

ANÁLISIS DE LA DINÁMICA COSTERA EN LA REGIÓN DE LAS GRUTAS, PROVINCIA DE RÍO NEGRO

Trabajo Final de Grado

Licenciatura en Geología



Autor: Lautaro Adrián Sbaizero
Director: Alberto Tomás Caselli
Co- director: Gerardo Esteban Barion

 Universidad Nacional
de Río Negro

Sede Alto Valle y Valle Medio
2024

Contenido

Resumen.....	3
Abstract	3
1. INTRODUCCIÓN	4
1.1 Objetivos	5
1.2 Materiales y métodos.....	5
2. ANTECEDENTES.....	7
2.1 Dinámica Costera General.....	7
2.2 Morfología de costas acantiladas.....	9
2.3 Antecedentes en la zona de estudio.....	10
Marco Geológico.....	10
Caracterización geotécnica	13
Dinámica costera local	15
2.4 Características físicas del área de estudio	16
Clima	16
Características de la marea astronómica.....	17
Ondas de tormenta.....	17
Olas.....	18
Esguerrimiento superficial	19
Esguerrimiento Subterráneo	19
3. RESULTADOS	22
3.1 Geología del área de estudio	22
3.2 Geomorfología del área de estudio	26
3.3 Caracterización morfológica de la zona de estudio.....	31
3.4 Topografía y relación con olas de tormenta y mareas.....	56
3.5 Estabilidad de playa	57
3.6 Retroceso de la línea de cresta de los acantilados	58
4. DISCUSIÓN	61
Agradecimientos.....	66
6. BIBLIOGRAFÍA.....	67

Resumen

En el presente manuscrito se lleva a cabo el estudio geológico y geomorfológico de la localidad balnearia de Las Grutas, a fines de comprender la evolución de la dinámica costera local y cómo ésta se relaciona con el retroceso de los acantilados allí expuestos.

A partir de relevamientos realizados con VANT, en base a los modelos digitales de elevación (MDE) obtenidos en 2021 y 2022, fue posible realizar una cuantificación de la variación del volumen de depósitos de playa, como así también perfiles topográficos de la zona. Además, utilizando los ortomosaicos generados a partir de los vuelos, en comparación con fotografías aéreas históricas, fue posible estimar una velocidad de retroceso del acantilado entre los años 1969 y 2021, obteniendo un valor medio de 3 metros de retroceso en los sectores menos afectados y hasta aproximadamente 6 metros en los sectores más afectados.

Se identificaron procesos y factores que condicionan a la zona litoral, incluyéndose los procesos erosivos marinos, que dan como resultado las oquedades basales y cuevas presentes en los acantilados, canales y surcos sobre la plataforma de abrasión y procesos subaéreos, que en ciertos sectores dan como resultado zonas con derrumbes. También, se identificaron factores condicionantes de la estabilidad del acantilado, relacionados a su litología, estructuras y pendientes.

El monitoreo con VANT es propuesto como método de monitoreo costero continuo, ya que su resolución espacial centimétrica brinda la posibilidad de cuantificar procesos ocurridos con un gran nivel de detalle.

Abstract

In this manuscript, the geological and geomorphological study of the resort town of Las Grutas is carried out, in order to understand the evolution of the local coastal dynamics and how this is related to the retreat of the cliffs exposed there.

From surveys carried out with UAV, based on the digital elevation models (DEM) obtained in 2021 and 2022, it was possible to quantify the variation in the volume of beach deposits, as well as topographic profiles of the area. Furthermore, using the orthomosaics generated from the flights, in comparison with historical aerial photographs, it was possible to estimate a speed of retreat of the cliff between the years 1969 and 2021, obtaining an average value of 3 meters of retreat in the least affected sectors and up to approximately 6 meters in the most affected sectors.

Processes and factors that condition the coastal zone were identified, including marine erosion processes, which result in basal cavities and caves present in the cliffs, channels and grooves on the abrasion platform, and subaerial processes, which in certain sectors result in resulting in areas with landslides. Also, conditioning factors of the stability of the cliff were identified, related to its lithology, structures and slopes. Monitoring with UAVs is proposed as a continuous coastal monitoring method, since its centimeter spatial resolution provides the possibility of quantifying processes that occur with a high level of detail.

1. INTRODUCCIÓN

El presente Trabajo Final de Grado se desarrolla en el sector noroeste del Golfo San Matías, más precisamente en la localidad balnearia de Las Grutas, provincia de Río Negro, Argentina, ubicándose a los 40° 60' de latitud sur y 65° 08' de longitud oeste (Figs. 1.1, 1.2). Esta se encuentra ubicada 193 km al oeste de la ciudad de Viedma, desde la cual se puede acceder a través de la Ruta Nacional N° 3 y N° 251 desde el norte.

El balneario Las Grutas es uno de los principales centros turísticos de la costa patagónica y forma parte del Área Natural Protegida “Bahía San Antonio”. La localidad se asienta sobre una costa acantilada de baja altura, cuyas paredes suelen desmoronarse frecuentemente en algunos sectores, lo cual representa una situación de peligro para la comunidad y los turistas. Por tal motivo, su estudio reviste gran relevancia, sobre todo teniendo en cuenta que en los últimos 40 años se experimentó la expansión del área urbana de la localidad, a partir del incremento de la población permanente y estacionaria, en un marco de planificación espontánea. Esto determinó la importancia de nuevos estudios que confluyan en el fortalecimiento de las medidas de planificación a futuro, para que éstas sirvan de orientación a la gestión y ordenamiento territorial.

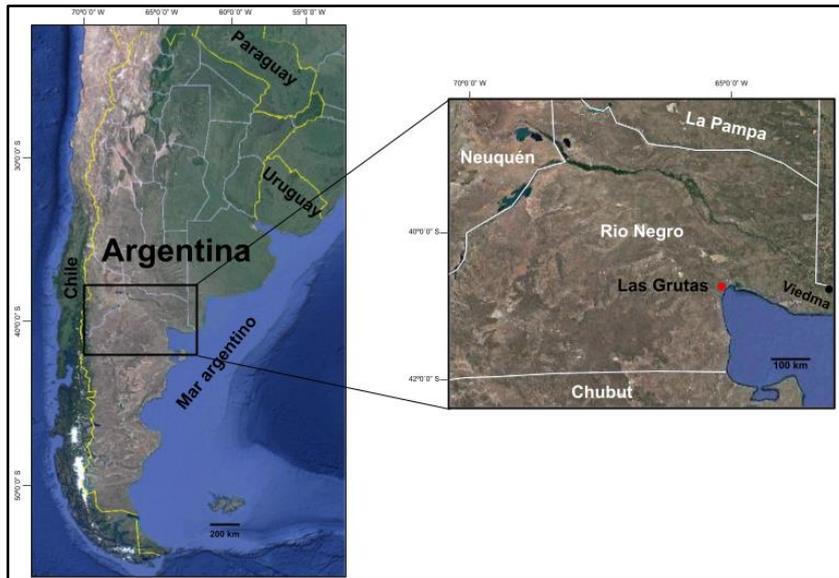


Fig. 1.1. Ubicación regional de la zona de estudio.

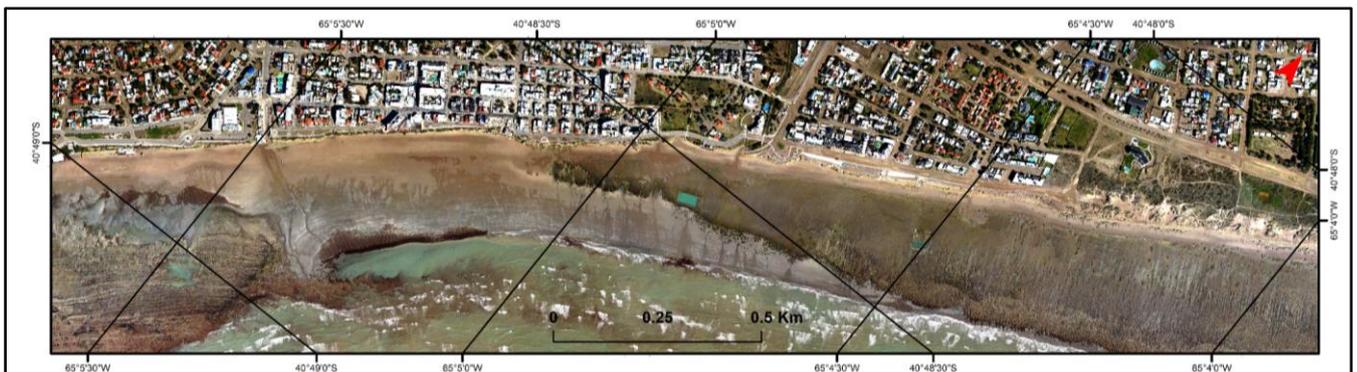


Fig. 1.2. Vista aérea del área de estudio.

1.1 Objetivos

El principal objetivo del presente Trabajo Final de Grado es analizar la dinámica costera de la localidad de Las Grutas (Río Negro), con la finalidad de comprender los procesos actuantes que modelan y producen el retroceso de los acantilados.

Otro objetivo consiste en determinar los principales factores que condicionan la estabilidad del acantilado. Además, el presente estudio busca brindar información para el manejo del riesgo costero y el ordenamiento territorial.

1.2 Materiales y métodos

Para lograr el objetivo propuesto se realizó una recopilación bibliográfica sobre la dinámica costera en general y del área de estudio en particular, logrando abarcar la caracterización física del medio y la caracterización geológica y geomorfológica, así como también generalidades de trabajos previos sobre el retroceso costero.

Los trabajos de campo consistieron en dos viajes a la zona de trabajo, donde se realizó el relevamiento con Vehículo Aéreo No Tripulado (VANT) y el levantamiento de perfiles geológicos. Se utilizaron dos VANT, uno de ala fija (Trimble Ux5) y otro de tipo helirotor (Phantom 4 Pro V2.0). El primero se usó para realizar un relevamiento fotogramétrico del área de estudio, cubriendo un área de 5,78 km², a partir de la obtención de 317 fotografías aéreas con vista cenital, tomadas a una altitud media de 414 m. El segundo se usó para relevar imágenes de la pared de los acantilados. Para lograr una precisa georeferenciación de las imágenes obtenidas mediante el VANT de ala fija, se levantaron puntos de control en superficie mediante mediciones geodésicas. Para ello se procedió a tomar 16 puntos distribuidos tanto sobre la parte alta del acantilado como sobre la plataforma de abrasión y playa (utilizando lonas de 1 x 1 m). Los puntos de control se tomaron con GPS diferencial (Trimble R3).

Las imágenes obtenidas mediante el VANT fueron procesadas mediante el software Agisoft Metashape PhotoScan V 1.2.2., donde se generó una nube de puntos densa y a partir de ella una malla, sirviendo de base para generar un ortomosaico con una resolución de 9.96 cm/px y un MDE (Modelo Digital de Elevación) con una resolución de 19.9 cm/px, con una densidad de puntos de 25.2 puntos/m², a partir de 24 puntos de control terrestres esparcidos en el área de interés. El ortomosaico obtenido se utilizó como base para la elaboración de un mapa geomorfológico de detalle utilizando el software ArcMap V 10.3.

Para el cálculo de las variaciones de los volúmenes de depósitos de playa de cada sección se utilizó el software Metashape Agisoft Profesional, usando como base los MDE generados a partir de los vuelos con VANT de diciembre del 2021 (día posterior a una tormenta del SE) y septiembre del 2022 (9 meses de recuperación de playa). Además, se utilizó el primer MDE generado para realizar perfiles perpendiculares a la costa.

Por otra parte, para medir el retroceso del acantilado, se contó con imágenes satelitales SPOT (2017) pancromáticas adquiridas mediante un convenio UNRN-CONAE, imágenes antiguas (2004) descargadas de Google Earth y fotografías aéreas del año 1969 a escala 1:70.000 adquiridas en el Instituto Geográfico Nacional y escaneadas en una resolución espacial de 1 m/px. Tanto las fotografías aéreas, como las imágenes satelitales fueron rectificadas para lograr una correcta superposición, con el fin de determinar con la mayor exactitud posible cambios ocurridos en la línea de cresta del acantilado. Para realizar la georeferenciación, el modelo geométrico elegido fue el polinomio de 3^{er} grado. Durante dicho proceso se trabajó con un error cuadrático medio (RMSE) inferior a los 1,5 m. El sistema de referencia seleccionado fue el WGS 1984 UTM con datum WGS 1984.

El cálculo del retroceso del acantilado se realizó a partir de la medición de distancias entre líneas de cresta de distintos años, uniendo con polilíneas perpendiculares las líneas de crestas de cada año con una equidistancia de 3 m y calculando a través del software ArcGIS la longitud de cada una de dichas polilíneas, procesando luego estas mediciones a través de hojas de cálculo para obtener un valor promedio de retroceso para cada sección en particular. El intervalo de tiempo considerado para realizar el cálculo de retroceso fue determinado en función de la calidad de las imágenes más antiguas posibles de utilizar, teniendo en cuenta que al ser tomadas por distintos medios (aéreas o distintos satélites) poseen cierto grado de deformación que no siempre permite una correcta superposición para realizar las mediciones anteriormente mencionadas, por lo que las imágenes seleccionadas para dicho análisis fueron las fotografías aéreas del año 1969 a escala 1:70.000 adquiridas en el Instituto Geográfico Nacional y las imágenes relevadas con VANT en diciembre del 2021.

2. ANTECEDENTES

2.1 Dinámica Costera General

La zona costera o litoral, se puede definir como la zona de transición e interacción entre el ambiente terrestre y el marino. Esta incluye tanto el sector terrestre emergido como la zona de aguas poco profundas, las playas y acantilados costeros modelados por la acción marina y las dunas costeras (Elorza, 2008).

Las costas de emersión se originan debido al levantamiento de bloques de corteza o al descenso en el nivel del mar y están formadas por depósitos sedimentarios por encima del nivel actual del mar (plataformas de abrasión, acantilados, etc.), con gran cantidad de accidentes litorales depositacionales (albuferas, cordones, deltas, etc.) (Elorza, 2008). Este tipo de costas operan como zonas de transferencia entre el continente y el mar, movilizandolos sedimentos desde los acantilados hacia la playa y mar abierto en intervalos de tiempo intermitente. La erosión y transporte del material provoca grandes cambios físicos y expone a las comunidades costeras y turistas a peligros con posibles daños a la propiedad, la infraestructura y la pérdida de vida (Violante, 2009).

La energía mecánica de las olas es el principal elemento que afecta al retroceso de las costas acantiladas (Sunamura, 1992), dicho factor es influenciado por la aparición de sedimentos sueltos en el agua de la costa, aumentando el impacto mecánico de abrasión. A pesar de ello, a medida que aumenta la carga sólida, la energía de las olas se disipa en el movimiento y la reelaboración de sedimentos, dando protección al acantilado (Violante, 2009).

La erosión basal constituye un factor crítico en la estabilidad del acantilado (Richards y Lorriman, 1987; McGrealw, 1979), así como las infiltraciones y circulación de aguas subterráneas, además de procesos que ocurren en la parte superior del acantilado (acción fluvial, remoción en masa, meteorización), contribuyendo considerablemente a los cambios costeros (Lawrence, 1994). Sin embargo, algunos de estos procesos pueden tender a la estabilización del acantilado, a partir de la conformación de un talud al pie del mismo, que lo proteja de la acción marina y detenga así el retroceso. En estos casos, el acantilado puede continuar siendo erosionado por procesos subaéreos o evolucionar a través de un proceso cíclico que implica la eliminación del talud y su redistribución por fuerzas hidrodinámicas (Violante, 2009).

Los cambios morfológicos que es posible observar en las costas de emersión son el resultado de un conjunto de factores, dentro de los cuales es posible detallar: factores litológicos (tipos de roca, estructuras sedimentarias, discontinuidades, fallas, diaclasas, etc.), meteorización (física y química); mareas; olas; formas heredadas de cambios anteriores del nivel del mar (Allison, 1989; Sunamura, 1992; Bray y Hooke, 1997).

Schillizzi *et al.* (2004), siguiendo a Ferrer Gijón (1995), contribuyeron al entendimiento de los procesos que actúan en la retracción de acantilados, determinando que los acantilados retroceden a partir de movimientos de partículas y bloques, movimientos de masas y movimientos complejos que combinan deslizamientos en masa y flujos (Fig. 2.1).

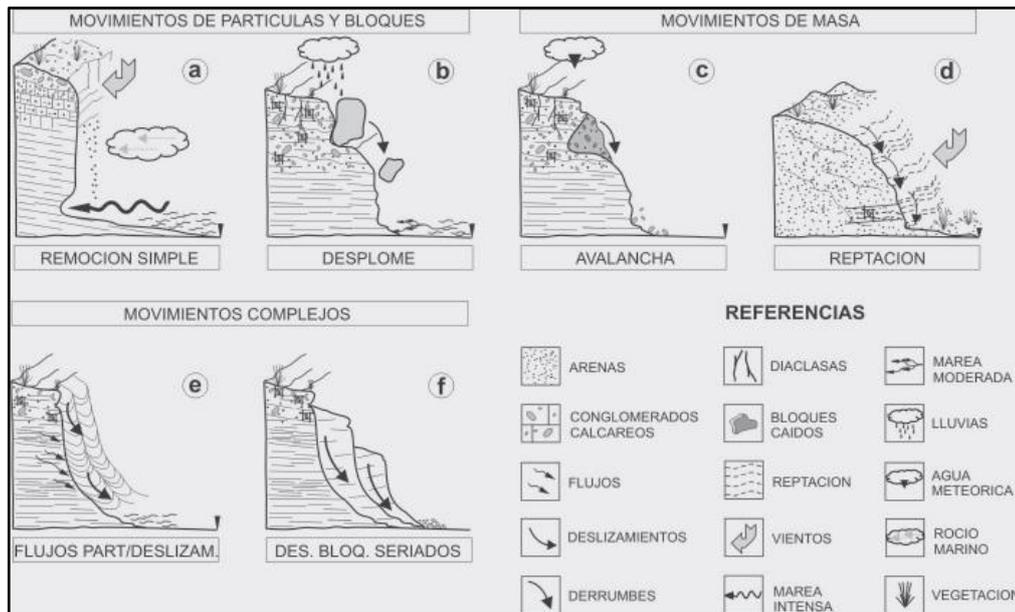


Fig. 2.1. Factores exógenos y movimientos de laderas. Tomado de Schillizzi *et al.* (2004).

Además, dividieron los factores que producen el retroceso en *condicionantes* y *desencadenantes* o *disparadores*. Los primeros corresponden a la composición litológica y debilidades estructurales (planos de estratificación, diaclasas, fracturas y fallas). Los sectores con los materiales más resistentes logran generar cabos, promontorios, o farallones de rocas aguas adentro, en cambio los sectores más débiles dan lugar a oquedades, cuevas, arcos, etc. Las rocas masivas son generalmente más resistentes que aquellas que presentan fracturas, planos de estratificación, diaclasas o fallas (Fig. 2.2).

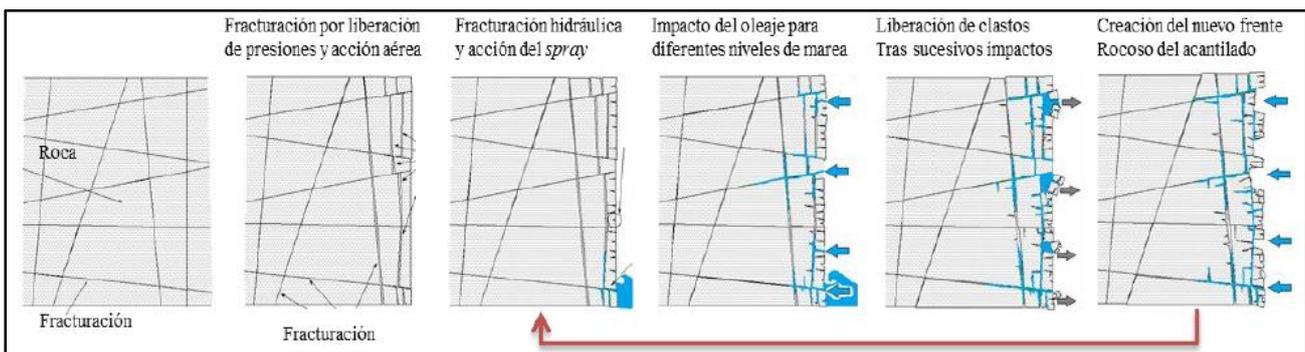


Fig. 2.2. Esquema del ciclo de liberación de material por acción marina en el frente de acantilado. Tomado de Castedo (2012).

Por otra parte, los factores *disparadores* o *desencadenantes* representan el tipo e intensidad de los agentes exógenos (dinámica marina, hidráulica continental y humectación-desección). La dinámica marina, actuante en la base del acantilado, produce la formación de molduras y de material particulado. En un segundo caso, actuando contra un frente con alternancia de bancos arenosos y arcillosos, combinado con plataformas de abrasión cortas y de gran pendiente, determina la caída de bloques, quienes protegen temporalmente la base del acantilado de la acción marina. En los casos donde los frentes presentan discontinuidades estructurales sub-verticales, la presión hidráulica generada por el choque del oleaje contra el acantilado, coloquialmente denominado efecto de “pistón marino”, produce el debilitamiento y ensanchamiento de las discontinuidades, con la consecuente caída de bloques, sin que éstos constituyan una protección basal del acantilado. La capacidad erosiva del oleaje dependerá de la dureza de las rocas, de la tasa de barrido de detritos desprendidos

desde el acantilado, la presencia o ausencia de playa, debido a que ésta actúa como disipador de energía de las olas, y la batimetría (Castedo, 2012).

Otro efecto disparador es la hidráulica continental, expresada por el movimiento de aguas de escurrimiento y de infiltración. El escurrimiento superficial es provocado mediante intensas precipitaciones, logrando generar cárcavas hacia el borde del acantilado, causando una morfología lobulada en las zonas de la cúspide del acantilado, y debilitando así los bloques subyacentes, ocasionando su caída. Por otro lado, la infiltración es producto de la escasa o nula cobertura vegetal, provocando que el agua circule subterráneamente hasta toparse con un nivel impermeable y emergiendo así sobre la pared del acantilado (Schillizzi *et al.*, 2004).

Por su parte, la humectación-desección también constituye un efecto disparador y ocurre en presencia de material pelítico provocada por la conjunción de los vientos provenientes del mar y las mareas (Celemin, 1984). De esta manera, se genera hidratación de minerales arcillosos, ocasionando la pérdida de cohesión de los niveles por microprocesos de contracción-expansión, condicionando así la verticalidad del frente del acantilado, provocando inclinación y morfología lobulada. Además, el agua meteórica causa disolución, contribuyendo a incrementar la velocidad de desagregación (Schillizzi *et al.*, 2004).

