

# ESTUDIO MORFODINÁMICO DE LAS DUNAS DEL CAMPO EÓLICO DE BAHÍA CREEK, RÍO NEGRO, PATAGONIA ARGENTINA

*Mauricio Toffani*<sup>1</sup>

<sup>1</sup> Universidad Nacional de Río Negro, Avenida Roca 1242, General Roca, Río Negro. mtoffani@unrn.edu.ar

## ARTICLE INFO

### **Article history**

Received October 12, 2019

Accepted February 25, 2020

Available online February 25, 2020

### **Handling Editor**

Sebastian Richiano

### **Keywords**

Morfología dunar

Dunas activas

Migración

Costa atlántica rionegrina

NE de Patagonia

## RESUMEN

El presente trabajo se llevó a cabo en el área de Bahía Creek, en la costa sur de la provincia de Río Negro, NE de Patagonia, Argentina. El mismo consta de una clasificación morfológica de las dunas presentes en el campo eólico de Bahía Creek, junto con un estudio del índice de movilidad y el potencial anual de deriva de arena (DP), sumado a la dirección de deriva resultante (RDD) y al potencial de deriva resultante (RDP); además de la tasa de avance de las dunas entre los años 1986 y 2017 y características granulométricas de las arenas que las componen. Estas tareas fueron posibles gracias al uso de imágenes satelitales, fotografías aéreas y de campo, muestreo in situ, modelos de elevación digital y datos de viento recolectados en estaciones cercanas al área de estudio. Las dunas estudiadas se agruparon en diez sectores con características comunes, definidos por las morfologías dominantes. Dentro de estos destacan los referidos a dunas semilunares (barjanes y cordones barjanoides y transversales), lineales, estrella, parabólicas, embrionarias, remontantes y colgadas, junto con dunas oblicuas, reversas, nebkas y, a escala de campo, dunas eco, descendentes y envolventes. A su vez, dentro de cada sector hay dunas compuestas y/o complejas, pudiendo haber más de un tipo de duna. Teniendo en cuenta el índice de movilidad, las dunas resultan en promedio activas a excepción de la interduna, mientras que el potencial de deriva de arena calculado fue de 1090, con una dirección de deriva resultante de 76° y un RDD de 391. Asimismo la tasa de migración media entre los años estudiados (1986 – 2017) fue de  $6,02 \pm 0,3$  m/año. Estos estudios, además de brindar una clasificación del campo de dunas de Bahía Creek, escasa hasta la actualidad, permiten tener un conocimiento sobre por qué las dunas en general se ubican en el área de estudio y cómo se produce la división de las mismas dentro del campo eólico. Esto último se debe a factores tales como la vegetación, la humedad, el aporte de arena, los vientos, la topografía y construcciones o procesos antropogénicos. Además se realizaron comparaciones con campos de dunas con similares características ubicados también en la costa Argentina.

## EXTENDED ABSTRACT

*Morphodynamic study of the dunes from Bahía Creek dunefield, Río Negro, Argentinian Patagonia*

This paper is carried out in the coastal area of Bahía Creek and its surroundings, highlighting 15 km to the west Caleta de los Loros. This area is located on the coast of Río Negro province, which is part of the San Matías gulf. Bahía Creek is located precisely at 41° 05´S, 63° 56´ W. It belongs to the department of Adolfo Alsina and it is located 70 km SW of Viedma city, capital of the province and 70 km E of San Antonio Oeste port (Fig. 1).

The main objective of this work is a morphological classification of the dunes present in the dunefield of Bahía Creek, based on the proposed classifications by McKee (1979), Lancaster (1995), Hesp (2011) and Sanjaume and Gracia (2011). For this it is necessary to observe satellite images and aerial and field photographs, together with the study of wind data. With this information it is also possible to know the factors that can condition the location of the dunes, their migration, their mobility index according to Lancaster (1988) and the sand drift potential (DP), the resulting drift direction (RDD), the resulting drift potential (RDP) and the directional variability of the wind through the RDP/DP relationship through the methodology proposed by Fryberger (1979).

The used material consisted of aerial photographs from 1986 from the *Servicio Geológico Minero Argentino*, scale 1:80.000; the digital elevation model (DEM) of the ALOS satellite and Landsat 8 images from 2017, the latter of 30 m of spatial resolution. The images available in Google Earth, Earth Engine and Bing Maps were also used. The wind data used correspond to the records of the *Servicio Meteorológico Nacional* weather stations located in the towns of Viedma and San Antonio Oeste (SAO). Within these winds, those capable of mobilizing the material available in the study area (effective wind), of an average grain size of 0.25 mm (Toffani, 2018), are those that reach speeds equal to or greater than 6.7 m/s. This value was calculated using the equations proposed by Bagnold (1954).

The effective wind was recorded in 34% of the total measurements within Viedma and SAO stations. In Viedma (Fig. 2) the main effective wind directions are NW (13.9%), and SW (10.1%), while in SAO (Fig. 2) the NW direction (18.8%) also predominates,

followed by WNW (10.4%). These values suggest that the net displacement of the dunes occurs from NW/SW to SE/NE.

Subsequently, applying the mobility index, it was obtained that the dunes, on average, correspond to active except in the interdune, with a value of 124.

The annual value of DP is 1090, the RDP 392 and the annual RDD direction is 76 °, indicating a displacement of the sediments towards the ENE (Fig. 3). The directional variability of the wind regime, characterized by the RDP/DP ratio, shows the value of 0.36. This means that Bahía Creek is located within a high energy environment, with a wind regime between complex and bimodal.

The annual rate of migration for the dunes studied, which are located within *fields* of dunes 2, 5 and 7, between 1986 and 2017 was  $6.02 \pm 0.3$  m/year (Fig. 4), towards NE – SE.

The dunefield is transgressive and is characterized by a gentle relief that goes from 0 to 60 – 90 meters above sea level from the beach towards N and E. The active dunes rest on a field of stabilized dunes and this in turn is located on an old dissected alluvial plain. The dunes can reach a relative height of 16 m and are composed of medium to fine sands, generally very well sorted, with the exception of some well sorted.

Within the classification itself (Fig. 5), the dune *fields* 1 (Fig. 6a), 3 (Fig. 6c), 5 (Fig. 8a) and 6 (Fig. 8b) are characterized by the predominance of crescentic dunes. Field 2 has mainly linear and reversible crest dunes (Fig. 6b). Field 4 is characterized by star dunes (Fig. 6d). Field 7 is composed of symmetric, asymmetric and lateral coalescence parabolic dunes (Fig. 8c – d). While field 8 is represented by embryonic dunes (Fig. 9a – b), field 9 by climbing dunes (Fig. 9c) and field 10 by hanging dunes (Fig. 9d). Echo dunes (Fig. 10a), falling dunes from the cliff (Fig. 10b) and enveloping dunes (Fig. 10c) were also recorded in the field. In addition, within the different sectors mentioned, the formation of nebkas occurs (Fig. 10d).

The wavelengths vary between 30 m and 350 m, the lowest values are after the creek, that is where the dunefield begins, and in the most distal part, east of the dune *field* 6. This sector is also the one that records the highest values. This distribution is coherent, since the first accumulations are of smaller size and close to each other, in general they are growing and having greater wavelength, until reaching a

maximum. Where transport begins to decrease they acquire smaller sizes. The greatest lengths, up to 1 km, due to the development of its arms, are reached by the parabolic dunes. The smallest, 10 m, are those presented by the barchans. Regarding the width, the latter are also those that have smaller sizes, 10 m, while the largest correspond to coalescent parabolic dunes and transverse or barchanoid ridges, which are between 500 m and 600 m. It is also observed that the larger the size of the dunes in terms of length and width, the wavelength is greater. Variations in wind and sand transport rate at different time and space scales appear to be the most important control of their size and spacing. These factors, together with vegetation, humidity, input of sand, topography and constructions or anthropogenic processes, influence the distribution of the active dunes and at the same time in the location of the different types of dunes. The most relevant for the population of Bahía Creek are the constructions that act as an obstacle to the transport of sediments by the wind. They difficult the passage of winds coming mainly from the S, which contribute to the movement of the dunes towards the NE, leaving them more relative weight to the winds of the W and the NW. The latter cause the fastest advance of the dunes towards the E and SE, that is, where the buildings are.

Bahía Creek dunefield, due the types of dunes and their distribution, shows great complexity, mainly due to the variations in the effective winds, and that over time generate compound and complex dunes. In Argentina, coastal dunefields with similar characteristics are develop, for example, around San Antonio Oeste and Este, in Río Negro province (Carbone *et al.*, 2007); in the south and east of Buenos Aires province (*Barrera Medanosa Austral y Oriental*) (Bértola and Cortizo, 2005; Cortizo and Isla, 2007, 2012; Bértola *et al.*, 2009); and in Península Valdés, Chubut province (del Valle *et al.*, 2008). However, Bahía Creek has exceptional characteristics due to the possibility that offers to appreciate a natural environment with different geomorphological features with virtually no anthropic disturbance. Among these are beaches, cliffs and mainly the vast dunefield, which enters the continent with a concentration and striking diversity of dunes. It is a site that is not yet highly exploited by urbanization and tourism and allows visitors to access an almost virgin and pristine environment, which includes Caleta de los Loros, Pozo Salado and Punta Mejillón

Protected Area. This last one is conformed to a greater extent by a tidal plain, which added to the rest of the coastal environment and to the dunefield, makes the area have a great diversity of species. In addition, the importance of the study of the dunefield lies in its proximity to the seaside town of Bahía Creek, which acquires more visitors over the years and is affected by the migration of the dunes, which sometimes have already covered houses or arrived at a distance very close to them and continue to move in that direction.

**Keywords:** dune morphology, active dunes, migration, Rionegral Atlantic Coast, NE Patagonia.

## INTRODUCCIÓN

El presente trabajo se desarrolla en la zona costera de Bahía Creek y sus alrededores y está centrado en el estudio de las dunas que conforman el campo eólico de Bahía Creek. Su existencia es posible gracias a ciertas características que se encuentran dentro de las enumeradas por Bértola y Cortizo (2005), Miot da Silva y Hesp (2010), Sanjaume y Gracia (2011) y López *et al.* (2016) y que son necesarias para el desarrollo de un campo de dunas costero. Estas características son: gran disponibilidad de material, energía eólica que supera un umbral mínimo de velocidad, transporte litoral libre (sin obstáculos), intensos vientos marinos de mar a tierra, favorable orientación de la costa en relación con la componente dominante del viento, precipitaciones moderadas, escasa humedad atmosférica, playas de poca pendiente, topografía de la zona continental adyacente a la playa suficientemente amplia y plana y limitado crecimiento de vegetación propio de regiones áridas y semiáridas.

En Argentina se desarrollan campos de dunas costeros con similares características, por ejemplo, en los alrededores de San Antonio Oeste y Este, en la provincia de Río Negro (Carbone *et al.*, 2007); en el sur y este de la provincia de Buenos Aires (*Barrera Medanosa Austral y Oriental*) (Bértola y Cortizo, 2005; Cortizo e Isla, 2007, 2012; Bértola *et al.*, 2009); y en la Península de Valdés, provincia de Chubut (del Valle *et al.*, 2008). Sin embargo, Bahía Creek presenta características excepcionales debido a la posibilidad que brinda de apreciar un ambiente natural con distintos rasgos geomorfológicos prácticamente sin perturbación antrópica. Dentro de estos destacan playas, acantilados y principalmente el extenso

campo eólico, que se adentra en el continente con una concentración y diversidad llamativa de dunas. Es un sitio que aún no se encuentra altamente explotado por la urbanización y el turismo y permite que quienes lo visitan puedan acceder a un ambiente casi virgen y prístino, dentro del que se destaca el Área Protegida Caleta de los Loros, Pozo Salado y Punta Mejillón. Esta última está conformada en mayor medida por una planicie mareal, que sumada al resto del ambiente costero y al campo de dunas, hace que el área posea una gran diversidad de especies. En algunos sectores específicos de dunas estabilizadas también se han encontrado restos arqueológicos indicativos de la ocupación de la zona desde hace al menos 6000 años (Favier Dubois, 2013). Además la importancia del estudio del campo eólico radica en su cercanía a la localidad balnearia de Bahía Creek, la cual adquiere mayor cantidad de visitantes con el paso de los años y se ve afectada por el avance de las dunas, que en ocasiones ya han cubierto casas o llegaron a una distancia sumamente cercana a las mismas y continúan avanzando en ese sentido.

En la zona se han realizado trabajos que abarcan diversos estudios geológicos, sedimentológicos, estratigráficos, geofísicos, referidos al ordenamiento territorial y al ascenso del nivel del mar. Sin embargo, no se cuenta con trabajos que pongan especial atención en las dunas, brindando una clasificación o información de detalle sobre las mismas; solamente se las divide como fijas o móviles en líneas generales. Por esta razón surge el presente trabajo, buscando poner fin a esta escasez de información. Los trabajos geológicos que se han realizado en el área de estudio son principalmente de carácter regional, abarcando grandes áreas, como puede ser la costa de Río Negro, la costa del golfo San Matías o entre la desembocadura del río Negro y San Antonio Oeste. Estos estudios permitieron determinar las unidades de los afloramientos de la zona en general (Andreis, 1965; Angulo *et al.*, 1978; Gelós y Spagnuolo, 1992; Zavala y Freije, 2005), la geomorfología general (González Díaz y Malagnino, 1984), las características regionales de los vientos (Pisoni, 2012) y la geología vinculada al ordenamiento territorial (del Río *et al.*, 2004; Fucks *et al.*, 2011; López Alfonsín *et al.*, 2012; Toffani, 2018).

Entonces, el objetivo principal de este trabajo es realizar una clasificación y descripción morfológica de las dunas presentes en el campo eólico de Bahía

Creek. Los objetivos particulares consisten en conocer los factores que pueden condicionar la ubicación de las dunas, conocer datos granulométricos de las mismas, la tasa de avance del campo de dunas activo, su índice de movilidad, el potencial de deriva de arena (DP), la dirección de deriva resultante (RDD) y el potencial de deriva resultante (RDP).

