



# Estudio de los acantilados activos y del campo de dunas de Bahía Creek, Río Negro, Argentina, como base para la elaboración de un mapa de peligro geológico

**Mauricio TOFFANI<sup>1</sup>, Alberto Tomás CASELLI<sup>1,2</sup> y Lucas Daniel LOTHARI INAUDI<sup>1</sup>**

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Río Negro

<sup>2</sup> Laboratorio de Estudio y Seguimiento de Volcanes Activos (LESVA), Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (IIPG), UNRN-CONICET

Email: mtoffani@unrn.edu.ar

**Editores invitados:** Adriana Mehl, Francisco Córdoba y Andrés Bilmes

Recibido: 7 junio, 2019

Aceptado: 17 octubre, 2019

## RESUMEN

En el presente trabajo se realizó una caracterización física junto al estudio de aspectos socioeconómicos de la región costera de Bahía Creek. Se analizaron así el acantilado activo y el campo de dunas de Bahía Creek así como el desarrollo de la población local. Las características relevadas permitieron evaluar el riesgo de erosión del acantilado activo, calculado como una medida numérica única a través de un índice de riesgo. Estas características fueron estudiadas en tres sectores, resultando el índice de riesgo medio en dos sectores y bajo en el restante. Luego, en base a imágenes satelitales, fotografías aéreas y datos de viento, se calculó la tasa de avance anual para las dunas ubicadas más próximas a la población de Bahía Creek. A partir de la tasa de avance de las dunas, estimada en 5.71 m/año, se proyectó su futura ubicación en los próximos 10, 25, 50 y 100 años. Conociendo los valores del índice de riesgo del acantilado y la probable ubicación de las dunas en el futuro, se elaboró un mapa de peligro geológico para la zona de Bahía Creek, el cual considera sectores de peligro alto, medio y bajo. El sector de alto peligro considera las zonas donde actualmente se ubica el acantilado activo y las dunas activas y donde su retroceso o avance, respectivamente, pueda ocurrir en el corto - mediano plazo, es decir, meses o hasta los próximos 25 años. La zona de peligro medio presenta marcadas irregularidades del terreno, se ubica a continuación de la zona de alto peligro y podría verse afectada dentro de los próximos 50 años por el retroceso del acantilado y el avance de las dunas. En la zona de bajo peligro, se estima que el terreno no sufrirá modificaciones en al menos 100 años, en consecuencia se recomienda como área para realizar futuras edificaciones. La zona del actual asentamiento poblacional se encuentra casi en su totalidad dentro de la zona de alto peligro, por lo tanto se discuten posibles medidas de manejo a implementar en relación con el mismo.

**Palabras clave:** geomorfología costera, vulnerabilidad, migración de dunas, peligro geológico.

## ABSTRACT

*Study of the active cliffs and the dune field from Bahía Creek, Río Negro, Argentina as base for the elaboration of a geological hazard map.*

In this paper, a physical characterization was carried out together with the study of some socioeconomic aspects of the coastal region of Bahía Creek; so, the active cliff and the dune field of Bahía Creek were analyzed as well as the development of the local population. The recorded characteristics permitted to develop a risk assessment of the active cliff erosion, calculated as a unique numerical measure through a risk index. It was studied in three sectors, resulting medium in two sectors and low in the remaining. In addition, based on satellite images, aerial photographs and wind data, the annual migration rate for the closest dunes to the town of Bahía Creek was

calculated. According to the migration rate of the dunes, estimated at 5.71 m/year, its future location was projected in the next 10, 25, 50 and 100 years. Knowing the risk index values of the cliff and the probable location of the dunes in the future, it was possible to draw up a geological hazard map for the Bahía Creek area, which was subdivided into high, medium and low hazard. The high hazard zone considers the areas where the active cliff and active dunes are currently located and where their retreat or advance, respectively, may occur in short - medium term, i.e., months or until the next 25 years. The medium hazard zone presents marked irregular terrain and is located next to the high hazard zone and may be affected within the next 50 years by the retreat of the cliff and the dune migration. On the low hazard zone, it is inferred that it will not be modified in a lapse of at least 100 years, consequently it is advisable to build there in the future. The area of the current population settlement is almost entirely within the high hazard zone. Therefore, likely management measures to be implemented in relation to it are discussed.

**Keywords:** *coastal geomorphology, vulnerability, dune migration, geologic hazard*

## INTRODUCCIÓN

Bahía Creek es un sitio de descanso y veraneo, que solo cuenta con una población estable de 5 habitantes pero que puede llegar a albergar 250 personas en su máxima ocupación. Actualmente es visitado en su mayoría por gente de las localidades de Viedma y Carmen de Patagones. El incremento poblacional del 12.5% registrado por el INDEC a partir de los últimos censos (2001 - 2010) en dichas localidades, hace que se espere mayor cantidad de visitantes en Bahía Creek y una mayor presión en el uso de su región costera proximal. Esto, sumado a que el área se encuentra sobre un acantilado activo con un retroceso promedio de 0,2 m/año (entre los años 1958 y 2003; del Río et al. 2007) y al avance de dunas, con una tasa de 6 m/año (entre los años 1993 y 2003 en cercanías a la localidad de Bahía Creek; Picone 2014), puede derivar mayormente en pérdidas materiales y representar un peligro para las personas. Por lo tanto, para comprender la situación y trabajar en base al peligro geológico, es necesario el estudio de la geomorfología y dinámica costera de la zona, principalmente respecto a los acantilados y las dunas, sumado a las alteraciones antrópicas y su influencia sobre la hidro - aerodinámica local. En general, como las viviendas de Bahía Creek han sido construidas sin reparar en el potencial peligro asociado a la zona, es importante identificar qué sectores pueden ser utilizados para la construcción de viviendas y cuales solo utilizarse para uso recreativo o científico en caso de ser necesario.

Por lo tanto, el presente trabajo tiene como objetivo realizar un mapa de peligro geológico para la localidad de Bahía Creek y sus alrededores, para así lograr una planificación del uso del terreno. Dentro de este ordenamiento territorial, se busca que las nuevas construcciones contemplen ubicarse fuera de las zonas de peligro medio o alto. Asimismo se propondrán estrategias de manejo costero para el lugar, tratando de incidir en la menor medida posible en la dinámica del sistema y que las personas y obras antrópicas no resulten afec-

tadas por la misma. El mapa será realizado tomando como base los resultados obtenidos en el índice de riesgo de erosión del acantilado activo y el avance de las dunas, teniendo en cuenta su actual ubicación y el potencial desplazamiento dentro de los próximos 100 años. Esta proyección de la futura ubicación de las dunas, a su vez, se ilustra en otro mapa, enfocado en la villa balnearia de Bahía Creek.

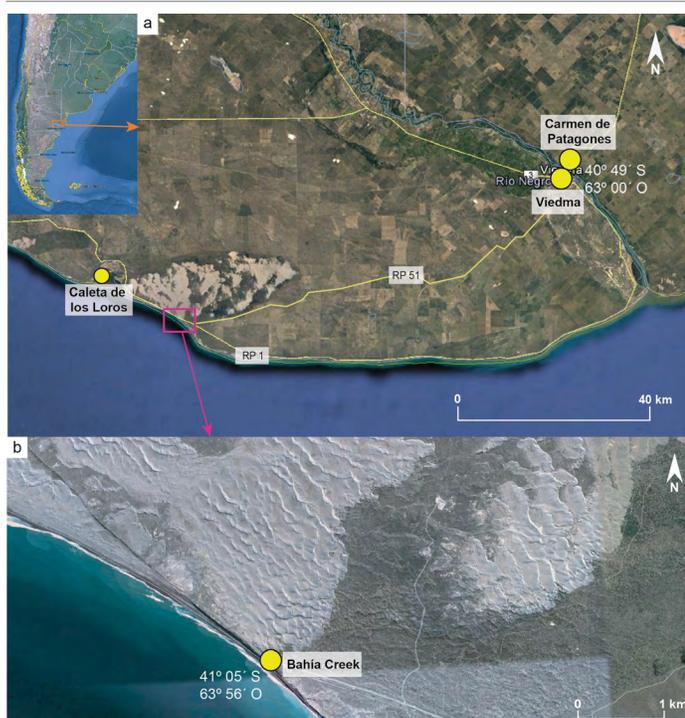
## CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

La localidad de Bahía Creek (41° 05'S, 63° 56'O, Fig. 1) está ubicada en la porción norte del golfo San Matías (departamento de Adolfo Alsina), en el sector este de la provincia de Río Negro y aproximadamente 70 km al SO de la ciudad de Viedma, capital provincial. Es una zona costera compuesta por playas, acantilados activos y un extenso campo de dunas. Se comunica con dicha localidad por medio de la Ruta Provincial N° 1, o Camino de la Costa, el cual posee magníficos paisajes, recorriendo 127 km de ruta paralelos al océano Atlántico para unir ambas localidades. También se puede acceder desde Viedma por la Ruta Provincial N° 51.

La zona posee un clima árido - semiárido, con un régimen hídrico estépico y térmico pampeano, con amplitudes térmicas atemperadas y temperaturas medias de 14°C (del Río et al. 2004, López Alfonsín et al. 2012). Las precipitaciones medias anuales entre 1992 y 2008 fueron 287.3 mm (Fucks et al. 2011), raramente superan los 300 mm y no presentan un ciclo anual definido (López Alfonsín et al. 2012). En cuanto a los vientos, se ubica dentro del cinturón planetario de los vientos del oeste, que en la Patagonia son mantenidos en movimiento por el centro de alta presión del Pacífico Sur y el canal subpolar de baja presión (del Valle et al. 2008). Estos vientos predominan sobre la plataforma patagónica durante todo el año e inducen una circulación media hacia el E-NNE en la capa superficial (Saavedra et al. 2011, Pisoni 2012). Poseen

medias mayores preferentemente en verano, lo cual favorece la aridez y la evaporación dentro de un ambiente con escasas precipitaciones (López Alfonsín et al. 2012).