2.2 Morfología de costas acantiladas

La exposición de las rocas a fenómenos mecánicos, químicos y biológicos, generan distintos tipos de erosión, desgaste y corrosión, los cuales pueden penetrar en zonas de debilidades. Dichos procesos resultan en distintos tipos de perfiles de costa y geomorfologías, siendo algunas de estas producto particularmente de la acción marina, mientras que otras son propias del ambiente litoral (Castedo, 2012).

La concavidad o convexidad del perfil de los acantilados es controlada por las tasas relativas de erosión, resultado de procesos marinos y subaéreos, como así también por la ubicación de los estratos más resistentes en los acantilados. Un ángulo agudo en la base del acantilado indica erosión marina activa, mientras que una curva suave en la base indica que la erosión subaérea domina (Emery y Kuhn, 1982).

Perfil de costas acantiladas: Los perfiles de los acantilados costeros se encuentran relacionados a las variaciones en la litología, estructura y competencia a lo largo de su extensión. Si la erosión mecánica marina al pie del acantilado es muy intensa, puede lograr descalzar la parte inferior, dejándolo inestable y propenso al derrumbe de la sección superior (Fig. 2.3). Si la acción marina no continúa en la base, como resultado de la caída de material y acumulación, puede ocurrir la formación de una playa, dejando a la sección superior expuesta principalmente a procesos aéreos, como temporales de tormentas o fuertes marejadas, y condicionada por las propiedades geotécnicas del macizo rocoso (Castedo, 2012).

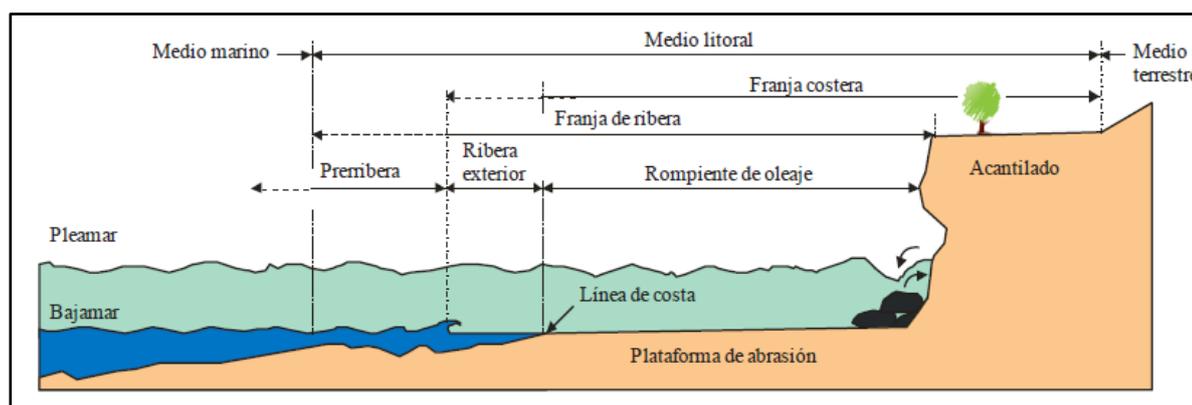


Fig. 2.3. Perfil de costas acantiladas. Tomado de Castedo (2012).

Plataforma litoral: Es la superficie erosiva que se extiende desde el acantilado hasta el límite de erosión de las olas y se forma generalmente cuando el acantilado retrocede a causa de la erosión, siendo luego modificada por la acción de las olas. Su pendiente es relativamente suave y en muchos casos casi horizontal, de ahí el término “plataforma” (Bird, 2008). Pueden presentar escalonamiento y por lo general, no suelen ser lisas. Algunas terminan en una terraza de acumulación, donde es posible el desarrollo de una playa (Castedo, 2012). Pueden clasificarse según su gradiente en: plataformas en pendiente (Tipo A); plataformas pseudo horizontales (Tipo B) y acantilado desplomado sin plataforma litoral (Tipo C) (Sunamura, 1992; Bird, 2008).

Oquedades basales: Son también conocidas como nichos basales o *notch* y son un indicador directo de la acción marina en la zona de la base de los acantilados. Estas estructuras en forma de mediacaña suelen ser más anchas que profundas e indican el nivel del mar en marea alta (Castedo, 2012).

Promontorio: Es una pequeña porción de acantilado que se desarrolla desde la costa hasta el interior del mar, formada generalmente donde al acantilado lo componen rocas resistentes por encima y por debajo del nivel del mar (Bird, 2008).

Cuevas: Generalmente se desarrollan en sectores donde la erosión marina ha penetrado zonas de debilidad del acantilado, comúnmente en acantilados que tienen gran concentración de discontinuidades (fallas o diaclasas), por lo que es poco probable que se generen en rocas débiles, dado que cualquier penetración marina desencadenaría el colapso de las mismas (Bird, 2008). También pueden darse como producto de la karstificación, que según el grado de meteorización química (disolución) pueden formar grandes cuevas de morfología y trazado muy variable, cuya penetración en el acantilado es mucho mayor que el tamaño de la entrada en el acantilado. Su origen está fuertemente condicionado por la litología (p.ej. carbonatos), así como factores estructurales (planos de debilidad) (Castedo, 2012). Es posible también que éstas morfologías se produzcan como resultado de procesos de remoción subterránea grano a grano de las partículas arcillosas, con poca o nula intervención de la disolución, dando lugar a cuevas de tubificación (“*Piping*”) (Galán y Nieto, 2015).

Playa: Son acumulaciones de arena, grava o una mezcla de ellas en estado inconsolidado, alojadas en el límite entre el mar y el continente. El origen de los sedimentos que la componen es variado, posiblemente siendo de origen eólico, fluvial, proveniente del fondo marino o de la misma erosión del acantilado. El material inconsolidado del que están compuestas actúa como amortiguador de energía que absorbe, disipa y refleja la acción del oleaje en la zona litoral (Anthony, 2005).

Dunas colgadas: Se constituyen como el resultado de un conjunto de procesos eólicos en interacción con procesos marinos, fluviales, litológicos y edafológicos. Cuando el aporte de arena es alto se forman cordones paralelos a la línea de costa, que migran lentamente hacia el continente. Si existe un obstáculo para la circulación de los vientos, como por ejemplo un acantilado, el flujo del aire se desvía generando una sombra de viento en la parte superior, donde disminuye la velocidad del viento y favorece la depositación de tamaños de grano que ya no pueden ser transportados en suspensión, dando origen a depósitos de dunas denominadas comúnmente como dunas colgadas, colgantes, dunas de obstáculo o de techo de acantilado, las cuales presentan formas irregulares y pueden ser fijadas por la vegetación (Elorza, 2008).

2.3 Antecedentes en la zona de estudio

Marco Geológico

Regionalmente las rocas más antiguas del sector corresponden a los granitos del Complejo Plutónico Paileman (Giacosa, 1997) del Carbonífero Superior-Triásico Inferior, aflorante en la zona de Piedras Coloradas, al sur de Las Grutas. Estratigráficamente por encima, se hallan las sedimentitas marinas

oligocenas superior-miocenas de la Formación Gran Bajo del Gualicho (Lizuain y Sepúlveda, 1978) cubiertas en parte por unidades litorales del Cuaternario (Pleistoceno y Holoceno) y depósitos eólicos también del Holoceno (Angulo *et al.*, 1978; Martínez *et al.*, 2001; Fucks *et al.*, 2011; Fucks *et al.*, 2012; Mouzo, 2014), estas unidades litorales corresponden a las Formaciones San Antonio y Baliza San Matías respectivamente. Por su parte, los depósitos eólicos recientes es posible hallarlos como Formación Punta Villarino (Angulo *et al.*, 1978) en sectores de la costa Rionegrina. Estas secuencias neógenas-cuaternarias representan al menos cuatro ingresiones marinas (*Marine Isotopic Stages*, MIS) correspondientes a los MIS1, MIS 5e, MIS 7 y MIS 9 (Fucks *et al.*, 2012).

Formación Gran Bajo del Gualicho (Oligoceno Sup. - Mioceno, Lizuain y Sepúlveda, 1978)

Los primeros registros sobre las sedimentitas marinas pertenecientes a la Formación Gran Bajo del Gualicho la asignan al Oligoceno Superior – Mioceno (Lizuain y Sepúlveda, 1978). Sin embargo, Zambrano (1980) y Fryklund *et al.* (1996) la extienden hasta el Plioceno, considerando a su equivalente, la Formación Barranca Final (Kaaschieter, 1965) en la Cuenca del Colorado. Este término (Formación Barranca Final) fue prescindido en los relevamientos de superficie, utilizándose el término Formación Patagonia (Stipanovic y Methol, 1972) para las sedimentitas idénticas descritas por (Gelós *et al.*, 1993) o proponiéndose un nuevo término para sedimentitas equiparables o presuntamente idénticas, aflorantes en el gran Bajo del Gualicho, Formación Gran Bajo del Gualicho (Lizuain y Sepúlveda, 1978).

La Formación Gran Bajo del Gualicho está compuesta casi exclusivamente por intercalaciones de arcillas y areniscas con colores que varían entre el pardo amarillento, pardo grisáceo y verde. Texturalmente se asocian a arcillitas arenomargosas, calcoarenosas, areniscas de grano mediano a fino, areniscas coquinoideas, arcillosas y calcáreas, presentándose en algunas oportunidades materiales tobáceos y niveles de yeso, cristalizado o pulverulento (Fucks *et al.*, 2012).

En base a las características litológicas y de acuerdo a la importancia que estas variaciones presentan en su evolución, Fucks *et al.* (2015) propusieron dividirla en tres horizontes principales, de base a techo: A, B y C. A su vez los últimos dos los diferencia en B1/B2 y C1/C2. Además, realizaron la descripción mineralógica de dichos horizontes, determinando que:

El horizonte A está constituido por Cuarzo (25%), material illítico (19%), Esmectita (10%), Plagioclasa (40%) y Microclino (6%). Por su parte, el horizonte B1 está constituido por Cuarzo (27%), material illítico (9%), Halita (12%), Plagioclasa (20%) y Microclino (8%), Dolomita (9%) y Carbonatoapatita (15%). El horizonte B2 está constituido por Cuarzo (30%), material illítico (18%), Caolinita (2%), Esmectita (7%), Plagioclasa (37%) y Microclino (6%). Por último, el horizonte C cuenta con una única descripción mineralógica, ya que Fucks *et al.* (2015) lo subdividen en C1 y C2 teniendo en cuenta que existe una diferencia en la estructuración que exhiben, presentando en algunos sectores una estructuración marcada en bloques redondeados de hasta 2 m de espesor y siendo más friable, diferenciando estas características como propias de C2, a diferencia de C1 que no las posee, por lo que litológicamente sugieren ser lo mismo, determinando que el horizonte C está constituido por: Cuarzo (26%), material illítico (15%), Esmectita (15%), Plagioclasa (Feldespato Na-Ca) (34%), Microclino (Feldespato K) (7%) y Calcita (3%).

Formación San Antonio (Holoceno, Angulo *et al.*, 1978)

Angulo *et al.* (1978) definen a la Formación San Antonio y la asignan originalmente al Holoceno, criterio compartido luego por Martínez *et al.* (2001) en la Hoja Geológica 4166-II San Antonio Oeste publicada por el Servicio Geológico Minero Argentino. Posteriormente Fucks *et al.* (2012) indicaron que dicha Formación corresponde a la ingresión del MIS5e, exhibiendo morfologías mantiformes y cordoniformes a cotas

máximas de 15 m en la zona. Posteriormente Kokot y Favier Dubois (2017) coinciden con Fucks *et al.* (2012) respecto a considerar a la terraza marina pleistocena establecida entre los 8-12 m.s.n.m como perteneciente al MIS 5.

Respecto a establecer la edad de la Formación al Holoceno (Angulo *et al.*, 1978; Martínez *et al.*, 2001; Fucks *et al.*, 2012; Kokot y Favier Dubois, 2017), extenderla hasta el Pleistoceno (Gelós *et al.*, 1992), o considerarla directamente pleistocena (Kokot y Favier Dubois, 2009), Mouzo (2014) adhiere a esta última interpretación, teniendo en cuenta las repetidas determinaciones de edades C^{14} de otros autores y su análisis sismo-estratigráfico. Concluye así, considerando pleistocenos a los depósitos en tierra firme emplazados por encima de la actual cota de alrededor de los 10 y hasta unos 20 msnm, límites superiores aproximados aceptados para las transgresiones del Pleistoceno en la zona.

En cuanto a su composición litológica, Angulo *et al.* (1978) la definen caracterizada por gravas arenosas, con clastos de rodados y con valvas de moluscos, que se distribuyen en casi todo el sector, formando acumulaciones mantiformes o cordones de playa. Por su parte Fucks *et al.* (2012) describen que estas acumulaciones coronan el acantilado de la Bajada La Rinconada (Las Grutas) con espesores que varían entre 1-1,5 m y donde se observan sedimentos arenosos alternando con gravas finas, finamente estratificadas cubiertos por arenas y limos castaños, con bivalvos como *Tangelus sp.* en posición de vida, junto a *Brachidontes Swainson*, *Amiantis Carpenter*, *Glycymeris*, *Mytllus Linné*, *Trachycardium Mörch*, *Pitar Römer*, *Tivela Link*, *Panopea Ménard*, *Ostrea Linné* y gasterópodos como *Tegula Lesson*, *Olivancillaria*, *Trophon Montfort* y *Buccinanops d'Orbigny*.

Formación Baliza San Matías (Pleistoceno, Angulo *et al.*, 1978)

El primer trabajo en presentar definiciones formales sobre esta Formación fue el de Angulo *et al.* (1978), reconociéndola en las plataformas litorales en los sectores de Piedras Coloradas - Las Grutas y asignándole una edad Pleistocena. Por su parte Fucks *et al.* (2012) coincide en esta edad asignada e indica que dichos depósitos corresponden a la ingresión MIS 7 (anterior a MIS 5e), situándose a nivel del mar y en discordancia sobre la Formación Gran Bajo del Gualicho.

Por otra parte, Mouzo (2014), sugiere nuevos reordenamientos en las edades de las unidades del Cuaternario (Fig. 2.4) proponiendo una edad holocena para esta unidad, teniendo en cuenta que los depósitos que forman la plataforma litoral al SO de Las Grutas corresponden a una “*beachrock*”, depósito de playa cementado con carbonato de calcio, de edad Holocena, teniendo en cuenta que corresponden a depósitos de playa actuales. Litológicamente consta de conglomerados bien estratificados de matriz areno-limosa, fuertemente cementados por carbonato de calcio, de color castaño oscuro a castaño amarillento, compuestos por rodados y valvas de moluscos enteras o fragmentadas (frecuentemente *Amiantis purpurata* y *Mactra sp.*). Sus estratos poseen de 20 a 50 cm de espesor, con una inclinación hacia el SE que varía entre 25-30° (Angulo *et al.*, 1978).

Depósitos eólicos recientes

Los depósitos eólicos recientes fueron descritos en parte de la costa de Rio Negro como Formación Punta Villarino por Angulo *et al.* (1978), Gelós *et al.* (1992) y Del Rio *et al.* (2004). Se componen de arenas finas a medias bien seleccionadas y se disponen como acumulaciones medianosas activas e inactivas.

En el lugar de estudio se encuentran coronando el acantilado, por encima de los depósitos de la Formación San Antonio o de la Formación Gran Bajo del Gualicho, según el sector de la costa y en muchos sectores se encuentran vegetados, evidenciando estabilidad en el tiempo. Los campos de dunas de mayores extensiones se ubican hacia el norte de la localidad balnearia (Fucks *et al.*, 2012).

Era	Periodo	Época	Unidad	
Cenozoico	Cuaternario	Holoceno	Formación Baliza San Matias	Depósitos eólicos
		Pleistoceno	Fm San Antonio	
	Neógeno	Plioceno	Formación Gran Bajo del Gualicho	
		Mioceno		
		Oligoceno		
	Paleógeno			

Fig. 2.4. Cuadro cronoestratigráfico con las unidades aflorantes en la zona de estudio considerando los aportes de Zambrano (1980), Fryklund *et al.* (1996) y Mouzo (2014).

Caracterización geotécnica

Kokot *et al.* (2013), a partir de relevamientos realizados en la Bajada “La Rinconada” indican que el sector exhibe un acantilado de tipo activo, afectado por cuatro familias de discontinuidades, además de la estratificación primaria subhorizontal. Estas familias afectan el sector centro y superior del acantilado (Kokot *et al.*, 2013), además de encontrarse en la plataforma litoral, indicando que no son diaclasas de relajación. En la Tabla 2.1 se indica la orientación del acantilado y de las familias de discontinuidades, y en la Fig. 2.5 se representan en una red estereográfica.

Tabla 2.1.- Orientación del acantilado y principales discontinuidades presentes en el acantilado en el sector de La Rinconada. Tomado de Kokot *et al.* (2013).

Discont / Acant	Azimut (°)	Ī (°)
Acantilado	250	90
Familia 1	214	90
Familia 2	112	90
Familia 3	184	90
Familia 4	131	90

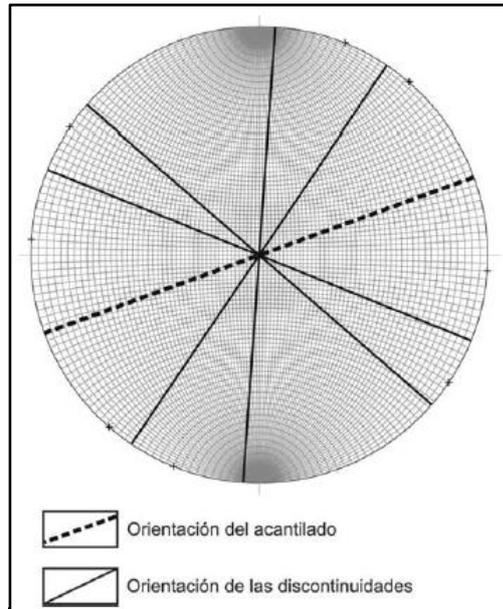


Fig. 2.5. Representación estereográfica del acantilado y principales discontinuidades del acantilado. Tomado de Kokot *et al.* (2013).

Acción mecánica del mar (olas y mareas)

Existen distintos sectores de los acantilados en los que se presentan en mayor o menor intensidad y predominancia los distintos procesos erosivos. En algunos se evidencia una marcada tendencia a la formación de cavernas, mientras que en otros se exhiben únicamente procesos erosivos por caída del frente del acantilado e incluso existen sectores donde el mar llega esporádicamente (Fucks *et al.*, 2015). La acción mecánica diaria del mar produce abrasión de los niveles ubicados al pie del acantilado, evidenciados en molduras de rompientes (Gelós *et al.*, 1992), en los bloques caídos en la costa y en la base de las cavernas (Fig. 2.6). Por su parte, la plataforma de abrasión se desarrolla desde la base del acantilado y en forma discontinua, evidenciando erosión con rasgos como marmitas y canales sinuosos perpendiculares a la costa (Fucks *et al.*, 2015).

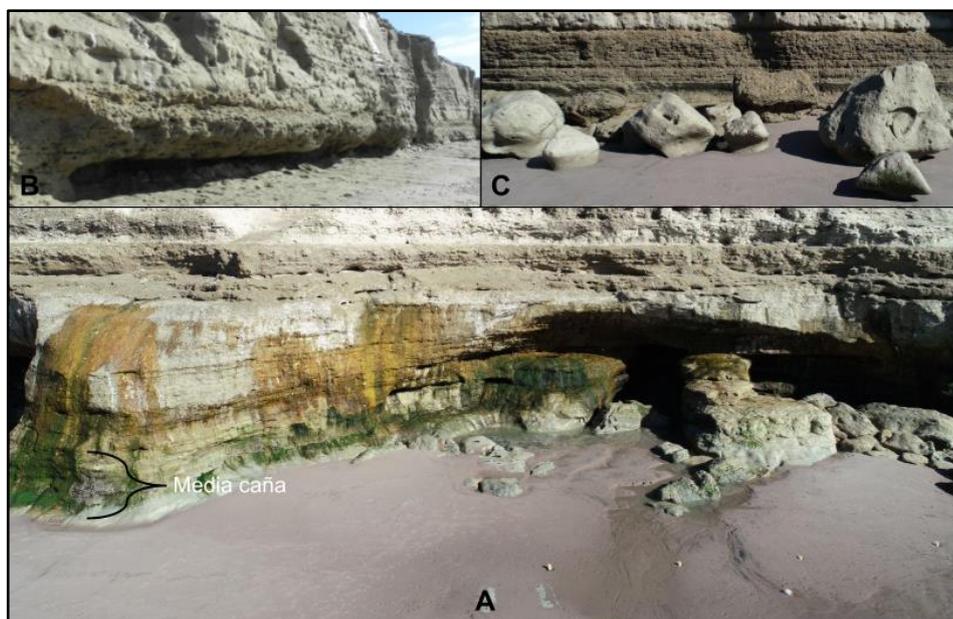


Fig. 2.6. Erosión producto de la acción mecánica del mar. (A) Base del acantilado en la zona de las cuevas. (B) Base del acantilado en la zona de La Rinconada. (C) Bloques en la zona de la Bajada Los Acantilados.

Dinámica costera local

El estudio del retroceso costero reviste gran importancia teniendo en cuenta que es un gran problema cuando es enfocado desde una perspectiva humana, ya que este proceso ocurrido a lo largo de vastas costas urbanizadas del mundo, resulta en una progresiva desvalorización e incluso pérdida de las propiedades. Un claro ejemplo de costas acantiladas que denotan una clara tendencia erosiva es la localidad de Las Grutas, Río Negro (Genchi *et al.*, 2013).

El análisis del retroceso de la línea de costa en la zona de estudio ha tenido múltiples aportes por parte de quienes analizaron dichos cambios a partir de distintas herramientas y metodologías, estimando en algunos casos una velocidad de retroceso, como es el caso de Fucks *et al.* (2011); Kokot y Chomnalez (2012); Fucks *et al.* (2015). En el estudio relevado por Fucks *et al.* (2011) se estimó una velocidad de retroceso del acantilado a partir de la comparación de fotografías aéreas de 1960 y 1997, determinando que los máximos retrocesos se dan entre las Bajadas 0 y 1, con valores puntuales máximos de 21 cm/año por desplome del techo de cavernas, acumulando un total de 8 metros de retroceso en 38 años. Además, consideraron que el resto del frente costero de la zona de estudio mantiene tasas de retroceso muy bajas y puede considerarse relativamente estable, determinando según parámetros comparativos de bibliografía internacional, que la erosión en los acantilados de Las Grutas es baja.