## CARACTERÍSTICAS DEL ÁREA DE ESTUDIO

### Área de estudio

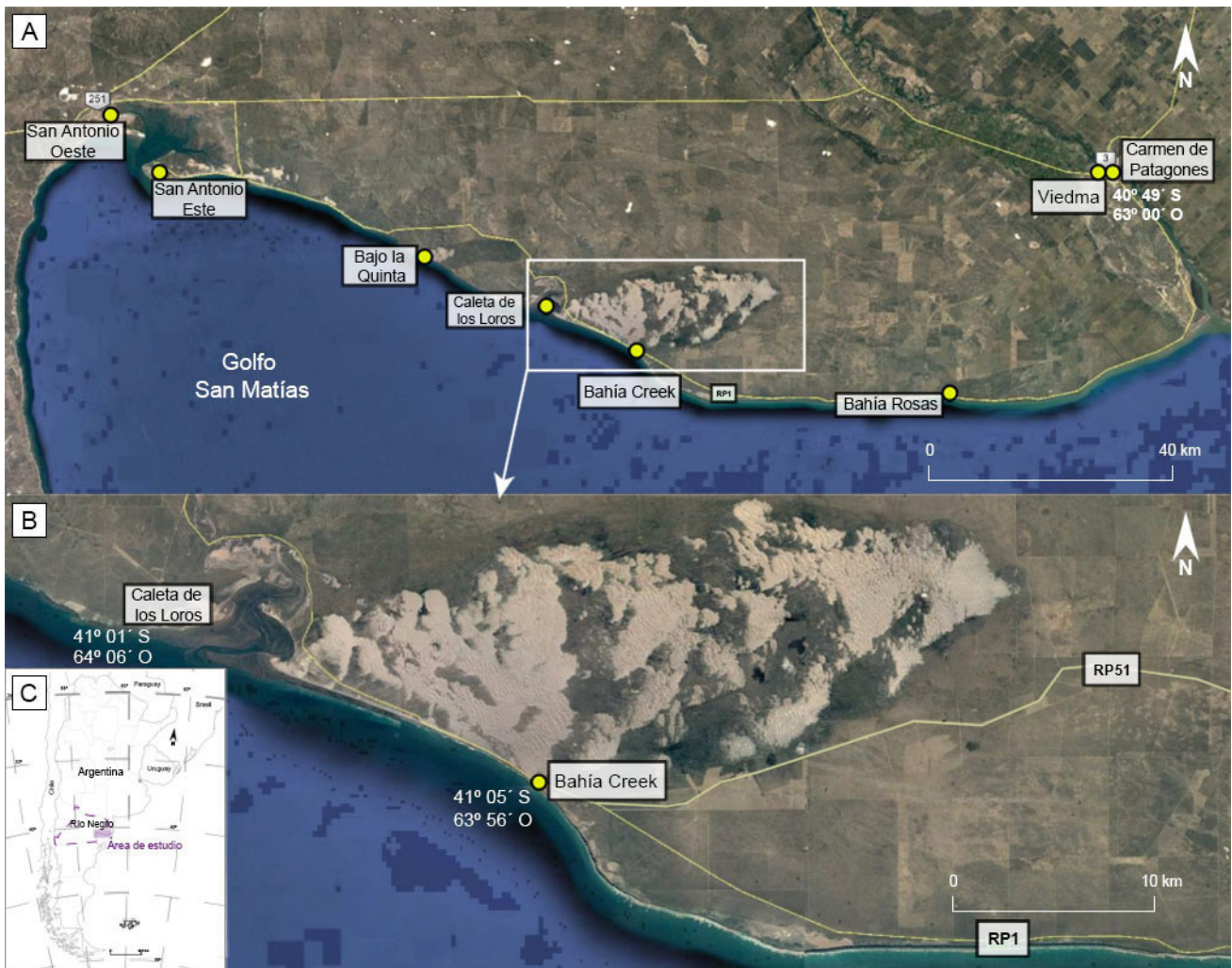
Bahía Creek está ubicada en la costa de la provincia de Río Negro, la cual forma parte del golfo San Matías. Se encuentra precisamente a los 41° 05' S, 63° 56' O, mientras que 15 km al O se localiza Caleta de los Loros, a los 41° 01' S, 64° 06' O. Toda la zona pertenece al departamento de Adolfo Alsina, encontrándose Bahía Creek 70 km al SO de la ciudad de Viedma, capital de la provincia y 70 km al E del puerto de San Antonio Oeste (Fig. 1). Se puede acceder al área de estudio desde Viedma a través de la Ruta Provincial N°1 (también conocida como "Camino de la Costa") o mediante la Ruta Provincial N° 51.

Bahía Creek cuenta con una población estable muy reducida, de 5 habitantes (Censo INDEC, 2010), y funciona como un sitio de veraneo y descanso de fin de semana para los visitantes de las localidades de Viedma y Carmen de Patagones fundamentalmente. En temporada alta puede alcanzar la cantidad de 200 – 250 personas hospedadas en su máxima ocupación.

Entre Bahía Creek y Caleta de los Loros, una planicie de mareas, predomina la costa baja. Hacia el E, la playa se vuelve más estrecha y el rasgo más distintivo son los acantilados marinos activos, mientras que hacia el continente se extiende el extenso campo de dunas.

### Geología y Geomorfología

En los acantilados costeros de Bahía Creek se reconocieron los afloramientos de la Formación Río Negro (Andreis, 1965), la Formación Tehuelche (Sepúlveda, 1983) y la Formación Punta Villarino (Angulo *et al.*, 1978). Los mismos han sido descritos detalladamente por Toffani (2018) y Toffani *et al.* (en prensa). Estos depósitos son de edades Plioceno temprano – Holoceno (Alberdi *et al.*, 1997; Zavala y Freije, 2005) y corresponden a ambientes de dunas



**Figura 1. a)** Región costera de la provincia de Río Negro, donde se destaca el campo de dunas de Bahía Creek. **b)** Detalle del campo de dunas de Bahía Creek. **c)** Ubicación del área de estudio dentro de la República Argentina.  
**Figure 1. a)** Coastal region of the Río Negro province, where Bahía Creek dune field stands out. **b)** Bahía Creek dunefield detail. **c)** Location of the study area within the Argentine Republic.

e interdunas y a la antigua planicie fluvial del río Negro (Gelós *et al.* 1992; Zavala y Freije, 2005). Dentro de los depósitos más jóvenes hay acumulaciones medianosas activas, incluido el campo de dunas de Bahía Creek, inactivas y depósitos de mantos de arena actuales que Gelós *et al.* (1992) y del Río *et al.* (2004) identificaron como Formación Punta Villarino.

En carbones y valvas de concheros ubicados en dunas y mantos de arena situados a diferentes distancias de la playa, se registraron edades de entre ca. 5310 y 1100 años  $^{14}\text{C}$  A.P. (Favier Dubois y Borella, 2007; Favier Dubois, 2013). Por las características que presentan estos depósitos, incluido su rápido sepultamiento, se cree que se trató de un ambiente

de dunas móviles, ahora fijadas (Favier Dubois y Borella, 2007). Estas edades se corresponden con depósitos de la Formación Punta Villarino.

La geomorfología del área de estudio está compuesta por el ambiente litoral, incluido el campo eólico, y la región septentrional del ambiente de mesetas y planicies, esta última representada casi en su totalidad por la Antigua Planicie Aluvial disectada (González Díaz y Malagnino, 1984). Su origen ha sido vinculado a depósitos glaciales, fluviales y aluviales, donde destacan facies distales de abanicos aluviales (Etcheverría *et al.*, 2006).

En el ambiente litoral se destaca una costa de acantilados activos marinos, con alturas de alrededor de 25 m en Bahía Creek, que alterna con costas bajas.

Estas últimas están representadas por una playa que alcanza una extensión de 120 m de ancho en marea baja y por la boca de mareas denominada Caleta de los Loros (Etcheverría *et al.*, 2006). Sobre la margen de la caleta se desarrollan dos espigas, conformadas por depósitos arenosos. También en el sector de costa baja, hacia el continente, existen cordones litorales y un paleocantilado que se encuentran parcialmente cubiertos por dunas activas (Etcheverría *et al.*, 2006).

Las arenas que componen la playa, cuya procedencia ha sido estudiada por Gelós y Spagnuolo (1992), se asemejan granulométricamente a la arena de las dunas, sin embargo, como característica propia del ambiente, tienen un tamaño de grano más grueso y peor selección, mientras que la asimetría varía sin un patrón definido (Toffani, 2018). Este último parámetro puede ser indicativo de una rápida mezcla de arenas de subambientes eólicos, de playa y mareales (Wadhawan, 1996) y/o indicar que las arenas de la playa forman parte del área de aporte para las futuras acumulaciones dentro del ambiente eólico (McLaren, 1981). Además pueden registrarse escasos cambios granulométricos debido a pequeñas variaciones diarias u horarias de las olas o vientos (Bértola *et al.*, 2009). Similar es el caso con los sedimentos disponibles en Caleta de los Loros, otra posible área de aporte para las dunas de Bahía Creek, la cual posee arena ligeramente más fina que las dunas (Toffani, 2018).

### Clima y vegetación dunar

Bahía Creek presenta un clima árido – semiárido, con precipitaciones entre 200 mm y 400 mm anuales, con un promedio de 287 mm entre los años 1992 – 2008, temperaturas medias de 14°C (del Río *et al.*, 2004; Fucks *et al.*, 2011) y evapotranspiración anual de 1050 mm (Bohn *et al.*, 2014).

Desde los 6000 años A.P. se evidenciaron períodos con mayor humedad, asociados al desarrollo de vegetación y fijación de las dunas, y períodos más secos que favorecen los procesos eólicos y la existencia de dunas móviles (Glasser *et al.*, 2004; Carbone *et al.*, 2007; Wanner *et al.*, 2008; Favier Dubois, 2013). Estas alternancias son propias de la formación de campos de dunas transgresivos costeros (Hesp, 2011).

El actual clima permite el desarrollo de especies vegetales adaptadas para sobrevivir a las frecuentes sequías (Marcos y Mancini, 2012). Estos autores,

dentro de las dunas móviles, reconocieron la comunidad psamófila, representada mayormente por *Hyalis argentea* (olivillo) y *Marsippospermum grandiflorum* (junquillo).

Asimismo, Bahía Creek 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 marina y la meseta patagónica durante todo el año e inducen una circulación media hacia el E – NNE en la capa superficial (Saavedra *et al.*, 2011; Pisoni, 2012).

### METODOLOGÍA

Se realizó una recopilación bibliográfica y se obtuvieron fotografías aéreas del año 1986 procedentes del Servicio Geológico Minero Argentino, escala 1:80.000; el modelo de elevación digital (DEM) del satélite *Advanced Land Observation Satellite* (ALOS) e imágenes satelitales *Landsat 8* (sensor OLI) del año 2017, estos últimos de 30 m de resolución espacial. También se utilizaron las imágenes disponibles en *Google Earth*, *Earth Engine* y *Bing Maps*. El DEM fue descargado del sitio oficial de ALOS, mientras que la imagen *Landsat 8* se obtuvo del sitio correspondiente a *United States Geological Survey* (USGS). Esta última fue procesada mediante el *software ENVI 4.7*, utilizando para este trabajo la combinación de bandas 432, correspondiente a color natural.

Luego se realizó una rectificación de la imagen satelital teniendo en cuenta 10 puntos GPS tomados en el campo. Esta a su vez sirvió 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. Vectorizando la posición de los frentes de dunas en las imágenes de los años 1986 y 2017 y calculando su desplazamiento promedio fue posible obtener una tasa de avance de las dunas, expresada en m/año. El desplazamiento promedio se obtuvo midiendo la distancia entre un frente y otro en el sentido de avance de las dunas en ese lugar puntual, tomando puntos cada 85 m en línea recta N – S. Las zonas donde se realizaron estas mediciones fueron elegidas priorizando los sitios donde el error en la superposición de imágenes fue menor, con valores máximos de 20 m.

Además se llevaron a cabo dos viajes de campo, en octubre de 2016 y mayo de 2017, donde se tomaron muestras de arenas y fotografías *in situ*.

Por su parte, para conocer las características generales del viento en Bahía Creek, fueron utilizados los datos tomados en las estaciones meteorológicas de Viedma y San Antonio Oeste (SAO), pertenecientes al Servicio Meteorológico Nacional. En Viedma los registros comenzaron en el año 1967, en SAO en 1988 y en ambos casos se siguen adquiriendo de manera continua hasta la actualidad. Los datos utilizados en el presente trabajo abarcan desde el comienzo de las mediciones hasta agosto del año 2017, momento en el cual se adquirió la información. Los valores correspondientes al umbral de velocidad de fricción en el cual se inicia el transporte de sedimentos eq. (1) y al umbral de velocidad mínimo para que los granos viajen por saltación eq. (2), según el material presente en Bahía Creek, fueron calculados mediante las ecuaciones propuestas por Bagnold (1954):

$$u.t = A * \sqrt{\frac{(\rho_s - \rho_a)}{\rho_a} * g * d}, \quad (1)$$

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  $2650 \text{ kg/m}^3$ ,  $\rho_a$  es la densidad del aire, igual a  $1,23 \text{ kg/m}^3$  y  $A$  es un coeficiente con un valor de 0,1 para tamaños de grano mayores a 0,1 mm.

$$ut(z) = \frac{u.t}{k} * \ln\left(\frac{z}{z_0}\right), \quad (2)$$

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 ( $z_0 = d/30$ ).

Mediante la observación de las imágenes satelitales, fotografías tomadas en el campo y el análisis de los datos de viento disponibles, se confeccionó una clasificación morfológica por sectores con características comunes para las dunas del campo eólico de Bahía Creek, la cual fue volcada en un Sistema de Información Geográfica (GIS), tomando como base las clasificaciones propuestas por McKee (1979), Lancaster (1995), Hesp (2011) y Sanjaume y Gracia (2011). El mapeo se realizó a escala 1:5000, sin incluir aquellas morfologías de menor escala. El área con dunas vegetadas o estabilizadas, donde se apoyan las dunas aquí estudiadas, no fue clasificada con mayor detalle.

Para conocer las características texturales de las arenas de las dunas se extrajeron 22 muestras de puntos cercanos a la playa, nombrados D2 – D8. Los sitios de extracción fueron elegidos según su accesibilidad en campo, cercanos a la ruta provincial N° 1. Por cada muestra se recolectaron manualmente 300 – 500 g de material a no más de 10 cm de profundidad, de los cuales 100 g fueron utilizados para realizar el proceso de tamizado, mediante tamizadora Ro – Tap. Este tuvo una duración de 15 minutos para cada muestra, de acuerdo a los tiempos sugeridos por Metz (1985) y Román Sierra *et al.* (2013). Se utilizaron todos los tamices disponibles en el Instituto de Investigación en Paleobiología y Geología (IIPG) dentro del tamaño de grano psamítico en la escala de Udden – Wentworth, tratando de incluir la mayor cantidad de tamices con valores de raíz cuarta de dos sugeridos por Scasso y Limarino (1997) para material eólico. De esta manera se consiguió un total de 9 tamices con aberturas de entre  $1000 \mu\text{m}$  y  $62 \mu\text{m}$ . Para conocer cuánto material corresponde al total ingresado inicialmente a la tamizadora y a cada una de las fracciones retenidas en los sucesivos tamices, se pesó cada una de estas fracciones en una balanza de precisión de  $\pm 0,001 \text{ g}$ . Con estos datos fue posible obtener la mediana y moda a través del método gráfico y media y selección a través del método de los momentos y según la clasificación de Folk y Ward (1957). Para obtener estos valores se tiene en cuenta la distribución normal de las muestras.

Sobre las imágenes de *Google Earth* se midió el rumbo de crestas de dunas. Estas se plotearon a través de *Rosnet*. Con el DEM, imágenes satelitales y datos GPS de campo también se calcularon dimensiones de las dunas.

Para obtener una magnitud del avance de las dunas en el área de estudio, se utilizó el índice de movilidad de dunas ( $M$ ) propuesto por Lancaster (1988), eq. (3):

$$M = W / \left(\frac{P}{PE}\right), \quad (3)$$

donde  $W$  corresponde al porcentaje de vientos mayores al umbral de velocidad de fricción,  $P$  a la precipitación anual y  $PE$  a la evapotranspiración potencial. Cuando  $M$  es menor a 50 se trata de dunas inactivas, cuando  $M$  está entre 50 y 100 están activas las partes de la cresta, cuando  $M$  está entre 100 y 200 se trata de dunas activas salvo en la interduna y

cuando  $M$  es mayor a 200 son dunas completamente activas.