En el puerto de San Antonio Este, ubicado 70 km al ONO del área de estudio, la amplitud mareal media es 6.67 m (Servicio de Hidrografía Naval 2019). La altura media de las olas, según estudios realizados por Worner et al. (2019) en los lugares más cercanos a Bahía Creek, ubicados dentro del Golfo San Matías, es de 0.5 m, mientras que la altura máxima es de 2.5 m.



**Figura 1.** Ubicación del área de estudio: a) ubicación del campo de dunas de Bahía Creek dentro de la provincia de Río Negro, donde también se puede observar Caleta de los Loros y las ciudades de Viedma y Carmen de Patagones; b) zoom de los alrededores de Bahía Creek, donde se puede apreciar el sector de dunas más cercanas al poblado.

## Geología de los acantilados de Bahía Creek

Las unidades geológicas aflorantes y la estratigrafía en la zona norte del Golfo San Matías han sido descritas en distintas oportunidades (Gelós et al. 1992, Zavala y Freije 2005, Reichler 2010). En Bahía Creek, en particular, en la bajada a la playa ubicada a los  $41^{\circ} 05' 02''$  S,  $63^{\circ} 56' 03''$  O, se reconocieron afloramientos de la Formación Río Negro, de la Formación Tehuelche y de la Formación Punta Villarino (Toffani 2018) (Fig. 2), unidades ya descritas en la región por Andreis (1965), Sepúlveda (1983) y Angulo et al. (1978) respectivamente.

La Formación Río Negro aflora con una potencia de 18,5

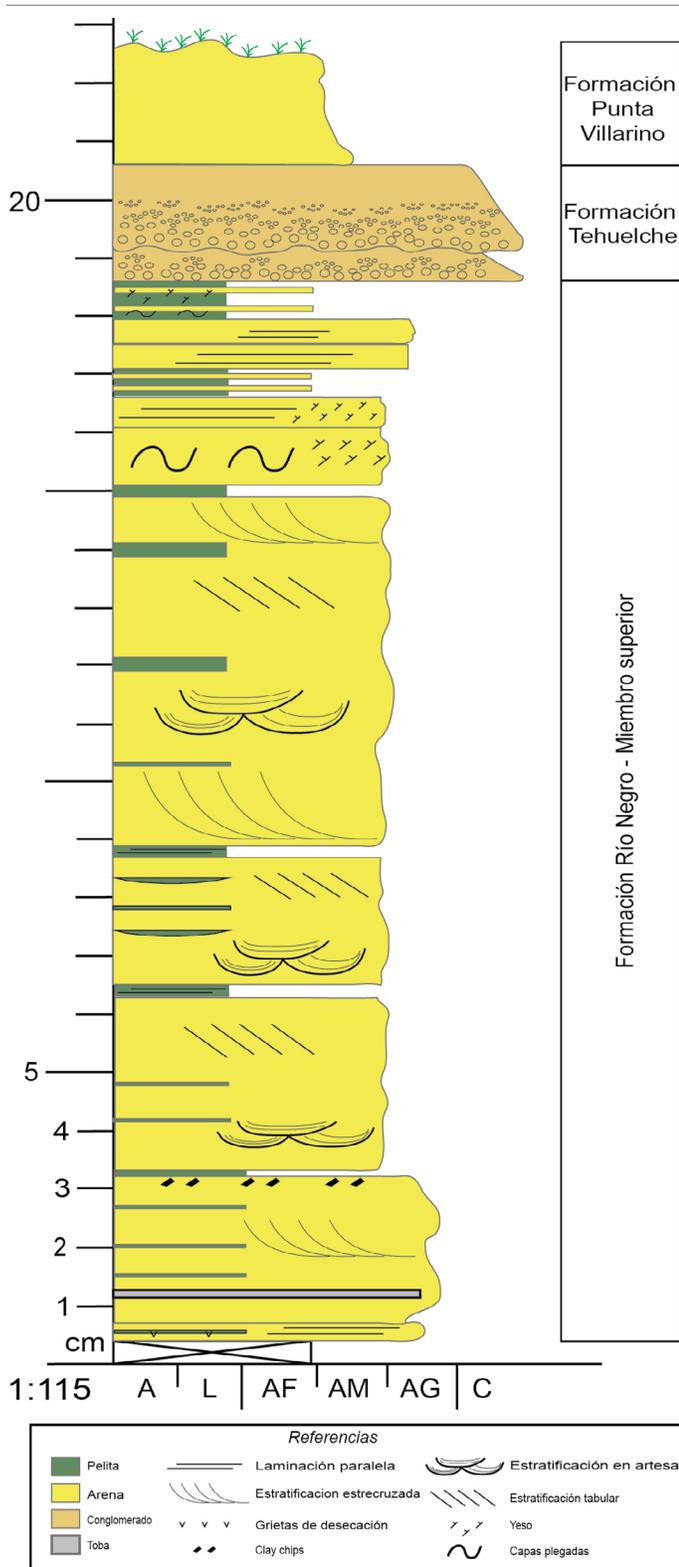
m y presenta una secuencia alternante de areniscas y pelitas (Toffani 2018). Las areniscas son de grano medio y subordinadamente grano fino, muy fino y grueso. En general presentan estratificación entrecruzada en artesas y estratificación paralela; los bancos son principalmente tabulares. Las pelitas son laminadas y hacia la base poseen grietas de desecación. Además, se reconoció un banco de tobas interestratificado y niveles con concreciones de yeso (Toffani 2018). Estos depósitos corresponden a un ambiente de dunas e interdunas, de edad Mioceno tardío - Plioceno temprano, asignado al Miembro Superior de la Formación Río Negro (Zavala y Freije 2005).

En discordancia erosiva sobre la Formación Río Negro apoya una secuencia de 2 m de espesor, compuesta por conglomerados matriz y clasto sostén asignada a la Formación Tehuelche (Toffani 2018). Estos depósitos fueron interpretados como una antigua planicie fluvial del río Negro (Gelós et al. 1992, del Rio et al. 2004), correspondiente al Pleistoceno (Zavala y Freije 2005). Sobre la Formación Tehuelche se disponen arenas muy finas a medias, bien seleccionadas, correspondientes a acumulaciones medianosas activas e inactivas (vegetadas) y depósitos de mantos de arena actuales, asignados a la Formación Punta Villarino (Toffani 2018).

## Geomorfología

Las dos grandes regiones geomorfológicas presentes en el área de estudio son la región septentrional del ambiente de mesetas y planicies y el ambiente litoral (González Díaz y Malagnino 1984). En el área de estudio, la primera región está representada por la Antigua Planicie Aluvial disectada, que posee una pendiente de entre  $10^{\circ}$  y  $15^{\circ}$  al este. Su origen se vincula a depósitos glaciales y fluviales; actualmente, sus rasgos generales se relacionan con superficies de erosión, tales como terrazas fluviales y pedimentos (González Díaz y Malagnino 1984).

En el ambiente litoral, destaca principalmente la presencia de una costa retrogradante de acantilados marinos activos con extensas plataformas de erosión (Codignotto 1997, del Rio et al. 2004), que en Bahía Creek llega a alcanzar 25 m de altura. Esta costa acantilada alterna con sectores de costas bajas, conformados por playas, planicies y canales mareales, cordones litorales, espigas y paleoacantilados (Fig. 3). Estas geoformas resultan de la erosión de los acantilados marinos en retroceso que en algún momento alcanzan bajos generados en el ambiente continental, y luego son ocupados y re-trabajados por la acción marina (González Díaz y Malagnino 1984). Por ejemplo, Caleta de los Loros ( $41^{\circ} 01' S$ ,  $64^{\circ} 06' O$ ) es una planicie de mareas de 5 km de largo por 2.5 km de an-



**Figura 2.** Perfil litoestratigráfico realizado en la bajada a la playa de Bahía Creek, ubicada entre los 41° 05' 02" S, 63° 56' 03" O y los 41° 05' 0" S, 63° 55' 59" O. Modificado de Toffani (2018).

cho. Se trata de una llanura suavemente lobulada, de muy escasa pendiente, constituida por material limo - arcilloso, sobre

la cual se ha instalado una densa red de canales de marea (Etcheverría et al. 2006). Presenta una espiga cubierta por médanos en la margen este de la desembocadura. Se caracteriza como una espiga compuesta de boca de Bahía, unida al continente por el este y recurvada hacia el interior de la caleta, indicando que fue generada por corrientes provenientes del este (Etcheverría et al. 2006). Se ubica a continuación de una playa permanente a la cual se integra lateralmente y se compone de tres fajas de cordones litorales de distintos rumbos, siendo la más externa funcional en la actualidad (González Díaz y Malagnino 1984).

La playa entre Bahía Creek y Caleta de los Loros alcanza unos 120 m de anchura en marea baja, posee una superficie aproximada de 5 km<sup>2</sup> y es predominantemente arenosa y en forma dispersa contiene grava y restos de conchas marinas (Etcheverría et al. 2006). En marea baja se pueden apreciar incipientes barras arenosas paralelas a la costa, disectadas por pequeños canales de escurrimiento, conformando un paisaje similar al de islas barrera (Etcheverría et al. 2006). Al pie de los acantilados se observan angostas playas expuestas únicamente durante mareas bajas (Etcheverría et al. 2006).

En el área se desarrolla además un paleoacantilado (Fig. 3) que alcanza los 4 m de altura y se ubica entre Caleta de los Loros y Bahía Creek. Posee rumbo ONO, converge con el acantilado activo, fue labrado sobre las mismas sedimentitas que dicho acantilado y parcialmente sepultado por dunas activas (Etcheverría et al. 2006).

Otro rasgo geomorfológico importante son los depósitos de remoción en masa (Fig. 4), asociados a la inestabilidad de los acantilados. Estos depósitos son producidos por la caída de bloques y detritos desde la cima de los acantilados activos. Dichos procesos se deben principalmente a la erosión diferencial por variaciones en la composición y competencia de la roca y están favorecidos por la acción del oleaje que golpea la parte inferior del acantilado (López Alfonsín et al. 2012). Además hay deslizamientos rotacionales que pueden afectar todo el acantilado en la vertical o solo la parte superior del mismo, generando escalones o terrazas hacia el mar (López Alfonsín et al. 2012). El tamaño de los bloques involucrados va desde centímetros, en el caso de desprendimientos menores, hasta porciones del acantilado que pueden alcanzar 200 m de longitud. Estos procesos de remoción en masa se ven favorecidos por distintos planos de ruptura, como lo son las diaclasas reconocidas en frente del acantilado (con al menos dos juegos, uno paralelo y otro perpendicular al mismo) o inclusive fallas (del Río et al. 2004). Toffani (2018) reconoció una serie de fallas normales en la bajada a la playa de Bahía Creek, que en su conjunto registran un rechazo de 1 m.