Por su parte, Kokot y Chomnalez (2012), a través de la comparación de fotografías aéreas e imágenes satelitales georreferenciadas analizaron el grado de retroceso de la línea de costa en Las Grutas en un período de tiempo comprendido entre 1969 y 2008. Sus resultados destacan una tendencia a la reducción de los campos de dunas, al retroceso de las plataformas litorales y de la línea de costa. Esta última, presentando una tasa de erosión media total de 1,50 m en el lapso de 39 años. Sin embargo, los sectores céntricos y norte fueron más afectados, alcanzando hasta 3 m de retroceso en ese período. Para la georreferenciación en dicho trabajo el modelo geométrico elegido fue el Polinomial 2º, con un error cuadrático medio (RMS) inferior a 0,5 m. El sistema de referencia seleccionado fue la proyección Conforme Cilíndrico Gauss Kruger con Datum WGS84. Definieron una categoría de proyección propia al reproyectar las escenas al meridiano central de la zona de estudio. Además, efectuaron mosaicos de imágenes para obtener una única imagen multiespectral de alta resolución espacial (1 m) de toda el área de interés.

En cuanto al trabajo realizado por Fucks *et al.* (2015), dicho estudio se basó en el análisis y tratamiento de fotografías aéreas de distintas épocas (1962, 1977 y 1999) a escalas 1:30000, 1:21000 y 1:31000, con ampliaciones a escala 1:15000, además de imágenes *QuickBird* (2003, 2004, 2009), permitiendo comparar la posición y accidentes de la línea de costa e intentando establecer cambios a lo largo del tiempo. En su análisis, también estimaron que los mayores retrocesos se dan entre las Bajadas 0 y 1 y que los mismos corresponden al desmoronamiento puntual de las cavernas. Si bien la comparación no fue mediante el correcto solapamiento de imágenes dado que no pudieron rectificar las fotografías por falta de puntos de control debido a la rápida urbanización de la ciudad, impidiendo esto realizar una corrección geométrica adecuada, los autores realizan su estimación en base a la comparación visual de las fotografías en puntos conspicuos, observando sectores con una escasa variación en la forma de las estructuras, dando indicios de una estabilidad relativa durante el período analizado, mientras que también pudieron establecer que existen sectores puntuales donde pudieron estimar retrocesos de 1-2 m en los últimos 50 años, con hasta 3 m en sectores puntuales (centro y norte), siendo coincidentes con otros trabajos realizados en la zona por Kokot y Chomnalez (2012).

El estudio en detalle de la dinámica costera es una herramienta valiosa a la hora de analizar la expansión urbana local, promoviendo la planificación urbana como acción preventiva de catástrofes naturales producto del retroceso de los acantilados en las zonas urbanas. El ordenamiento territorial es un instrumento de gestión

que permite definir áreas del territorio que se destinarán a distintos usos, en concordancia con los diferentes intereses y necesidades de la sociedad, procurando también la conservación del ambiente (Toffani, 2018). Desde la década de los '60, se ha registrado un gran avance del turismo hacia los espacios litorales con la consiguiente urbanización, en su mayoría en forma espontánea y descontrolada, sin las debidas regulaciones ambientales y sin un adecuado ordenamiento espacial territorial y urbano (López *et al.* 2012).

2.4 Características físicas del área de estudio

Clima

La temperatura media anual analizada para el período 1992-2008 fue de 14,9 °C, con valores mínimos medios para el mes de julio de 7,2 °C y máximos medios para el mes de enero de 22,9 °C (Fucks *et al.*, 2011).

Por su parte, las precipitaciones medidas para el mismo período, indican valores medios anuales de 287,3 mm, siendo la estación más lluviosa el otoño y la menos lluviosa el invierno (Fucks *et al.*, 2011).

Un factor importante a tener en cuenta al estudiar la erosión del acantilado, es la torrencialidad, debido a su contribución a la generación de cárcavas y sus efectos sobre los bloques diaclasados. Cabe destacar que, durante los meses de verano, con mayor concurrencia turística, las precipitaciones pueden presentar eventos de gran magnitud. Para el período 1992-2008 se registraron las mayores precipitaciones diarias en los meses de diciembre, enero y febrero (Fucks *et al.*, 2011). A pesar de que la importancia de los eventos de torrencialidad en la morfología de los acantilados es poco conocida, debe tenerse en cuenta que las grandes tormentas debilitan los acantilados y aumentan la probabilidad de caídas de rocas, incluso algunos días luego de la tormenta (Fucks *et al.*, 2011).

Respecto a los vientos, su dirección predominante anual es NO. En los meses estivales la dirección predominante es SE, seguido por los vientos del NO (Fucks *et al.*, 2011; Fig. 2.7). La velocidad media anual del viento es 5,2 m/s (1961-2000). La estación estival es la que posee mayor velocidad media mensual. Las mayores velocidades provienen del O (primavera y verano) y S (otoño e invierno). La calma posee una frecuencia de ocurrencia media anual del 8% con predominio en el otoño y el invierno (Genchi, 2012).

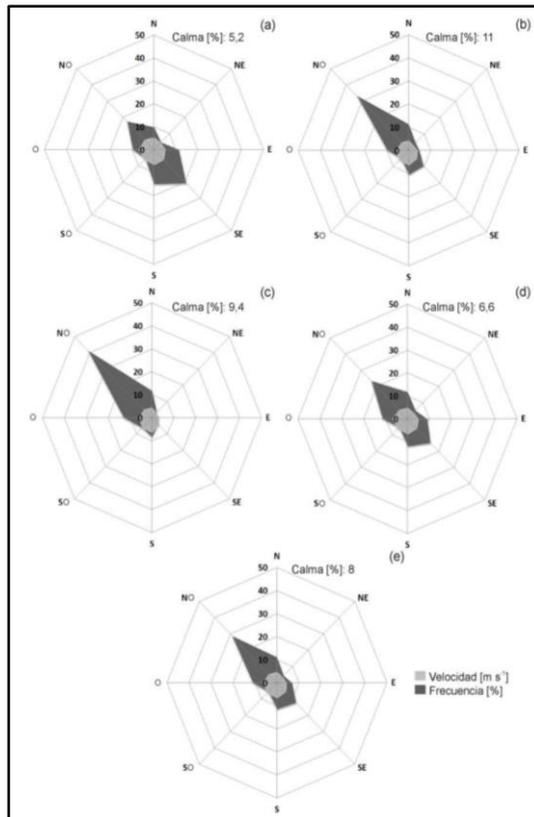


Fig. 2.7. Velocidad y dirección del viento medio mensual por estación (1991-2008). (a) Verano; (b) Otoño; (c) Invierno; (d) Primavera; (e) Anual. Fte. SMN. Tomado de Genchi (2012).

Características de la marea astronómica

El régimen de la marea astronómica en el Golfo San Matías es semidiurno. Generalmente se observan dos pleamares y dos bajamares diarias, sin diferencias significativas entre alturas de pleamares consecutivas y bajamares consecutivas (Fucks *et al.*, 2011). La marea astronómica produce cambios diarios sobre el nivel del mar que varían entre los 6 y 9 metros de amplitud.

Otros parámetros que caracterizan la marea astronómica son la pleamar astronómica más alta (*Highest Astronomical Tide*, HAT), la bajamar astronómica más baja (*Lowest Astronomical Tide*, LAT) y la amplitud extrema. El HAT es aceptado para el planeamiento costero como el lugar más bajo para la línea de costa. Los valores para el Puerto de San Antonio Este, también válidos para Las Grutas corresponden a 9,74 m para el HAT, 0 m para el LAT y 9,57 m para la amplitud máxima, todos referidos al cero que pasa a 4,75 m por debajo del nivel medio (Fucks *et al.*, 2011).

Ondas de tormenta

Las ondas de tormenta son variaciones del nivel del agua producto de los cambios bruscos de presión atmosférica y principalmente por efecto de arrastre del viento. Estas ondas modifican la marea astronómica ocasionando inundaciones o bajantes. Las más importantes ocurren en regiones relativamente poco profundas, cuando el viento sopla durante varios días y sobre superficies extensas (Fucks *et al.*, 2011).

Una forma de calcular la onda de tormenta es calculando la diferencia entre la altura horaria de marea observada y su correspondiente valor predictivo de la marea astronómica. Los valores positivos serán los que originen ondas de tormenta causantes de inundaciones y erosión costera, mientras que los negativos originarán ondas de tormenta causantes de bajantes. Cuando existe coincidencia de alturas máximas de marea

astronómica con perturbaciones excepcionales debidas a ondas de tormenta, da origen a valores extremos de mareas. Para la zona de estudio Fucks *et al.* (2011) indican que no existen suficientes observaciones de mareas como para estudiar las ondas de tormenta, pero de acuerdo a la información disponible, es posible esperar que las ondas de tormentas positivas y negativas puedan alcanzar 1 m de altura.

Olas

Teniendo en cuenta que no hay disponibilidad de mediciones directas de olas, Fucks *et al.* (2011) utilizaron el modelo SWAN (*Simulating Waves Nearshore*) Cycle III versión 40.31 para simular la altura, período y dirección de olas en el área para obtener estimaciones de los parámetros principales del oleaje. SWAN es un modelo numérico utilizado para estimar parámetros de olas especialmente en aguas someras costeras a partir del viento y la batimetría. El modelo se basa en la ecuación de balance de acción de las olas (*wave action*) y considera fuentes y sumideros.

A partir de los parámetros de olas simulados, con 8.778 valores horarios de alturas significativas (H_s), direcciones de incidencia y períodos del pico espectral (T_p) correspondientes al punto “boya Las Grutas”, los autores confeccionaron las distribuciones bidimensionales H_s - T_p para cada una de las ocho direcciones principales (N, NE, E, SE, S, SO, O, NO). En los gráficos de la Fig. 2.8, los contornos diferenciados con líneas punteadas corresponden a frecuencias de ocurrencia cero, por lo tanto, encierran pares de valores posibles para alturas y períodos de ola. Es posible observar en dicha figura también, que las direcciones de menor ocurrencia de oleaje corresponden a las NE y E (menos de 500 eventos horarios por año para cada una) siguiéndole las direcciones N, NO, SE y S, con cerca de 1000 eventos cada una. En cuanto a las direcciones de mayor frecuencia de oleaje, son las SO y O, sumando entre ambas cerca de 4.000 eventos horarios anuales.

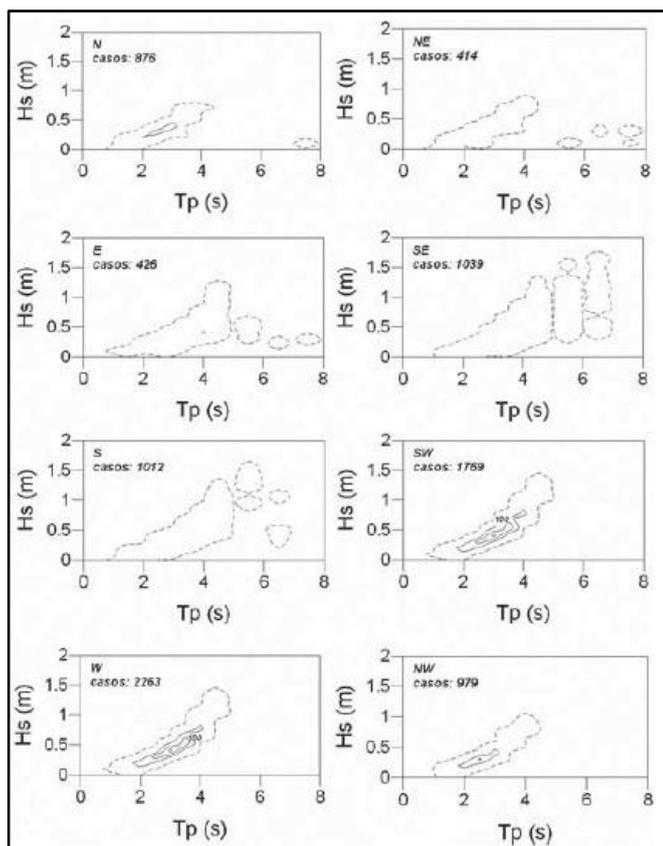


Fig. 2.8. Diagramas bidimensionales direcciones realizados con valores horarios H_s y T_p para Las Grutas en el año 2000. Tomado de Fucks *et al.* (2011).

Escurrecimiento superficial

Genchi (2012) realizó un estudio sobre las cuencas que atraviesan la localidad de Las Grutas, identificando dos sistemas fluviales exorreicos denominados Cuenca Norte (CN) y Cuenca Sur (CS) (Fig. 2.9). Las cuencas poseen un área de drenaje pequeña (CS= 11,7 km²) a muy pequeña (CN= 8,2 km²) y poseen formas elípticas a circulares.

La red hidrográfica está compuesta por cauces generalmente estrechos, cuyo ancho en la desembocadura alcanza los 15 m. Los segmentos de órdenes inferiores se caracterizan por ser frecuentemente ocasionales (Genchi *et al.*, 2011). En otros casos, la red consiste de cauces cubiertos en gran parte o totalmente por sedimentos cuaternarios derivados de unidades adyacentes e infrayacentes. Según Genchi (2012), el diseño de la red de drenaje es dendrítico en ambas cuencas. La red fluvial se asocia a una estructura suave con capas horizontales representada por los depósitos coluviales holocénicos y las sedimentitas marinas y fluviales terciarias (Martínez *et al.*, 2001).

Las inundaciones, producto de la acción conjunta de abundancia e intensidad de la precipitación y humedad del suelo, sumado a la antropización en el tramo inferior de las cuencas, principalmente en la CN, hacen que resulte clave el conocimiento de la respuesta hidrogeológica de las cuencas, en particular del escurrecimiento superficial, en relación a los eventos de precipitación máximos (Genchi, 2012).

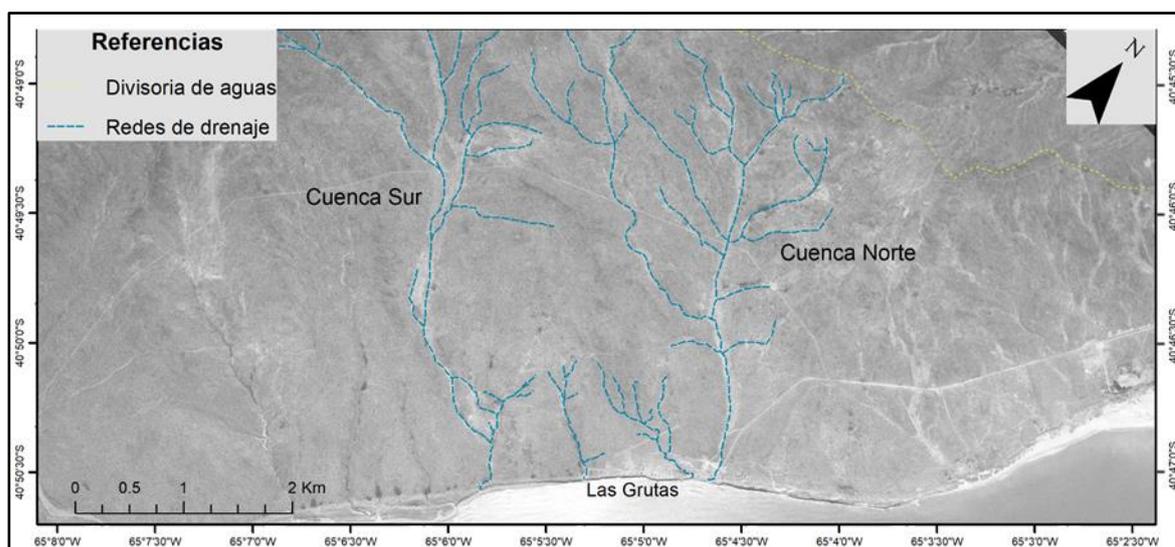


Fig. 2.9. Cuencas hidrográficas que interceptan la localidad de Las Grutas. La imagen de base corresponde a un fotograma del año 1969 adquirido del IGN.

Escurrecimiento Subterráneo

En los acantilados de la zona de estudio es posible observar extensos sectores con descargas de aguas subterráneas. Estas surgencias no son constantes a lo largo de los acantilados, siendo más importantes en el sector central de la zona de estudio.

Las características litológicas de la Formación Gran Bajo del Gualicho y la pendiente local, controlan la circulación de las aguas freáticas. Fucks *et al.* (2015) interpretan que existe un nivel en la base del acantilado que es impermeable y funciona como piso del escurrecimiento, sobre el cual se deposita un nivel que exhibe

estructura lenticular y ondulítica y una textura areno arcillosa, al cual se lo identifica como acuífero. La estructuración de este nivel deriva en la concentración del flujo subterráneo a lo largo de las discontinuidades, erosionándolas y ampliándolas, desalojando los granos en un proceso conocido como “*sapping*” (Higgins, 1982; Howard y McLane, 1988). Mediante procesos químicos el agua subterránea puede disolver granos inestables o cementos químicos de las rocas que conforman el acantilado, logrando desestabilizarlo (Turner, 1981).

Debido a las características genéticas de la roca, al circular el agua por ella, disuelve y se carga de componentes salinos que, al llegar a la zona de descarga, debido al cambio de las condiciones físico-químicas, produce la precipitación de espeleotemas en forma de rosetas, las que forman una capa que cubre gran parte del frente de los acantilados en algunos sectores (Fig. 2.10) (Fucks *et al.*, 2015).

Por su parte, Bonuccelli *et al.* (2021) sugieren que a partir de la gran circulación de aguas subterráneas cargadas de materia orgánica (producto la infiltración de residuos líquidos de origen doméstico) ocurren procesos de karstificación, ya que dichas aguas cuentan con la acidez suficiente para producir disolución de la roca carbonática que se dispone en el subsuelo como acuífero. A partir de esto, los autores sugieren que las cuevas o grutas expuestas en ciertos sectores de la costa, podrían ser producto de dicho proceso.



Fig. 2.10. Espeleotemas en el frente del acantilado.

El contacto entre el nivel base determinado como impermeable y el suprayacente determinado como el acuífero, altamente friable por efecto de la disolución y por la presión hidráulica del agua de escurrimiento, es diariamente atacado por las olas en algunos sectores de la costa, mientras que en otros sectores, este mismo contacto sólo es atacado durante mareas mayores. Dicho contacto funciona como un plano de escurrimiento debido a las diferencias de petrofísicas entre ambas facies, haciendo que el agua que fluye por el nivel permeable, surja en dicho contacto, por efecto de la impermeabilidad del nivel inferior. La exposición de este plano a la acción marina, genera una línea de debilidad, donde se producen oquedades que ante el impacto de las olas se transforman en cuevas y grutas de diversos tamaños. En función del buzamiento de este plano, un alto porcentaje de flujo subterráneo se dirige hacia el sector comprendido entre Bajada “La Rueda” y Bajada 1, lo que se manifiesta en un flujo constante de agua en la zona de cavernas del sector central, evidente en las filtraciones y goteos permanentes de los techos de las grandes cavernas (Fucks *et al.*, 2011).

A partir de fotografías históricas (1969) y relatos de pobladores antiguos, se revela que en esa fecha y con una población minúscula, el nivel permeable se mantenía relativamente humectado, aunque no con los niveles actuales (Fucks *et al.*, 2015). Estudios de estas aguas indican altas concentraciones de Enterococos, Nitritos y Nitratos, lo que significa que las aguas cloacales contribuyen en parte a la descarga (Fucks *et al.*, 2011).

3. RESULTADOS

3.1 Geología del área de estudio

La litología que presentan los acantilados está representada principalmente por afloramientos de la Formación Gran Bajo del Gualicho, cubiertos irregularmente por depósitos eólicos recientes y afloramientos correspondientes a depósitos litorales, dentro de los cuales se encuentran la Formación San Antonio y la Formación Baliza San Matías. Por su parte, los afloramientos que componen a las plataformas litorales (NE y SO) corresponden a la Formación Gran Bajo del Gualicho y a la Formación Baliza San Matías, respectivamente. Los sectores delimitados entre ambas plataformas litorales, son cubiertos por depósitos de playas actuales que se extienden desde el pie del acantilado hasta el límite con el mar (Fig. 3.1).

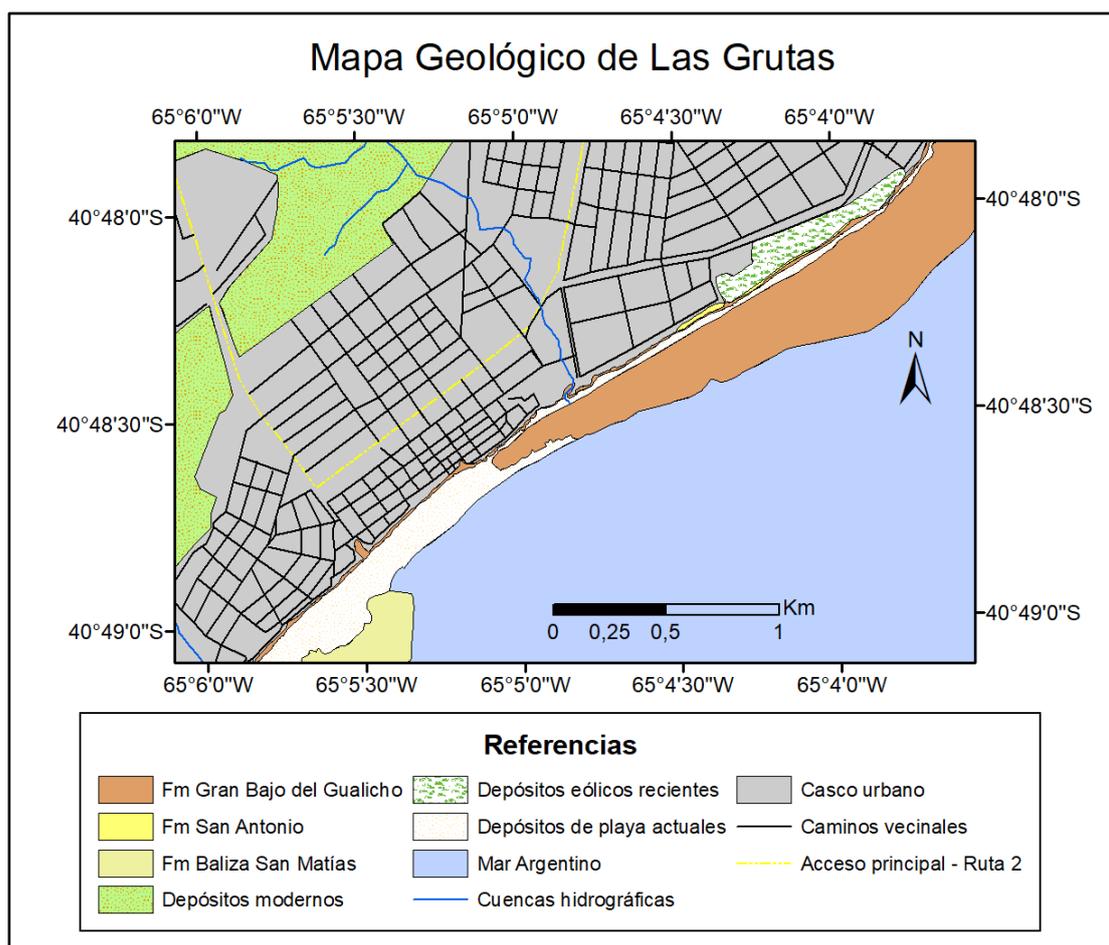


Fig. 3.1. Mapa geológico de Las Grutas. Se exhiben las principales formaciones y su distribución en la zona de estudio.