A su vez, para conocer la intensidad regional del viento, con la totalidad de los datos de viento de la estación de SAO, se calculó el potencial anual de deriva de arena (DP) (según Eq. 4) a través del modelo de Fryberger (1979):

$$Q \propto V^2 (V - V_t) * t, \quad (4)$$

donde  $Q$  es la cantidad de sedimento transportado en un tiempo  $t$ ,  $V$  es la velocidad media del viento durante el tiempo  $t$ ,  $V_t$  es la velocidad mínima para que la arena viaje por saltación y  $t$  es el tiempo que sopló el viento, expresado como porcentaje. Para trabajar este modelo la unidad utilizada fue nudos y se proporcionaron datos para 16 clases, correspondientes a direcciones geográficas (cada 22,5°). Los valores de DP representan ambientes de baja energía (<200), media energía (200 – 400) o alta energía (>400) en cuanto al viento.

Una vez calculado el DP, se procedió al cálculo de la dirección de deriva resultante (RDD) (según Eq. 7) y del potencial de deriva resultante (RDP) (según Eq. 8) a través de las siguientes operaciones:

$$C = \sum(DP) \sin \theta, \quad (5)$$

$$D = \sum(DP) \cos \theta, \quad (6)$$

donde  $\theta$  representa el punto medio de las clases de orientación. Luego,

$$RDD = \text{Arctan} \left( \frac{C}{D} \right), \quad (7)$$

$$RDP = \sqrt{C^2 + D^2} \quad (8)$$

Finalmente se calculó la variabilidad direccional del viento mediante la relación RDP/DP. Esta relación puede variar entre 0 y 1. Menor a 0,3 significa que la variabilidad direccional del viento es alta y la probable dirección es compleja o bimodal obtusa, entre 0,3 y 0,8 significa que la variabilidad direccional del viento es intermedia y la probable dirección es bimodal obtusa o aguda obtusa y mayor a 0,8 significa que la variabilidad direccional del viento es baja y la probable dirección es cercana a unimodal (Al – Awadhi *et al.*, 2005).

## RESULTADOS

### Vientos y dinámica dunar

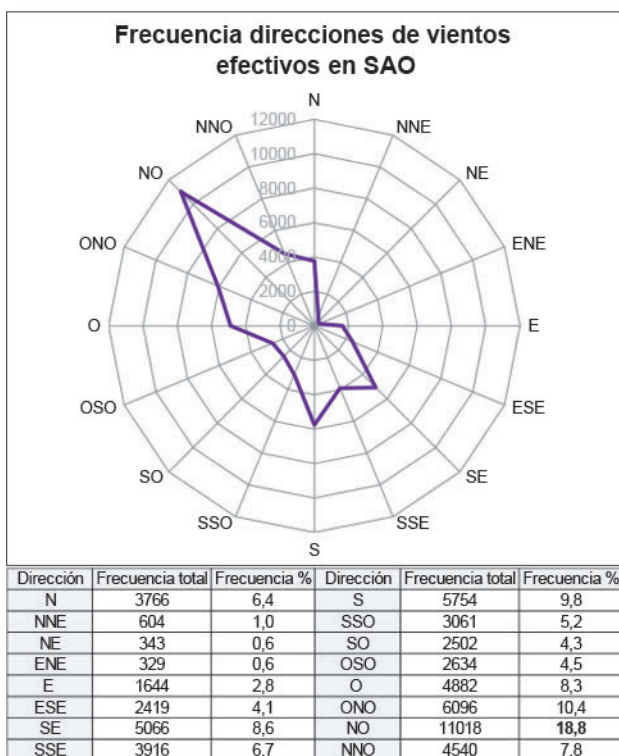
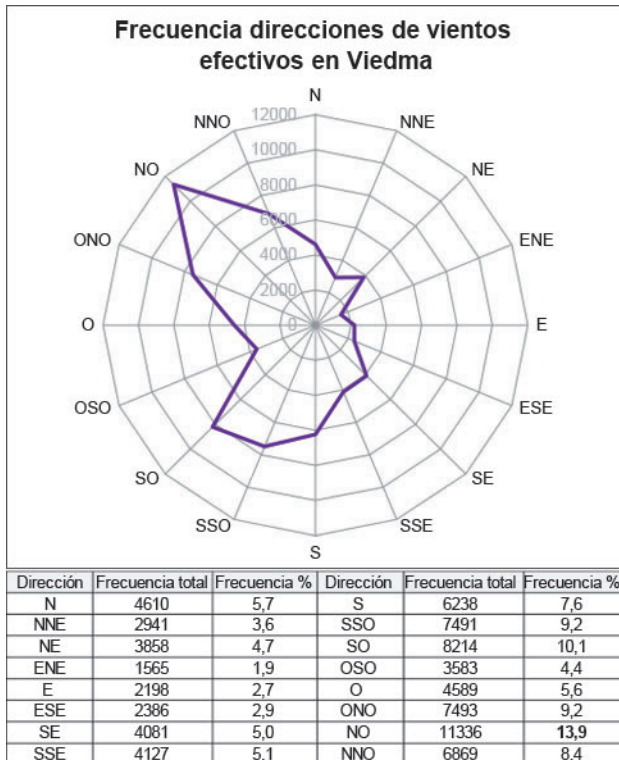
El viento capaz de movilizar los sedimentos (viento efectivo) en el área de estudio, teniendo en cuenta el promedio de tamaño de grano de 0,25 mm (Toffani, 2018), es el que supera los 6,7 m/s. Fue registrado en un 34% del total de las mediciones dentro de las estaciones de Viedma y SAO. En Viedma (Fig. 2) las direcciones principales de viento efectivo son NO (13,9%), y SO (10,1%), mientras que en SAO (Fig. 2) predomina también la dirección NO (18,8%), seguida de la ONO (10,4%). Teniendo en cuenta la diferencia de frecuencias entre una dirección y su opuesta, se puede deducir el transporte de los sedimentos. En Viedma entre SO y NO se registran 43,2% de los vientos efectivos, y entre las direcciones NE y SE 17,3% de vientos efectivos, mientras que en SAO el 46,3% de vientos efectivos proviene entre el SO y NO y el 16,7% de estos vientos es del NE al SE. Estos valores sugieren que el desplazamiento neto de las dunas se produce de NO – SO a SE – NE.

En lo que respecta a la mayor cantidad de vientos efectivos según el momento del día y los distintos meses (Tabla 1), suele ser más intenso a partir de las 10 hs y hasta las 18 hs, mientras que también lo es en los meses de verano. En esta época los vientos efectivos representan el 43% en diciembre y enero, y el 40% en febrero. Estos valores cambian notoriamente en los meses de otoño – invierno, alcanzando el mínimo de 25% en el mes de mayo. En combinación de las dos variables se tiene que los máximos valores están en la franja horaria de las 15 hs y 18 hs en los meses de noviembre, diciembre, enero y febrero, donde superan el 60%, y los valores mínimos aparecen entre las 19 hs y 20 hs en el mes de mayo y entre las 4 hs y 6 hs de los meses abril – junio y agosto – octubre, alcanzando un piso de 13%.

Posteriormente, aplicando el índice de movilidad (eq. 3), se obtuvo que las dunas, en promedio, corresponden a activas salvo en la interduna, siendo  $M$  igual a 124. Asimismo, son completamente activas cada vez que el porcentaje de vientos efectivos supera el 55%, mientras que se comportan como dunas inactivas cuando el porcentaje de vientos efectivos es menor o igual a 13% (Tabla 1). Sin embargo este último valor se registra únicamente para las 5 hs en el mes de octubre.

El valor de DP obtenido fue de 1090, mientras





**Figura 2.** Frecuencias de las direcciones desde donde soplan los vientos efectivos (con una velocidad mayor a 6,7 m/s o 24 km/h) calculadas a partir de los registros de las estaciones meteorológicas del Servicio Meteorológico Nacional en Viedma y San Antonio Oeste (SAO), entre los años 1967 y 2017 y 1988 y 2017, respectivamente. La frecuencia porcentual en ambos casos es igual al 100%, mientras que en Viedma la frecuencia total es 81579 y en SAO 58574. Modificado de Toffani *et al.* (en prensa).

**Figure 2.** Frequencies of the directions from which the effective winds (with a speed greater than 6,7 m/s or 24 km/h) blow, calculated from the records from the meteorological stations of the *Servicio Meteorológico Nacional* in Viedma and San Antonio Oeste (SAO), between the years 1967 – 2017 and 1988 – 2017, respectively. The percentage frequency in both cases is equal to 100%, while in Viedma the total frequency is 81579 and in SAO 58574. Modified from Toffani *et al.* (in press).

interpretada previamente a partir de los datos de viento y estimada visualmente a través de las imágenes satelitales. La variabilidad direccional del régimen de vientos, caracterizada por la relación RDP/DP, muestra el valor de 0,36. Los valores obtenidos sugieren que Bahía Creek se ubica dentro de un ambiente de alta energía, con un régimen de viento entre complejo y bimodal.

La tasa anual de avance para las dunas estudiadas (Fig. 4), las cuales se ubican dentro de los sectores *campo 2*, *campo 5* y *campo 7* (Fig. 5), fue de  $6,02 \pm 0,3$  m/año entre los años 1986 – 2017, con todas las mediciones entre 3 m/año y 10 m/año y sentido hacia el NE – SE.

### Geomorfología dunar

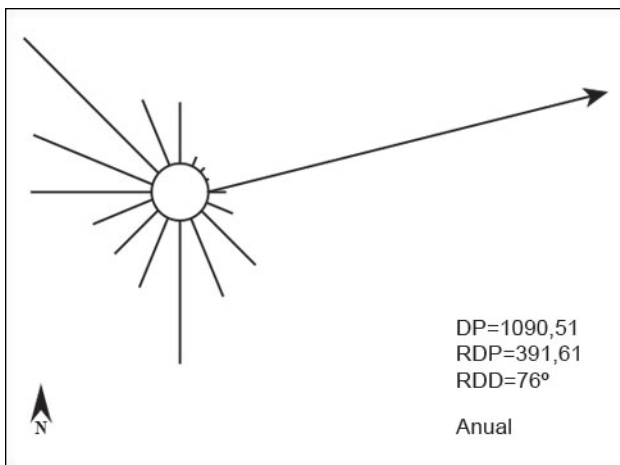
En el área de estudio hay dos grupos principales de dunas: activas e inactivas. Las dunas activas, parten desde la caleta y la playa sin acantilado, aprovechando el material allí disponible y cubren parcialmente las dunas inactivas. Se comportan como dunas transgresivas hacia el continente y se disponen en forma de cuña desde la costa hacia el ENE. Se desarrollan desde Caleta de los Loros y la playa adyacente hasta 25 – 35 km dentro del continente y se caracterizan por un suave relieve que va en ascenso desde los 0 msnm en la costa y la caleta hasta los 60 – 90 msnm. Las dunas vegetadas presentan una notable constancia en el rumbo de sus ejes mayores, también se ubican desde la costa hacia el ENE y ocupan un área más extensa que las

que el RDP arrojó un valor de 392 y la dirección de RDD anual tomó el valor de  $76^\circ$  (Fig. 3). Este último parámetro indica un desplazamiento de los sedimentos hacia el ENE, de acuerdo con la dirección general de migración del campo de dunas,

Mes/hora	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19	20	21	22	23	Promedio
Enero	36	30	30	24	24	23	21	30	43	45	43	46	48	54	58	63	67	66	64	62	54	39	36	37	43
Febrero	37	29	25	25	22	21	22	23	27	39	47	48	49	53	57	62	63	63	60	54	43	32	31	36	40
Marzo	27	26	21	21	20	19	20	19	19	32	43	45	45	48	49	53	54	53	51	41	25	22	24	23	33
Abril	17	16	17	17	18	18	17	18	18	23	33	42	43	45	48	48	52	47	40	22	17	18	16	17	28
Mayo	18	19	17	18	16	22	19	17	17	19	25	36	40	43	42	43	43	38	24	16	15	17	16	19	25
Junio	20	19	20	19	21	19	20	19	22	22	25	35	41	44	47	46	45	35	21	20	19	19	20	21	27
Julio	22	24	26	27	25	21	22	21	23	24	26	36	44	46	48	48	47	42	26	18	19	20	22	22	29
Agosto	21	21	21	21	19	19	17	18	21	21	33	40	46	48	49	49	49	47	35	22	19	18	19	18	29
Septiembre	18	18	14	17	19	20	18	16	24	28	38	43	45	43	43	47	45	44	40	26	18	19	17	18	28
Octubre	23	21	19	16	16	13	16	17	26	37	42	44	46	48	50	56	59	57	53	43	28	21	22	23	33
Noviembre	31	28	26	21	21	18	19	22	32	42	44	45	48	52	56	61	64	63	62	55	41	32	29	30	39
Diciembre	34	35	30	26	25	23	22	26	38	46	43	45	51	55	61	65	65	66	62	56	49	39	31	34	43
Promedio	25	24	22	21	20	20	19	21	26	32	37	42	45	48	51	53	54	52	45	36	29	25	24	25	34

**Tabla 1.** Frecuencia porcentual de vientos efectivos por mes y por hora obtenida de los datos de la estación meteorológica del Servicio Meteorológico Nacional ubicada en San Antonio Oeste entre los años 1988 y 2017.

**Table 1.** Effective wind percentage frequency per month and hour obtained from the data of the *Servicio Meteorológico Nacional* weather station located in San Antonio Oeste between 1988 and 2017.