La geomorfología de la zona de estudio se caracteriza además por la presencia de un extenso campo de dunas activo, desarrollado sobre otro campo de dunas fósiles (Toffani 2018). Es importante mencionar que el desarrollo de dunas costeras refleja las características particulares que puede poseer una zona (Sanjaume y Gracia 2011). En este sentido, Bahía Creek cuenta con una topografía de la zona continental, adyacente a la playa, suficientemente amplia y plana, es decir sin acantilados, gran disponibilidad de material, transporte litoral sin obstáculos, intensos vientos de mar a tierra, precipitaciones moderadas, escasa humedad atmosférica, playas de poca pendiente y apropiada orientación de la costa en relación con los vientos. De esta manera se desarrolla el extenso campo de dunas que se extiende sobre una superficie de 456 km<sup>2</sup>, de los cuales 165 km<sup>2</sup> están cubiertos por dunas móviles. Cuenta principalmente con dunas barján, dunas de crestas barjanoides, dunas transversales y dunas longitudinales y parabólicas (Toffani 2018).

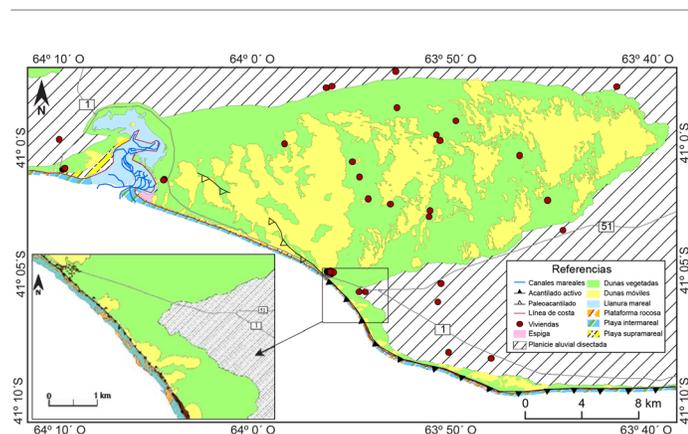


Figura 3. Mapa geomorfológico de la zona de estudio y alrededores. Tomado de Toffani (2018).

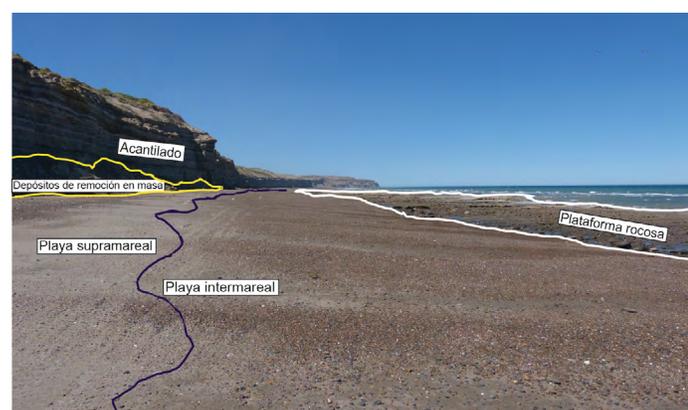


Figura 4. Vista general de la playa, donde también puede apreciarse el acantilado junto con depósitos de remoción en masa y la plataforma rocosa. La línea que divide la playa intermareal y supramareal es la de pleamar diaria. Fotografía tomada hacia el SE.

## METODOLOGÍA

Teniendo en cuenta el riesgo que puede significar para los asentamientos poblacionales ubicarse en una zona que pueda verse afectada por el retroceso de acantilados o el avance de campos de dunas, se realizó un análisis del riesgo de erosión del acantilado y se estudió la migración de las dunas en las cercanías a la localidad de Bahía Creek para finalmente poder elaborar un mapa de peligro geológico de la zona.

Para llevar adelante estas tareas se utilizaron fotografías tomadas en el campo en los años 2016 y 2017, fotografías aéreas de 1986 procedentes del Servicio Geológico Minero Argentino con escala 1:80.000, imágenes satelitales disponibles en *Bing Maps* y *Google Earth* que abarcan desde 2004 a 2014, imágenes satelitales disponibles en *Earth Engine Time-lapse* desde 1984 hasta el presente e imágenes *Landsat 8* (sensor OLI) del año 2017. Esta última se obtuvo del sitio web de *United States Geological Survey* (USGS) y fue procesada mediante el software *ENVI 4.7*, utilizando para este trabajo la combinación de bandas 432, correspondiente a color natural.

Las imágenes satelitales fueron rectificadas teniendo en cuenta 10 puntos GPS tomados en el campo. Luego sirvieron para georreferenciar las fotografías aéreas, ya digitalizadas, teniendo en cuenta 50 puntos de control terrestres homólogos. En ambos casos se utilizó el software *Global Mapper v.15.0*. Se trabajó utilizando el sistema de coordenadas geográficas y el datum WGS84.

## Riesgo de erosión del acantilado marino

El riesgo es el potencial impacto negativo que puede ocurrir sobre la población, infraestructura humana y bienes ambientales, como consecuencia de un agente perturbador o peligro. Esto quiere decir que una adecuada evaluación del riesgo debe incluir el peligro físico que potencialmente puede causar daños, y su impacto en los elementos y actividades en el área (del Río y Gracia 2009). El peligro, a su vez, dependerá de la vulnerabilidad del sistema y los elementos expuestos al peligro y que pueden ser afectados por el mismo (del Río y Gracia 2009).

Teniendo en cuenta la presencia de un acantilado activo en Bahía Creek y cómo su retroceso puede afectar a la localidad balnearia homónima, se realizó la evaluación del riesgo de erosión de dicho acantilado. Para llevar adelante esta tarea se siguió la metodología propuesta por del Río y Gracia (2009), con ciertas modificaciones. Es posible aplicar esta metodología en el área de Bahía Creek porque posee clima templado, costa clástica y la escala temporal y espacial se ajustan al modelo propuesto.

El procedimiento se basa en la selección, escalamiento y evaluación de una serie de variables físicas, geomorfológicas y dinámicas que determinan la potencial pérdida del acantilado (peligro de erosión del acantilado), junto con variables socioeconómicas que controlan el potencial daño (impacto de la erosión o de este peligro), entendido como el acoplamiento de la exposición y la vulnerabilidad. Estos se combinan en dos índices, el índice de peligro y el índice de impacto. Juntos constituyen el índice de riesgo, expresado como una medida numérica única del riesgo para un área determinada (del Río y Gracia 2009).

Cada variable ( $a_n$ ) involucrada fue dividida en cuatro clases según su influencia sobre la erosión de los acantilados, asignándoles un valor de 1 a las menos influyentes y un valor de 4 a las más influyentes (Cuadros 1 y 2; del Río y Gracia 2007, 2009). A su vez, las variables se ponderaron con factores ( $f_n$ ) de acuerdo con su importancia relativa en la determinación del riesgo general de erosión del acantilado (Cuadros 1 y 2; del Río y Gracia 2009). La clasificación de cada una de las variables utilizadas en el presente trabajo se ajusta con las características que presenta el área de estudio. También es importante mencionar, respecto a la evaluación de estas variables, la conveniencia de adoptar el enfoque del peor caso cuando la clasificación apropiada no es clara y hay dos posibilidades de clasificación (del Río y Gracia 2007, 2009).

De esta forma se eligieron diez y cinco factores para construir los índices de peligro (Cuadro 1) e impacto (Cuadro 2), respectivamente. Dentro del índice de peligro (Cuadro 1) los aspectos más relevantes son generalmente aquellos relacionados con los materiales de los acantilados y la amortiguación que pueden brindar las playas, considerándose las variables litología del acantilado (A), pendiente (C) y protección de playa (D) como determinantes y ponderándose con un factor 1. Las variables estructura del acantilado (B), plataformas rocosas (E), exposición a los frentes de las olas de tormenta (G) y diferencia entre la altura de olas de tormenta y modales (H), muestran una importancia intermedia y se consideran como variables indirectas, ponderándose con un factor de 0.8. Los restantes parámetros son los menos significativos, dentro de ellos se encuentra el rango mareal (F), la tendencia relativa del nivel del mar (I) y las precipitaciones (J), y son ponderados con un factor 0.5.

Respecto a estas variables se puede agregar que las clases litológicas se clasifican en base a su erodabilidad relativa, mientras que las estructuras reducen la resistencia promedio del acantilado, especialmente en ambientes de baja energía (del Río y Gracia 2009).

La protección de playa se refiere a la playa al pie del acan-

tilado que puede actuar como zona de amortiguación al disipar la energía de las olas. La clasificación de esta variable se realiza sobre la frecuencia de olas que alcanzan el pie del acantilado, lo que hace que la variable sea más ampliamente aplicable al no estar basadas en la anchura o la altura absoluta de la playa (del Río y Gracia 2009). Asimismo tampoco sería adecuada la definición de umbrales de anchura de plataforma específicos para un índice destinado a una aplicación general, por eso se construye de manera relativa (del Río y Gracia 2009). Los grandes rangos de marea permiten una mejor disipación de la energía de las olas (del Río y Gracia 2009).

La infiltración de la lluvia y la escorrentía superficial producto de las precipitaciones constituyen dos de los denominados "procesos preparatorios" que reducen la resistencia de los materiales del acantilado, aumentando así su capacidad de erosión y el desencadenamiento de movimientos en masa (del Río y Gracia 2009).

Para el índice de impacto (Cuadro 2), el principal uso del suelo (A) y la densidad de población (D) pueden considerarse como elementos determinantes, por lo que se ponderan con un factor 1. Las estructuras ingenieriles (B) y la presencia y tipo de redes de transporte (C) poseen importancia intermedia y se ponderan con un factor de 0.8. La tasa de variación de la población (E) es considerada el aspecto menos significativo y se pondera con un factor 0.6.