Formación Gran Bajo del Gualicho (Oligoceno Sup. - Plioceno)

En el presente trabajo se utilizó la división propuesta por Fucks *et al.* (2015) en base a las características litológicas teniendo en cuenta la importancia que estas variaciones representan en su comportamiento, considerándolas como facies, de base a techo: FA, FB1, FB2, FC1 y FC2 (Fig. 3.2).

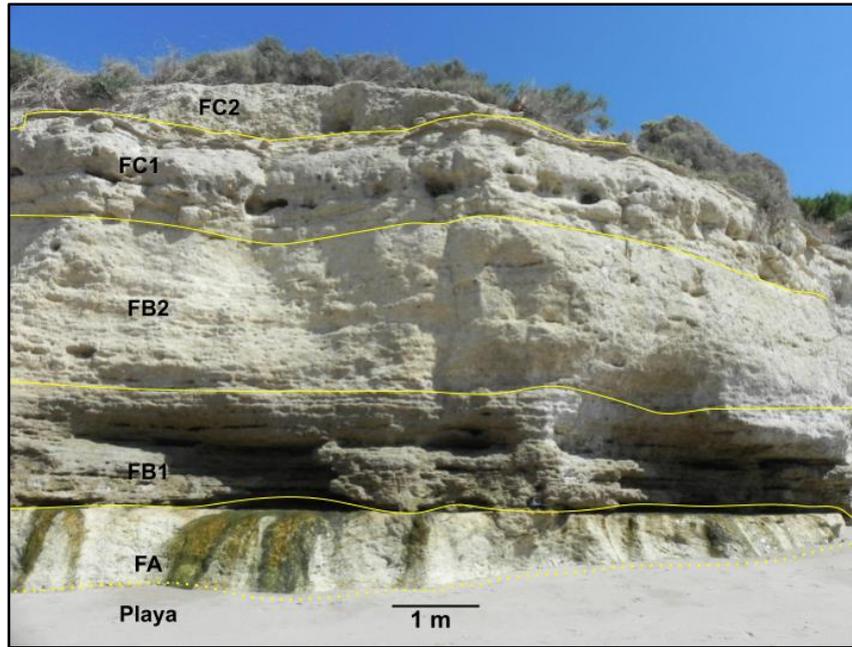


Fig. 3.2. Fotografía de los acantilados con la diferenciación en facies de la Formación Gran Bajo del Gualicho.

Facies FA

Se compone por un banco arcilloso, masivo y compacto, de color verde claro a verde amarillento, presentando en su mayor espesor 1,5 m de potencia. Presenta diaclasas verticales en muchas ocasiones cementadas por yeso.

Facies FB

Este nivel exhibe espesores promedios de 4 m, en discordancia sobre FA. A partir de sus características litológicas y estructurales es posible subdividirlo en las facies FB1 y FB2.

La facies inferior (FB1) está constituida por una arenisca limosa a arcillosa, de color castaño amarillento, exhibe una fina estratificación lenticular y ondulítica con espesores medios de 2 a 3 metros. En algunos sectores puede exhibir signos de bioturbación, con y sin rellenos, que se disponen en forma generalmente transversal a la estructura. En algunos sectores aislados se observan fragmentos de conchillas, concreciones de MnO milimétricas y aislados clastos irregulares de algunos centímetros de diámetro. Esta facies, además de estar presente en el acantilado, conforma la plataforma litoral NE del área de estudio (Fig. 3.3).

La facies FB1 pasa de manera gradual a la facies FB2, compuesta por una areno-arcillita, castaño amarillento a amarillento, con una gran cantidad de bioturbaciones, tanto rellenas como vacías, dispuestas en distintas orientaciones y de variadas dimensiones, como así también concreciones silíceas de forma cilíndrica de 5 a 6 cm de diámetro y alargadas de hasta 30 cm (Fig. 3.4). La intensa bioturbación ha dado como resultado un material muy removido, logrando que la estructura original que caracteriza a FB1, esté prácticamente ausente.

Facies FC

Se compone de una arenisca fina a muy fina, bien seleccionada, levemente estratificada, moderadamente cementada, con un espesor que aumenta hacia el NE, con alrededor de 2 m en el sector sur y centro y más de 8 m en el sector norte. Exhibe un color amarillento y algunos clastos milimétricos (tamaño conglomerado fino) dispersos. El contacto en su base posee, en gran parte de las exposiciones, gruesas concreciones silíceas. Estas concreciones se involucran espacialmente con galerías de thalassionoides con diámetros que superan

los 5 cm. Presenta superficies ondulantes rellenas con yeso, de escasos mm de espesor, pero de varios metros de continuidad lateral.

En algunos sectores del acantilado, este material presenta una estructuración marcada en bloques redondeados de hasta 2 m de espesor, más friable, dando lugar a que en la actualidad existan procesos de bioerosión (nidadas de loros barranqueros) y caída de detritos. En función de estas características, es posible subdividir la facies FC en FC1 y FC2 diferenciadas principalmente por la masividad de la sección inferior y la mayor estructuración en bloques del horizonte superior.



Fig. 3.3. Vista en detalle de la laminación ondultfca y lenticular presente en FB1.

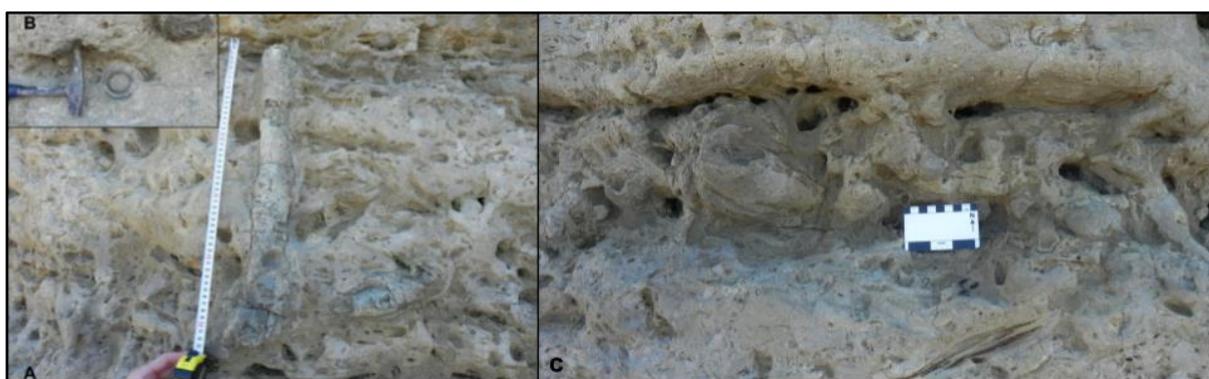


Fig. 3.4. (A) Vista en detalle de las galerías silíceas (thalassinoides) y (B) Vista perpendicular de las galerías, ambas estructuras presentes en la FB2; (C) Vista en detalle de las demás bioturbaciones presentes en FB2.

Formación San Antonio (Pleistoceno)

La Formación San Antonio se ubica en discordancia sobre la Formación Gran Bajo del Gualicho de manera discontinua, coronando los acantilados en el sector centro y por debajo de depósitos eólicos modernos en el norte de la zona de estudio, aflorando principalmente entre el denominado “Drenaje Pewans” hasta La Rinconada. La componen facies arenosas y conglomerádicas, finamente estratificadas, cubiertas por arenas y limos castaños (Fig. 3.5). Incluyen valvas de moluscos como bioclastos. Su espesor varía entre 1 y 1,5 m, acuñaándose hacia el Sur.

Formación Baliza San Matías (Holoceno)

Por encima de la Formación Gran Bajo del Gualicho se deposita en discordancia la Formación Baliza San Matías, conformando la plataforma de abrasión SO del balneario, compuesta por conglomerados

polimícticos, clastos soportados de muy mala selección (entre 1 y 8 cm), matriz areno-limosa con una marcada estratificación y cemento carbonático. Posee entre 20 y 50 cm de espesor, con una inclinación hacia el SE entre 25° - 30°. Contiene bioclastos compuestos por valvas de moluscos enteras o fragmentadas y su coloración varía entre castaño oscuro a castaño amarillento (Fig. 3.6).

Depósitos eólicos recientes (Holoceno)

Coronan el acantilado en la zona de estudio, por encima de los depósitos de la Formación San Antonio o de la Formación Gran Bajo del Gualicho, según el sector de la costa, depósitos eólicos recientes (arenas no consolidadas), que en muchos sectores se encuentran vegetados (Fig. 3.7). Los campos de dunas de mayores extensiones se ubican hacia el norte de la localidad balnearia, entre el denominado barrio “Golfo Azul” hasta La Rinconada.



Fig. 3.5. Afloramiento de la Formación San Antonio en cercanías a La Rinconada.



Fig. 3.6. Afloramiento de la Formación Baliza San Matías en la plataforma litoral SO de Las Grutas.

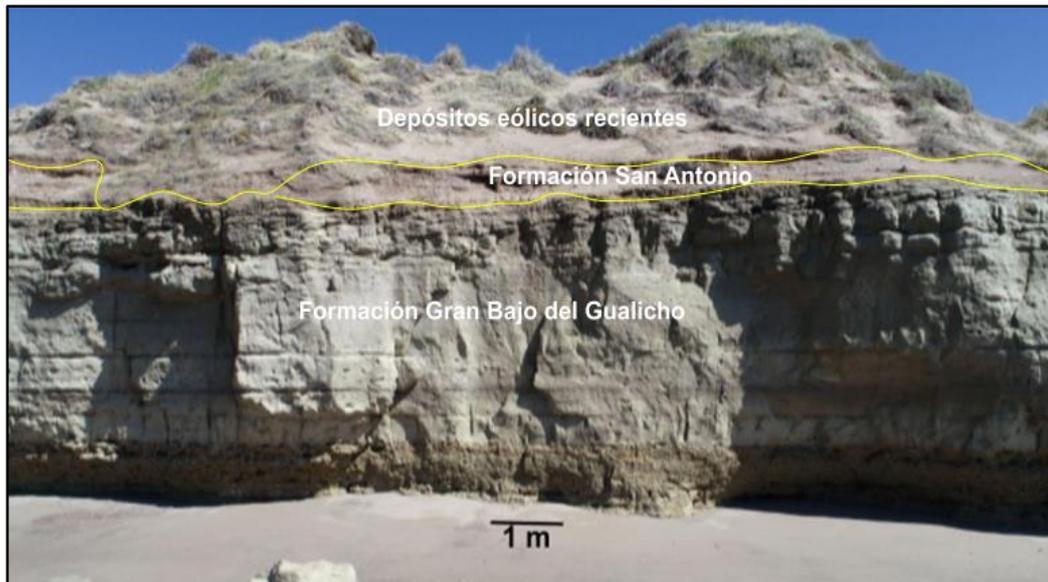


Fig. 3.7. Depósitos eólicos recientes coronando el acantilado en cercanías a La Rinconada.

Depósitos de playa actuales (Holoceno)

Cubren parte de la zona baja de la franja costera, extendiéndose desde el pie del acantilado hasta el límite con el mar y abarcando todo el espacio comprendido desde la plataforma litoral NE hasta la SO. Presenta su mayor expresión en el sector central de la franja costera. Se compone de arenas con gran contenido de cuarzo, con predominio de granulometrías medias a finas, moderadamente seleccionadas y de coloración pardo grisáceo. Ocasionalmente es posible encontrar clastos redondeados y bioclastos tamaño conglomerado.

3.2 Geomorfología del área de estudio

A partir del relevamiento con VANT se obtuvo un ortomosaico con una resolución de 9.96 cm/px. (Fig. 3.8) y un modelo digital de elevación (MDE) con una resolución de 19.9 cm/px. (Fig. 3.9).

Sobre el ortomosaico, y con apoyo de relevamientos de campo, se realizó un mapa geomorfológico de detalle del área (Fig. 3.10). En él se incluyen las geformas que se describen a continuación.

Plataforma litoral: Siguiendo la clasificación de Sunamura (1992), la baja pendiente y su terminación en escarpa hacia el mar permiten clasificar la plataforma en el área de estudio como tipo B. La misma no es continua a lo largo de la franja costera (Fig. 3.11) y es posible diferenciarla en una plataforma SO y en una NE. En la Figura 3.12 es posible observar a partir de un perfil de elevación paralelo a la línea de costa dicha discontinuación y la variación en las altitudes de ambas plataformas litorales.

La plataforma SO está compuesta por la Formación Baliza San Matías y aflora a una distancia de unos 150 m desde el pie del acantilado, dando lugar así a la formación de una playa entre ambos. Posee una extensión de unos 250 m hasta la rompiente de olas y es interrumpida lateralmente a la altura de la Bajada 3 por depósitos de playa que se extienden hasta cercanías de la Bajada 1. Cabe destacar que en este sector de playa es posible observar luego de eventos de tormenta, la presencia de una plataforma de abrasión conformada por la facies FA de la Formación Gran Bajo del Gualicho, que permanece cubierta por sedimentos de playa durante la mayor parte del año, excepto luego de eventos extraordinarios (sudestadas) que remueven grandes volúmenes de arena (Figs. 3.13, 3.14).

Por su parte, la plataforma litoral NE aflora a unos 120 m hacia el NE de la Bajada 1, en este caso conformada por la facies FB1 de la Formación Gran Bajo del Gualicho, diferenciándose así de la plataforma litoral SO. Además, a diferencia de su equivalente más austral, en este sector exhibe una longitud máxima de 300 m y

una menor distancia con el acantilado, dejando lugar a una playa acotada entre ambos, con una extensión aproximada de unos 15 m.



Fig. 3.8. Ortomosaico de la franja costera de Las Grutas correspondiente al año 2021.

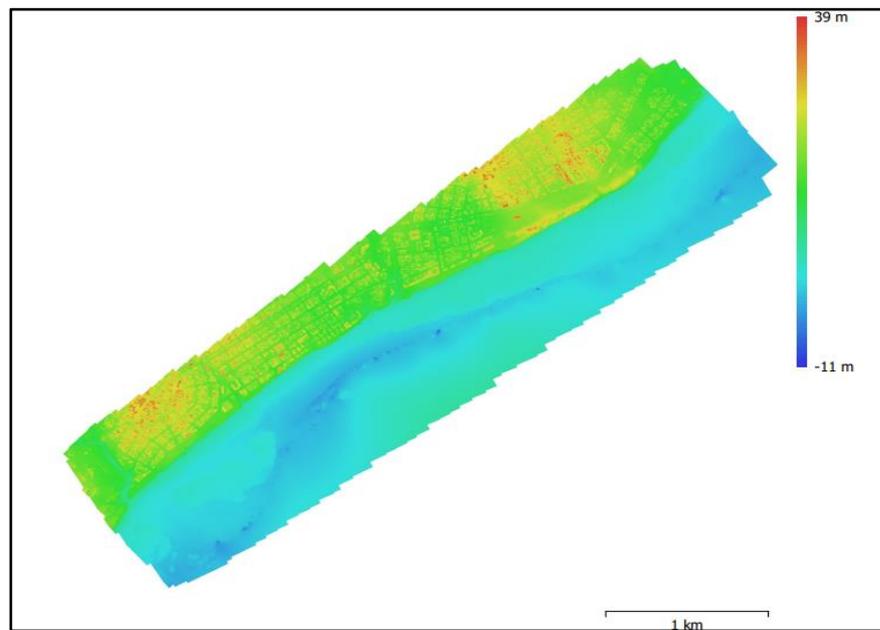


Fig. 3.9. Modelo Digital de Elevación de la zona de estudio.

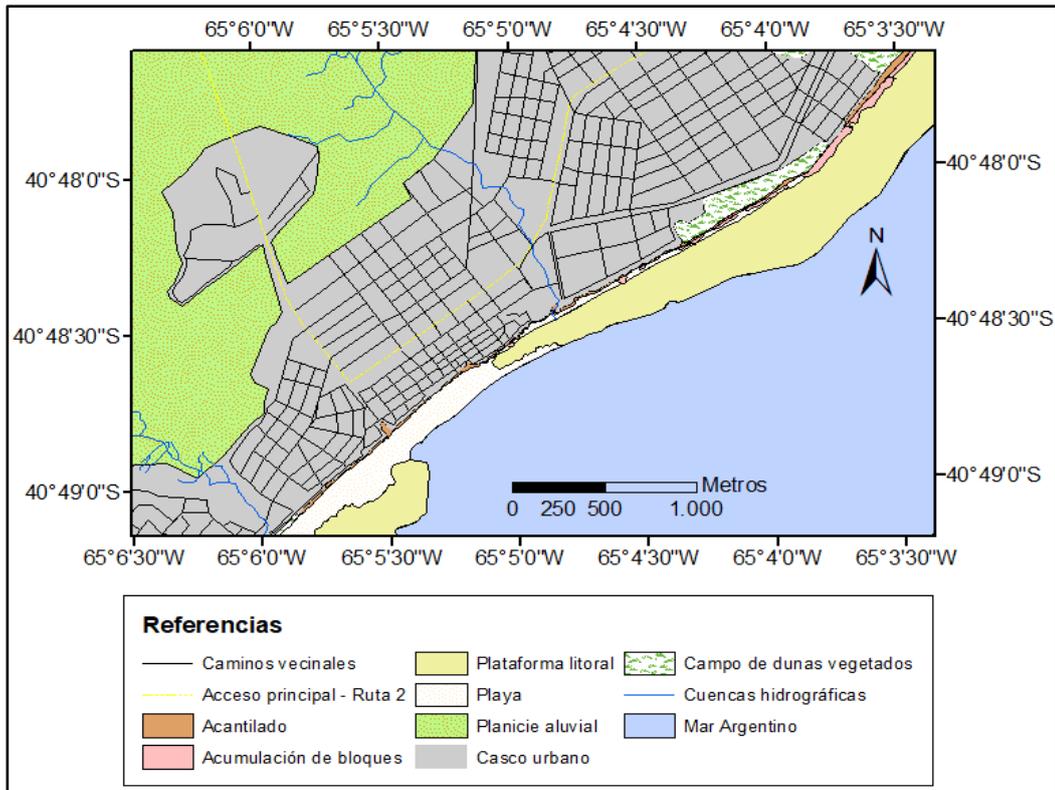


Fig. 3.10. Mapa geomorfológico de Las Grutas.



Fig. 3.11. Vista desde el sector de la Bajada "La Rueda" hacia el Sur, pudiéndose observar la discontinuidad de la plataforma litoral, dando lugar a la conformación de una extensa playa.



Fig. 3.12. Perfil topográfico paralelo a la línea de costa, obtenido a partir del MDE generado mediante los vuelos con VANT. A: "La Rinconada; A': Bajada 5.

Transecta B: Límite restinga NE (entre Bajadas 0 y 1); **Transecta C:** Sector central de playa (Bajada 2); **Transecta D:** Límite playa - restinga SO (Bajada 3). Es posible apreciar el desnivel topográfico desde A hacia A', existiendo una depresión por debajo del nivel del mar entre las plataformas litorales, donde es posible apreciar las playas más extensas de todo el balneario.



Fig. 3.13. Plataforma litoral expuesta en cercanías a la Bajada 3 luego de eventos de tormenta.



Fig. 3.14. (A) Plataforma litoral en Bajada 3, aflorando luego de un evento de tormenta (2021). (B) Plataforma litoral en Bajada 3 cubierta (2022).

Acantilado activo: Los acantilados activos están conformados principalmente por las sedimentitas de la Formación Gran Bajo del Gualicho, aflorando por encima en algunos sectores de la costa, la Formación San Antonio y coronándose irregularmente por depósitos eólicos. Las alturas varían entre 5 y 12 metros y muestran generalmente un perfil vertical que se orienta en arco cóncavo hacia el SE. Los procesos erosivos se evidencian al pie del acantilado, exhibiendo oquedades basales (Fig. 3.15) y cuevas de hasta 4 m de altura y 5 m de profundidad (Fig. 3.16).

A lo largo de su extensión presenta variaciones morfológicas de la línea de cresta, dentro de las cuales se puede observar sectores donde se mantiene rectilínea y sectores donde se adoptan formas de bahías limitadas por promontorios, limitando la formación de playa en las bahías. Además, presenta variaciones en la altura, presentando los sectores de mayor potencia hacia el NE, coincidente con mayores espesores de las areniscas de la facies FC.

Acumulación de bloques: En algunos sectores se observan bloques sobre la playa producto de desprendimientos desde el acantilado, condicionados por los distintos tipos de discontinuidades que cortan al macizo rocoso, como los planos de estratificación y diaclasas. En el sector Sur ocurren pequeños desprendimientos desde el acantilado relacionados a la actividad de las colonias de nidos de loros barranqueros (*Cyanoliseus patagonus*), provocando la caída de material de unos pocos cm de diámetro, aunque con mayor frecuencia de ocurrencia.



Fig. 3.15. Acantilado exhibiendo erosión basal.



Fig. 3.16. Cuevas/grutas en acantilados.

Playa: Los sedimentos que componen la playa en general no superan los 250 m de ancho y se encuentran cubriendo a la plataforma de abrasión. El mayor desarrollo se concentra en el sector central de la franja costera, entre la Bajada 3 y la Bajada 1. Se compone por sedimentos de variada granulometría, con predominio de arenas medias, aunque es posible encontrar clastos de tamaño conglomerado, redondeados y bioclastos ocasionalmente.

Planicie aluvial: Conforman el terreno natural sobre el cual se ha desarrollado la ciudad balnearia y que actualmente la rodea. Se compone de material cuaternario que se dispone sobre una meseta basáltica con un relieve que posee menor altura hacia el mar, donde culmina con una costa acantilada. Es atravesada de NO a SE por dos cuencas hidrográficas de carácter estacional (Cuenca Norte y Cuenca Sur).

Campo de dunas: Se ubican sobre los acantilados en sectores acotados, principalmente entre el barrio “Golfo Azul” y la Bajada La Rinconada, extendiéndose por aproximadamente 700 m de longitud en forma paralela a la línea de cresta, mayormente cubiertos por vegetación, con un ancho aproximado de 70 m y alturas de hasta 6 m (Fig. 3.17).