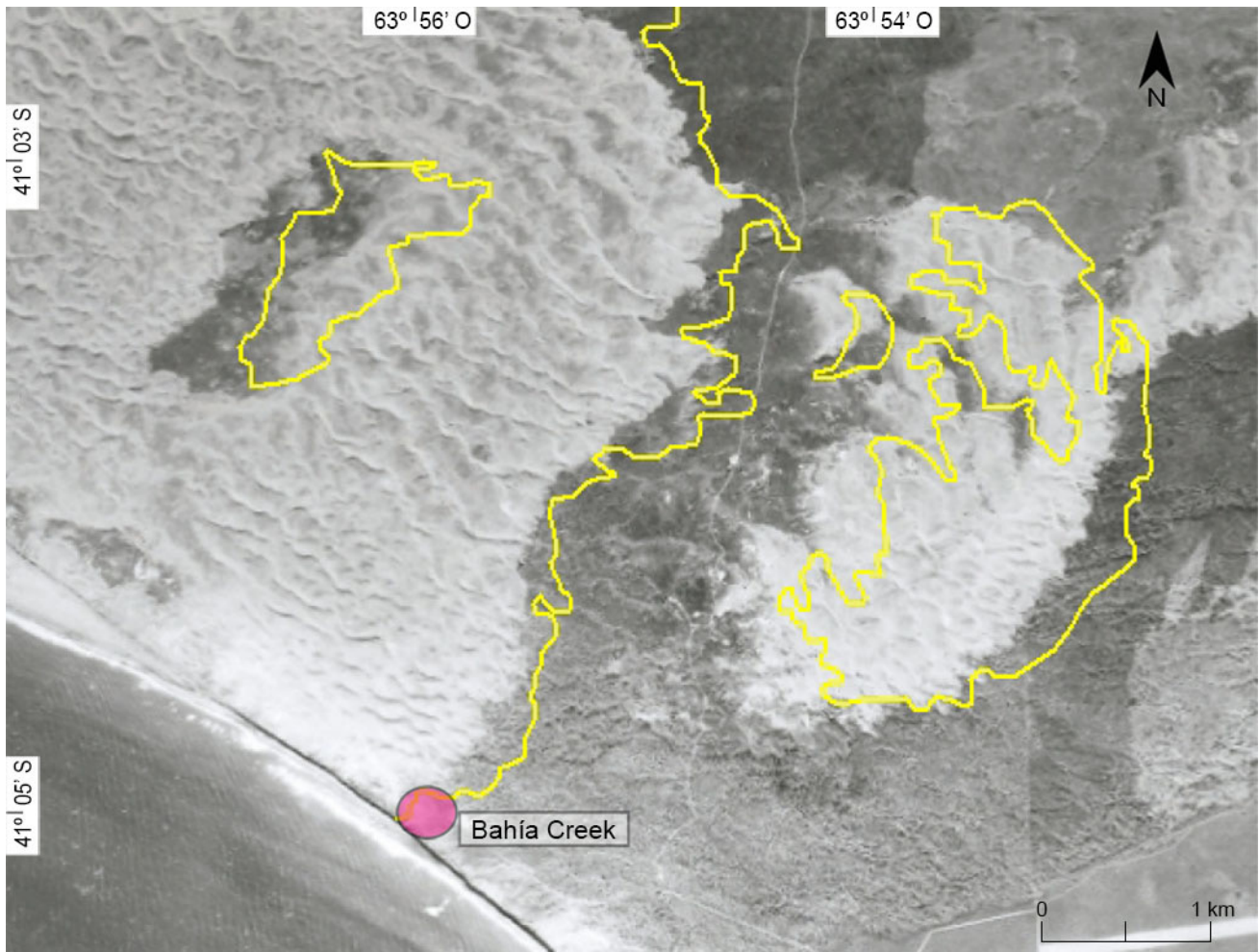
**Figura 3.** Diagrama de rosas del potencial anual de deriva de arena (DP) en 16 sectores según las direcciones del viento, junto al vector de potencial de deriva resultante (RDP) alineado en la dirección de deriva resultante (RDD). Valores obtenidos a partir del análisis vectorial de los datos de viento de la estación de San Antonio Oeste, según el modelo de Fryberger (1979).

**Figure 3.** Rose diagram of annual drift potential (DP) in 16 wind direction sectors, the resultant drift potential vector (RDP) aligned in the resultant drift direction (RDD). Values obtained from the vector analysis of the wind data of the San Antonio Oeste station, according to the Fryberger model (1979).

formas móviles, extendiéndose hasta 35 km dentro del continente. El campo de dunas se ubica sobre un área de 456 km<sup>2</sup> y las dunas móviles cubren 168 km<sup>2</sup>, un 36%.

Las geoformas principales son dunas lineales, crestas barjanoides y transversales y barjanes, estas tres últimas clasificadas también en su conjunto como *crescentic* o semilunares vistas a través de fotografías aéreas o imágenes satelitales según Breed y Grow (1979). También hay dunas parabólicas, en estrella, primarias o embrionarias, colgadas y remontantes, estas dos últimas en relación al acantilado y paleoacantilado respectivamente. Además, principalmente en zonas de interduna, esparcidas a lo largo de todo el campo de dunas, hay nebkas, asociadas en su mayoría al crecimiento de especies vegetales como junquillo y olivillo. Las direcciones de viento pueden llegar a cambiar localmente y dar lugar al desarrollo de algunos tipos de dunas menos frecuentes, como las reversas. A su vez, todas las geoformas mencionadas, generalmente están rodeadas por mantos de arena.

Las dunas pueden llegar a alcanzar una altura relativa máxima de 16 m y están conformadas por



**Figura 4.** Migración de las dunas en cercanías a la localidad de Bahía Creek entre los años 1986 y 2017. Las dunas que abarca este sector corresponden a los campos 2, 5 y 7. La imagen de fondo es la correspondiente al año 1986 (SEGEMAR), mientras que las líneas amarillas representan la ubicación de las dunas en el año 2017.

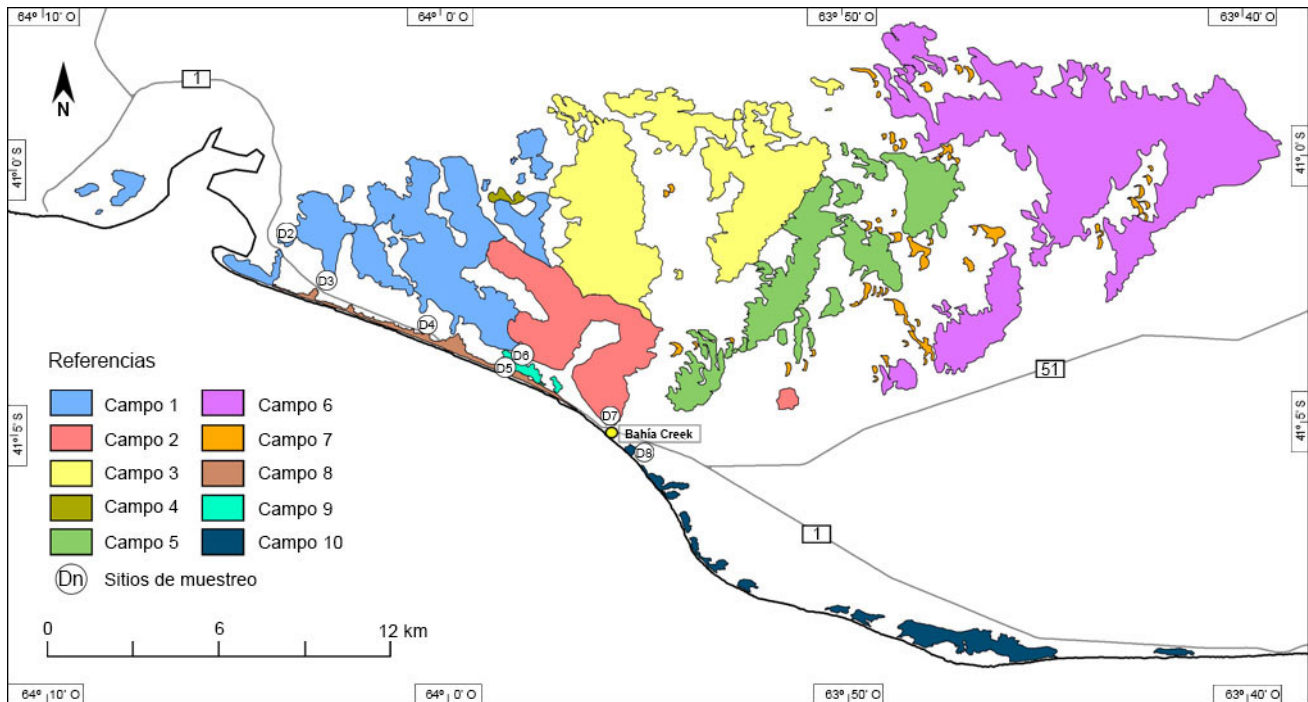
**Figure 4.** Dune migration near Bahía Creek town between the years 1986 and 2017. The dunes covering this sector correspond to the fields 2, 5 and 7. The background image corresponds to the year 1986 (SEGEMAR), while the yellow lines represent the location of the dunes in 2017.

arenas medianas a finas, generalmente muy bien seleccionadas, a excepción de algunas bien seleccionadas. Los tamaños de grano presentan una media de entre  $1,81 \phi$  y  $2,36 \phi$ , una mediana de  $1,85 - 2,4 \phi$  y moda de  $2 \phi$  y  $2,5 \phi$ , mientras que los valores de selección se encuentran entre 0,32 y 0,58 (Tabla 2).

A continuación, en la clasificación por sectores (Fig. 5), se describirá con mayor detalle las dunas activas del campo eólico de Bahía Creek y sus características particulares.

*Campo 1:* se ubica en el sector occidental del área de estudio (Fig. 5), cubriendo una superficie de  $28,7 \text{ km}^2$ , siendo el más próximo a Caleta de los Loros. Es la unidad más heterogénea, posee mayormente dunas compuestas, así como también complejas y

simples. Como formas principales predominan en toda el área las dunas semilunares (Fig. 6a). Dentro de estas, se pueden diferenciar principalmente cordones de dunas transversales y barjanoides, con las crestas orientadas SE – NO a N – S, con un promedio de  $169^\circ$  (Fig. 7), inclinando hacia el E – NE. Además, sobre sus caras de barlovento, presentan superpuestas otras formas semilunares de manera generalmente perpendicular. Esta podría ser solo temporal, dependiendo de los vientos. Por otro lado, hay zonas donde parece verse reflejado más aún el régimen de viento de múltiples direcciones, donde no se logró establecer una clara dirección de avance para las dunas, teniendo características de dunas reversas o estrella.



**Figura 5.** Mapa de los distintos sectores de dunas registrados en el campo de dunas de Bahía Creek. Los círculos con inscripciones representan los lugares donde se obtuvieron muestras en el campo. Modificado de Toffani (2018).

**Figure 5.** Map of the different dune sectors registered in the dunefield of Bahía Creek. Circles with inscriptions represent the places where samples were collected in the field. Modified from Toffani (2018).

Poseen escasas zonas de interduna, generalmente seca, aunque también existen las húmedas. Estas áreas generalmente no poseen vegetación, sin embargo, donde se encuentra es abundante. En el campo se han reconocido nebkas que pueden superar el metro de alto, formados con olivillos y junquillos.

En el punto D2 (Fig. 5) los valores de pendiente obtenidos para la cara de barlovento fueron de 11° y 17°, mientras que para la cara de sotaventos las inclinaciones respectivas fueron 34° y 37°. Además el material resultó ser arena fina, muy bien seleccionada (Tabla 2). La altura medida en esta duna fue de 6 m, mientras que en el resto de la zona los valores que se registraron pueden llegar a los 10 – 12 m.

Donde fue posible medir las dimensiones de las dunas las longitudes de onda varían entre los 30 m y los 200 m, el ancho es de entre 100 m y 200 m y el largo oscila entre los 40 m y 150 m.

*Campo 2:* ocupa un área de 15,7 km<sup>2</sup> y se ubica en un sector cercano al centro del área de estudio (Fig. 5), con la particularidad de ser las dunas que se encuentran más próximas a la localidad de Bahía Creek, comenzando a toparse en su parte más distal

con algunas viviendas. Se clasifican como dunas lineales complejas de cresta sinuosa (Fig. 6b). En ocasiones también hay simples de cresta sinuosa o compuestas, que constan de más de una cresta, con uniones “y” frecuentes en diagonal entre las crestas. Tienen un rumbo promedio de 130° (NO – SE; Fig. 7), siendo las crestas paralelas a subparalelas, y su cara de deslizamiento inclina hacia el SO. Poseen longitudes de onda de 100 – 200 m. Su ancho oscila entre 30 m y 70 m y su largo va desde el centenar de metros hasta los 600 m. A su vez, presentan formas barjanoides de menor tamaño superpuestas en sus flancos o crestas, con sus crestas orientadas principalmente O – E, mostrando un ligero desplazamiento hacia el S sobre esos flancos. En algunos casos, estas adquieren un desarrollo que prácticamente alcanza a predominar por sobre la duna lineal. En ciertas ocasiones también se desarrollan dunas reversas u oblicuas.

En general poseen zonas de interduna seca, donde se desarrollan mantos de arena y en ocasiones se encuentran vegetadas, principalmente en algunos corredores paralelos a las dunas lineales, donde pueden aparecer nebkas.

Muestra	Media	Mediana	Moda	Selección		Clasificación
D2A	2,22	2,3	2,5	0,41	MBS	AF
D2B	2,23	2,35	2,5	0,39	MBS	AF
D2C	2,36	2,4	2,5	0,32	EBS	AF
D2D	2,26	2,35	2,5	0,44	MBS	AF
D3A	2,27	2,35	2,5	0,4	MBS	AF
D3B	2	2,15	2	0,42	MBS	AF
D3C	2,24	2,3	2,5	0,4	MBS	AF
D3D	1,91	2,05	2	0,53	BS	AM
D4A	1,95	2,1	2	0,44	MBS	AM
D4B	1,95	2,1	2	0,44	MBS	AM
D4C	1,94	2	2	0,45	MBS	AM
D5A	1,81	1,85	2	0,43	MBS	AM
D5B	1,96	2	2	0,48	MBS	AM
D5C	2,08	2,2	2,5	0,49	MBS	AF
D6A	2,18	2,3	2,5	0,52	BS	AF
D6B	1,89	1,9	2	0,46	MBS	AM
D6C	2,1	2,2	2,5	0,52	BS	AF
D6D	2,03	2,1	2	0,58	BS	AF
D7A	2,01	2,1	2	0,5	MBS	AF
D7B	1,85	1,9	2	0,48	MBS	AM
D7C	1,98	2,05	2	0,51	BS	AM
D8A	1,95	2	2	0,51	BS	AM

**Tabla 2.** Datos granulométricos de las muestras, expresados en *phi*. Referencias: BS: bien seleccionada, MBS: muy bien seleccionada, EBS: extremadamente bien seleccionada; AF: arena fina, AM: arena mediana.

**Table 2.** Granulometric data from samples, expressed in *phi*. References: BS: well sorted, MBS: very well sorted, EBS: extremely well sorted; AF: fine-grained sand, AM: medium-grained sand.