El principal tipo de uso de la tierra se considera un factor clave ya que controla en gran medida el valor económico del área. Esta variable, junto a las redes de transporte, debe ser evaluada desde el borde del acantilado hasta 100 metros hacia el continente (del Río y Gracia 2009).

Las estructuras de ingeniería no pertenecen en sí mismas a una variable física o geomorfológica, sino que se relacionan con el ser humano y contribuyen a controlar el potencial daño que pueden causar otras variables. Es por este motivo que se incluye dentro del índice de impacto. Se considera que si la estructura no cubre toda la longitud del pie del acantilado, las áreas vecinas del acantilado sin protección sufrirán el efecto de la erosión lateral y el peligro aumentará (del Río y Gracia 2009).

Dentro de la presencia y el tipo de redes de transporte no se tienen en cuenta los senderos y vías peatonales, ya que el impacto social de su pérdida en caso de erosión del acantilado y el costo monetario de protegerlos, restaurarlos o reubicarlos es relativamente bajo (del Río y Gracia 2009).

La densidad de población constituye un factor clave en el índice de impacto y es más ampliamente aplicable que las cifras de población absoluta (del Río y Gracia 2009). Para

**Cuadro 1.** Variables del índice de peligro, junto con la definición de los valores que pueden tomar y el factor que se utiliza para su ponderación.

Variable (an)	Rangos de peligro	Factor (fn)
Litología del acantilado A	1- Calizas, plutónicas, volcánicas, metamórficas 2- Pelitas, areniscas, conglomerados 3- Metamórficas no resistentes, sedimentos finos consolidados, material grueso no consolidado 4- Materiales finos no consolidados	1
Estructura del acantilado B	1- Homogéneo, sin discontinuidades significativas 2- Secuencias con alternancia de litologías duras/blandas 3- Arroyos e incisiones costeras y/o moderadas fallas, fracturas, diaclasas 4- Badlands costeros y/o abundantes fallas, fracturas, diaclasas	0,8
Pendiente del acantilado C	1- < 25° 2- 26°-50° 3- 51°-75° 4- > 75°	1
Protección de playa D	1- Playa amplia/alta (las olas alcanzan el acantilado en las mareas de sicigias coincidiendo con mareas de tormenta) 2- Playa intermedia (las olas alcanzan el acantilado en las mareas de sicigias o durante tormentas) 3- Playa estrecha/baja (las olas alcanzan el acantilado durante las pleamares diarias) 4- Sin playa	1
Plataforma rocosa E	1- Plataforma intermareal ancha y continua 2- Plataforma intermareal estrecha y discontinua 3- Plataforma submareal 4- Sin plataforma	0,8
Rango mareal F	1- Hipermareal (MSTR>6m) 2- Macromareal (MSTR 4-6m) 3- Mesomareal (MSTR 2-4m) 4- Micromareal (MSTR <2m)	0,5
Exposición a los frentes de olas de tormenta G	1-Ángulo 81°-90° (normal a la costa) 2-Ángulo 46°-80° 3-Ángulo 11°-45° 4-Ángulo <10° (subparalelo a la costa)	0,5
Diferencia entre la altura de las olas modales y de tormenta H	1- < 0,5m 2- 0,5m -2 m 3- 2m -3,5 m 4- >3,5 m	0,8
Tendencia relativa del nivel del mar I	1- Cambia < -1mm/año 2- Cambia -1mm/año a +1mm/año 3- Cambia +1mm/año a +2,5mm/año 4- Cambia > +2,5mm/año	0,5
Precipitaciones J	1- Media anual <500mm 2- Media anual 500-1000mm 3- Media anual 1000-1500mm 4- Media anual >1500mm	0,5

calcular su valor se considera habitada el área que abarca la villa balnearia y se evalúa con una máxima ocupación.

Como los factores de impacto socioeconómico generalmente muestran mayores variaciones en una dirección dada a lo largo del tiempo respecto de los elementos de peligro físico, se incluye una medida de los cambios socioeconómicos

referida a la tasa de crecimiento poblacional. Esto se debe a que la población es el factor socioeconómico más relevante (del Río y Gracia 2009).

Otra modificación, además del cambio de índice de las estructuras ingenieriles, fue optar por prescindir de las variables presencia de reservas naturales y porcentaje desa-

**Cuadro 2.** Variables del Índice de impacto, junto con la definición de los valores que pueden tomar y el factor que se utiliza para su ponderación.

Variable (an)	Rangos de peligro	Factor (fn)
Uso del terreno A	1- Áreas naturales 2- Tierras de cultivo 3- Edificios dispersos o estacionamiento 4- Áreas densamente urbanizadas y/o industriales	1
Estructuras ingenieriles al pie del acantilado B	1- Escollera o muro de contención 2- Estructura de protección abandonada o puntual 3- Sin estructuras ingenieriles 4- Diques o espigones cercanos que causen erosión inducida	0.8
Presencia y tipo de redes de transporte C	1- Sin estructuras para tráfico vehicular 2- Calles menores 3- Calles mayores 4- Autopistas y/o vías	0.8
Densidad de población D	1- < 50 personas/km <sup>2</sup> 2- 51-300 personas/km <sup>2</sup> 3- 301-1000 personas/km <sup>2</sup> 4- > 1000 personas/km <sup>2</sup>	1
Tasa de cambio de población E	1- anual < 0,1% 2- 0,1% < anual < 2% 3- 2% < anual < 5% 4- anual > 5%	0.6

rollado. La primera por no resultar una variable significativa para el índice en el área de estudio y la segunda por considerarse redundante con la densidad de población y el uso de la tierra.

Una vez definidas las variables y su valor, se calcularon los índices de peligro absoluto ( $IP_{abs}$ ) e impacto absoluto ( $II_{abs}$ ) mediante la suma de los valores de las variables ponderadas:

$$I_{abs} = \sum a_n f_n$$

Luego, se normalizaron estos resultados con respecto a los valores máximo y mínimo teóricos de los índices, para lograr obtener el índice de peligro relativo ( $IP_{rel}$ ) y el índice de impacto relativo ( $II_{rel}$ ), más realistas y expresados como porcentaje del peligro máximo teórico e impacto máximo teórico respectivamente:

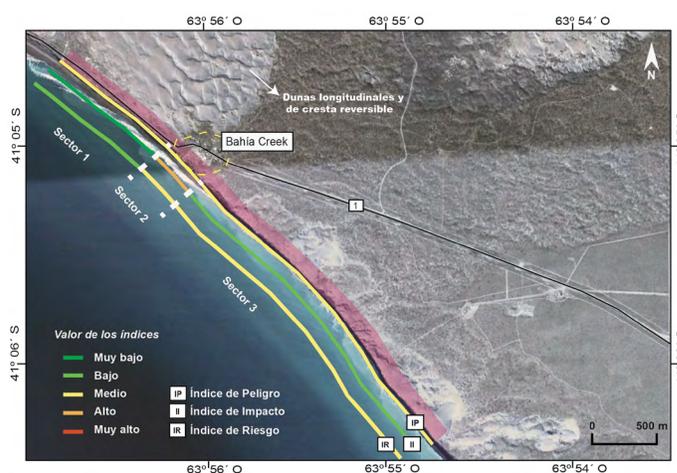
$$I_{rel} = [(I_{abs} - \text{mín } I_{abs}) / \text{máx rango } I_{abs}] * 100$$

Finalmente, el índice de peligro y el índice de impacto se combinaron para obtener el índice de riesgo. Como un índice posee diez variables y otro cinco, se combinaron ambos índices por medio de un promedio ponderado de ambos en función de su número de variables. Para obtener el valor del mismo se realizó el siguiente cálculo:

$$I_r = [(IP_{rel} * 10) + (II_{rel} * 5)] / 15$$

El riesgo de erosión del acantilado, según el valor del índice de riesgo, se consideró muy bajo (0-20 %), bajo (21-40 %), medio (41-60 %), alto (61-80 %) o muy alto (81-100 %).

La porción de costa acantilada estudiada para calcular el índice de riesgo abarca desde aprox. 1 km al O de la localidad de Bahía Creek, donde finaliza el acantilado activo, hasta aprox. 2.5 km al este del sector habitado (Fig. 5). La misma fue dividida en 3 sectores (1, 2 y 3), considerando el



**Figura 5.** Zona de costa acantilada donde fue aplicado el índice de riesgo. Imagen original extraída de Google Earth, año 2004. Las líneas que siguen la costa acantilada, separadas por sectores con características comunes, indican los resultados de los índices de peligro e impacto relativos y del índice de riesgo, según su grado. La franja magenta indica los 100 m desde el borde del acantilado hacia el continente, utilizados para medir las variables del índice de impacto que tienen en cuenta esta distancia.

asentamiento poblacional de Bahía Creek con características socioeconómicas distintas al resto de costa acantilada, que a su vez, al E y al O de la porción habitada registra diferencias dentro de las variables físicas.

### Migración de las dunas

Respecto del viento, este es capaz de movilizar el material disponible en el área de estudio, de un tamaño promedio de grano de 0.25 mm (Toffani 2018), alcanzando velocidades iguales o mayores a 6.7 m/s o 24 km/h. Este valor se calculó a través de las ecuaciones propuestas por Bagnold (1954), referidas al umbral de velocidad de fricción en el cual se inicia el transporte:

$$u.t = A * \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} * g * d},$$

donde  $d$  es el diámetro promedio de las partículas,  $g$  es la aceleración de la gravedad,  $\rho_s$  es la densidad del grano, igual a 2650 kg/m<sup>3</sup>,  $\rho_a$  es la densidad del aire, igual a 1.23 kg/m<sup>3</sup> y  $A$  es un coeficiente con un valor de 0.1 para tamaños de grano mayores a 0,1 mm; y al umbral de velocidad mínimo para que los granos viajen por saltación

$$ut(z) = \frac{u.t}{k} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right),$$

donde  $u.t$  es la velocidad de fricción umbral,  $k$  es la constante de capa límite turbulenta universal de Von Karman ( $k = 0,4$ ),  $z$  es la altura sobre la superficie y  $z_0$  es la longitud de rugosidad aerodinámica ( $z_0 = d/30$ ).