En cuanto a su composición, se encuentran conformados por arenas finas a medias de color pardo grisáceo, bien seleccionadas. La génesis de las dunas es producto de la circulación de los vientos provenientes del mar, que circulan por la playa hasta encontrarse con el acantilado, el cual funciona de obstáculo, produciendo un desvío de la masa de aire que luego de un descenso en la velocidad deposita los sedimentos que viajan en suspensión.

Durante los eventos de precipitaciones altas estos depósitos favorecen una infiltración rápida, evitando la generación de escorrentías superficiales de gran porte.



Fig.3.17. Campo de dunas sobre el acantilado, ubicado entre el barrio Golfo Azul y Bajada La Rinconada.

3.3 Caracterización morfológica de la zona de estudio

A partir del reconocimiento de las distintas geformas producto de los procesos erosivos-acumulativos presentes a lo largo de la extensión del área de estudio, comprendida entre la Bajada 5 y la Bajada La Rinconada (Fig. 3.18), se diferenciaron 7 secciones a lo largo de la franja costera:

- **Sección 1-** Comprendida desde Bajada 5 a Bajada 4 del balneario
- **Sección 2-** Comprendida desde Bajada 4 a Bajada 3 del balneario
- **Sección 3-** Comprendida desde Bajada 3 a Bajada 2 del balneario
- **Sección 4-** Comprendida desde Bajada 2 a Bajada 1 del balneario
- **Sección 5-** Comprendida desde Bajada 1 a Bajada “La Rueda” del balneario
- **Sección 6 -** Comprendida desde Bajada “La Rueda” hasta el barrio “Golfo Azul”
- **Sección 7-** Desde el barrio “Golfo Azul” hasta Bajada “La Rinconada”

Cabe destacar que la zona comprendida entre la Bajada 5 y la Bajada 7 no es incorporada dentro del análisis del presente trabajo, ya que difiere sustancialmente en la geforma principal, existiendo un acantilado de muy baja potencia, cubierto en su totalidad por depósitos eólicos vegetados, que no permiten una correcta comparación en cuanto al comportamiento, con respecto al resto del sector costero del balneario. Cada una de las secciones fueron relevadas mediante la utilización de un VANT, logrando la construcción de paneles panorámicos para cada sección (Fig. 3.19). A continuación, se describen las características de cada una de ellas.

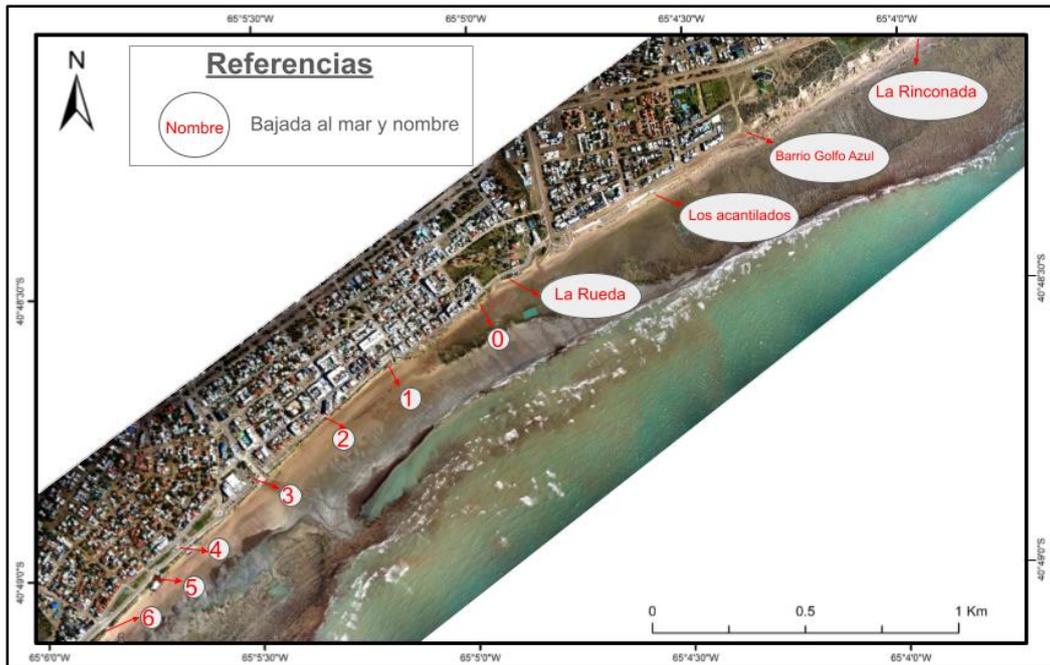


Fig. 3.18. Bajadas del balneario de Las Grutas.

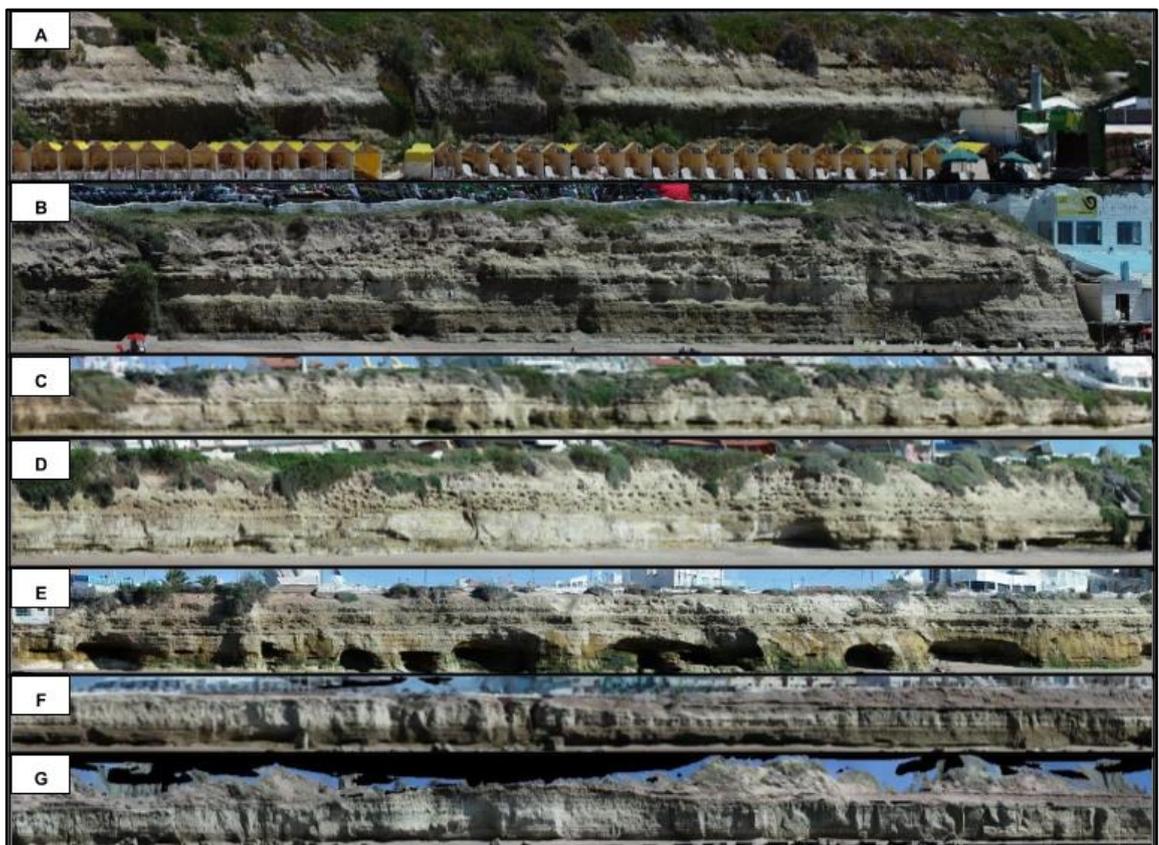


Fig. 3.19. Imágenes panorámicas de cada Sección de estudio. (A) Sección 1. (B) Sección 2. (C) Sección 3. (D) Sección 4. (E) Sección 5. (F) Sección 6. (G) Sección 7. Las imágenes panorámicas corresponden al frente del acantilado en las distintas secciones comprendidas dentro de la franja costera que compone la zona de estudio. La variación del zoom en las mismas se debe a que existen secciones de mayor longitud que otras, las cuales son observadas desde mayor distancia al acantilado.

Sección 1- Compreendida desde la Bajada 5 a la Bajada 4

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la línea de costa obtenido a partir del MDE y perfil litoestratigráfico esquemático se exhiben en las figuras 3.20; 3.21 y 3.22 respectivamente.

En esta primera sección se exhibe una playa de unos 100 m, seguida de una plataforma litoral conformada por conglomerados de la Formación Baliza San Matías hasta el límite de rompiente de olas. Se observan dos niveles de plataforma, una baja con lineamientos perpendiculares a la línea de costa y una por encima, con lineamientos paralelos a la línea de costa (Fig. 3.20). En la figura 3.21 es posible observar las elevaciones y pendientes perpendiculares a la línea de costa.

En el acantilado desde la base hacia el techo se exponen las sedimentitas pertenecientes a la Formación Gran Bajo del Gualicho, culminando la secuencia un escueto banco de depósitos eólicos modernos, cubiertos casi en su totalidad por vegetación que se extiende hasta facies infrayacentes (Figs. 3.22, 3.23). La facies FB1 exhibida en la base del acantilado, en contacto con la playa, posee 2.40 m de espesor. Sobre FB1 se dispone en contacto erosivo la facies FB2, exponiendo en promedio 2 m de potencia y por encima, en contacto discordante se ubica la facies FC con un espesor de 0.70 m aproximadamente. Coronan la secuencia depósitos eólicos modernos, con una potencia de aproximadamente 1 m. Tanto FB2, como FC1 y los depósitos eólicos exhiben vegetación en la cara frontal del acantilado (Fig. 3.23).

No se observan en el acantilado geformas erosivas, tales como cuevas o grutas. Tampoco se observan diaclasas o discontinuidades evidentes en el mismo. En dicha sección no suele llegar la marea hasta el pie del acantilado, a excepción de eventos extraordinarios.

Respecto a surgencias de agua desde el acantilado no han sido observadas, aunque se observa la presencia de humedad en el mismo.

No existen bloques caídos desde el acantilado, sin embargo, es posible observar una acumulación de sedimentos al pie del acantilado, sobre los cuales existe un desarrollo de suelo que da lugar a vegetación arbórea.



Fig. 3.20. Vista aérea de la Sección 1 tomada con VANT. Es posible apreciar los dos niveles de plataforma litoral superpuestos.



Fig. 3.21. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas, obtenido a partir del MDE. Es posible destacar las elevaciones correspondientes a la plataforma de abrasión. Las unidades de ambos ejes son metros.

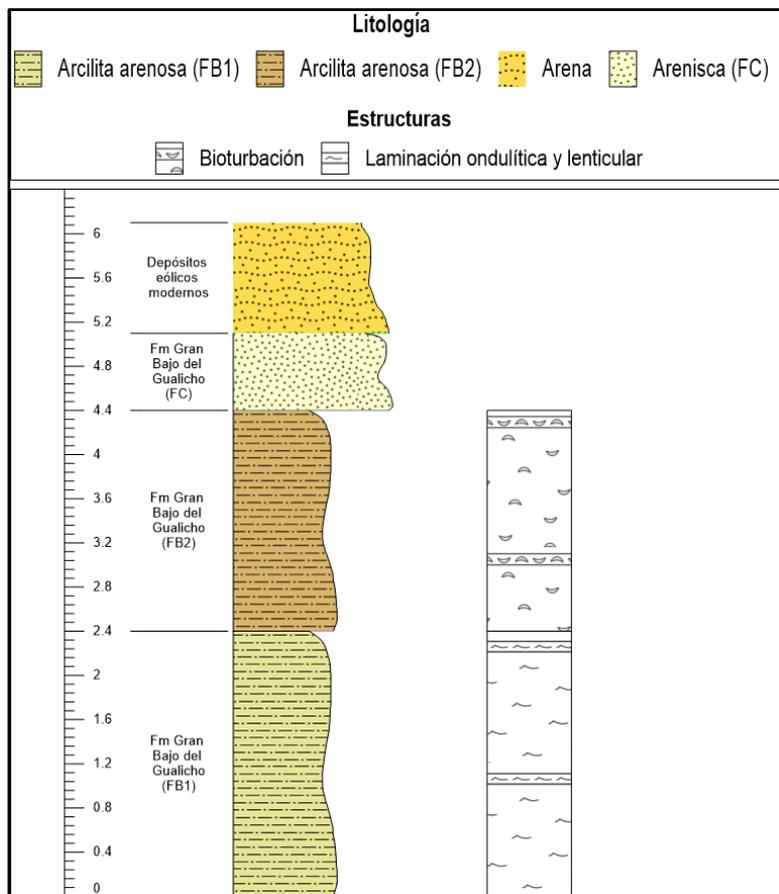


Fig. 3.22. Perfil litoestratigráfico esquemático de la Sección 1.

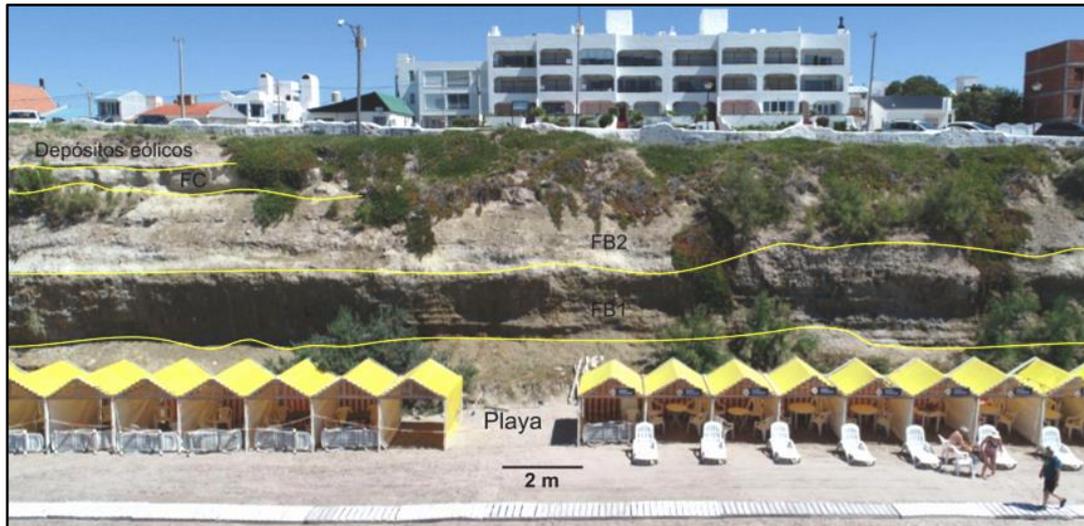


Fig. 3.23. Vista general del afloramiento en la Sección 1 tomada con VANT.

Sección 2- Compreendida desde la Bajada 4 a la Bajada 3

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la línea de costa obtenido a partir del MDE y perfil litoestratigráfico esquemático se exhiben en las figuras 3.24; 3.25 y 3.26 respectivamente.

Esta sección exhibe una playa con una extensión de aproximadamente 140 m, seguida de una plataforma litoral conformada por la Formación Baliza San Matías, que se extiende hasta la zona de rompiente de olas (Fig. 3.24).

En el acantilado se exhibe la Formación Gran Bajo del Gualicho, coronada por depósitos eólicos modernos vegetados (Fig. 3.27). La facies FB1 al pie del acantilado, en contacto con la playa, posee una potencia de 2.75 m, exhibiendo planos de laminación ondulática y lenticular. Sobre la facies FB1 se deposita en discordancia erosiva la facies FB2, de unos 2.5 m de espesor, la cual contiene gran cantidad de bioturbación. No se observan en el acantilado geofomas erosivas, tales como cuevas o grutas. Tampoco se observan diaclasas o discontinuidades evidentes en el mismo. En esta sección normalmente el mar no suele llegar a hacer contacto con el acantilado durante las mareas altas en los sectores próximos a la Bajada 4, mientras que, si lo hace en el extremo próximo a la Bajada 3, provocando erosión basal.

En algunos sectores se observan niveles de yeso, coincidentes con zonas de humedad. Sobre la facies FB2, en contacto erosivo se encuentra la facies FC, la cual posee un espesor aproximado de 1 m, presenta una estructuración en bloques redondeados y desde allí ocurre la caída de detritos de pequeños tamaños (1-4 cm), producto de la actividad bioerosiva de colonias de nidos de loros barranqueros (*Cyanoliseus patagonus*). Corona la secuencia un banco irregular de depósitos eólicos modernos de unos 0,5 m de espesor.

Es posible observar sectores con surgencia de agua desde el acantilado, aprovechando los planos de estratificación de FB1 como en el sector central de la sección (Fig. 3.28) así como también de FB2, observado en cercanías a la Bajada 4 (Fig. 3.29). En algunos sectores específicos de la sección, es posible observar una coloración anaranjada sobre FB1, propia de la meteorización química producida por la humedad. También es posible observar surgencia de agua desde la playa, a unos 40 m desde el acantilado (Fig. 3.24).



Fig. 3.24. Vista aérea de la Sección 2 tomada con VANT. Es posible observar surgencia de agua desde la playa.

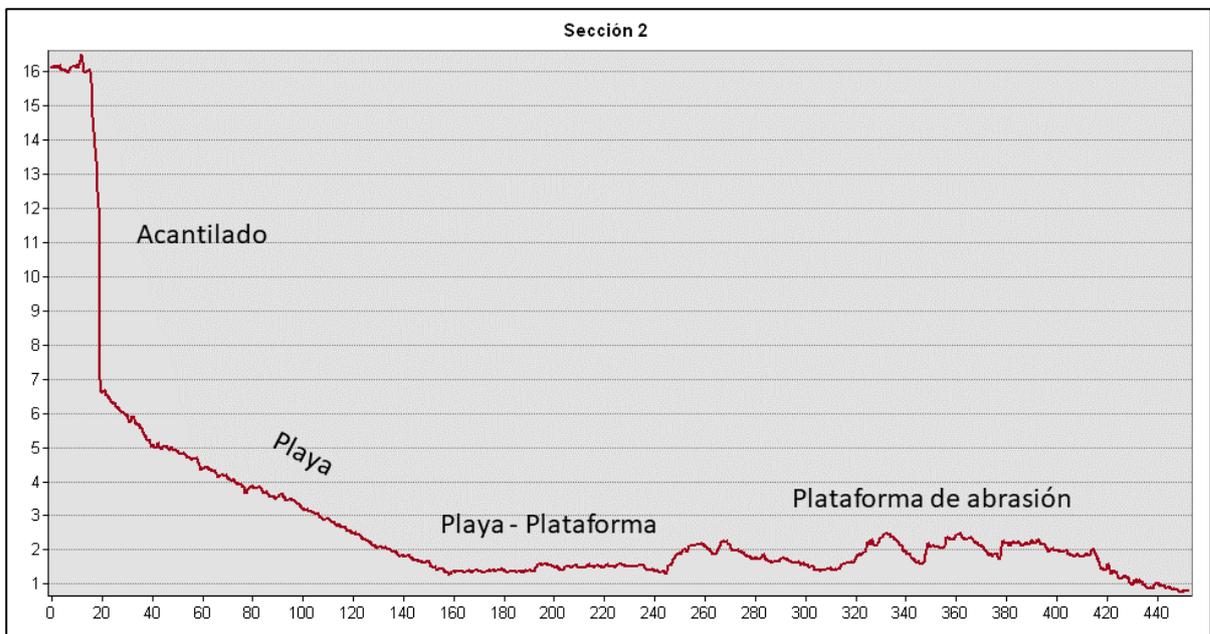


Fig. 3.25. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas. Es posible destacar las elevaciones correspondientes a la plataforma de abrasión. Las unidades de ambos ejes son metros.

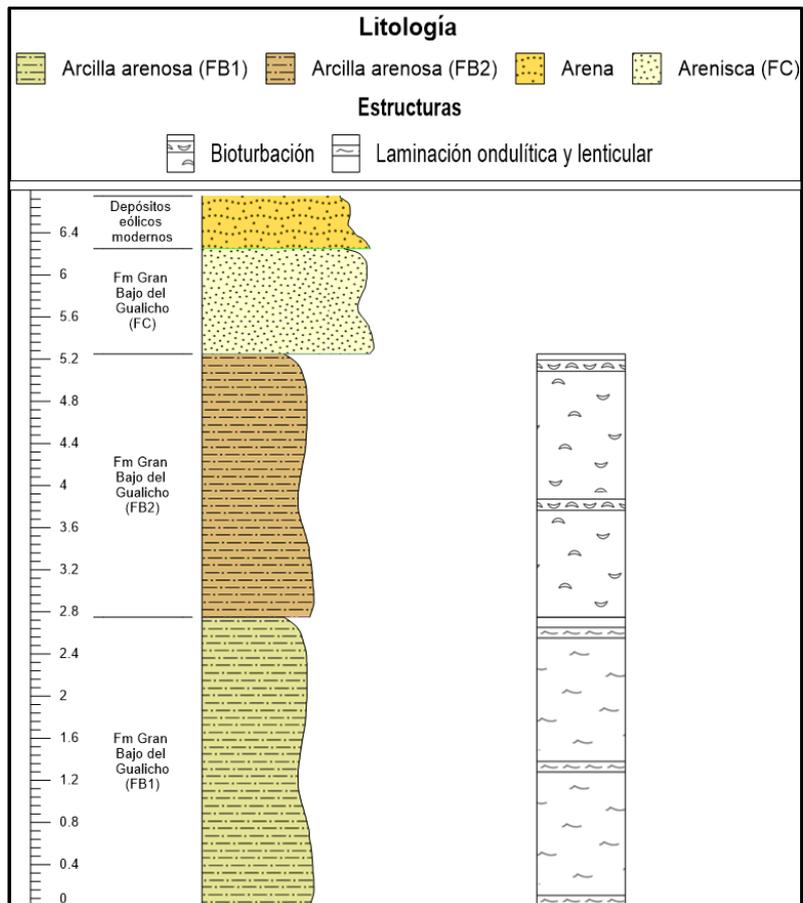


Fig. 3.26. Perfil litoestratigráfico esquemático de la Sección 2.