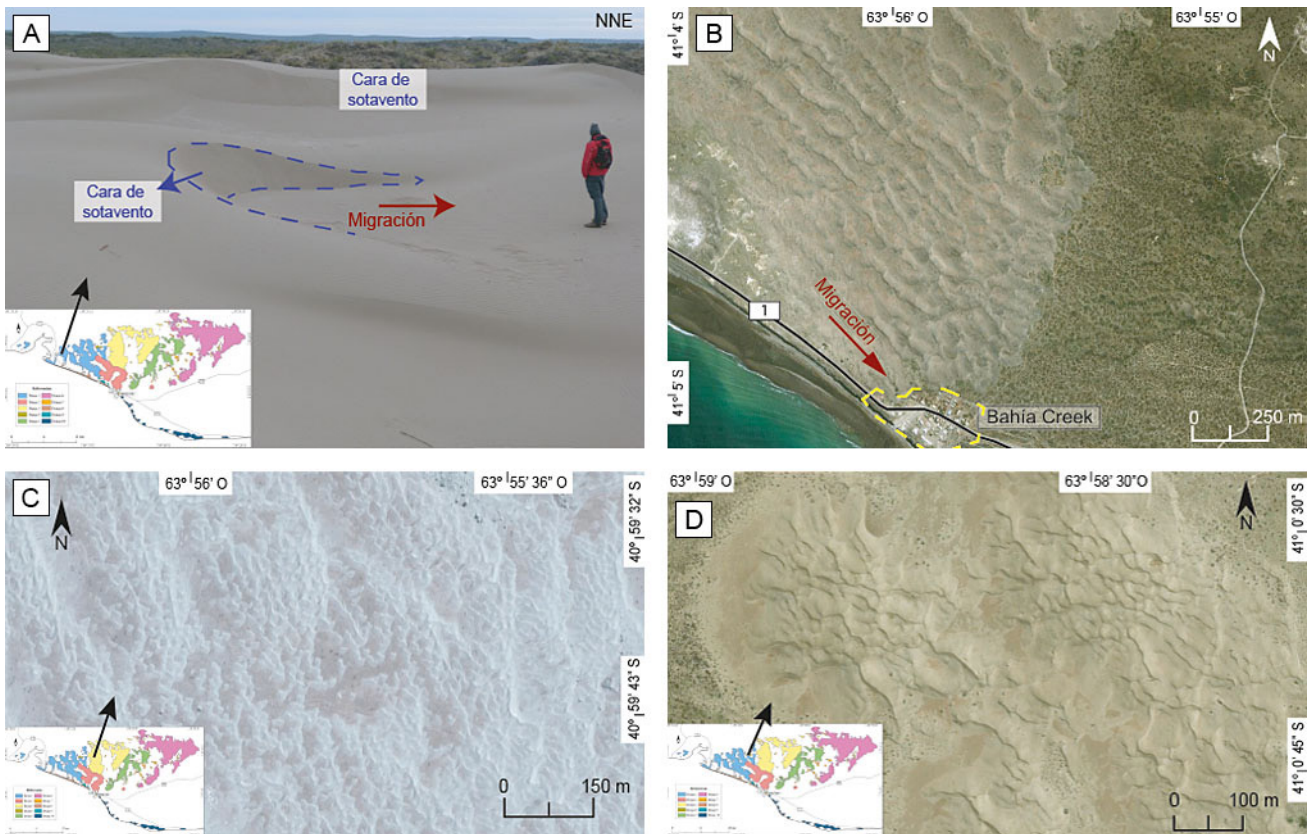
Una duna estudiada (Fig. 5; D7), está compuesta por arena mediana – fina, muy bien – bien seleccionada (Tabla 2). La misma registra una altura relativa de 6 m, mientras que el resto oscila dentro de esos valores, alcanzando un máximo de 14 m.

*Campo 3:* está ubicado aproximadamente en el centro del sector mapeado, al N del anterior y al E del primero (Fig. 5). Abarca un área de 36,5 km<sup>2</sup>. Junto con el sector 1 es uno de los más heterogéneos.

Es la porción del área de estudio que cuenta con mayor cantidad de barjanas, que suelen poseer un espacio interdunal de 10 m (Fig. 6c). Sus crestas se orientan preferentemente con un rumbo NO – SE y

O – E, registrando un avance medio hacia el NNE. A su vez estos barjanas pueden unirse, formando crestas barjanoides, orientadas mayormente NE – SO. Ambos tipos de dunas, en ocasiones, también forman parte de las caras de barlovento de otros cordones de dunas transversales, derivando en dunas compuestas.

Además se observaron dunas oblicuas con sus crestas orientadas con rumbos de 90° y 180°, que en su conjunto migran hacia el E, dunas reversas con orientación de sus crestas O – E, e inclusive en ocasiones pueden encontrarse en transición hacia dunas estrella.



**Figura 6.** Imágenes representativas de las dunas de los campos 1 – 4. **a)** fotografía de campo tomada en el año 2017 dentro del campo de dunas 1; al frente se aprecia un barján con desplazamiento aprox. hacia el E, mientras que al fondo hay una cresta barjanoides con desplazamiento aprox. hacia el S. **b)** imagen satelital tomada de *Bing Maps* que muestra las dunas lineales y de cresta reversibles correspondientes al campo 2, con dirección general de migración hacia el SE aprox., es decir donde se encuentra la localidad balnearia de Bahía Creek. **c)** imagen satelital del año 2014 tomada de *Google Earth*; representa el campo de dunas 3, donde se puede apreciar barjanes y crestas barjanoides. **d)** imagen satelital tomada de *Bing Maps* correspondiente al campo de dunas 4, caracterizado por dunas estrella.

**Figure 6.** Representative images of the dunes of fields 1 - 4. **a)** field photography taken in 2017 within the dune field 1; in the front there is a barchan with displacement approx. towards E, while at the bottom there is a barchanoid crest with displacement approx. towards S. **b)** satellite image taken from *Bing Maps* that shows linear and reversible ridge dunes, corresponding to field 2, with a general direction of migration approx. towards SE, where the seaside town of Bahía Creek is located. **c)** satellite image of the year 2014 taken from *Google Earth*; it represents the field of dunes 3, where it can be seen barchans and barchanoid ridges. **d)** satellite image taken from *Bing Maps* corresponding to the dune field 4, characterized by star dunes.

Asimismo, en general poseen interdunas en su mayoría secas y con escasa a abundante vegetación, donde se desarrollan nebkas. Cuando la vegetación es escasa se desarrollan mantos de arena. Las dunas pueden alcanzar una altura relativa de 12 m, siendo más común encontrar valores de 6 – 7 m como los mayores y que estos tamaños se desarrollen en los cordones transversales, mientras que los barjanes son más pequeños.

*Campo 4:* comprende un pequeño sector de 0,4 km<sup>2</sup> ubicado entre el campo 1, hacia el NO del campo eólico (Fig. 5). En estas dunas las caras de

deslizamiento se disponen en variadas direcciones y se clasifican como dunas estrellas, tanto compuestas como complejas. Las compuestas se caracterizan por grandes brazos primarios y pequeños brazos subsidiarios (dispuestos con distintos rumbos, NO – SE, SO – NE y NNO – SSE), ambos con caras de deslizamiento que no se proyectan lejos de la masa principal de la duna, mientras que las complejas poseen una combinación con barjanes o crestas barjanoides (Fig. 6d).

Alcanzan una altura relativa de 13 m, su diámetro ronda los 300 m, no presentan zonas de interduna y

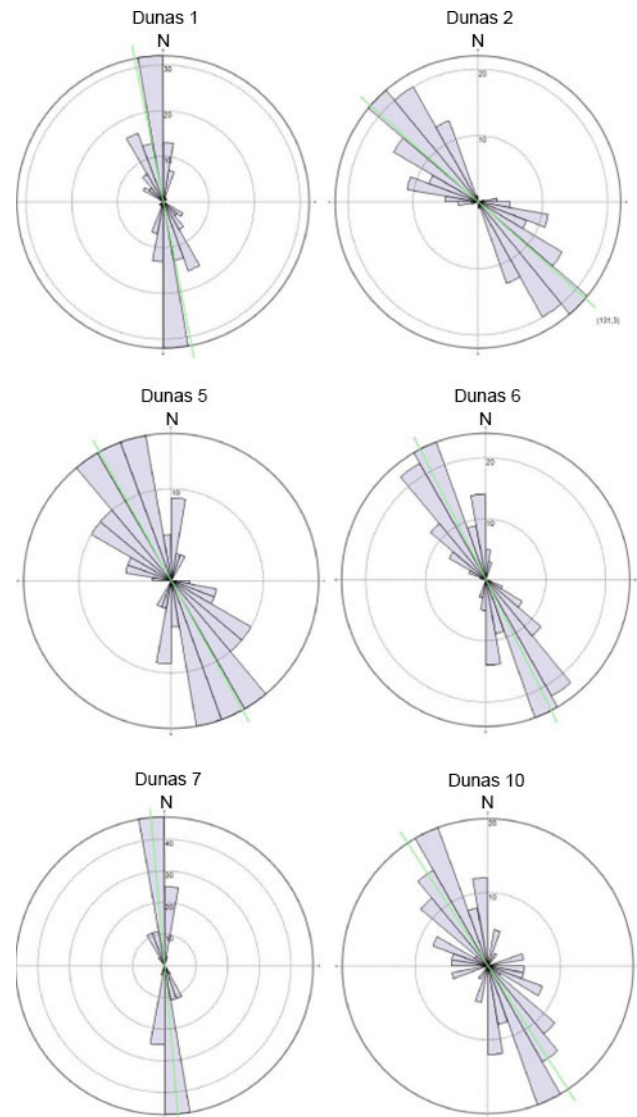
el crecimiento de vegetación es sumamente escaso.

*Campo 5:* se encuentra más al E que los anteriores, aproximadamente entre los campos 2, 3 y 6 (Fig. 5), extendiéndose sobre un área de 20,4 km<sup>2</sup>. Comprende los tipos de dunas barjanes, crestas barjanoides y cordones transversales, con sus crestas orientadas preferentemente SO – NE y N – S, con un rumbo promedio de 151° (Fig. 7). Con direcciones similares sobre las caras de barlovento o en sectores de interduna, se desarrollan otras dunas de este mismo tipo, principalmente barjanes, haciendo que sean dunas compuestas (Fig. 8a). En lugares puntuales aparecen acumulaciones lineales, también sobre las caras de barlovento de las formas principales, con las crestas orientadas O – E, dándole a las dunas el carácter de complejas.

Poseen interdunas secas y con moderada vegetación, la cual se encuentra mayormente en los bordes del conjunto de dunas activas. Algunos de los sitios con mayor vegetación, dentro de los que predominan los nebkas, se desarrollan en este sector.

Dentro de las geoformas principales se encuentran desde barjanes de 10 m de largo y 10 m de ancho hasta crestas barjanoides o transversales con longitudes de onda entre 100 m y 300 m. En estas dos últimas, el ancho presenta valores similares a las longitudes de onda, mientras que el largo varía entre 100 – 400 m. La altura relativa puede alcanzar los 12 m, siendo mayormente entre 4 m y 7 m.

*Campo 6:* se encuentra en el sector nororiental dentro del área de estudio (Fig. 5), cubriendo una superficie de 54,1 km<sup>2</sup>. Es la mayor de las zonas diferenciadas. Hacia el centro y el norte de donde se asienta se registra un bajo, que alcanza los 40 m de desnivel y no parece tener grandes implicancias en el desarrollo de las dunas. Se trata esencialmente de dunas semilunares complejas, habiendo tanto crestas transversales como barjanoides (Fig. 8b). La orientación de sus crestas es N – S y NO – SE, con un rumbo medio de 153° (Fig. 7), mientras que las caras de sotavento inclinan hacia el E – NE. Son complejas porque en las caras de barlovento desarrollan otros tipos de dunas, lineales y estrella (Fig. 8b); las primeras con sus crestas de forma perpendicular a las dunas sobre las que se apoyan. En algunos lugares puntuales, particularmente al NO de este sector, se encuentran las dunas de mayor tamaño de este campo eólico, las cuales alcanzan una altura relativa de hasta 16 m. Se observa que las dunas reducen su tamaño hacia el E. Sus longitudes de onda varían



**Figura 7.** Gráficos de rosas que muestran la orientación de las crestas de dunas medidas dentro de los campos 1, 2, 5, 6, 7 y 10.  
**Figure 7.** Rose graphs showing the orientation of the dune ridges measured within the fields 1, 2, 5, 6, 7 and 10.

entre los 100 m y los 350 m, salvo en las menores acumulaciones al E, donde termina el campo de dunas. Las dimensiones oscilan mayormente entre 50 m y 300 m de largo y 100 m y 500 m de ancho.

Poseen escasas zonas de interduna, salvo en una porción central que son moderadas – abundantes. En ocasiones son húmedas, que junto con las secas, representan en términos generales áreas de moderada vegetación, donde también se desarrollan nebkas, además de mantos de arena.

*Campo 7:* se trata de dunas parabólicas, habiendo principalmente simples y en menor medida

compuestas. Poseen distintos desarrollos, desde las que tienen brazos incipientes y escasa a moderada vegetación a las que tienen brazos muy desarrollados y abundante vegetación (Fig. 8c). También, al igual que a las dunas parabólicas de la región Pampeana Oriental descritas por Contreras *et al.* (2018), se las puede dividir en simétricas, asimétricas y con coalescencia lateral (Fig. 8c). Su tipo no determina una ubicación dentro del campo de dunas. Las más abundantes son asimétricas (28), seguido por las simétricas (22; Fig. 8d) y las más escasas son con coalescencia lateral (14).

Estas dunas se ubican en forma irregular por el campo eólico, distinguiéndose una mayor densidad hacia el este (Fig. 5). Abarcan una superficie total de 3,46 km<sup>2</sup>. Avanzan hacia el E – ENE, con un promedio de rumbo de sus crestas de 175° (Fig. 7). Propio de sus características son las que poseen mayor cantidad de vegetación. En general alcanzan alturas relativas cercanas a los 10 m, mientras que su largo y ancho máximo es de 1 km y 600 m, respectivamente. Las menores tienen dimensiones de 45 m de largo y 100 m de ancho.

También hay crestas transversales y barjanoides que van adquiriendo transicionalmente las características de dunas parabólicas (Fig. 8c). Esto está de acuerdo con médanos parabólicos con coalescencia lateral estudiados por Contreras *et al.* (2018) y con estudios realizados por Tsoar y Blumberg (2002) y Hesp (2011).

*Campo 8:* a lo largo de 10 km de playa, donde la costa es baja y no presenta acantilados (Fig. 5), se desarrolla un sistema de cordones dunares compuesto por dunas embrionarias, equivalentes a las dunas incipientes descritas por López *et al.* (2016) en sectores costeros de la provincia de Buenos Aires. Teniendo en cuenta una clasificación genético – evolutiva, se trata de dunas primarias móviles, siendo las únicas reconocidas en el presente trabajo, ya que el resto de los sectores estudiados se compone por dunas transgresivas. Se identifican como las primeras acumulaciones de arena desde la playa y paralelas a la línea de costa y su génesis se vincula con la presencia de vegetación (Hesp, 2011; López *et al.*, 2016). Las dunas embrionarias comprenden una faja de escasos 50 – 100 m en dirección hacia el continente (Fig. 9a) y pueden alcanzar una altura relativa de 2 m, encontrándose parcialmente cubiertas por vegetación. Con mayor acumulación de material, en algunos sectores a continuación de los anteriores,

aparecen crestas barjanoides o transversales, las cuales pueden llegar hasta los 500 m o 600 m de extensión hacia el continente (Fig. 9b) y alcanzar mayores tamaños que las dunas embrionarias, con alturas de 4 – 6 m y menor vegetación.

Las dunas primarias móviles avanzan hacia el continente en dirección general NE, de manera perpendicular a la playa. En el caso de las dunas embrionarias siempre es así, más allá de poseer una configuración irregular dada principalmente por la vegetación a la que están asociadas. Las crestas barjanoides o transversales, se disponen en otras direcciones además de perpendicular a la playa, encontrándose sus crestas entre los 128° y 223°. De todas formas, en líneas generales avanzan hacia el NE – SE.