Para determinar las características generales del viento en Bahía Creek se utilizaron los datos de las estaciones meteorológicas pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional en San Antonio Oeste (SAO) y en Viedma, situándose la primera 70 km al oeste y la segunda 70 km al noreste del área de estudio. En Viedma se tienen registros desde el año 1967 y en San Antonio desde 1988, en ambos casos hasta la actualidad. Los datos utilizados comprenden desde el comienzo de los registros hasta agosto de 2017, momento en el cual fue adquirida la información. Al comienzo de las mediciones, los registros de la dirección y velocidad del viento se han almacenado tres veces por día (9 hs, 15 hs y 21 hs), luego desde las 6 hs hasta las 23 hs y finalmente durante cada hora. De esta manera, con los datos disponibles, fue posible calcular las direcciones predominantes de viento efectivo y su frecuencia mensual y horaria.

Se realizó también una comparación de las fotografías aéreas e imágenes satelitales disponibles para conocer la ubicación de las dunas activas y su migración entre los años 1986 y 2011 en las cercanías a la zona habitada de Bahía Creek. Con esta información, y los datos de viento, se calculó la tasa y el sentido de avance de las dunas en ese sector en particular y su ubicación esperada para los próximos 10, 25, 50 y 100 años, graficándolas de acuerdo a la ubicación de los frentes de dunas actuales. Esta tarea fue realizada mediante un Sistema de Información Geográfica (SIG; *ArcGis 10.1*), vectorizando la posición de los frentes de dunas en las imágenes de los años 1986 y 2011 y calculando su desplazamiento promedio, obteniendo una tasa de avance expresada en m/año. Se utilizó dicho lapso de tiempo priorizando el uso de las imágenes con mejor definición y que a su vez abarcaran el mayor período posible. El desplazamiento promedio se obtuvo midiendo la distancia entre un frente y otro en el sentido de avance de las dunas en un lugar puntual, tomando puntos cada 100 m en línea recta N-S. Estas mediciones solo abarcan un sector cercano a la localidad de Bahía Creek debido a la relación de la población con el avance de las dunas y a que el error en la superposición de imágenes fue menor, con valores máximos de 20 m.

### Mapa de Peligro Geológico

Finalmente, combinando el potencial retroceso del acantilado y la migración estimada de las dunas, tomando como base el índice de riesgo y la tasa de avance respectivamente, se realizó un mapa de peligro geológico a través de un SIG. El mismo contempla como zonas de alto peligro las que en el presente o dentro de los próximos 25 años puedan verse afectadas por procesos de remoción en masa o por la presencia de dunas activas. El peligro medio está definido por zonas donde estos procesos puedan influir dentro de los próximos 50 años, mientras que el resto del área de estudio corresponde a peligro bajo, es decir, no se prevén cambios geomorfológicos significativos dentro de los próximos 100 años.

## RESULTADOS

A continuación se presentan las características y los valores que adquiere cada variable implicada en el índice de riesgo frente a la erosión costera en la zona de estudio.

**Litología del acantilado:** por estar compuestos por peli-tas, areniscas, conglomerados y sedimentos finos consolidados, a esta variable se le asigna un valor de 3 en todos los sectores ya que son homogéneos.

**Estructura del acantilado:** en todos los sectores existen moderadas fracturas, fallas o diaclasas, por lo tanto la variable adquiere el valor 3.

**Pendiente del acantilado:** dentro de toda el área de estudio el acantilado es vertical o tiene una pendiente de casi 90° (Fig. 6), por lo tanto esta variable toma el valor 4 en los tres sectores.

**Protección de playa:** en los sectores 1 y 2 (Fig. 5) se observa que la marea llega al acantilado solo durante mareas de sicigias o durante temporales, clasificándose como playa intermedia; mientras que en el sector 3 (Fig. 5) lo hace durante las pleamares diarias, dando lugar a una playa estrecha. Entonces el valor que toma esta variable en los sectores 1 y 2 es 2 y en el sector 3, 3.

**Plataforma rocosa:** en los tres sectores se registra una plataforma rocosa intermareal y discontinua. Puede ser apreciada cuando baja la marea pero no se encuentra en la totalidad de la playa (Fig. 4). Esto le confiere a la variable el valor 2.

**Rango mareal:** el área de estudio posee un rango hipermareal para la clasificación aquí propuesta, por lo tanto la variable toma el valor 1 en todos los sectores.

**Exposición a los frentes de olas modales y de tormenta:** la costa posee una orientación NO-SE. Teniendo en cuenta la acción de olas provenientes del este y del sudeste, predominando netamente las segundas (Kokot y Chomnalez 2012), la variable toma el valor 1.

**Diferencia entre la altura de olas modales y de tormenta:** teniendo en cuenta la diferencia de altura de las olas modales y de tormenta registradas en sectores cercanos a Bahía Creek dentro del Gofu San Matías, la variable toma el valor 2, ya que varían en 2 m.

**Tendencia relativa del nivel del mar:** datos del mareógrafo de Buenos Aires, con registros entre 1905 y 1987, dan una tendencia al ascenso del nivel del mar de 1.6 mm/año (Kokot et al. 2004). También se han registrado valores similares, de 1,4 mm/año, en Mar del Plata entre los años 1954 y 1992 (Lanfredi et al. 1998) y en Puerto Quequén, 1.4 mm/año, entre 1918 y 1981 (Lanfredi et al. 1998). Estos datos la dan a la variable el valor 3 en todos los sectores.

**Precipitaciones:** debido al valor medio de precipitaciones anuales en el área de estudio a esta variable se le asignó el valor 1 en todos los sectores.

**Uso del terreno:** los sectores 1 y 3 se caracterizan por ser áreas naturales sin urbanizar y la variable adquiere el valor 1. El sector 2 posee edificaciones dispersas, por lo tanto la variable toma el valor 3 (Fig. 5).

**Estructuras ingenieriles al pie del acantilado:** en nin-

guno de los tres sectores hay estructuras ingenieriles, entonces el valor asignado a esta variable es 3.

**Presencia y tipo de redes de transporte:** en las cercanías al acantilado en el sector 3 no hay estructuras para tráfico vehicular, por lo tanto la variable tiene el valor 1. En los sectores 1 y 2 solo existe el camino de la costa junto con pequeñas calles en la villa balnearia, asignándole a la variable el valor 2 (Fig. 5).

**Densidad de población:** en temporada alta, en la localidad de Bahía Creek se registran más de 1000 personas/km<sup>2</sup>, es decir que el sector 2 adquiere el valor 4. Los sectores 1 y 3, contrariamente, no poseen ocupación y la variable toma el valor 1.

**Tasa de cambio de población:** la tasa de crecimiento demográfico en Viedma, Carmen de Patagones y Bahía Creek entre 2001 y 2010 fue de 1.4 %, por lo tanto, la variable adquiere el valor 2.

En el Cuadro 3 se indican los valores obtenidos al calcular los índices de peligro e impacto relativo y absoluto y finalmente el índice de riesgo. El valor de este último índice del sector 1 (36.45) corresponde a bajo riesgo, mientras que los sectores 2 (51.79) y 3 (41.57) tienen valores de riesgo medio.

En lo que respecta al viento, del total de los datos horarios disponibles en Bahía Creek, en un 34% de los casos iguala o supera la velocidad umbral de 6.7 m/s. Además se puede mencionar que éste en general es más intenso entre las 12 hs y las 16 hs y durante los meses de verano.

Con respecto a la dirección del viento efectivo, teniendo en cuenta todos sus registros, existen direcciones predominantes (Fig. 7): en SAO la NO (18.8 %), seguida de la ONO (10.4 %), mientras que en Viedma se observa un comportamiento similar (NO: 13.9 % y SO: 10.1 %). Si se comparan los vientos provenientes de las direcciones ubicadas entre los 213,75° (SO) y los 326.25° (NO) con los vientos provenientes con direcciones entre 33.75° (NE) y 146.25° (SE), las diferencias son significativas: en el caso de SAO un 46.3% frente a un 16.7 % respectivamente, mientras que en Viedma las primeras poseen un valor de 43.2% frente al 17.3 % de las segundas. Esta es la razón principal que explica que el transporte neto de las dunas se produzca de NO a SE y/o SO a NE. Este avance resulta de mayor interés en el sector de dunas que se desplazan próximas y hacia las edificaciones de Bahía Creek (Figs. 1, 8-9) por el riesgo que suponen para la población. Esta última se ubica junto a la porción más distal de un sector dominado por dunas longitudinales complejas de cresta sinuosa, con un rumbo promedio NO-SE (Fig. 5). En ocasiones, superpuestas en sus flancos o crestas, presentan formas barjanoides de menor tamaño, con sus crestas

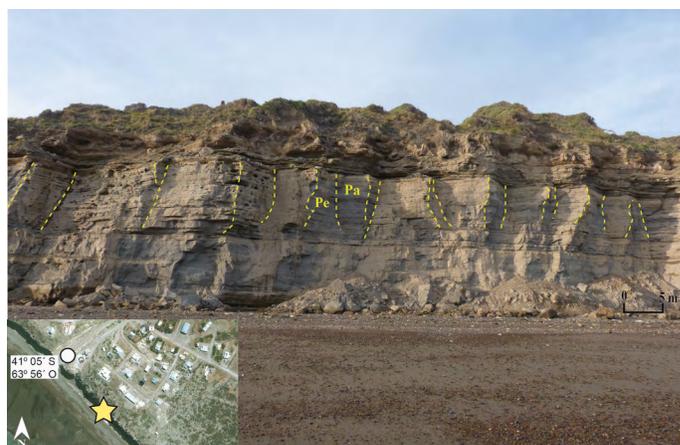
orientadas principalmente O-E, mostrando un ligero desplazamiento hacia el S sobre esos flancos o crestas. En este sitio también hay dunas reversas y oblicuas.