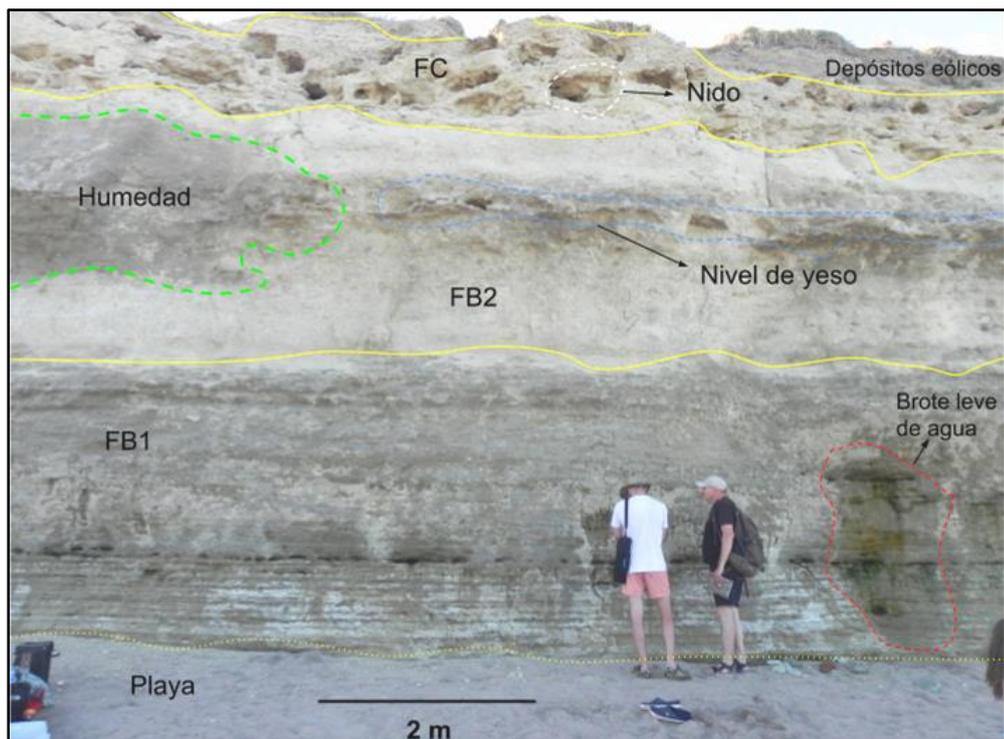


Fig. 3.27. Vista general del afloramiento en la Sección 2.

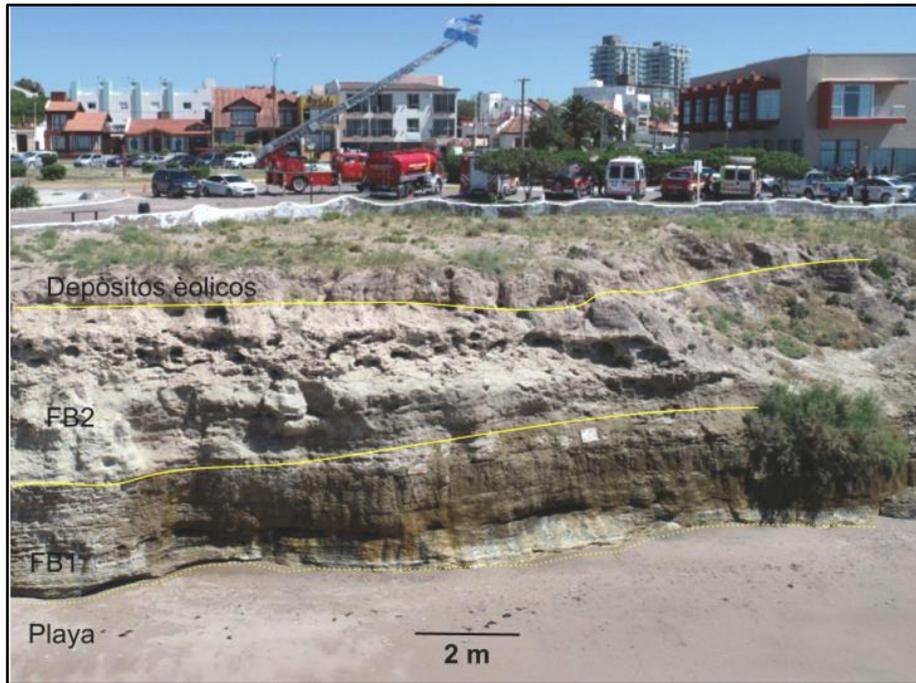


Fig. 3.28. Surgencia de agua desde los planos de estratificación de FB1 en el sector central de la Sección 2. Fotografía tomada con VANT.



Fig. 3.29. Surgencia de agua desde FB1 y FB2 en el sector sur de la Sección 2, próximo a la Bajada 4. Tomada con VANT.

Sección 3- Compreendida desde la Bajada 3 a la Bajada 2

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la costa obtenido a partir del DEM y perfil litoestratigráfico esquemático se muestra en las figuras 3.30, 3.31 y 3.32 respectivamente.

En esta sección es posible apreciar una playa de unos 270 m que se extiende desde el pie del acantilado hasta el límite con la zona de rompiente de olas (Fig. 3.30).

El acantilado está representado por la Formación Gran Bajo del Gualicho (Fig. 3.33). Desde el pie del acantilado hasta los 0.5 m es posible observar la facies FA, la cual queda al descubierto luego de tormentas. Sobre FA se deposita, en discordancia erosiva, la facies FB1, con un espesor aproximado de 1.75 m. Las estructuras de laminación ondulítica y lenticular se ven con dificultad debido a los espeleotemas que las recubren, producto de la recristalización de minerales disueltos en el agua que surge de dicha facies, con mayor surgencia desde el contacto FA-FB1. Sobre FB1 se deposita en discordancia erosiva la facies FB2, con 1 m de espesor aproximadamente y presencia de bioturbación. Corona el acantilado la facies FC, con un espesor aproximado de 2 m, cubiertos por vegetación. Presenta estructuración en bloques redondeados y alberga en algunos sectores nidos de loros barranqueros.

En el contacto entre FA y FB1 es posible observar socavamientos, con menor grado de avance en el sector próximo a la Bajada 2 (Fig. 3.34) y con mayor grado de avance en el sector central de la sección, dando lugar a los primeros estadios en la conformación morfológica de una caverna o gruta (Fig. 3.35).

Se observa surgencia de agua en el contacto FA-FB1 y humedad relativamente en todo el espesor de FB1 a lo largo de casi toda la sección, siendo mayor la surgencia en la Bajada 3, donde es posible observar agua fluyendo continuamente desde la mitad de la rampa (utilizada para la bajada de lanchas) y desde el final de la misma (Fig. 3.36). Tanto en FA como en FB1 es posible observar una coloración anaranjada, propia de la meteorización química producida por la humedad.

No se observan bloques caídos sobre la playa y tampoco se identifican discontinuidades sobre el acantilado. En esta sección el mar hace contacto con el acantilado durante las mareas altas.

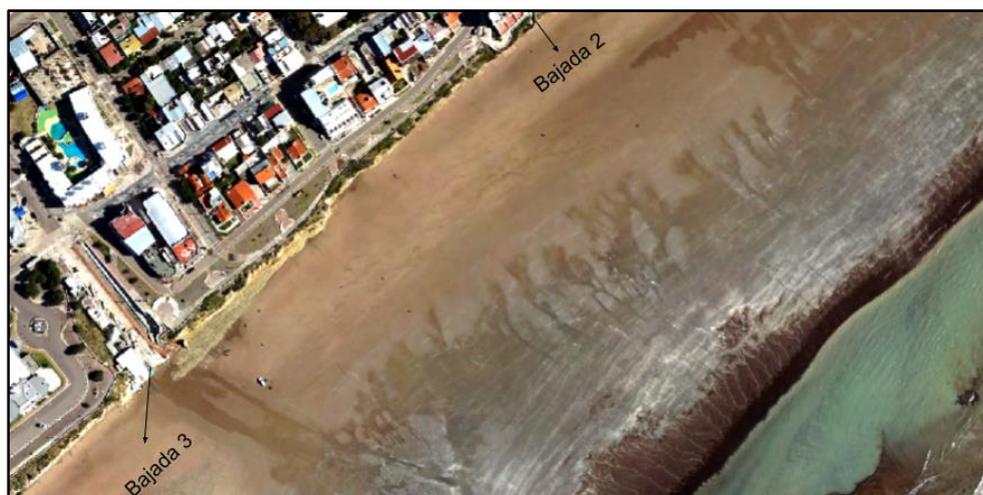


Fig. 3.30. Vista aérea de la Sección 3 tomada con VANT. Se destaca la surgencia de agua desde la rampa de la Bajada 3.

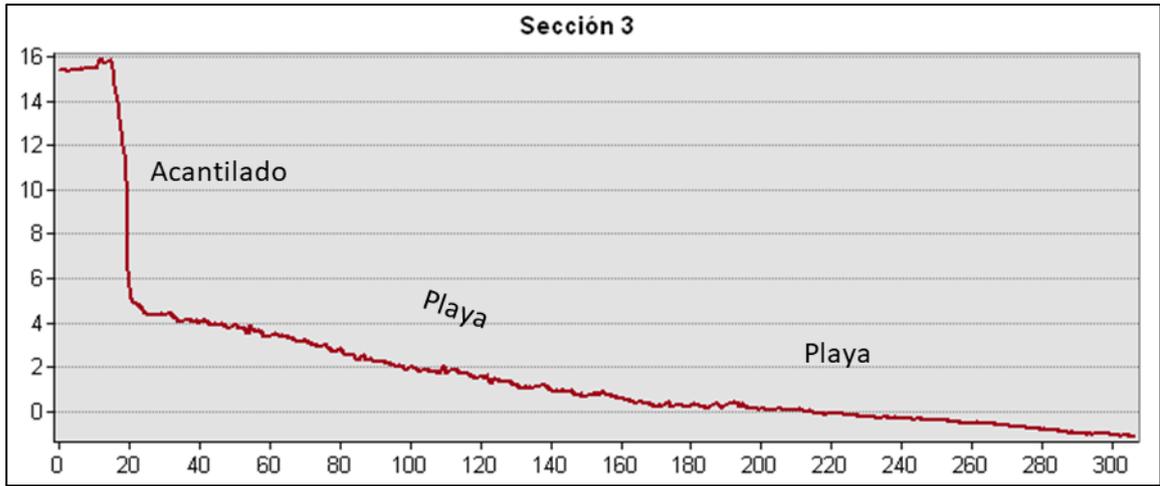


Fig. 3.31. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas. Se destaca la suave pendiente de la playa hacia el mar. Las unidades de ambos ejes son metros.

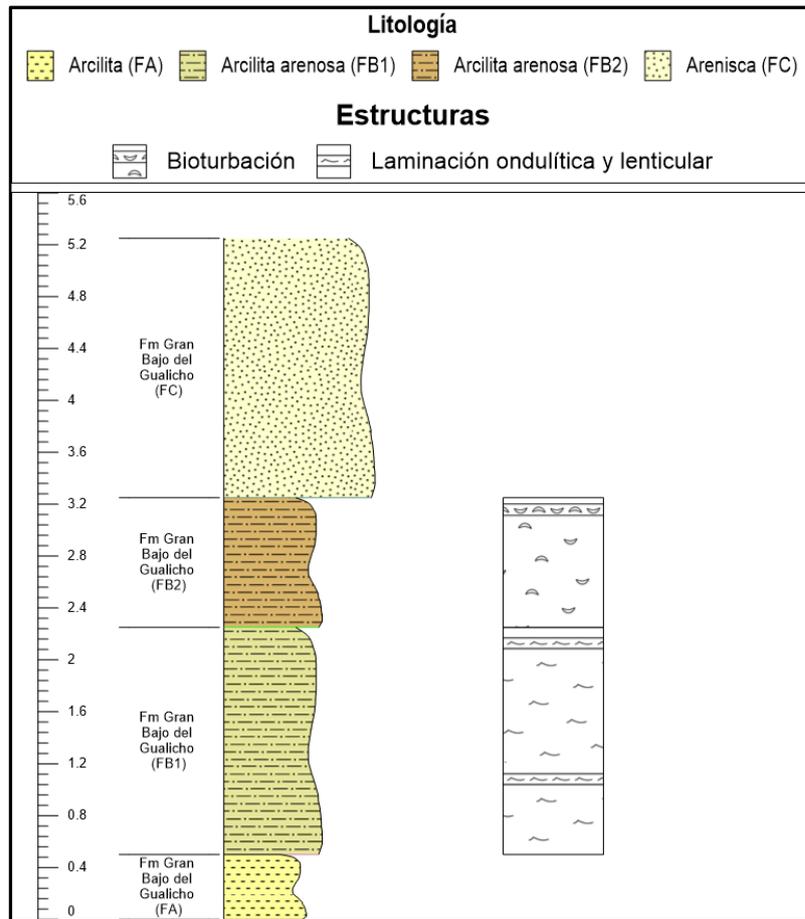


Fig. 3.32. Perfil litoestratigráfico tipo de la Sección 3.

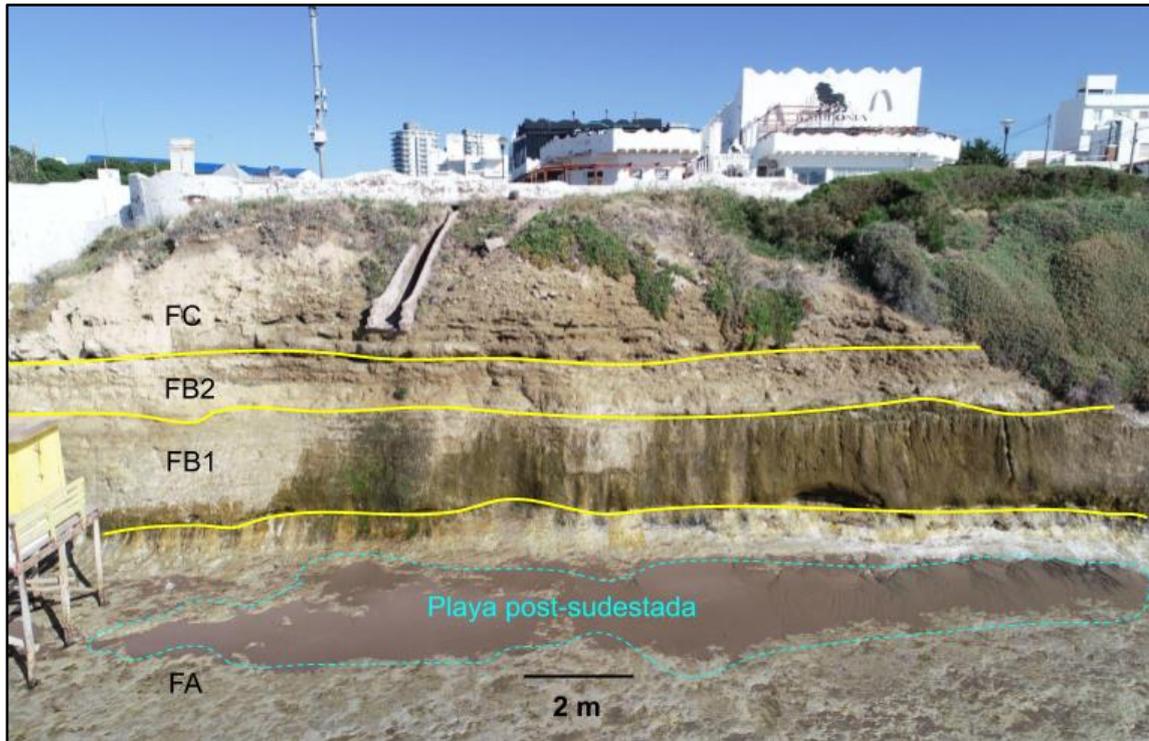


Fig. 3.33. Vista general del afloramiento en la Sección 3 en cercanía a la Bajada 3. Tomada con VANT.

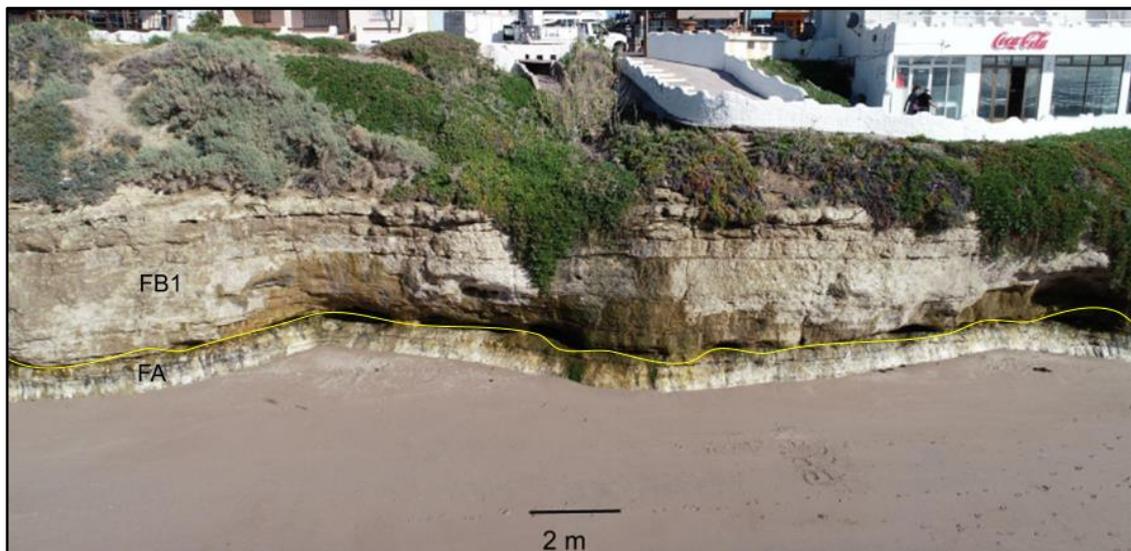


Fig. 3.34. Vista del acantilado en inmediaciones a la Bajada 2, exhibiendo socavamientos y surgencia de agua en el contacto entre FA y FB1. Fotografía tomada con VANT.

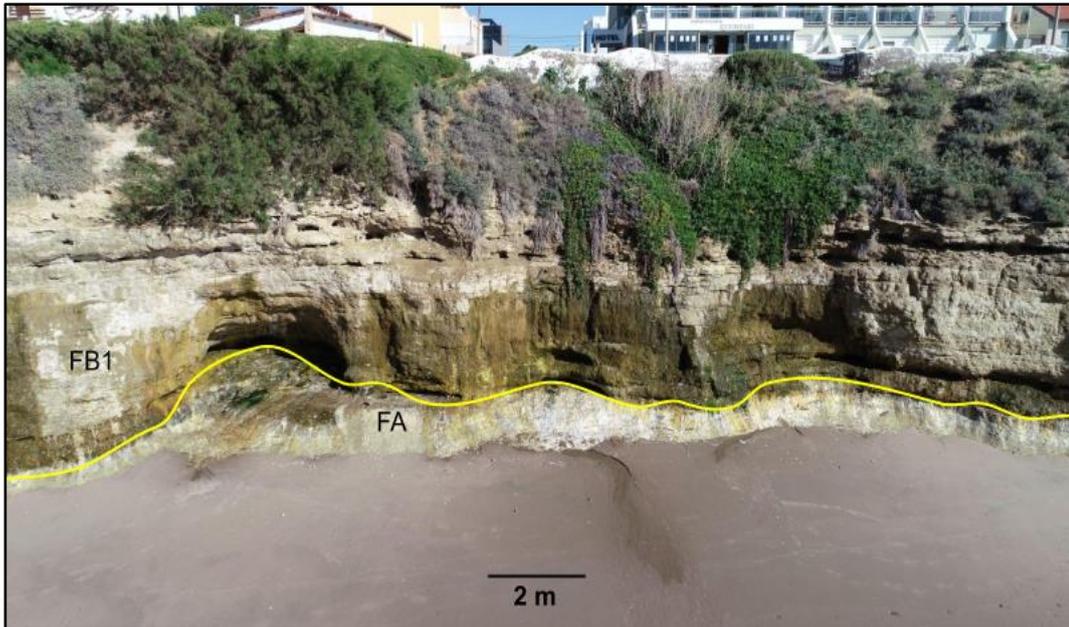


Fig. 3.35. Vista del acantilado en el sector central de la sección 3, exhibiendo socavamientos en mayor grado de avance y surgencia de agua en el contacto entre FA y FB1. Fotografía tomada con VANT.



Fig. 3.36. Vista frontal de la Bajada de lanchas de la Bajada 3. Se exhibe surgencia de agua desde la mitad de la bajada de lanchas, además de un brote en la parte final de la misma, en contacto con la playa, provocando un socavón en los cimientos del parador de la Bajada 3.

Sección 4- Comprendida desde la Bajada 2 a la Bajada 1

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la costa obtenido a partir del MDE y perfil litoestratigráfico esquemático se muestra en las figuras 3.37, 3.38 y 3.39 respectivamente.

Esta sección expone una playa de unos 260 m que se extiende desde la base del acantilado hasta la zona de rompiente de olas (Fig. 3.37).

El acantilado está conformado por la Formación Gran Bajo del Gualicho. Desde la base del acantilado hasta los 2.40 m es posible apreciar la facies FB1, exhibiendo oquedades basales. Sobre FB1 se ubica en discordancia erosiva FB2, con un espesor aproximado de 1.20 m. Se destaca la presencia de nidadas de loros barranqueros a lo largo de todo el espesor de dicha facies. Corona la secuencia la facies FC, con un espesor aproximado de 2 m, cubiertos por vegetación hacia el techo a lo largo de toda la sección (Fig. 3.40). No se observan geofomas tales como cavernas o grutas.

En esta sección el mar hace contacto con la base del acantilado durante las mareas altas, dejando como resultado a la vista erosión basal.

Tanto en FB1 como en FB2 es posible observar una coloración propia de la meteorización química producto de la humedad, aunque no es posible observar surgencia de agua desde el acantilado. Por el contrario, si es posible observar surgencia de agua desde la playa, a unos 3 m aproximadamente del acantilado (Fig. 3.37, 3.40).

Se observa un control estructural paralelo a la cara del acantilado, principalmente evidenciado en FB1 y dando como resultado desprendimientos superficiales (Fig. 3.40).



Fig. 3.37. Vista aérea de la Sección 4 tomada con VANT. Es posible destacar la surgencia de agua desde la playa.

