered along the beaches.

In summary, coastal erosion has notably decreased in intensity since the resort was founded but it is still meaningful. *Sudestada* storms constitute one of the most important natural factors and their effects have increased due to human activities such as dune fixation. Also, the planning of streets (which act as storm drains) and urban growth are the main source of local anthropogenic erosion. Regionally, sand extraction, even though it has for the most part ceased, has affected sand input by littoral drift to the resort, as have the coastal defenses built to the south of the study area. Consequently, the magnitude of beach nourishment due to littoral drift is minimal compared with the inputs that favoured the formation of dune chains, an environment that characterized the area more than 60 years ago.

Acknowledgements

This study was partially funded by the National University of Mar del Plata. We thank R Ferraro for valuable comments and suggestions, as well as MC Villar, G Witkin, R Sciarrone, and the Minister of the Municipal Delegation of Mar Chiquita for the information and material provided during the interviews.

English translation by Christine Harris.

References

- Allan JC, Komar PD, Priest GR. 2003. Shoreline variability on the high-energy Oregon coast and its usefulness in erosion-hazard assessments. *J. Coast. Res.* 51(38): 83–105.
- Álvarez J. 2005. El fenómeno de la erosión afecta a todo el sector marítimo de la provincia de Buenos Aires. La situación en Mar de Cobo y La Caleta. <http://www.todomardelplata.com/noticias>.
- Anders FJ, Byrnes MR. 1991. Accuracy of shoreline change rates as determined from maps and aerial photographs. *Shore Beach* 59: 17–26.
- Bértola GR. 2006. Morfodinámica de playas del sudeste de la Provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *ASS Rev.* 13: 31–57.
- Bértola GR, Cortizo LC. 2005. Transporte de arena en médanos litorales activos y colgados del sudeste de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 60: 174–184.
- Bertoncello R. 1992. Configuración socio-espacial de los balnearios del Partido de la Costa (Provincia de Buenos Aires). *Territorio* 5: 18–55.
- Celemín AH. 1984. *Meteorología Práctica*. Edición del autor, Mar del Plata, 313 pp.
- Crowell M, Leatherman SP, Buckley MK. 1991. Historical shoreline change: Error analysis and mapping accuracy. *J. Coast. Res.* 7: 839–852.
- (fig. 5) y, junto a la acción de las tormentas, explicaría las mayores tasas de erosión de esta transecta en el último período analizado.
- La erosión de las playas es considerada como una consecuencia inmediata de la extracción de arena, que afecta por déficit de material al transporte por deriva litoral, ya que se han extraído volúmenes equiparables al aporte de sedimentos por esa vía (Schnack *et al.* 1983). La actividad extractiva no sólo afecta las áreas donde es llevada a cabo, sino que incrementa la erosión de playas hacia el norte (Marcomini y López 1999), con efectos que se manifiestan en el mediano plazo. El crecimiento de las ciudades costeras durante las décadas de 1970 y 1980 incrementó fuertemente la demanda de arena, abasteciendo además estos yacimientos a partidos del interior de la provincia. La extracción de arena ha sido considerada como una de las causas más importantes del deterioro costero en el partido de Mar Chiquita (Fundación CEPA-Municipalidad Mar Chiquita 1991), por lo que fue prohibida en 1977 (Decreto Ley N° 8,758) en Mar Chiquita y otros partidos. Sin embargo, en las décadas de 1980 y 1990 se permitía la extracción a entidades públicas estatales y fue realizada por la municipalidad de Mar Chiquita en playas al sur del partido (Merlotto 2007). Actualmente todavía se extrae arena de la escollera sur del puerto de Mar del Plata para su mejor funcionamiento.
- Por último, las defensas costeras obstruyen la deriva litoral ya que actúan reteniendo arena en su lado sur y disminuyendo el suministro hacia el norte. Su efecto negativo aumenta cuando son excesivamente prolongadas hacia el interior del mar alcanzando la profundidad de clausura de la deriva, como las escolleras del puerto de Mar del Plata, terminadas en 1914 y 1919. A partir de entonces, éstas ocasionaron problemas de erosión a todas las playas situadas al norte de ellas y excesiva acumulación al sur. Entre las décadas de 1920 y 1970 se construyeron espigones con resultados locales positivos, pero se modificó el balance sedimentario regional, resultando un incremento de la acción erosiva en los sectores desprotegidos (Schnack *et al.* 1983) en una escala temporal de mediano a largo plazo. Los procesos erosivos comenzaron a evidenciarse en Santa Clara del Mar desde su fundación en 1949, hasta que en 1983 se construyeron siete espigones con la finalidad de retener la arena (Orensanz 1986). En la década de 1990 se construyeron tres escolleras en Mar de Cobo, balneario ubicado 9 km al sur del área de estudio (Álvarez 2005). Todas las defensas mencionadas han contribuido a disminuir el transporte de sedimentos hacia el norte, afectando el aporte de arena a las playas del Balneario Parque Mar Chiquita.
- La situación descrita anteriormente podría ser considerada como otra de las causas del intenso proceso erosivo sufrido en el área de estudio entre 1949 y 1979. A partir de 1979 se han realizado numerosas defensas costeras que, se estima, han contribuido a disminuir el retroceso de la línea de costa. Entre 1982 y 1985 se construyeron obras paralelas a la costa con materiales diversos (elementos premoldeados de hormigón, rocas, escombros, cubiertas de tractor). A comienzos de la década de 1990 se construyeron los espigones y escolleras que