Dentro del sector recientemente mencionado, en cercanías a la localidad de Bahía Creek, la tasa de avance promedio de las dunas entre los años 1986 y 2011 fue de  $5.71 \pm 0.8$  m/año, con valores máximos superiores a los 10 m/año con sentido SE a NE (Fig. 9). En la zona que incluye a la villa de Bahía Creek, Picone (2014) registró una medición de 6 m/año entre los años 1993-2003, similar a la obtenida en el presente trabajo. Este fenómeno también pudo evidenciarse a partir de la comparación entre fotografías de octubre de 2016 y mayo de 2017, donde se observa cómo las dunas avanzan hacia las casas del poblado (Fig. 8).

La medición de esta tasa de avance permitió hacer una predicción de la migración de las dunas dentro de los próximos 10, 25, 50 y 100 años en los alrededores del asentamiento de Bahía Creek (Fig. 10). Así, en los próximos 10 años el campo de dunas avanzaría unos 57.1 m hacia el E, unos 142.75 m a los 25 años, y 285.5 m y 571 m a los 50 y 100 años respectivamente (Fig. 10).

El mapa de peligro geológico, desarrollado a partir del riesgo de erosión del acantilado y de la tasa de avance calculada de las dunas para el área de estudio (Fig. 11), indica que se consideran zonas de alto peligro aquellas que están cubiertas por dunas móviles y una franja aprox. de 150 m hacia el sector donde estas migran, en base al avance determinado para los próximos 25 años. La zona de alto peligro incluye también el acantilado activo, contemplando una franja de 100 m hacia el continente desde su cima, y 15 m

hacia el mar desde su base. Esto se debe a la posibilidad de caída de bloques principalmente o algún otro tipo de proceso de remoción en masa. Se utilizaron estas medidas siguiendo recomendaciones de ordenamiento territorial para zonas costeras acantiladas propuestas por Marcomini y López (1999), Plunkett y Gastaminza (2002) y Marcomini et al. (2007). De esta manera se priorizó un margen de seguridad además de los valores calculados en el índice de riesgo del acantilado y la tasa de retroceso de 0.2 m/año calculada por del Río et al. (2007). La zona de peligro medio está representada por dunas estabilizadas, ubicadas en un área donde se espera que en los próximos 25 a 100 años se ubiquen dunas activas, es decir a unos 150-500 m de los frentes de dunas actuales

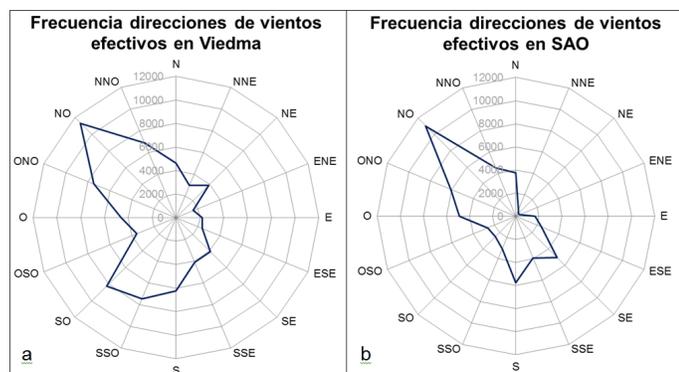


**Figura 6.** Acantilado ubicado 100 m aproximadamente al este de la bajada a la playa de Bahía Creek, donde se puede apreciar su verticalidad y los dos juegos de diaclasas verticales prácticamente perpendiculares entre sí, uno paralelo (Pa) y otro perpendicular (Pe) al acantilado. La estrella indica donde se tomó la fotografía.

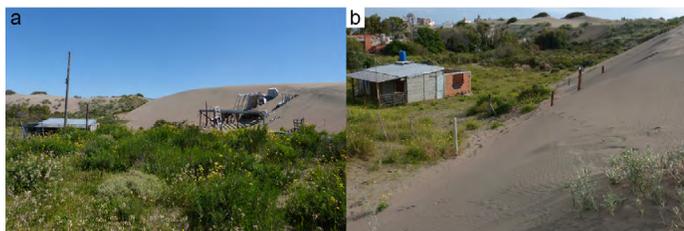
**Cuadro 3.** Detalle de los valores adquiridos por cada variable en los índices de peligro e impacto, con los cuales se obtiene el índice de riesgo.

Índice	Variables										Ilrel	IPrel	IR	
	A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	Ilabs	IPabs		
Sector A	Peligro	3	3	4	2	2	1	1	2	3	1	17.46	45.95	36.45
	Impacto	1	3	1	1	2	-	-	-	-	-	6.4	17.6	
Sector B	Peligro	3	3	4	2	2	1	1	2	3	1	63.49	45.95	51.79
	Impacto	3	3	2	4	2	-	-	-	-	-	12.2	17.6	
Sector C	Peligro	3	3	4	3	2	1	1	2	3	1	23.81	50.45	41.57
	Impacto	1	3	2	1	2	-	-	-	-	-	7.2	18.6	

activas; además se incluye a la playa ubicada a más de 15 m de distancia en la horizontal bajo los acantilados. Finalmente, la zona de bajo peligro corresponde al área de la antigua planicie aluvial disectada y a las dunas vegetadas que no forman



**Figura 7.** Direcciones desde donde soplan los vientos efectivos. Los valores de frecuencia corresponden a la cantidad de mediciones de vientos superiores a 6.7 m/s o 24 km/h registradas dentro del total de registros de viento disponibles en las estaciones del Servicio Meteorológico Nacional de Viedma (a) y San Antonio Oeste (b).



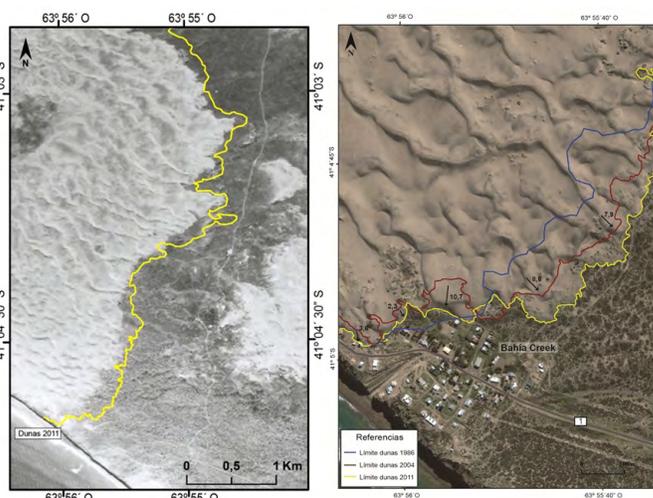
**Figura 8.** Avance de una duna longitudinal sobre las construcciones de Bahía Creek: a) octubre de 2016; b) mayo de 2017.

parte de las otras zonas de peligro, es decir, a partir de unos 500 m aprox. del frente de dunas activas actuales.

## DISCUSIÓN

A partir del índice de riesgo del acantilado activo calculado, se deduce que las variables más significativas que contribuyen al mismo en cuanto al peligro son la pendiente del acantilado, su litología y las discontinuidades que presenta. En el sector 3 también se puede agregar la protección de la playa. En cuanto al impacto, la variable común más significativa es la correspondiente a estructuras ingenieriles ya que en el área estas obras están ausentes, mientras que en el sector del asentamiento poblacional es muy relevante la densidad de población y el principal uso de la tierra. En los sectores 1 y 3 no hay otras variables de significativa importancia, propio de una zona que cuenta con un desarrollo muy incipiente hasta la actualidad.

De esta manera se puede observar que son las variables del índice de impacto, propias de un sector habitado, las que



**Figura 9.** Migración de las dunas en los alrededores del pueblo de Bahía Creek entre los años 1986 y 2011: a) imagen del año 1986 (SEGEMAR); b) imagen del año 2011 (Bing maps).

marcan la mayor diferencia en el cálculo final del índice de riesgo. Esto se debe a la vulnerabilidad de ese sector respecto al peligro geológico, similar en todos los sectores. A su vez, hacia donde desaparece el acantilado activo, se registran los menores valores de los índices, propio de la estabilidad del área dada por la inactividad del acantilado y de no estar habitado.

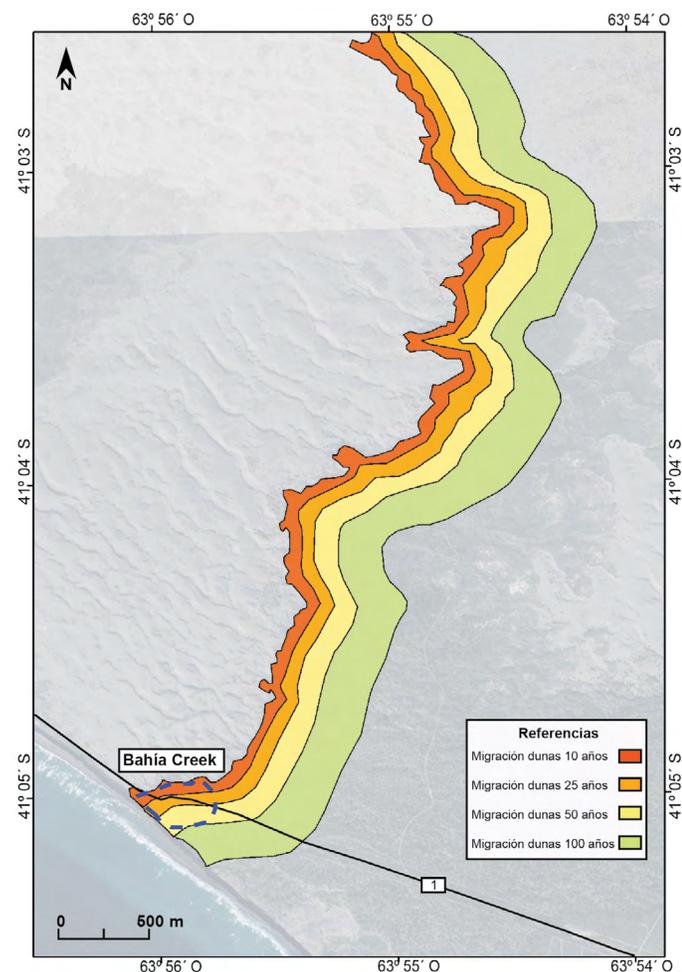
Asimismo la tasa de retroceso del acantilado de 0,2 m/año (del Río et al. 2007) correspondería con valores de erosión moderados de acuerdo con el estudio de vulnerabilidad costera desarrollado por Kokot et al. (2004). Esto concuerda con los valores medios y el valor cercano por debajo obtenidos tras el cálculo del índice de riesgo.