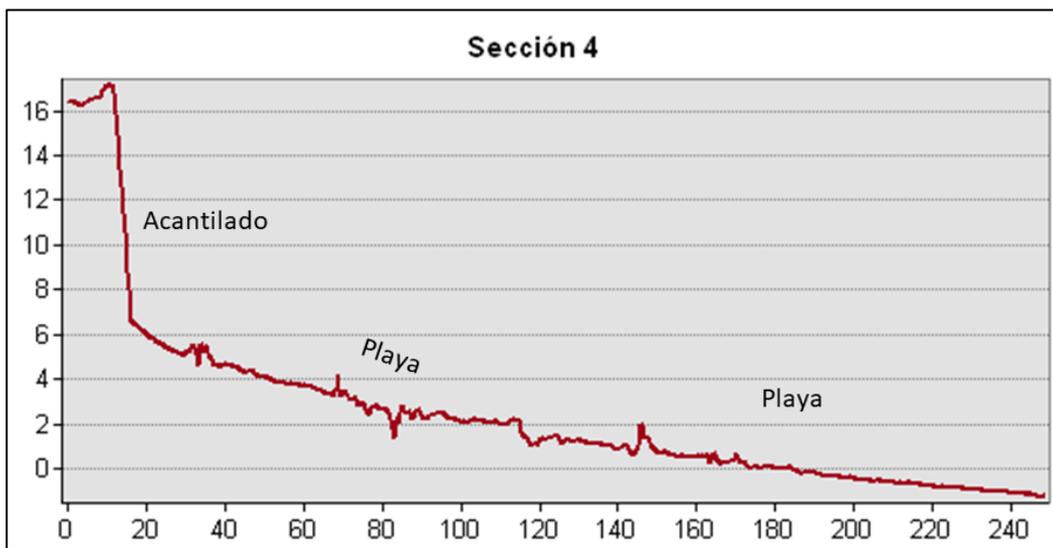


Fig. 3.38. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas. Se destaca una suave pendiente hacia el mar en el sector de playa. Las unidades de ambos ejes son metros.

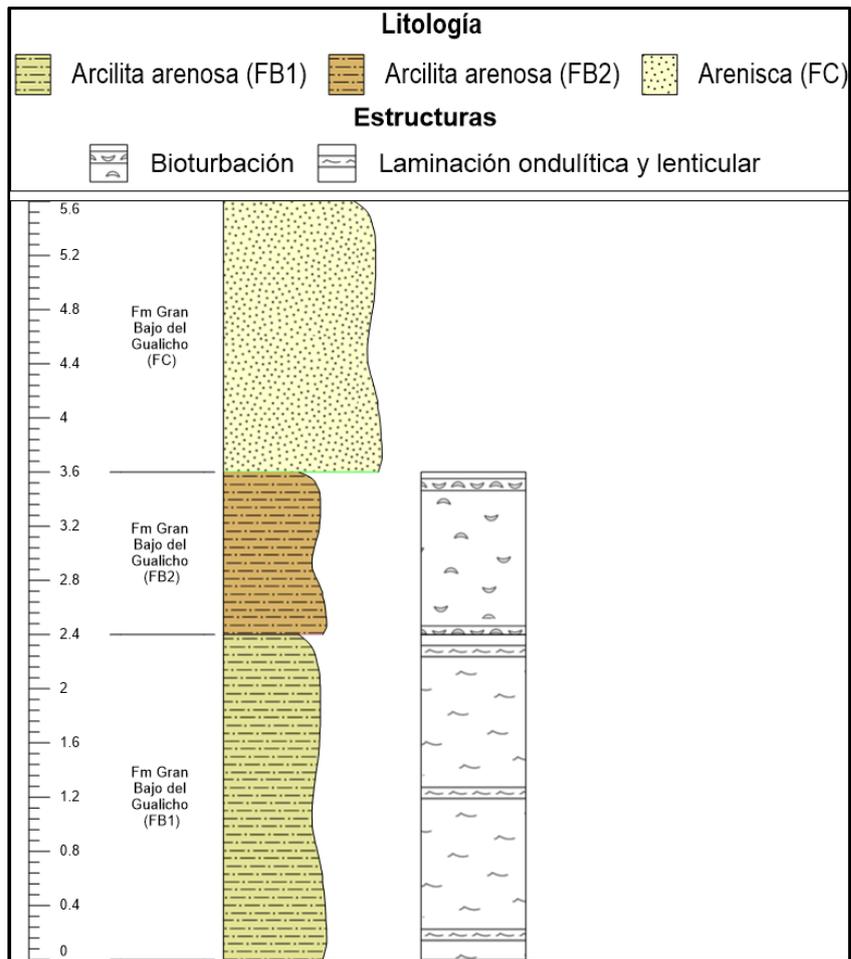


Fig. 3.39. Perfil litoestratigráfico esquemático de la Sección 4.



Fig. 3.40. Vista general del afloramiento en la Sección 4. Tomada con VANT.

Sección 5- Compreendida desde Bajada 1 a Bajada “La Rueda”

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la línea de costa obtenido a partir del MDE y perfil litoestratigráfico esquemático se exhiben en las figuras 3.41; 3.42 y 3.43 respectivamente.

Esta sección posee uno de los perfiles de costa más irregulares del área de estudio, exponiendo los promontorios más pronunciados. En un acotado sector en el extremo SO exhibe una playa de unos 200 m, hasta la zona de rompiente de olas. En el sector NE una playa de unos 25 m, que continúa luego con una extensa plataforma de abrasión de unos 70 m, culminando en una playa de unos 100 m hasta la zona de rompiente de olas (Fig. 3.41). La plataforma de abrasión en este sector está conformada por la facies FB1.

El pie del acantilado exhibe la facies FA de unos 0.80 m de espesor, albergando oquedades basales. En discordancia erosiva se deposita por encima la facies FB1 con unos 2.90 m de potencia, presentando oquedades en algunos de sus planos. Por encima, en contacto erosivo se expone la facies FB2, de unos 1.70 m de espesor, exhibiendo una intensa bioturbación. Corona la secuencia la facies FC, con unos 3.5 m de espesor, cubiertos hacia el techo por vegetación (Fig. 3.44). Tanto FB1 como FB2 presentan una coloración anaranjada, producto de la erosión química en el frente del acantilado y surgencia de agua, en el caso de FB1 desde las oquedades.

Son destacadas las cavernas/grutas en los acantilados, siendo las de mayor magnitud en toda el área de estudio (Fig. 3.45). A su vez, esta sección contiene al promontorio de mayores dimensiones en toda el área de estudio, ubicado en la Bajada 0 (Fig. 3.46). En este sector durante las mareas altas el agua hace contacto con el acantilado, siendo el sector de la costa donde primero ocurre dicho contacto.

Se observan bloques sobre la playa, producto del colapso del techo de las cavernas, los cuales poseen entre 1 y 2 m de diámetro y presentan signos de retrabajo debido a la intensa actividad marina (Fig. 3.45). Es la única sección del balneario que contiene medidas de mitigación contra la erosión, albergando muros y gaviones de contención contra el acantilado (Fig. 3.46). Es posible apreciar planos paralelos a la cara frontal del acantilado, dando lugar a desprendimientos superficiales que afectan tanto a FB1 como FB2 (Figs. 3.45, 3.46).



Fig. 3.41. Vista aérea de la Sección 5 tomada con VANT. Es posible destacar la irregularidad del perfil de costa y el promontorio más grande del área de estudio, ubicado en la Bajada 0.

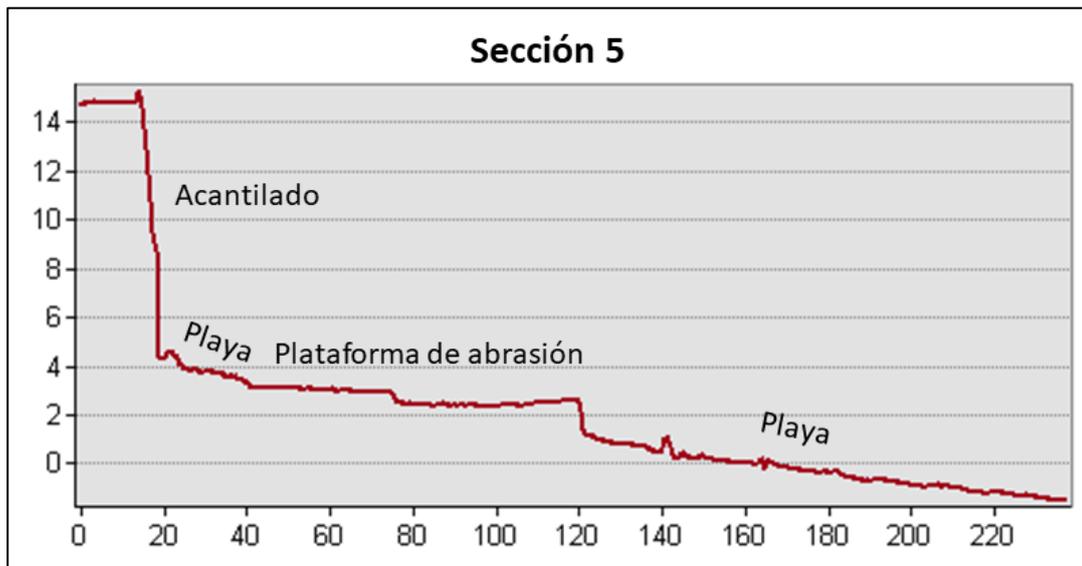


Fig. 3.42. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas. Es posible destacar una depresión abrupta “en escalón” luego de la plataforma de abrasión. Las unidades de ambos ejes son metros.

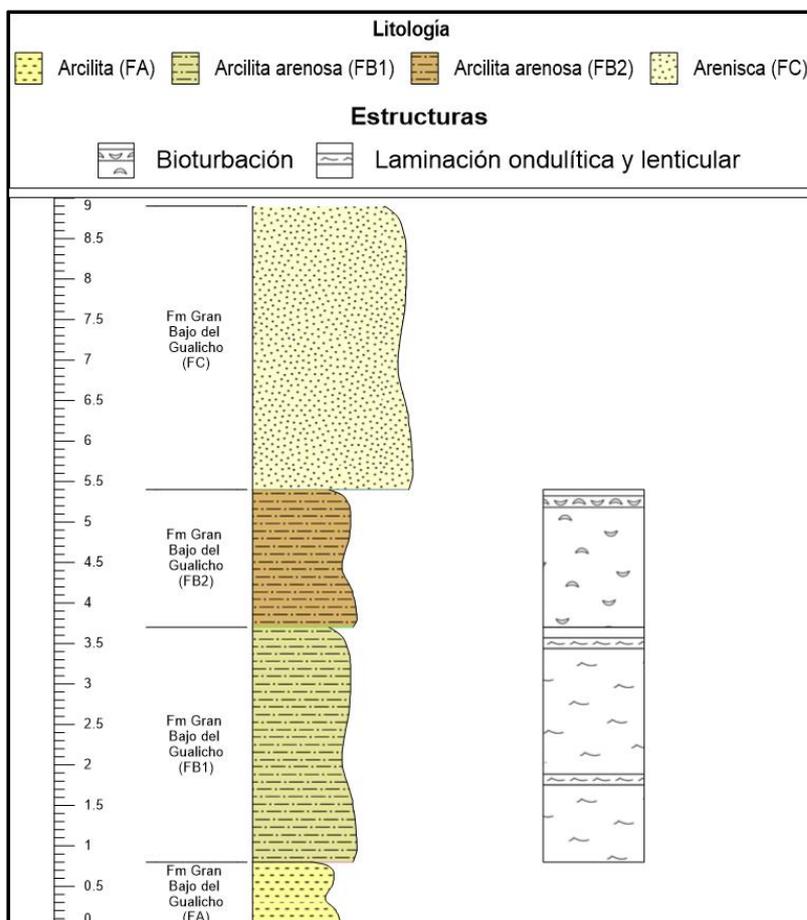


Fig. 3.43. Perfil litoestratigráfico esquemático de la Sección 5.



Fig. 3.44. Vista general del acantilado en la Sección 5. Fotografía tomada con VANT.



Fig. 3.45. Cuevas/grutas en los acantilados. También es posible observar bloques desprendidos por el colapso del techo de las mismas. Fotografía tomada con VANT.



Fig. 3.46. (A) Vista frontal tomada con VANT del promontorio más pronunciado del área de estudio, destacan los muros de contención sobre el acantilado y la surgencia de agua. (B) Vista con zoom, exhibiendo los cimientos de un antiguo muro de contención.

Sección 6 - Desde Bajada “La Rueda” hasta barrio “Golfo azul”

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la línea de costa obtenido a partir del DEM y perfil litoestratigráfico esquemático se exhiben en las figuras 3.47, 3.48 y 3.49 respectivamente.

Esta sección comprende un sector de costa con una playa de unos 35 m desde el acantilado, seguida de una extensa plataforma litoral de entre 70 a 180 m que culminan (en bajamar) con 40 m de playa hasta la zona de rompiente de olas (Fig. 3.47). La plataforma litoral se encuentra representada por la facies FB1 y presenta lineamientos perpendiculares a la línea de costa (Fig. 3.47).

En el acantilado se exhibe la Formación Gran Bajo del Gualicho. En la base del acantilado aflora la facies FB1 con 1.5 m de espesor, en contacto erosivo se ubica FB2 con 1 m de espesor. Por encima, en discordancia erosiva y con presencia de concreciones silíceas en la base, se encuentra FC, exhibiendo un acuñamiento hacia el SO y presentando en el sector tipo elegido un espesor máximo de 3.5 m (Fig. 3.50). Cabe destacar que, hacia el NE, aumenta considerablemente el espesor de FC. En discordancia se apoyan, en algunos sectores, los depósitos de la Formación San Antonio, con 1.20 m de espesor, exponiendo geometrías de canales hacia el extremo SO y geometrías tabulares hacia el extremo NE de la sección (Fig. 3.51). En algunos sectores coronan el acantilado depósitos eólicos modernos vegetados de unos 0.50 m de espesor. En esta sección el mar hace contacto con el acantilado durante marea alta.

Se observan familias de diaclasas que delimitan grandes bloques, afectando en mayor medida a la facies FC, siendo propensos a derrumbes y/o desplomes. Es posible destacar que, dentro de la presente sección, se encuentra la denominada “Bajada de los Acantilados”, un sector reconocido por su alta frecuencia de derrumbes de bloques de un tamaño considerable (entre 1 y 2 m³) (Fig. 3.52). No se observan geformas tales como cavernas o grutas. Tampoco se aprecia surgencia de agua desde el acantilado, aunque sí humedad en el mismo, principalmente en las facies FB1 y FB2. Además, unos 100 m al NE de la Bajada “La Rueda” es posible observar uno de los desagües para descargas pluviales más importantes de la ciudad, denominado por los pobladores como “Desagüe Pewans” (Fig. 3.47).



Fig. 3.47. Vista aérea de la Sección 6 tomada con VANT. Es posible destacar la irregularidad del perfil de costa y el incremento en el ancho de la plataforma litoral hacia el NE.

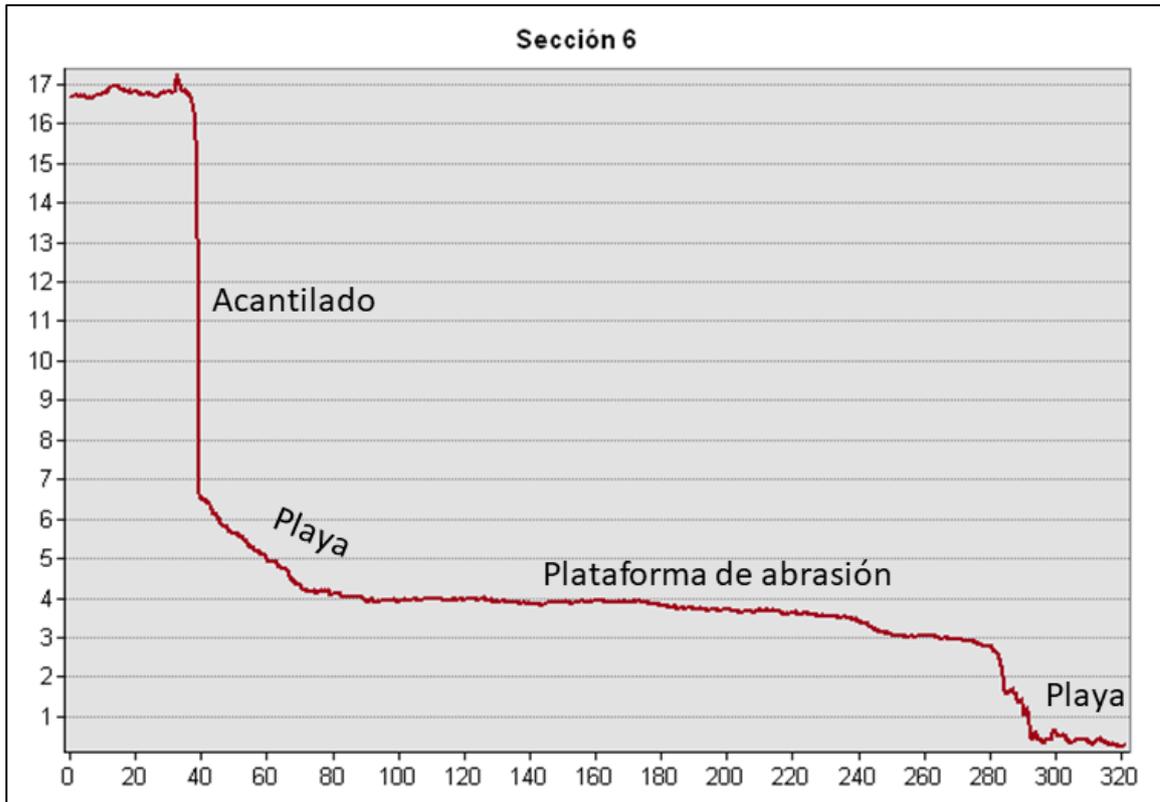


Fig. 3.48. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas. Es posible destacar una depresión abrupta “en escalón” luego de la plataforma de abrasión. Las unidades de ambos ejes son metros.

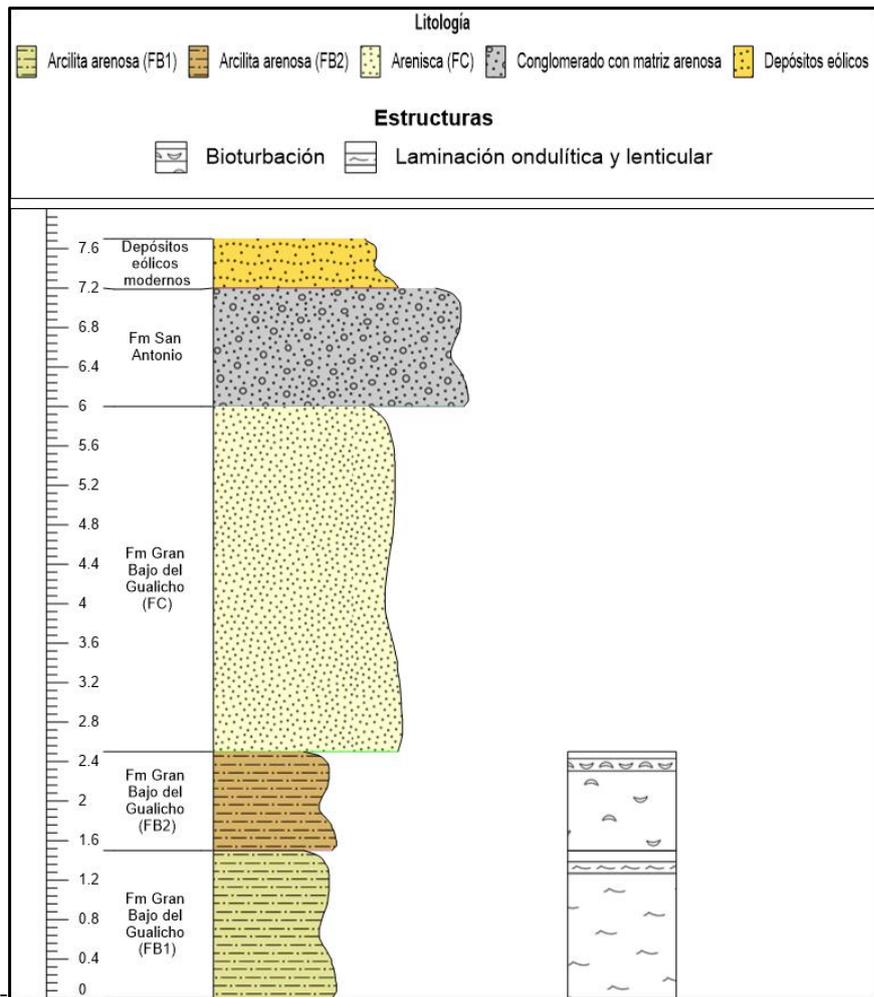


Fig. 3.49. Perfil litoestratigráfico tipo de la Sección 6.

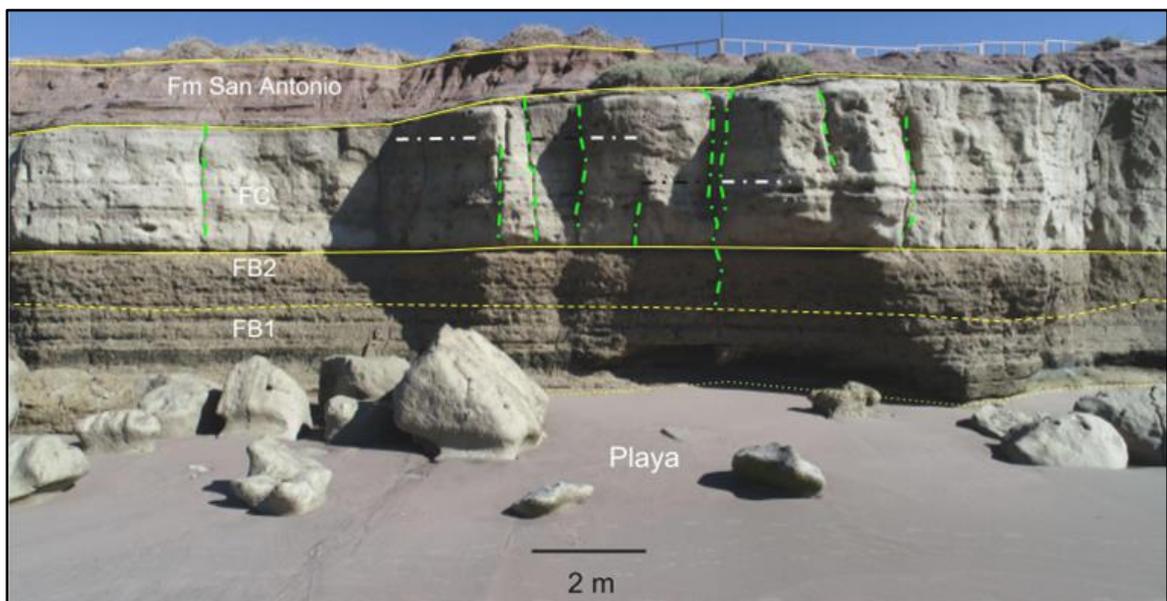


Fig. 3.50. Vista general del afloramiento en la Sección 6. Las líneas punteadas blancas y negras corresponden a los planos de las dos familias de discontinuidades que atraviesan el acantilado. Las líneas intermitentes verdes corresponden a la intersección de los planos con la vertical.