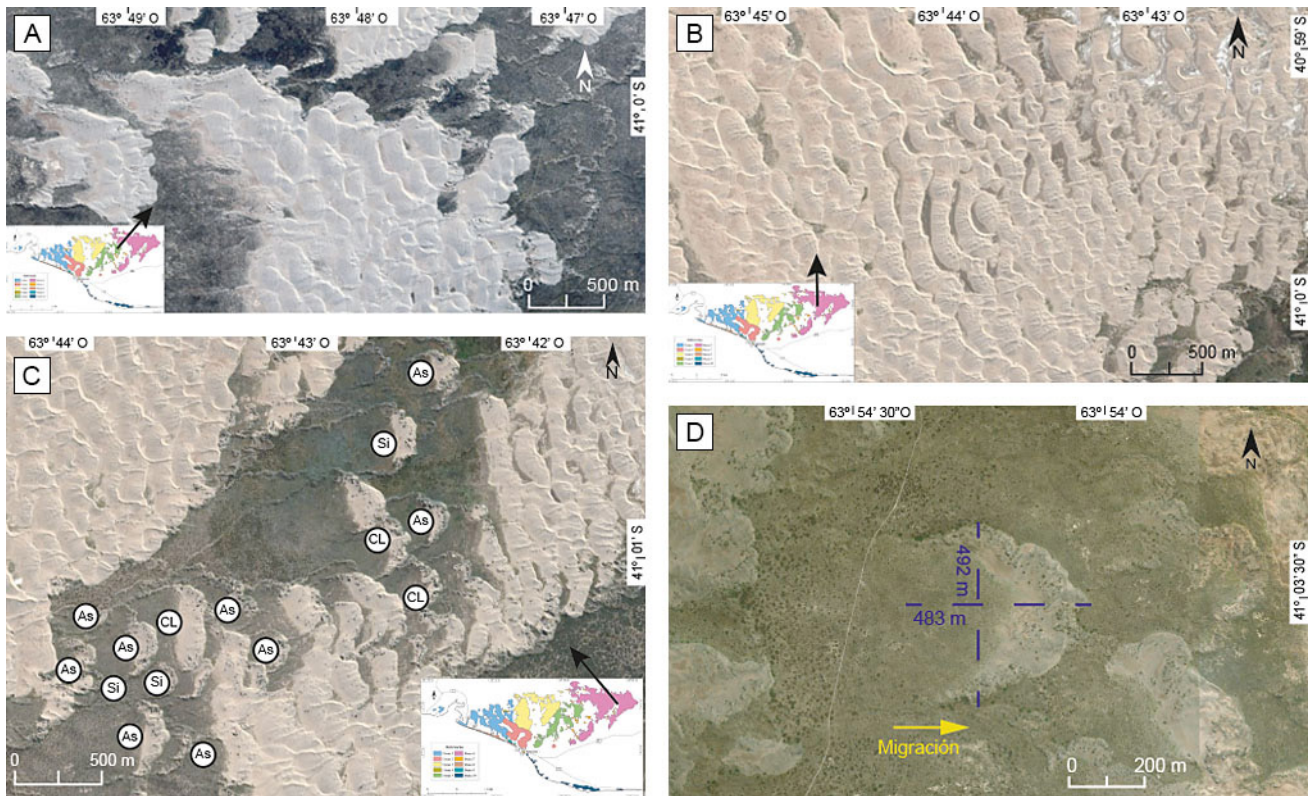
Las muestras tomadas en este sector (Fig. 5; D3 – D4) están compuestas por arena mediana muy bien seleccionada (Tabla 2) y dos dunas estudiadas presentan pendientes de barlovento de 11° y 18° y pendientes de sotavento de 33° y 34°.

Hay que tener en cuenta que los fuertes vientos, la disponibilidad de sedimentos y la falta de vegetación en el *backshore* llevan a la formación de formas transgresivas en lugar de dunas delanteras (Barbosa y Domínguez, 2004; López *et al.*, 2016), por lo que aquí el desarrollo de estas últimas se puede ver limitado por el crecimiento de formas semilunares luego de las dunas embrionarias.

*Campo 9:* se encuentra en relación a afloramientos del paleoacantilado y en un pequeño sector cercano a la playa donde culmina el acantilado costero hacia el oeste, entre Bahía Creek y Caleta de los Loros (Fig. 5). Se trata de dunas remontantes que se extienden de manera irregular a lo largo de 2,4 km, con una altura relativa máxima de 7 m. Su dirección general de migración es hacia el NE (Fig. 9c), salvo algunas lenguas de arena que se desprenden y se desplazan hacia el SE. En algunos sectores con mayor acumulación de sedimentos también se aprecian crestas barjanoides, que inclinan hacia el NE. En ocasiones llegan a establecerse por encima del paleoacantilado (Fig. 9c). En los sectores estudiados en el campo (Fig. 5; D5 – D6) presentan caras de barlovento tendidas, con una inclinación de 8° y caras de sotavento con pendientes cercanas a los 30°. Están compuestas por arenas medianas a finas, bien a muy bien seleccionadas (Tabla 2).

*Campo 10:* en la porción sudoriental del área de estudio, de manera interrumpida sobre el acantilado





**Figura 8.** Imágenes representativas de las dunas de los campos 5 – 7. **a)** imagen satelital del año 2014 tomada de *Google Earth* perteneciente al campo de dunas 5, allí se observan crestas barjanoides y transversales. **b)** imagen satelital del año 2014 tomada de *Google Earth*; representa las dunas transversales complejas del campo de dunas 6. **c)** imagen satelital del año 2014 tomada de *Google Earth* donde se puede observar los tres tipos de dunas parabólicas presentes en área de estudio (campo 7, indicadas con círculos blancos), simétricas (Si), asimétricas (As) y con coalescencia lateral (CL). **d)** imagen satelital tomada de *Bing Maps* correspondiente al detalle de una duna parabólica simétrica; sobre esta se puede apreciar mayor vegetación en relación a los otros tipos de dunas que las rodean.

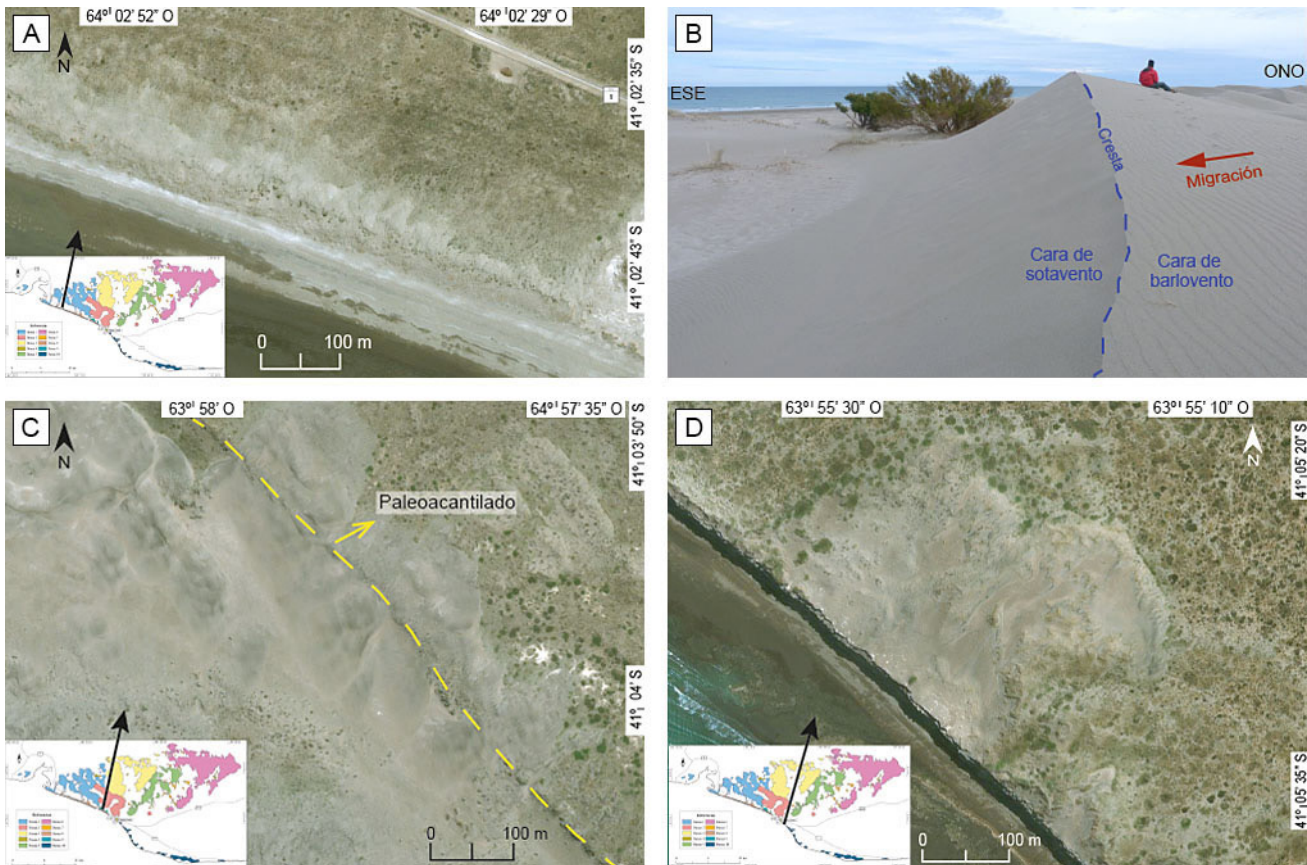
**Figure 8.** Representative images of the dunes of the fields 5 - 7. **a)** satellite image of the year 2014 taken from *Google Earth* belonging to the dune field 5, there are barchanoid and transverse ridges. **b)** satellite image of the year 2014 taken from *Google Earth*; represents transverse complex dunes of the dune field 6. **c)** satellite image of the year 2014 taken from *Google Earth* where it can be seen the three types of parabolic dunes present in the study area (field 7, indicated with white circles), symmetrical (Si), asymmetric (As) and with lateral coalescence (CL). **d)** satellite image taken from *Bing Maps* corresponding to the detail of an symmetric parabolic dune; on this one it can be seen more vegetation in relation to the other types of dunes that surround them.

activo, a lo largo de 30 km (Fig. 5), se reconocieron dunas colgadas (Fig. 9d). Cubren un área de 5,2 km<sup>2</sup> y tienen una extensión desde 100 m hasta casi 1 km desde el borde del acantilado hacia el continente. Una duna estudiada se compone por arena mediana, bien seleccionada (Tabla 2, Fig. 5; D8). Su altura relativa puede alcanzar los 6 m y solo en contados sectores poseen escasa vegetación, compuesta principalmente por junquillos.

Dentro de las acumulaciones que penetran más hacia el continente, esta migración y mayor cantidad de material disponible, hace que las dunas registren formas barjanoides, con crestas orientadas

principalmente N – S o NO – SE, inclinando hacia el E y NE respectivamente. En promedio la orientación de las crestas es de 149° (Fig. 7), donde se registran varias crestas próximas su espaciamiento es de entre 25 m y 100 m y en ocasiones las dunas muestran una transición entre barjanoides y lineales.

Dentro del área de estudio, además de los distintos tipos de dunas ya mencionados, en el campo se registraron dunas eco (Fig. 10a) desarrolladas a partir de obstáculos, siendo en este caso principalmente el acantilado; dunas descendentes desde el acantilado (Fig. 10b) y dunas envolventes (Fig. 10c). Estas últimas desarrolladas mayormente por la presencia



**Figura 9.** Imágenes representativas de las dunas de los campos 8 – 10. **a)** imagen satelital tomada de *Bing Maps* donde se pueden apreciar dunas embrionarias ubicadas al O del *campo* de dunas 8. **b)** fotografía de campo tomada en el año 2017 dentro del *campo* de dunas 8; cresta transversal desarrollada a continuación de las dunas embrionarias, con dirección de avance SE aprox. **c)** imagen satelital tomada de *Bing Maps* que muestra las dunas remontantes pertenecientes al *campo* 9; se puede ver cómo estas atraviesan el paleoacantilado. **d)** imagen satelital tomada de *Bing Maps* en la cual se observan dunas colgadas desarrolladas sobre el acantilado activo, ubicadas 500 m al E aprox. de la localidad de Bahía Creek.

**Figure 9.** Representative images of the dunes of fields 8 - 10. **a)** satellite image taken from *Bing Maps* where embryonic dunes can be seen located at the O of the dune *field* 8. **b)** field photography taken in 2017 within the dune *field* 8; transverse ridge developed following embryonic dunes, with direction of migration approx. SE. **c)** satellite image taken from *Bing Maps* showing the climbing dunes belonging to *field* 9; it can be seen how they pass through the paleo cliff. **d)** satellite image taken from *Bing Maps* in which there are hanging dunes developed on the active cliff, located approx. 500 m to E from the town of Bahía Creek.

de edificaciones construidas por el hombre. Además, como se ha mencionado en las descripciones de los distintos sectores, en diversos lugares ocurre la formación de nebkas (Fig. 10d).

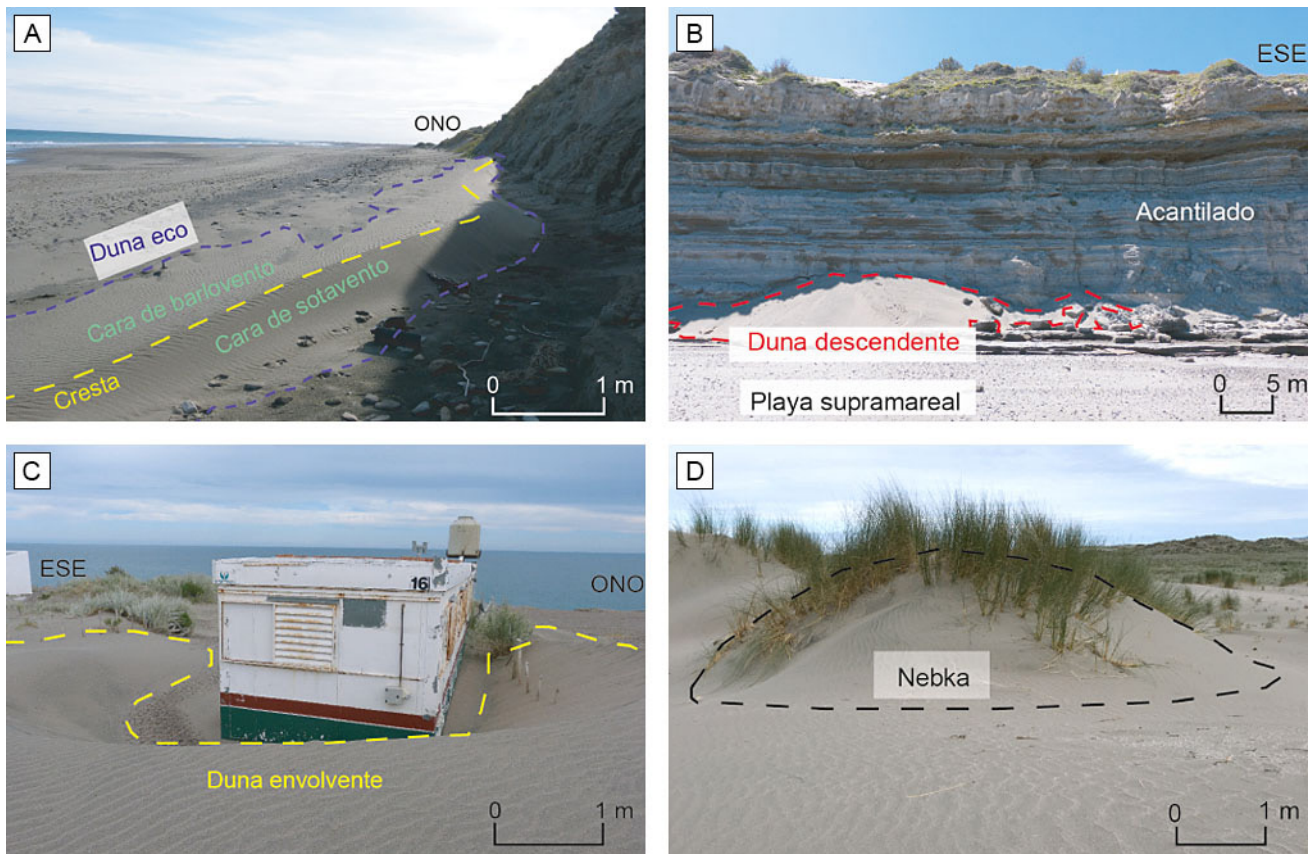
## DISCUSIÓN

### Factores condicionantes en la formación y distribución de dunas

Hay distintos factores que pueden influir en la distribución de las dunas activas y a su vez en la ubicación de los distintos tipos de dunas. Dentro

de los enumerados por Lancaster (1995), Aagaard *et al.* (2004), Bértola (2006) y Hesp (2011), en el área de estudio, se reconocieron los relacionados a la vegetación, la humedad, el aporte de arena, los vientos, la topografía y construcciones o procesos antropogénicos.