La tasa de avance para las dunas cercanas a Bahía Creek corresponde a tasas de movimiento medias según Dong et al. (2013). En comparación con campos de dunas de características similares, ubicados también en la costa atlántica argentina, la tasa de migración en Bahía Creek es igual o menor. El campo de dunas de Patagones registra para los años 1973-2005 una tasa de 5-9 m/año para dunas barjanoides desarrolladas entre Punta Redonda y Punta Rasa (Cortizo e Isla 2012). En el campo de dunas de Península Valdés, por su parte, se registraron valores de  $9.1 \pm 2.7$  m/año en mediciones realizadas en 30 mega parches de dunas entre los años 1969-2002 (del Valle et al. 2008). Si bien la tasa de avance en Bahía Creek es menor o igual, adquiere gran relevancia al ubicarse junto a un poblado, que se ve afectado en la actualidad y pudiendo ser afectado en el futuro.

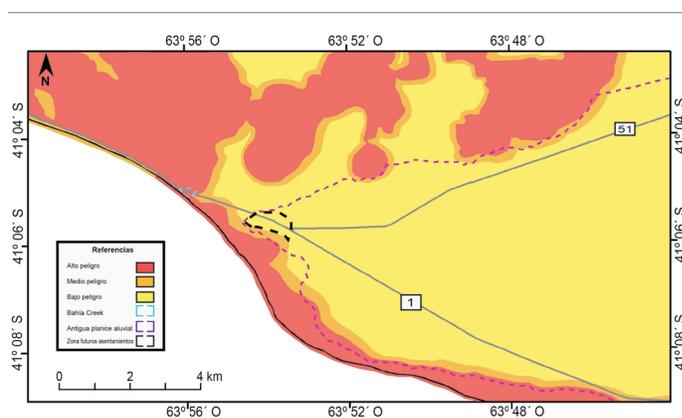
Es importante resaltar que, localmente, las construcciones de la villa balnearia de Bahía Creek dificultan el paso de los vientos provenientes del cuadrante S principalmente, res-

ponsables del movimiento de las dunas hacia el NE mayormente. Así adquieren mayor peso relativo los vientos del O y del NO. Estos últimos provocan el avance resultante de las dunas hacia el E y SE, es decir hacia donde se encuentran las edificaciones (Figs. 1, 5 y 9). De esta forma se ve como la intervención antrópica en el área influye en la evolución de las dunas. Además de la villa turística de Bahía Creek, cuyas construcciones se encuentran esparcidas en zonas de dunas vegetadas, hay un pequeño número de viviendas aisladas. Estas pertenecen a pobladores rurales, dedicados principalmente a la cría de ganado, que también podrán verse afectadas por el avance de las dunas.

Entonces, las divisiones de peligro en el presente trabajo consideran que los sectores con mayor peligro son los que pueden verse afectados en el corto plazo, ya sea en la inmediatez por procesos de remoción en masa dentro del acantilado o por el avance de dunas en el lapso de meses o unos pocos años; no son apropiados para los asentamientos poblacionales y, dependiendo del sector en particular, se podría



**Figura 10.** Estimación del avance de las dunas en las cercanías a la localidad de Bahía Creek para los próximos 100 años.



**Figura 11.** Mapa de peligro geológico de Bahía Creek.

admitir el uso científico/educativo regulado y/o el uso recreacional. Estos sectores, no admiten la construcción de infraestructura o asentamientos humanos, tanto por el cambio que generan en la dinámica del sistema, como por el daño que pueden sufrir personas y bienes. Las zonas de peligro medio se caracterizan por tener mayor estabilidad a lo largo de los años que las zonas de alto peligro. Admiten el uso recreacional, científico y educativo de tipo extensivo, la construcción de sendas y accesos de playa, campamentos agrestes e inclusive viviendas con estructuras de protección. Las zonas de bajo peligro son las más estables, allí prácticamente no habrá modificaciones en al menos 100 años. Admiten el uso turístico – recreativo intensivo, con alta concentración de visitantes, junto con edificaciones de distintos tipos. Asimismo, se debe procurar un mínimo impacto al medio natural y bajo una regulación especial, atendiendo al artículo 74 de la Constitución de la provincia de Río Negro. Este impone la necesidad de un Ordenamiento Territorial compatible con las necesidades generales de la comunidad.

Mediante el trabajo aquí realizado junto al trabajo hecho por Kokot et al. (2004), referido a la vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar, se puede tener un conocimiento más completo de la exposición frente a los fenómenos naturales y geológicos a los que está expuesta el área de estudio y del peligro asociado. La vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en Bahía Creek es alta y en Caleta de los Loros muy alta (Kokot et al. 2004).

## RECOMENDACIONES

Es aconsejable, siempre que sea posible, construir en sitios que no se vayan a ver afectados por el avance de las dunas o el retroceso del acantilado en al menos el mediano plazo, adaptándose a la dinámica del sistema y evitan-

do acciones que la alteren, de acuerdo con las propuestas de abstención o adaptación enumeradas por Pope (1997). Esto significa abstenerse de cualquier actividad protectora o compensatoria y simplemente dejar que la playa se comporte como lo hará en forma natural, o aceptar y adaptarse a las consecuencias del desarrollo a lo largo de la costa, sin modificar el sistema. Se recomienda, como mejor opción dentro del área que abarca el mapa de peligro realizado, que los futuros asentamientos se localicen en la antigua planicie aluvial disectada, unidad que se encuentra dentro de la zona de bajo peligro (Fig. 11).

Respecto a las viviendas ubicadas en la actualidad dentro de la zona de alto peligro se propone realizar medidas de manejo costero de moderación, por ejemplo siguiendo la propuesta de Pope (1997) para aquellas ubicadas a menos de 100 m del borde de los acantilados activos; medidas que se orientarán a proteger la costa acantilada de la erosión. Para el caso de las viviendas que están construidas junto a las dunas activas sería conveniente realizar acciones para mejorar su situación, como puede ser el establecimiento de pantallas forestales, con el objetivo de frenar el avance de estas dunas. De otra forma, siguiendo la premisa de adaptación propuesta por Pope (1997), la situación de las casas quedará librada al avance de las dunas, pudiendo verse afectadas por este proceso.

Adicionalmente, respecto a las vías de acceso a la playa, se propone realizar modificaciones que mejoren la seguridad respecto a los procesos de remoción en masa. Se recomienda que la bajada a la playa, emplazada sobre el acantilado, sea utilizada únicamente para peatones, realizando canaletas o contenciones en los laterales en forma escalonada, con bermas vegetadas. Mientras que los vehículos podrían acceder a la playa a través de la costa baja, ubicada a poca distancia del poblado. Allí también se podría delimitar un estacionamiento adecuado, ubicado fuera de los límites del acantilado activo, tratando también de minimizar la pérdida de sedimento en las playas ya que reducen su estabilidad en el corto plazo (Gracia, 2002, del Río et al. 2004, Marcomini et al. 2007, Hesp y Walker, 2013). Además, si el sector de costa baja contará con accesos a la playa a través del campo eólico, estos deberán consistir en pasarelas de madera que eviten que se dañe la vegetación que existiese (Hesp y Walker 2013).

Como se mencionó en la zonificación de peligro, es recomendable que las avenidas costaneras y construcciones estén a una distancia mayor a 100 – 200 m del borde del acantilado (Marcomini y López, 1999, Plunkett y Gastaminza, 2002, Marcomini et al. 2007), procurando su mayor vida útil y el resguardo frente a fenómenos extraordinarios. A su vez, no

se recomienda construir en las zonas bajas más expuestas al ascenso del nivel del mar (Gracia 2002), como lo es en este caso la zona comprendida entre Bahía Creek y Caleta de los Loros.

Es recomendable también realizar un pertinente trazado de las calles, con adecuadas vías de escurrimiento y un adecuado sistema de desagües o cloacas que viertan los desechos en un lugar apropiado (Marcomini et al. 2007), o en primer término, que al menos cada casa cuente con un lecho nitrificante (López Alfonsín et al. 2012). Esto se debe a que los diseños urbanos con calles perpendiculares a la costa que terminan en el mar modifican sustancialmente la morfología costera, dando lugar a canales de desagüe artificiales luego de fuertes tormentas (Marcomini et al. 2007). Además, los asentamientos urbanos en acantilados pueden producir alteraciones en su estabilidad, desencadenando o acelerando los procesos de dinámica gravitacional. Las filtraciones de agua a partir de cañerías, redes de alcantarillado y desagües pluviales producen un aumento del agua intersticial de la roca, facilitando la caída de bloques y deslizamientos en acantilados de material blando (Gracia 2002).

Así como no se debe construir sobre dunas móviles, tampoco se debe destruir la cubierta de vegetación que protege y estabiliza a las dunas, ya que conduce a pérdidas de sedimento en las playas y transformaciones que reducen su estabilidad a corto plazo, de acuerdo con Marcomini et al. (2007). Según estos autores, en líneas generales, tampoco se deben estabilizar las dunas con especies exóticas. La mejor opción es explicar al visitante y a los pobladores la importancia de los ecosistemas naturales, procurando su protección, así como también la preservación de los recursos antropológicos y paleontológicos (Gracia 2002, Plunkett y Gastaminza 2002, Hesp y Walker 2013).

Finalmente, es recomendable un programa de monitoreo que contemple relevamientos de perfiles de playa en sus accesos, retroceso de la línea de costa, procesos de remoción en masa y avance de dunas. También se deberá atender la comunicación del peligro, teniendo cartelera adecuada y un mapa o sistema de evacuación.