- Delgado-González O, Lizárraga-Arciniega R, Martínez-Díaz de León A, Galindo-Bect L, Fermán-Almada JL, Sánchez-Arcilla A, Mosso C, Pérez-Higuera R, Cruz-Varela A. 2005. Cambios en la posición de la línea de playa de la boca del Estero de Punta Banda, Baja California, durante 1972–2003. *Cienc. Mar.* 31: 707–717.
- Dolan R, Fenster MS, Holme SJ. 1991. Temporal analysis of shoreline recession and accretion. *J. Coast. Res.* 7: 723–744.
- Domínguez L, Gracia FJ, Anfuso G. 2004. Tasas de avance/retroceso de la línea de costa mediante morfometría fotogramétrica en el sector Sanlúcar de Barrameda-Rota (Provincia de Cádiz). *Rev. Soc. Geol. España* 17: 71–86.
- D'Onofrio EE, Fiore MME, Pousa JL. 2008. Changes in the regime of storm surges at Buenos Aires, Argentina. *J. Coast. Res.* 24: 260–265.
- Escobar G, Vargas W, Bischoff S. 2004. Wind tides in the Río de la Plata estuary: Meteorological conditions. *Int. J. Climatol.* 24: 1159–1169.
- Esteves LS, Toldo Jr EE, Dillenburg SR, Tomazelli LJ. 2002. Long- and short-term coastal erosion in southern Brazil. *J. Coast. Res.* SI(36): 273–282.
- Fasano JL, Hernández MA, Isla FI, Schnack EJ. 1982. Aspectos evolutivos y ambientales de la albufera Mar Chiquita (Provincia de Buenos Aires, Argentina). *Oceanol. Acta SP*: 285–292.
- Forbes DL, Parkes GS, Manson GK, Ketch LA. 2004. Storms and shoreline retreat in the southern Gulf of St. Lawrence. *Mar. Geol.* 210: 169–204.
- Framiñan M. 1990. Transporte de sedimentos en Pinamar, Provincia de Buenos Aires. II Jornadas de Oceanografía Física y XVI Reunión Científica de la Asociación Argentina de Geofísicos y Geodestas, 15 pp.
- Fundación CEPA-Municipalidad de Mar Chiquita. 1991. Documento de Base Pautas para una Planificación Preventiva del Parque Atlántico Mar Chiquita. Mimeo, La Plata, 53 pp.
- Isla FI. 1990. Tendencias litorales y transversales de transporte en playas y boca de marea: Mar Chiquita, Buenos Aires. *Rev. Asoc. Argent. Mineral. Petrol. Sedimentol.* 21: 75–87.
- Isla FI. 1994. Evaluación del deterioro de playas causado por el temporal del 24 de junio de 1994. HCD, Municipalidad de Pinamar, Mar del Plata, 18 pp.
- Isla FI. 1997. Seasonal behaviour of Mar Chiquita tidal inlet in relation to adjacent beaches, Argentina. *J. Coast. Res.* 13: 1221–1232.
- Isla FI. 2006. Erosión y defensas costeras. In: Isla FI, Lasta CA (eds.), *Manual de Manejo Costero para la Provincia de Buenos Aires*. EUDEM, Mar del Plata, pp. 125–147.
- Isla FI, Bértola GR, Farenga MO, Serra SB, Cortizo LC. 1998. Villa Gesell: Un desequilibrio sedimentario inducido por fijaciones de médanos. *AAS Rev.* 5: 41–51.
- Isla FI, Cortizo LC, Turno Orellano HA. 2001a. Dinámica y evolución de las barreras medanosas, Provincia de Buenos Aires, Argentina. *Rev. Bras. Geomorfol.* 2: 73–83.
- Isla FI, Bértola GR, Farenga MO, Cortizo LC. 2001b. Morfodinámica y balance sedimentario de playas del partido de Pinamar (1995–1999), Provincia de Buenos Aires. *Rev. Asoc. Geol. Argent.* 56: 150–160.
- Juárez V, Isla FI. 1999. Evolución histórica del núcleo urbano de Villa Gesell. *Rev. Geográfica* 125: 49–60.
- Lanfredi NW, Balestrini CF, Mazio CA, Schmidt SA. 1987. Tidal sandbanks in Mar Chiquita coastal lagoon, Argentina. *J. Coast. Res.* 3: 515–520.
- Lanfredi NW, Pousa JL, D'Onofrio EE. 1998. Sea level rise and related potential hazards on the Argentine coast. *J. Coast. Res.* 14: 47–60.
- actualmente protegen el balneario, y recientemente se terminó la primera de tres escolleras con rompeolas proyectadas. Junto a este proyecto se reacondicionaron las obras previas, y se protegieron con roca sectores en peligro. Sin embargo, ciertos sectores han mostrado un gran deterioro visual del paisaje debido a la presencia de escombros y hierros esparcidos por las playas.
- En conclusión, la erosión costera ha disminuido notablemente su intensidad desde la fundación del balneario, aunque no ha desaparecido. Las tormentas Sudestadas constituyen unos de los factores naturales más importantes y sus efectos se han visto incrementados por acciones humanas como la fijación de médanos. Asimismo, el trazado de vías de comunicación (que actúan como desagües) y la urbanización sobre éstos, constituyen la principal causa de erosión antropogénica de origen local. Regionalmente, la extracción de arena, si bien ha cesado casi totalmente, ha afectado el aporte de arena por deriva litoral al balneario, al igual que lo han hecho las defensas costeras construidas al sur del área de estudio; por consiguiente, la alimentación de las playas por deriva litoral es mínima si se la compara con los aportes que favorecieron la formación de la cadena de médanos, que fue el ambiente que caracterizó al área hace más de 60 años.