La vegetación y los cambios de humedad en el aire y en el suelo pueden influir en momentos con mayor desarrollo y transporte de dunas, es decir períodos más secos, o por el contrario, puede haber períodos húmedos con mayor fijación de dunas y escaso trasporte. En la actualidad, el ambiente árido a semiárido de Bahía Creek, favorece el crecimiento



**Figura 10.** Imágenes representativas de dunas observables a escala de campo, en ocasiones también observables a través de imágenes satelitales, de muy pequeña escala para mapear. Las fotografías se tomaron entre octubre de 2016 y mayo de 2017. **a)** duna eco acumulada al pie del acantilado, 300 m al O aprox. de la localidad de Bahía Creek. **b)** duna descendente formada con material proveniente del tope del acantilado activo, ubicada 100 m al O de la bajada a la playa de Bahía Creek. **c)** duna envolvente desarrollada a partir de un obstáculo de origen antrópico, en este caso una casilla perteneciente a la localidad de Bahía Creek. **d)** nebka desarrollado junto con el crecimiento de junquillos.

**Figure 10.** Representative images of field – level observable dunes, sometimes also observable through satellite images, of very small scale for mapping. The photographs were taken between October 2016 and May 2017. **a)** accumulated echo dune at the foot of the cliff, approx. 300 m W from the town of Bahía Creek. **b)** falling dune formed with material coming from the top of the active cliff, located 100 m W of the descent to the beach of Bahía Creek. **c)** enveloping dune developed from an obstacle of anthropic origin, in this case a hut belonging to the town of Bahía Creek. **d)** nebka developed together with the growth of jonquils.

de dunas. De otro modo, la humedad del suelo o un nivel freático más superficial, como en los médanos parabólicos de la región Pampeana Oriental (Contreras *et al.*, 2018), podrían favorecer lugares de acumulación dentro del campo eólico de Bahía Creek. De hecho hay vegetación asociada a dunas embrionarias, parabólicas y nebkas principalmente. No obstante esta vegetación no es abundante, entonces solo en ocasiones actúa como modificadora del flujo de viento, reteniendo sedimentos. Donde no hay vegetación, las dunas semilunares son la forma dominante. Asimismo un aumento en las condiciones de humedad del suelo puede llevar

a la transición de crestas barjanoides a dunas parabólicas, como sucede en sectores de la costa bonaerense (Cortizo e Isla, 2007). Prolongadas fases húmedas también contribuyen a la formación de suelo y a la preservación de los depósitos (Martinho *et al.*, 2008) y una alternancia de períodos secos y húmedos puede llevar a la coexistencia de dunas fijas y móviles, al igual que sucede en San Antonio Este (Carbone *et al.*, 2007).

Otra característica que permite el crecimiento e influye en la ubicación del campo de dunas es la dirección de viento efectivo. Es el régimen del viento local quien rige el control primario del tipo de

duna, mientras que la distribución de los distintos tipos de dunas y su orientación dentro del campo eólico puede estar relacionada a las variaciones en las características direccionales del flujo (Lancaster, 1995). Teniendo en cuenta la amplitud del campo de dunas de Bahía Creek y la complejidad del viento en la zona, el cual según sus direcciones se ubica entre bimodal agudo a bimodal obtuso, puede derivar en la gran variedad de dunas presentes en este sitio. A su vez, la existencia de distintos tipos de dunas en cercanías unas con otras, también se puede relacionar a modificaciones del flujo de aire inducidas por la topografía o la geomorfología previa.

Donde aparecen las dunas estrella o donde forman parte de dunas complejas, se desarrollan mayormente por la acumulación vertical de arena dentro de áreas con direcciones de viento muy variables. Mientras que si las dunas migran serán principalmente semilunares simples y si se extienden serán lineales. También hay lugares cercanos a los límites del campo de dunas donde predominan barjanas o crestas barjanoides de pequeño tamaño y aisladas. Esto coincide con las áreas más alejadas, donde la disponibilidad de arena es limitada. A medida que aumenta el suministro de material, los barjanas se unen lateralmente para formar crestas barjanoides o transversales, como sucede desde el comienzo de los acumulaciones hacia el este dentro del área de estudio, desarrollándose el mayor crecimiento de las dunas en el *campo 6*.

Los vientos, junto con el aporte de arena, van a influir en la selección, tamaño de grano y demás propiedades granulométricas. Estas características van a depender de la distancia al área de aporte a la que se produce la sedimentación y del material transportado. Las principales áreas de aporte son la playa y la caleta, su principal diferencia es el tamaño de grano, menor en la caleta,  $2,45 \phi$  y mayor en la playa,  $1,50 - 1,99 \phi$  (Toffani, 2018). Estos valores, junto a los obtenidos en las dunas, son similares a los adquiridos en la zona por Favier Dubois y Borella (2007). En la zona estudiada las muestras tomadas en las dunas en cercanías a la caleta tienen granulometría más fina que el resto. Esto se podría deber a la proximidad al área de aporte. Contrariamente, donde las arenas registran un mayor tamaño de grano dentro de las dunas, es porque se encuentran más próximas a la playa. Asimismo los valores granulométricos que presentan las arenas dunares son típicos de arenas eólicas (Scasso y Limarino, 1997). Esta disminución

de tamaño de grano desde la playa hacia los médanos también se registra en distintos sectores de la costa argentina: La Boca, Río Negro (Vergara Dal Pont, 2015), Monte Hermoso, Buenos Aires (Fernández *et al.*, 2003), la costa de Tres Arroyos y San Cayetano, Buenos Aires (Bértola *et al.*, 2009) y Cabo San Antonio, Buenos Aires (López *et al.*, 2016).

Como factores topográficos u obstáculos significativos, se reconocieron los acantilados activos costeros, el paleoacantilado y las construcciones de la localidad de Bahía Creek. Los acantilados, se relacionan a dunas colgadas, eco y descendentes. El sedimento que parte desde la playa aprovecha la ausencia de vegetación en dicho sitio y cárcavas en el acantilado, por las cuales la arena se mueve hacia arriba. Esta arena también puede aprovechar rampas del mismo material, correspondientes a dunas eco o descendentes, y una vez arriba, los sedimentos componen médanos colgados. Estos últimos pueden continuar su migración hacia el continente y formar otros tipos de dunas, como se aprecia en el *campo 10*. Acumulaciones similares se describieron en la Barrera Medanosa Austral (Bértola y Cortizo, 2005). Donde está ausente el acantilado, se produce el mayor transporte de material desde la caleta y la playa hacia el continente, favorecido por el transporte litoral sin obstáculos. Por otro lado, donde se encuentra el paleoacantilado, se desarrollan dunas remontantes. Debido a su menor altura y pendiente que los acantilados y al no tener continuidad, la arena puede atravesar el paleoacantilado y seguir avanzando tierra adentro. Luego, las construcciones representan un obstáculo, siendo capaces de influir en los vientos y en el material que estos transportan. Dificultan el paso de los vientos procedentes del cuadrante S principalmente, que contribuyen al movimiento de las dunas hacia el NE mayormente, dejándoles más peso relativo a los vientos del O y del NO. Estos últimos transportan una mayor cantidad de sedimentos y provocan el avance más rápido de las dunas hacia el E y SE, es decir hacia donde se encuentran las edificaciones. En este caso las dunas lineales son las que se encuentran más cercanas a la población de Bahía Creek, de hecho ya han alcanzado algunas viviendas (Figs. 4, 6b), y su sentido de avance continúa hacia donde se ha asentado la población. De esta forma se ve como la actividad humana y las construcciones que han realizado tienen influencia en la evolución de las dunas. Por este motivo su estudio no solo es importante para

clasificarlas, sino también para conocer el peligro geológico. En otros trabajos se trata con mayor profundidad este tema, en general relacionado al ordenamiento territorial (del Río *et al.*, 2004; López Alfonsín *et al.*, 2012; Toffani, 2018).

Más allá de estos, no se observan factores topográficos significativos en relación al desarrollo de las dunas o del campo eólico. A través del DEM se distingue un bajo hacia el sector oriental del área de estudio, sin embargo no se reconoce una influencia sobre el movimiento de las dunas. Sí se observa que el actual campo de dunas se limita a donde antes había dunas y no se extiende sobre la antigua planicie aluvial. Esto se puede relacionar a que las dunas estabilizadas actúan como un obstáculo, favoreciendo la acumulación.

Finalmente es importante mencionar que, además de la villa turística de Bahía Creek, esparcido en lugares donde no hay dunas activas, hay un pequeño número de viviendas aisladas. Estas pertenecen a pobladores rurales, dedicados principalmente a la cría de ganado, que podrán verse afectados por el avance de las dunas (Fabregat, 2015). Asimismo el hecho de la presencia de animales, aunque sea a muy pequeña escala, puntualmente puede estar afectando la vegetación del lugar y como consecuencia aspectos morfodinámicos de las dunas.

### Campo de dunas

Se considera que las dunas fijas y móviles son contemporáneas. Algunas de las dunas fijas corresponden a los lugares donde Favier Dubois y Borella (2007) y Favier Dubois (2013) encontraron concheros con edades de entre 5310 y 1100 años <sup>14</sup>C A.P., mientras que la edad estimada para el comienzo de la acumulación de las dunas actuales, en base a la tasa de migración y al área de aporte, es de 6000 – 5000 años. Estas acumulaciones se incluyen dentro de la Formación Punta Villarino. Los factores anteriormente descritos podrían haber definido la migración o fijación dentro del campo eólico en esos años, formándose en fases o episódicamente, dentro de las que pueden influir ciclos estacionales o episodios de tormenta, como se ha evidenciado en sectores de costa bonaerense (Bértola, 2006). Esta tendencia también se manifiesta en otros sectores de la costa argentina, con playas y dunas costeras formadas con posterioridad a la fluctuación holocena del nivel del mar (Bértola y Cortizo, 2005; Cortizo e

Isla, 2007; Hesp, 2011).

En lo que se refiere a las dimensiones de las dunas, las longitudes de onda varían entre los 30 m y los 350 m, los menores valores están a continuación de la caleta, es decir donde comienza el campo de dunas, y en la parte más distal, al este del *campo 6*. A su vez, este sector también es el que registra los valores más elevados. Esta distribución es coherente, ya que las primeras acumulaciones son de menor tamaño y próximas entre sí, en general van creciendo y teniendo mayor longitud de onda, hasta alcanzar un máximo. Donde comienza a disminuir el transporte debido a que los sedimentos disponibles ya se han ido depositando en el camino, las dunas vuelven a adquirir tamaños más pequeños. Además se observa que a mayor tamaño de dunas, en cuanto a largo y ancho, es mayor la longitud de onda.

Las alturas relativas de las dunas registran valores de entre 2 m y 16 m, lo que las posiciona entre dunas bajas (hasta 6 m de altura) y moderadas (entre 6 m y 24 m de altura) según una clasificación geométrica propuesta por Sanjaume y Gracia (2011).

A su vez, según lo observado, se deduce que dentro de los mismos tipos de dunas, las complejas son las que alcanzan mayores tamaños, mientras que las simples son las más pequeñas. Esto también se evidencia en Península Valdés; barjanes dispersos no superan los 3 m de altura, mientras que este parámetro en las dunas transversales compuestas llega hasta los 15 m (del Valle *et al.*, 2008).

Como el viento efectivo favorece el transporte de arena hacia el continente y a través de este, se desarrolla mayormente un crecimiento longitudinal del campo de dunas, evidenciado en los tipos de dunas desarrolladas, en el índice de movilidad y en el potencial de deriva de arena. Las dunas son principalmente semilunares y lineales y en promedio se comportan como activas salvo en la interduna, dentro de un ambiente de gran energía. Asimismo las tasas promedio de avance de dunas, de  $6,02 \pm 0,3$  m/año, sugieren tasas de movimientos medias según una clasificación propuesta por Dong *et al.* (2013). En la zona que afecta a la villa turística de Bahía Creek se ha registrado una medición igual a la presentada en este trabajo, de 6 m/año entre los años 1993 – 2003 (Picone, 2014). Estos números son muy importantes para la población del lugar ya que actualmente las dunas comenzaron a toparse con algunas casas y en el futuro lo continuarán haciendo con otras edificaciones si no se toman medidas al

respecto. A su vez, valores de 5 – 9 m/año se han registrado entre punta Redonda y punta Rasa entre los años 1973 – 2005 (Cortizo e Isla, 2012); mientras que la tasa de avance medida entre los años 1969 – 2002 arrojó valores de  $9,1 \pm 2,7$  m/año en Península Valdés (del Valle *et al.*, 2008). Estas mediciones pueden estar justificadas por los valores de DP, entre 923 – 953 en la Barrera medanosa de Patagones (Cortizo e Isla, 2012) y 2021,9 en Península Valdés (del Valle *et al.*, 2008).

Si bien son múltiples las direcciones de viento efectivo, como se mencionó, las del cuadrante O superan claramente a las del cuadrante E, influyendo significativamente en el transporte. Esto está sustentado por la dirección de RDD obtenida, la cual fue de  $76^\circ$ . También se observa la dominancia de vientos del O en la Barrera medanosa de Patagones y en Península Valdés, donde las direcciones de RDD dieron como resultado  $45-60^\circ$  y  $98^\circ$ , respectivamente (Cortizo e Isla, 2007; del Valle *et al.*, 2008; Cortizo e Isla, 2012). La dominancia de los vientos provenientes del O también coincide con un estudio de dunas fósiles llevado a cabo por Zárate y Tripaldi (2012). En el mismo interpretaron que desde hace unos 700 ka hasta 0,4 ka, los vientos predominantes en distintos sectores, correspondientes a distintas unidades eólicas del centro de Argentina, fueron principalmente O y SO. Esto reafirma el predominio de los *westerlies* durante todos estos años dentro de la región estudiada y sus alrededores. Estas direcciones promedio de viento también coinciden con la información brindada por trabajos de escala regional llevados a cabo por Saavedra *et al.* (2011) y Pisoni (2012), en los cuales se estudió que los vientos predominantes sobre la plataforma marina y la meseta patagónica a lo largo de todo el año provienen del O, induciendo una circulación media en la capa superficial hacia el E – NNE.

Según el valor de la relación RDP/DP, 0,36, el viento se ubica entre bimodal agudo y bimodal obtuso con respecto a las direcciones de viento efectivo. Tal es así que las variaciones en la dirección de viento efectivo influyen en la gran variedad de dunas encontradas. Lo mismo sucede en Península Valdés, con una relación RDP/DP de 0,39 (del Valle *et al.*, 2008).