## CONCLUSIONES

El índice de riesgo de erosión del acantilado activo calculado resultó ser bajo en el sector occidental (1) y medio en los sectores central (2) y oriental (3) del área de estudio. El valor más elevado se registró en el sector 2, correspondiente a la zona donde se ubica el poblado de Bahía Creek, eviden-

ciendo la vulnerabilidad frente a los factores de peligro a los que está expuesto. A su vez el peligro es más elevado en los sectores alejados de la costa baja, propio de sus características geológicas y geomorfológicas. Dentro de las variables más influyentes se destacan la pendiente del acantilado, sus estructuras y composición (litología) y la ausencia de obras ingenieriles en todos los sectores. Adicionalmente es muy importante la densidad de población y áreas desarrolladas en el sector 2 y la protección de la playa en el sector 3.

El peligro que representan las dunas está asociado al rápido desplazamiento que pueden tener en el tiempo. En las cercanías a Bahía Creek la tasa de avance desde 1986 a 2011 fue de  $5.71 \pm 0,8$  m/año, con máximos de 10 m/año, con sentido de desplazamiento SE – ENE. El avance hacia las edificaciones está potenciado porque estas actúan frenando los vientos del cuadrante S y en consecuencia disminuye el transporte de sedimentos hacia el cuadrante N.

Finalmente, con la caracterización del área y el estudio del peligro geológico, se definieron zonas de bajo, medio y alto peligro respecto al retroceso del acantilado y a la migración de las dunas. Las zonas de alto peligro representan sitios donde no debe expandirse la localidad balnearia. Los sitios recomendados para este desarrollo se encuentran dentro de las zonas de bajo peligro, específicamente dentro del sector de la antigua planicie aluvial disectada más cercano a la costa baja. Se propone dicho lugar priorizando limitar el daño que podría causar el retroceso del acantilado o la migración de las dunas, y que a su vez, sea un lugar cercano a la playa, a los caminos y al poblado existente. Para las viviendas ubicadas dentro de la zona de alto peligro, a menos de 100 m de los acantilados activos, se propone realizar medidas de manejo costero de moderación (Pope, 1997). En cambio para aquellas ubicadas junto a las dunas, es recomendable la implantación de pantallas forestales. Si no se realizara ninguna de estas acciones, se estará siguiendo la propuesta de adaptación descripta por Pope (1997).

Futuros y diversos estudios permitirán entender mejor la dinámica del sistema y contar con mayor precisión a la hora de establecer lugares apropiados para asentarse o para realizar acciones que permitan el asentamiento sin modificar sustancialmente el medio ambiente. Resulta de vital importancia mejorar el conocimiento sobre los procesos allí ocurridos para establecer la relación exacta del campo de dunas y el acantilado activo con los asentamientos poblacionales y sus actividades, así como el potencial peligro que puede representar para la comunidad el avance de las dunas y el retroceso del acantilado.

## AGRADECIMIENTOS

Al IIPG que brindó sus instalaciones y equipamiento necesario para la realización de partes importantes del presente trabajo y a los revisores que contribuyeron a la mejora del manuscrito.

## REFERENCIAS

- Andreis, R.R. 1965. Petrografía y paleocorrientes de la Formación Río Negro (tramo General Conesa – boca del Río Negro). *Revista del Museo de La Plata*, 5, Geología 36: 245- 310.
- Angulo, R., Fidalgo, M.A., Gómez Peral, M. y Schnack, E.J. 1978. Geología y geomorfología del bajo de San Antonio y alrededores, Provincia de Río Negro. Centro de Investigaciones Científicas de la Provincia de Río Negro. Estudios y documentos 8: 1-32.
- Codignotto, J. 1997. Geomorfología y dinámica costera. El mar argentino y sus recursos pesqueros 1: 89 -105.
- Cortizo, L. C. e Isla, F. I. 2012. Dinámica de la barrera medanosa e islas de barrera de Patagones (Buenos Aires, Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 19(1): 47-63.
- Del Río, J.L., Álvarez, J., López de Armentia, A., Bó, M.J., Martínez, J. y Camino, M. 2004. Estudio y desarrollo metodológico para la determinación de la velocidad de retroceso de la costa entre Punta Mejillón y el Balneario El Cóndor, Provincia de Río Negro. Dirección de minería de la provincia de Río Negro, Reporte Técnico, 88 p., Viedma.
- Del Río, J. L., López de Armentia, A. M., Álvarez, J. R., Ferro, G., Bó, M. J., Martínez Arca, J. y Camino, M. 2007. Shoreline Retreat at the Gulf San Matias, Argentina. *Thalassas: An international journal of marine sciences* 23 (2): 43-51.
- Del Río, L. y Gracia, F. J. 2007. Análisis de la vulnerabilidad de los acantilados atlánticos de la provincia de Cádiz ante la erosión costera. *Cuaternario y Geomorfología* 21(1): 87-101.
- Del Río, L. y Gracia, F. J. 2009. Erosion risk assessment of active coastal cliffs in temperate environments. *Geomorphology* 112: 82-95.
- Del Valle, H. F., Rostagno, C. M., Coronato, F. R., Bouza, P. J. y Blanco, P. D. 2008. Sand dune activity in North – Eastern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 72 (4): 411-422.
- Dong, Z., Qian, G., Lv, P. y Hu, G. 2013. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea. *Earth Science Reviews* 120: 20-39.
- Fucks, E., Scalise, A. H y Schnack, E. J. 2011. Evaluación de alternativas para la conservación y manejo del frente costero en Las Grutas. Consejo Federal de Inversiones, 81 p., Buenos Aires.
- Etcheverría, M., Folguera, A., Dal Molín, C., Dalponte M. y Ferro, G. 2006. Hojas Geológicas 4163-II/IV y I/III, Viedma y General Conesa. Provincias de Río Negro y Buenos Aires. Instituto de Geología y Recursos Minerales, Servicio Geológico Minero Argentino. Boletín 366, 67 p., Buenos Aires.
- Gelós, E. M., Schillizzi, R. A. y Spagnuolo, J. O. 1992. El Cenozoico de la

- costa norte del Golfo San Matías, Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47: 135-140.
- González Díaz, E. F. y Malagnino, E. C. 1984. Geomorfología de la provincia de Río Negro. 9º Congreso Geológico Argentino, 159 p., San Carlos de Bariloche.
- Gracia, F. J. 2002. La franja litoral: riesgos y protección. En: Ayala, F. J., Carcedo, M. y Olcina Cantos, J. (eds.), *Riesgos naturales*, 1023-1058, Barcelona.
- Hesp, P.A. y Walker, I.J. 2013. Coastal Dunes. En: Shroder, J.F. (ed.), *Treatise on Geomorphology* 11: 328-355, San Diego.
- INDEC (Instituto Nacional de Estadística y Censos) 2010. Censo Nacional de Población, Hogares y Viviendas 2010.
- Kokot, R. R., Codignotto, J. O. y Elisondo, M. 2004. Vulnerabilidad al ascenso del nivel del mar en la costa de la provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 59: 477-487.
- Kokot, R. R. y Chomnalez, F. 2012. Retroceso de la línea de costa en las Grutas, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 69: 88-96.
- Lanfredi N.W., Pousa J.L. y D'Onofrio, E.E. 1998. Sea – level rise and related potential hazards on the Argentine coast. *Journal of Coastal Research* 14: 47-60.
- López Alfonsín, R., Coccia, M. E., Fauqué, L. E., Castaños, C. y Olvar, N. M. 2012. Estudio para el ordenamiento territorial de la Orla Atlántica Rionegrina. Desde La Lobería a Bahía Creek. Consejo Federal de Inversiones, 108 p., Buenos Aires.
- Marcomini, S. C. y López, R. A. 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. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 6: 1-18.
- Marcomini, S. C., López, R. A., y Spinoglio, A. 2007. Uso de la morfología costera como geoindicador de susceptibilidad a la erosión en costas cohesivas, Necochea, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62: 396-404.
- Picone, S. E. 2014. El Proceso Socio – natural en las Aguadas (Río Negro): un Estudio del Paisaje. Instituto de Investigación en Políticas Públicas y Gobierno Universidad Nacional de Río Negro – Sede Atlántica: 55 p., Viedma.
- Pisoni, J. P. 2012. Los sistemas frontales y la circulación en las inmediaciones de los Golfos Norpatagónicos. *Disertación Doctoral*, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires (inédita), 197 p., Buenos Aires.
- Plunkett, S. y Gastaminza, O. 2002. Plan de ordenación territorial preliminar. Litoral del Río Negro, Argentina. Universidad Nacional de Cuyo 3, 19 p., Mendoza.
- Pope, J. 1997. Responding to Coastal Erosion and flooding damage. *Journal of Coastal Research* 13(3): 704-710.
- Reichler, V. A. 2010. Estratigrafía y paleontología del Cenozoico marino del Gran Bajo y Salinas del Gualicho, Argentina, y descripción de 17 especies nuevas. *Andean Geology* 37: 177-219.
- Saavedra, M., Calvo, M. y Jiménez, C. 2011. Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur. *Revista de Investigación de Física*, 14 (01).
- Sanjaume, E. y Gracia, F. J. 2011. Las dunas de España. *Sociedad Española de Geomorfología*, 747 p., Madrid.
- Sepúlveda, E. G. 1983. Descripción Geológica de la Hoja 381, Gran Bajo del Gualicho, Provincia de Río Negro. *Boletín Servicio Geológico Nacional* 194: 1-61.
- Toffani, M. 2018. Dinámica Costera y Bases para el Ordenamiento Territorial en el Balneario Bahía Creek, Provincia de Río Negro. Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional de Río Negro (inédita), 134 p., General Roca.
- Wörner, S., Dragani, W. C., Echevarria, E. R., Carrasco, M. y Barón, P. J. 2019. An Estimation of the Possible Migration Path of the Pacific Oyster (*Crassostrea gigas*) Along the Northern Coast of Patagonia. *Estuaries and coasts* 42: 806-821.
- Zavala, C. y Freije, H. 2005. Geología de los acantilados. En: Masera, R., Lew, J., y Serra Peirano, G. (eds.), *Las mesetas patagónicas que caen al mar: la costa rionegrina*. Argentina: Gobierno de Río Negro, 18-199., Viedma.