Agradecimientos

Se agradece a la Universidad Nacional de Mar del Plata el financiamiento parcial de este trabajo, a R Ferraro por sus sugerencias y comentarios, así como a MC Villar, G Witkin, R Sciarrone y al Secretario de la Delegación Municipal del Balneario Parque Mar Chiquita por la información y material proporcionados durante las entrevistas.

- Marcomini SC, López RA. 1997. Influencia de la urbanización en la dinámica costera, Villa Gesell, Provincia de Buenos Aires, República Argentina. *AAS Rev.* 4: 79–96.
- Marcomini SC, López RA. 1999. Alteración de la dinámica costera por efecto de la explotación de arena de playa, partidos de General Alvarado y Lobería, Provincia de Buenos Aires. *ASS Rev.* 6: 1–18.
- Merlotto A. 2007. Erosión costera en el Balneario Parque Mar Chiquita. Evolución, causas e implicancias socio-económicas. B.Sc. thesis, Universidad Nacional de Mar del Plata, 135 pp.
- Merlotto A, Bértola GR. 2008. Evolución urbana y su influencia en la erosión costera en el balneario Parque Mar Chiquita, Argentina. *Pap. Geogr.* 47–48: 143–158.
- Morton RA, Miller T, Moore L. 2005. Historical shoreline changes along the US Gulf of Mexico: A summary of recent shoreline comparisons and analyses. *J. Coast. Res.* 21: 704–709.
- Netherlands Ministry of Transport, Public Works, and Water Management. 1997. Estudio del Puerto y la Costa de Mar del Plata. Informe Interno de la Municipalidad de General Pueyrredón, 142 pp.
- Ojeda-Zújar J. 2000. Métodos para el cálculo de la erosión costera. Revisión, tendencias y propuesta. *Boletín AGE* 30: 103–118.
- Orensanz A. 1986. Orígenes de Santa Clara del Mar y otras localidades. Talleres Gráficos Talgraf, Buenos Aires, 506 pp.

- Pajak MJ, Leatherman SP. 2002. The high water line as shoreline indicator. *J. Coast. Res.* 18: 329–337.
- Parker G, Perillo GME, Violante R. 1978. Características geológicas de los bancos alineados (*linear shoals*), frente a Punta Médanos Provincia de Buenos Aires. *Acta Oceanogr. Arg.* 2: 11–50.
- Romagnoli C, Mancini F, Brunelli R. 2006. Historical shoreline changes at an active island volcano: Stromboli, Italy. *J. Coast. Res.* 22: 739–749.
- Sánchez-Arcilla A, Jiménez JA. 1994. Ingeniería de playas (I): Conceptos de morfología costera. *Ingeniería del Agua* 1: 97–114.
- Schnack EJ, Álvarez JR, Cionchi JL. 1983. El carácter erosivo de la línea de costa entre Mar Chiquita y Miramar, Provincia de Buenos Aires. *Actas del Simposio Oscilaciones del Nivel del Mar durante el Último Hemiciclo Deglacial en la Argentina*, pp. 118–130.

*Recibido en abril de 2008;
aceptado en julio de 2009.*