## CONCLUSIONES

El campo eólico de Bahía Creek resulta activo,

dentro de un ambiente de alta energía, por la migración de las dunas según las imágenes observadas de distintos años (junto al cálculo de una tasa de avance anual), la ausencia de vegetación, los vientos efectivos y el valor obtenido de DP.

Comparado con los demás campos de dunas de Argentina recientemente mencionados, el campo eólico estudiado en el presente trabajo comparte varias características que permiten su desarrollo. Estas son: disponibilidad de arena, intensidad y dirección de los vientos respecto a la orientación de la línea de costa, tipo y densidad de vegetación, topografía plana en la playa que favorece la acumulación en el continente y precipitación anual baja. Si bien hay algunas diferencias en las direcciones generales de migración en los distintos campos de dunas, estas se ubican entre los  $45^\circ$  y los  $98^\circ$ , sustentando el predominio de los vientos del O en toda la región. En particular Bahía Creek registra una dirección de  $76^\circ$ , siendo la resultante de dirección proveniente del viento OSO, dentro de un régimen de viento efectivo bimodal agudo – bimodal obtuso. Para la barrera medanosa de Patagones los valores de DP son similares a los de Bahía Creek, mientras que en Península Valdés son mayores. Esto podría estar ligado a la mayor frecuencia de vientos efectivos más al S, el cual también se refleja en las tasas de migración y en el índice de movilidad. Dentro de estos lugares, además de la playa, Caleta de los Loros representa un área de aporte de sedimentos mayor para Bahía Creek, entonces se puede desarrollar un campo de dunas más extenso en sus cercanías.

El campo eólico fue dividido en 10 sectores según la morfología de las dunas. En estos predominan las dunas semilunares y lineales. También las hay parabólicas, estrella, oblicuas, reversas, embrionarias, remontantes y colgadas.

Los tamaños de dunas varían desde los 10 m tanto en ancho como en largo en barjanes simples, hasta 600 m y 1 km de largo en dunas lineales y parabólicas respectivamente y 600 m de ancho en cordones transversales y barjanoides compuestos o complejos. Las alturas de las dunas en general van desde los 2 m hasta los 16 m, siendo dunas bajas o moderadas.

La distribución de las dunas en Bahía Creek resulta de la suma de un conjunto de factores, los cuales son cobertura vegetal, vientos, aporte de arena, humedad del suelo y del aire, topografía y construcciones o procesos antropogénicos. Mientras

que las variaciones en los vientos y en las tasas de transporte de arena en diferentes escalas temporales y espaciales parecen ser el control más importante del tamaño y espaciado de las dunas eólicas.

Los tamaños de grano corresponden a arenas finas a medianas, mayormente muy bien seleccionadas, con valores similares en relación a las cercanías de las muestras, ubicadas dentro del mismo ambiente, donde se reconoce la llanura de mareas y la playa como área de aporte para la zona de acumulación dentro del campo de dunas.

Finalmente, resulta muy importante mejorar el conocimiento sobre los procesos ocurridos en Bahía Creek e interpretar íntegramente la dinámica del sistema, para así establecer mejor aún la relación del campo de dunas con los asentamientos poblacionales y sus actividades y por el potencial peligro que puede representar para la comunidad el avance de las dunas. En este sentido, la tasa de migración de las dunas brinda una muy buena aproximación sobre donde se podrán ubicar los frentes de dunas en los próximos años, y la morfología y características de las dunas ayudan a que se pueda predecir cómo será ese avance. Para construir futuras edificaciones se deberá prestar atención al artículo 74 de la Constitución de la provincia de Río Negro, que impone la necesidad de un Ordenamiento Territorial compatible con las necesidades generales de la comunidad, y a la Ley de Impacto Ambiental – N° 3266. Además se pueden tener en cuenta los sitios sugeridos por Toffani (2018) y Toffani *et al.* (en prensa) para el desarrollo de la localidad, alentando a construir en zonas más estables, que no se vean afectadas por estos procesos en el corto y mediano plazo, prestando atención a la migración de las dunas y al retroceso del acantilado. También se recomienda realizar un monitoreo periódico de esta situación e informar a la comunidad para poder prevenir, estar mejor preparados frente a los fenómenos naturales y tomar medidas al respecto.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Aagaard, T., R. Davidson-Arnott, B. Greenwood y J. Nielsen, 2004. Sediment supply from shoreface to dunes: linking sediment transport measurements and long – term morphological evolution. *Geomorphology* 60:205-224.
- Al-Awadhi, J. M., A. Al-Helal y A. Al-Enezi, 2005. Sand drift potential in the desert of Kuwait. *Journal of arid environments* 63 (2):425-438.
- Alberdi, M. T., F. P. Bonadonna y E. Ortiz Jaureguizar, 1997. Chronological correlation, paleoecology, and paleobiogeography of the late Cenozoic South American Rionegran land-mammal fauna: a review. *Revista Española de Paleontología* 12 (2):249-255.
- 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., M. A. Fidalgo, M. Gómez Peral y E. J. Schnack, 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* vol. 8, 32 pp.
- Bagnold, R. A., 1954. Experiments on a gravity – free dispersion of large solid spheres in a Newtonian fluid under shear. *Mathematical and Physical Sciences* 225 (1160):49-63.
- Barbosa, L. M. y J. M. L. Dominguez, 2004. Coastal dune fields at the São Francisco River strandplain, northeastern Brazil: morphology and environmental controls. *Earth Surface Processes and Landforms* 29 (4):443-456.
- Bértola, G. R., 2006. Morfodinámica de playas del sudeste de la provincia de Buenos Aires (1983 a 2004). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 13(1):31-57.
- Bértola, G. R. y L. C. Cortizo, 2005. Transporte de arena en médanos litorales activos y colgados del sudeste de Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 60 (1):174-184.
- Bértola, G. R., L. C. Cortizo y F. I. Isla, 2009. Dinámica litoral de la costa de Tres Arroyos y San Cayetano, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 64 (4):657-671.
- Bohn, V. Y., R. M. Sánchez, C. N. Carrascal y F. B. Romagnoli, 2014. Estudio Preliminar de Variables Climatológicas y Productividad de los Suelos (RESAP, Argentina). *XXIV Congreso Argentino de la Ciencia del Suelo II Reunión Nacional “Materia Orgánica y Sustancias Húmicas”*: 1-6.
- Breed, C. S. y T. Grow, 1979. Morphology and distribution of dunes in sand seas observed by remote sensing. En: E.D McKee (Ed.), *A study of global sand seas*. United States Geological Survey, Washington DC: 253-304.
- Carbone, M. E., G. M. E. Perillo y M. C. Piccolo, 2007. Dinámica morfológica de los ambientes costeros de Bahía San Antonio Oeste, provincia de Río Negro. *Geoacta* 32:83-91.
- Contreras, F. I., G. Mavo Manstretta, G. Perillo y M. Piccolo, 2018. Caracterización de Médanos Parabólicos de la Región Pampeana Oriental, Centro Oeste de la Provincia de Buenos Aires (Argentina). *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 25 (1):3-17.
- Cortizo, L. y F. I. Isla, 2007. Evolución y dinámica de la Barrera Medanosa entre los arroyos Zabala y Claromecú, partidos de San Cayetano y Tres Arroyos, Buenos Aires. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 62 (1):3-12.
- Cortizo, L. y F. I. Isla, 2012. Dinámica de la barrera medianosa 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., J. Álvarez, A. López de Armentia, M. J. Bó, J. Martínez y M. Camino, 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*, Viedma, 88pp.
- Del Valle, H. F., C. M. Rostagno, F. R. Coronato, P. J. Bouza y P. D. Blanco, 2008. Sand dune activity in north – eastern Patagonia. *Journal of Arid Environments* 72 (4):411-422.

- Dong, Z., G. Qian, P. Lv y G. Hu, 2013. Investigation of the sand sea with the tallest dunes on Earth: China's Badain Jaran Sand Sea. *Earth – Science Reviews* 120:20-39.
- Etcheverría, M., A. Folguera, C. Dal Molín, M. Dalponte y G. Ferro, 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, Buenos Aires, Boletín 366, 67 pp.
- Fabregat, E. H., 2015. El Proceso de Construcción Territorial en el Área de Bahía Creek. *Geosaberes* 6 (1): 192-208.
- Favier Dubois, C., 2013. Hacia una cronología del uso del espacio en la costa norte del golfo San Matías (Río Negro, Argentina): sesgos geológicos e indicadores temporales. *Tendencias teórico – metodológicas y casos de estudio en la arqueología de la Patagonia*, 87-96.
- Favier Dubois, C. y F. Borella, 2007. Consideraciones acerca de los procesos de formación de concheros en la costa Norte del golfo San Matías (Río Negro, Argentina). *Cazadores – recolectores del Cono sur* 2: 151-165.
- Fernández, E., J. Caló, A. Marcos y H. Aldacour, 2003. Interrelación de los ambientes eólico y marino a través del análisis textural y mineralógico de las arenas de Monte Hermoso, Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología* 10 (2): 151-161.
- Folk, R. L. y W. C. Ward, 1957. Brazos River bar: a study in the significance of grain size parameters. *Journal of Sedimentary Research* 27 (1):3-26.
- Fryberger, S. G., 1979. Dune forms and wind regime. En: E.D McKee (Ed.), *A study of global sand seas*. United States Geological Survey, Washington DC: 137-169.
- Fucks, E., A. H. Scalise y E. J. Schnack, 2011. *Evaluación de alternativas para la conservación y manejo del frente costero en Las Grutas*. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires, 81 pp.
- Gelós, E. M., R.A. Schillizzi y J. O. Spagnuolo, 1992. El Cenozoico de la costa norte del Golfo San Matías, Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47: 135-140.
- Gelós, E. M. y J. O. Spagnuolo, 1992. Relación área de aporte – ambiente tectónico de las psamitas de la plataforma continental argentina. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 47 (2): 141-146.
- Glasser, N. F., S. Harrison, V. Winchester y M. Aniya, 2004. Late Pleistocene and Holocene palaeoclimate and glacier fluctuations in Patagonia. *Global and planetary change* 43: 79-101.
- González Díaz, E. F. y E. C. Malagnino, 1984. Geomorfología de la provincia de Río Negro. *IX Congreso Geológico Argentino*, San Carlos de Bariloche.
- Hesp, P., 2011. Dune Coasts. En: E. Wolanski y D. S. McLusky (Eds.), *Treatise on Estuarine and Coastal Science*, Waltham Academic Press, Vol 3: 193-221.
- Lancaster, N., 1988. Development of linear dunes in the southwestern Kalahari, Southern Africa. *Journal of Arid Environments* 14: 233-244.
- Lancaster, N., 1995. *Geomorphology of Desert Dunes*. Routledge, Londres, 244 pp.
- López Alfonsín, R., M. E. Coccia, L. E. Fauqué, C. Castaños y N. M. Olvar, 2012. *Estudio para el ordenamiento territorial de la Orla Atlántica Rionegrina. Desde La Lobería a Bahía Creek*. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires, 108 pp.
- López, R. A., S. C. Marcomini y M. P. Bunicontro, 2016. Morfodinámica de las dunas costeras del cabo San Antonio, provincia de Buenos Aires, Argentina. *Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis* 23 (2): 111-125.
- Marcos, M. A. y M. V. Mancini, 2012. Comunidades vegetales de la costa norte del Golfo San Matías, Río Negro, Argentina. *Ecología austral* 22 (3): 188-194.
- Martinho, C. T., S. R. Dillenburg y P. A. Hesp, 2008. Mid to late Holocene evolution of transgressive dunefields from Rio Grande do Sul coast, southern Brazil. *Marine Geology* 256: 49-64.
- McKee, E. D., 1979. *A study of global sand seas*. United States Geological Survey, Washington DC, 429 pp.
- McLaren, P., 1981. An interpretation of trends in grain size measures. *Journal of Sedimentary Research* 51 (2): 611 – 624.
- Metz, R., 1985. The importance of maintaining horizontal sieve screens when using a Ro – Tap. *Sedimentology* 32 (4): 613-614.
- Miot da Silva, G. y P. Hesp, 2010. Coastline orientation, aeolian sediment transport and foredune and dunefield dynamics of Moçambique Beach, Southern Brazil. *Geomorphology* 120: 258-278.
- 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, Viedma, 55 pp.
- Pisoni, J. P., 2012. *Los sistemas frontales y la circulación en las inmediaciones de los Golfos Norpatagónicos*. Tesis Doctoral, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires, 197 pp. (inédito).
- Román-Sierra, J., J. J. Muñoz-Pérez y M. Navarro-Pons, 2013. Influence of sieving time on the efficiency and accuracy of grain – size analysis of beach and dune sands. *Sedimentology* 60 (6): 1484-1497.
- Saavedra, M., M. Calvo y C. Jiménez, 2011. Caracterización climática de la circulación atmosférica en América del Sur. *Revista de Investigación de Física* 14 (1).
- Sanjaume, E. y F. J. Gracia, 2011. *Las dunas de España*. Sociedad Española de Geomorfología, Madrid, 747 pp.
- Scasso, R. A. y C. O. Limarino, 1997. *Petrología y Diagénesis de Rocas Clásticas*. Asociación Argentina de Sedimentología, Publicación Especial 1, Buenos Aires, 259 pp.
- Sepúlveda, E. G., 1983. Descripción Geológica de la Hoja 38I, 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, Escuela de Geología, Paleontología y Biología, Universidad Nacional de Río Negro, 134 pp. (inédito).
- Toffani, M., A. T. Caselli y L. D. Lothari Inaudi, en prensa. 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. *Revista de la Asociación Geológica Argentina* 77 (1).
- Tsoar, H. y D. G. Blumberg, 2002. Formation of parabolic dunes from barchan and transverse dunes along Israel's Mediterranean Coast. *Earth Surface Processes and Landforms* 27: 1147-1161.
- Vergara Dal Pont, I. P., 2015. *Dinámica costera y análisis del riesgo geológico asociado en la desembocadura del río Negro, provincias de Buenos Aires y Río Negro*. Tesis de Licenciatura, Escuela de Geología, Paleontología y Biología, Universidad Nacional de Río Negro, 105 pp. (inédito).
- Wadhawan, S. K., 1996. Textural attributes of recent aeolian



deposits in different subbasins of the Thar Desert, India. *Journal of Arid Environments* 32 (1): 59-74.

**Wanner, H., J. Beer, J. Bütikofer, T. J. Crowley, U. Cubasch, J. Flückiger, H. Goosse, M. Grosjean, F. Joos, J. O. Kaplan, M. Küttel, S. A. Müller, I. C. Prentice, O. Solomina, T. F. Stocker, P. Tarasov, M. Wagner y M. Küttel**, 2008. Mid – to Late Holocene climate change: an overview. *Quaternary Science*

*Reviews* 27 (19-20), 1791-1828.

**Zárate, M. A. y A. Tripaldi**, 2012. The aeolian system of central Argentina. *Aeolian Research* 3 (4): 401-417.

**Zavala, C. y H. Freije**, 2005. Geología de los acantilados. En: R. Maser, J. Lew y G. Serra Peirano (Eds.), *Las mesetas patagónicas que caen al mar: la costa rionegrina. Argentina*. Gobierno de Río Negro, Viedma: 187-199.