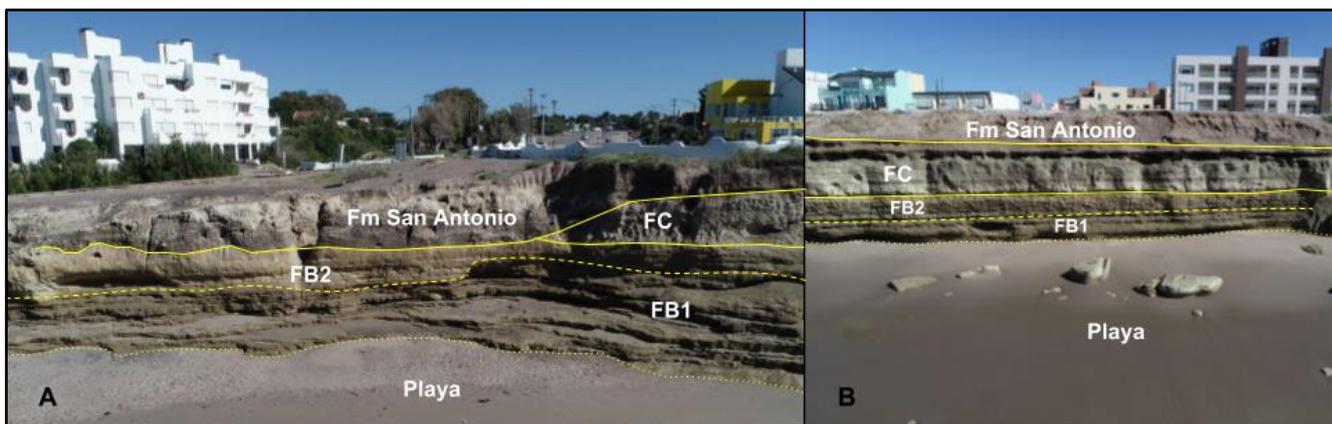


Fig. 3.51. (A) Afloramientos de la Formación San Antonio representados por geometrías de cuña en cercanías al drenaje Pewans (extremo sur). (B) Geometrías tabulares en cercanías al extremo norte de la sección, en cercanías a la Bajada “Los Acantilados”.



Fig. 3.52. Comparación de imágenes tomadas mediante vuelo con VANT en la Bajada “Los Acantilados”.

(Izq) Vuelo de Diciembre del 2021- (Der) Vuelo de Septiembre del 2022. Es posible destacar los cambios en relación a la cantidad de bloques derrumbados desde el acantilado en el período comprendido por ambos vuelos. Además, es posible observar que en el vuelo del 2021 (vuelo post-tormenta) se exhibe la facies FA al pie del acantilado, que generalmente se encuentra cubierta por la playa.

Sección 7- Desde el límite del barrio “Golfo azul” hasta Bajada “La Rinconada”

Una vista aérea de la sección, perfil topográfico perpendicular a la línea de costa obtenido a partir del DEM y perfil litoestratigráfico esquemático se exhiben en las figuras 3.53; 3.54 y 3.55 respectivamente.

Esta sección comprende un sector de playa que se extiende desde el acantilado unos 30 m, continuando luego con una extensa plataforma litoral de unos 300 m hasta la zona de rompiente de olas (Fig. 3.53). La plataforma litoral se encuentra representada por la facies FB1 de la Formación Gran Bajo del Gualicho y presenta lineamientos perpendiculares a la línea de costa (Fig. 3.53).

En el acantilado se expone la Formación Gran Bajo Del Gualicho, cubierta en sectores por la Formación San Antonio, coronando por depósitos eólicos modernos vegetados (Fig. 3.56). Aflora al pie del acantilado la facies FB2 con 2.7 m de espesor, sobre la que en discordancia erosiva se exhibe la facies FC con un espesor promedio de 3.10 m, siendo posible en algunos sectores de esta sección diferenciarla entre FC1 y FC2. Cabe destacar que existen sectores donde FC aumenta considerablemente su espesor, llegando en algunos casos hasta los 8.75 m (Fig. 3.57). Por encima, en discordancia erosiva se deposita la Formación San Antonio, con una geometría irregular, presentando en promedio 1 m de espesor. Culminan la secuencia depósitos eólicos

modernos con aproximadamente 1 m de potencia. En esta sección el mar hace contacto con el acantilado durante marea alta.

En esta sección es posible apreciar un gran control estructural, evidenciado principalmente sobre la facies FC (Fig. 3.58), lo cual en concordancia con su mayor potencia, da como resultado los desprendimientos con los bloques de mayor tamaño de toda la franja costera (Fig. 3.59).



Fig. 3.53. Vista aérea de la sección. Es posible destacar una extensa plataforma litoral con lineamientos perpendiculares a la línea de costa y un campo de dunas vegetado sobre el acantilado.

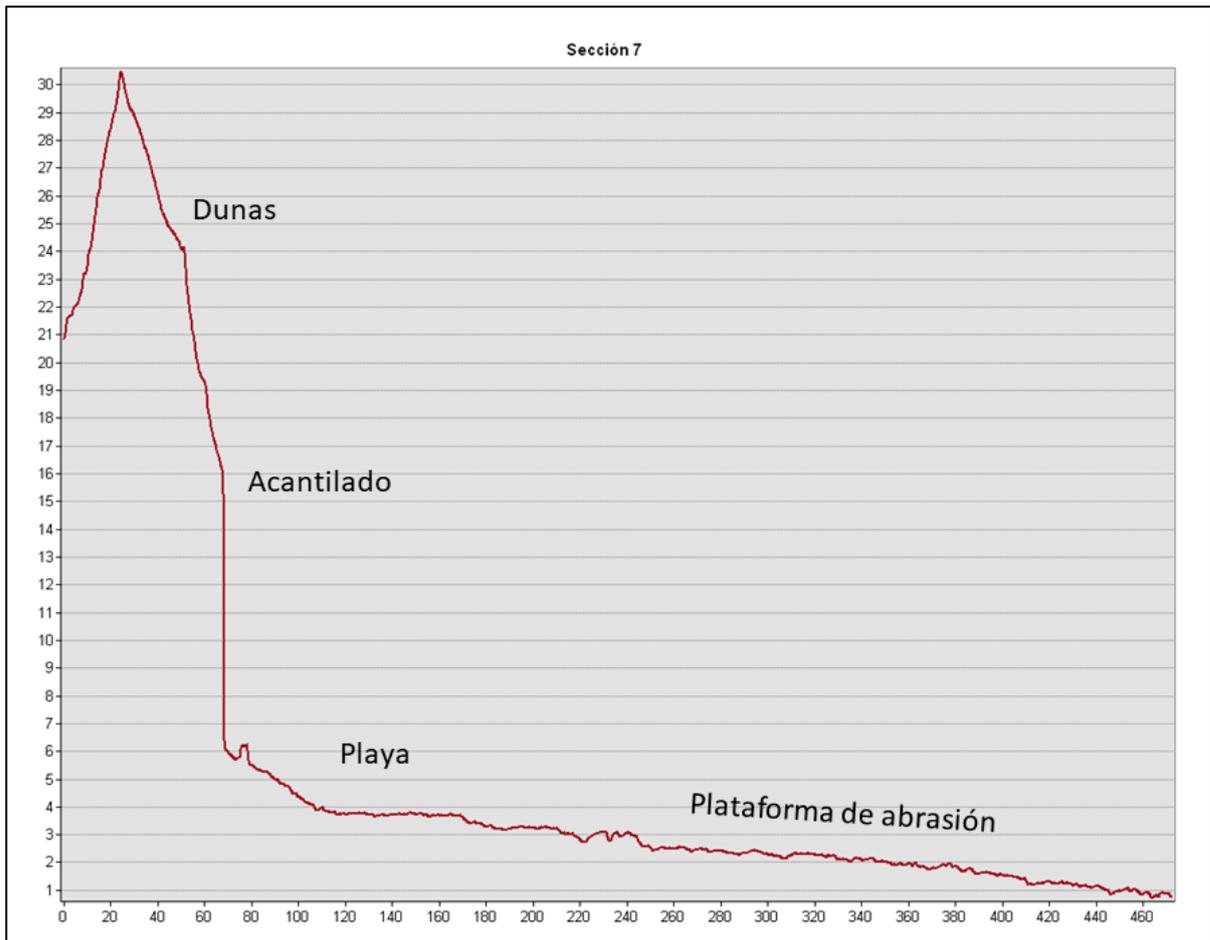


Fig. 3.54. Perfil topográfico tipo de la sección, perpendicular a la línea de costa, desde la cresta del acantilado hasta la zona de rompiente de olas. Es posible destacar una suave pendiente en lugar de la plataforma de abrasión. Las unidades de ambos ejes son metros.

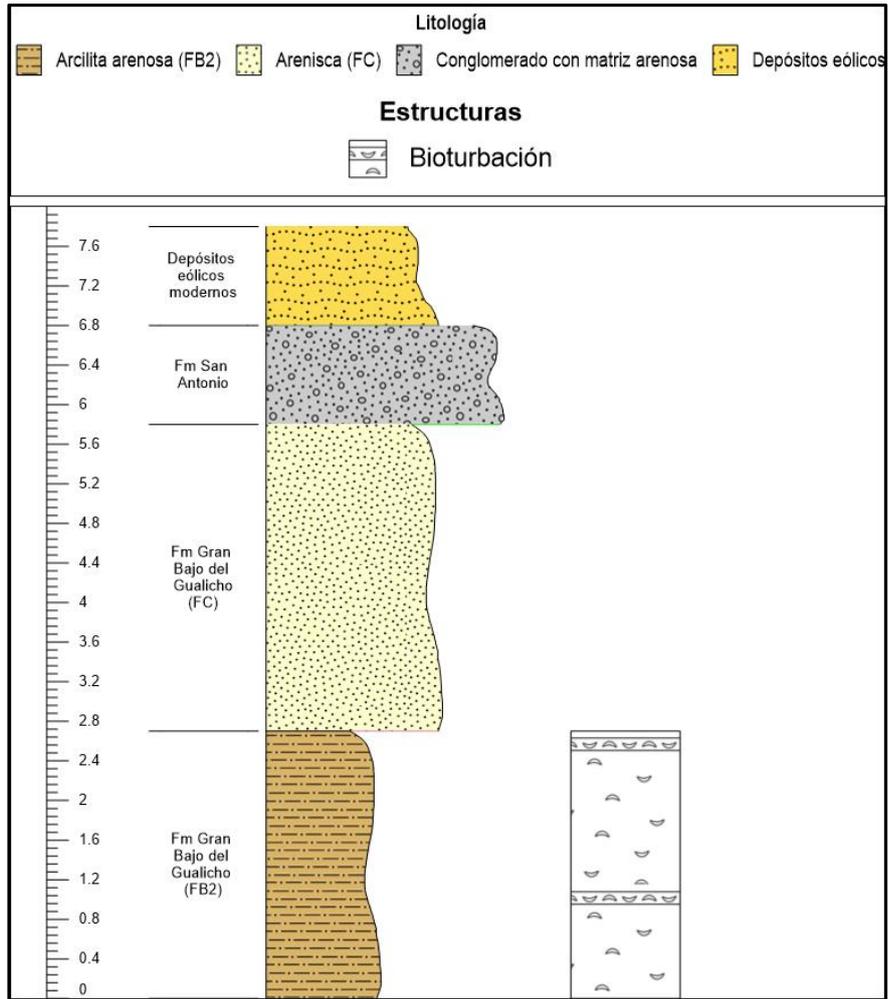


Fig. 3.55. Perfil litoestratigráfico esquemático de la Sección 7.

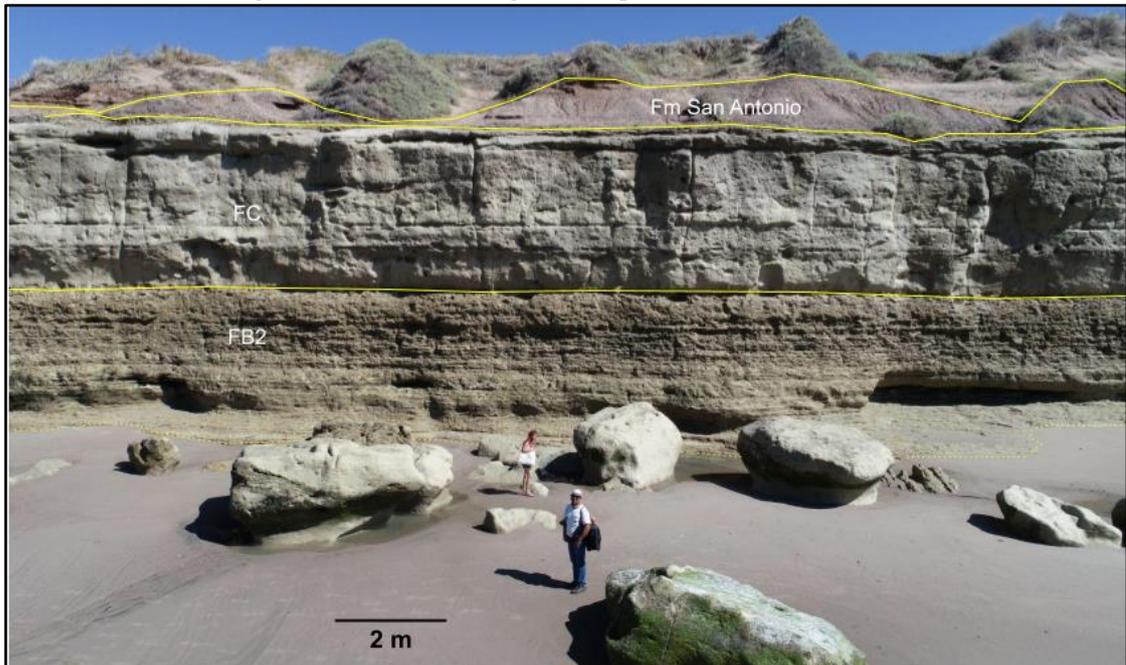


Fig. 3.56. Vista general del acantilado en la Sección 7. Es posible destacar el gran tamaño de algunos bloques desprendidos del acantilado. Tomada con VANT.

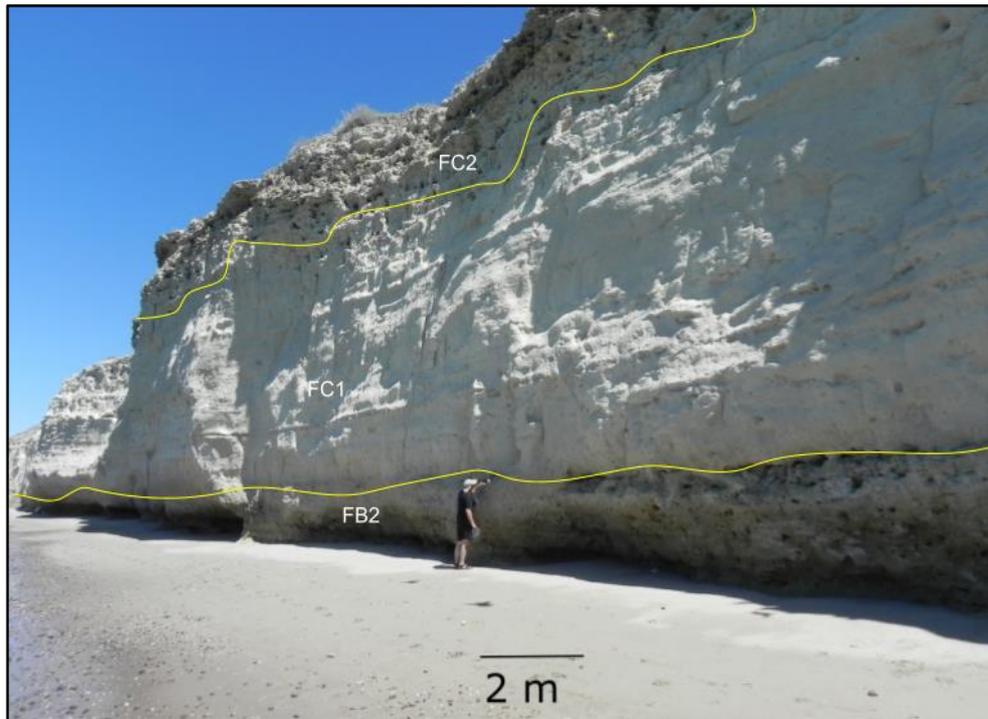


Fig. 3.57. Mayores espesores de la facies FC en la zona de estudio, ubicados en la sección 7, en cercanías a “La Rinconada”.



Fig. 3.58. Vista aérea tomada con VANT de la Bajada “La Rinconada”. Es posible observar gran control estructural en el acantilado, concretamente en la facies FC.



Fig.3.59. Bloques desplomados mayores a 2 m³. Es posible apreciar que corresponden a la facies FC.

3.4 Topografía y relación con olas de tormenta y mareas

A partir del MDE generado mediante el procesamiento de las imágenes recolectadas con VANT, fue posible generar un perfil topográfico que exhibe la cota al pie del acantilado a lo largo de toda la zona de estudio, siendo representada la altura en metros en el eje de coordenadas y la distancia en kilómetros desde la Bajada 5, en el eje de abscisas (Fig. 3.60). Además, dentro del mismo gráfico fueron graficadas la pleamar astronómica más alta (HAT) y la altura de ola de tormenta.

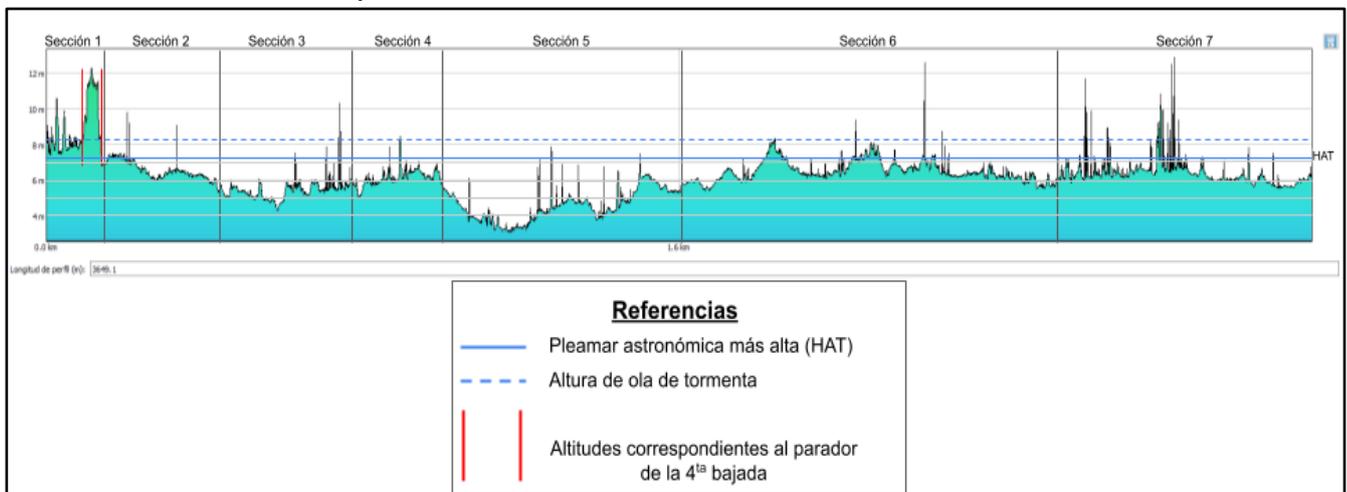


Fig. 3.60. Perfil de elevación de la cota al pie del acantilado respecto de la altura de HAT. Los valores de altura comprendidos entre las líneas verticales rojas, no deben ser considerados, ya que corresponden a la altura del parador ubicado en la Bajada 4, que por razones de cercanía al acantilado no fue posible diferenciar en el procesamiento.

De acuerdo a lo observado, es posible comprender la variación espacial de los procesos erosivos-acumulativos a lo largo de la franja costera de Las Grutas, diferenciadas las secciones anteriormente abordadas. Es necesario tener en cuenta que, a mayor cota, mayor será la energía que perderá el agua al transitar esa pendiente, y menor será el tiempo de contacto mar-acantilado.

Del gráfico es posible destacar que la Sección 5 se encuentra a menor altura respecto del nivel del mar, seguida de la Sección 3, siendo en ese orden, los sectores afectados por olas de mayor amplitud y por más tiempo en cada ciclo de mareas.

La Sección 1, Sección 6 y Sección 7, presentan las mayores alturas respecto del nivel mar, siendo estos sectores afectados en menor medida por la mayoría de las mareas altas diarias, sufriendo mayores erosiones

durante las mareas altas extraordinarias y aquellas generadas durante las tormentas, que, si bien son breves, son enérgicas y actúan socavando el acantilado y generando inestabilidad.

Por su parte, la Sección 2 y la Sección 4 se mantienen con cotas comprendidas dentro de la media, siendo sometidas a la acción marina en menor proporción que las secciones 5 y 3, pero en mayor medida que las secciones 1, 6 y 7.

3.5 Estabilidad de playa

Es posible comprender a partir de los perfiles topográficos perpendiculares a la línea de costa realizados en cada sección, que las acumulaciones de playa son distintas en cada sector. Las olas de tormenta pueden causar la removilización de grandes volúmenes de sedimentos, dejando al descubierto masas rocosas y ausencia de arena en la playa (Fig. 3.61).

En base a los MDE obtenidos durante el relevamiento con el VANT en diciembre del 2021, día posterior a una intensa tormenta del SE que afectó la costa, y en septiembre del 2022, fue posible realizar cálculos correspondientes al volumen de sedimentos recuperados durante los nueve meses comprendidos entre ambos vuelos, siendo posible también interpretarlo como una aproximación a los volúmenes removidos durante una tormenta.

Los datos derivados de los procesamientos se exhiben en la Tabla 3.1. Allí se evidencia que la sección con mayor recuperación de volumen de sedimentos de playa fue la Sección 5, lo que hace posible inferir que durante los eventos de tormenta es el sector más afectado por la acción marina, con una variación de 0,62 m en la altura de playa. Por otro lado, la Sección 6 es la segunda con mayor variación de sedimentos, pero en este caso, gran parte de la variación en el volumen corresponde a derrumbes ocurridos durante el período de tiempo comprendido entre ambos vuelos (Fig. 3.52).



Fig. 3.61. Fotografía aérea tomada con VANT donde se observa el cambio en el volumen de depósitos de arena de playa en la Bajada 3. (A) Relevamiento un día después de una tormenta del sudeste en 2021. (B) Relevamiento realizado 9 meses después de la tormenta del sudeste, en 2022. Obsérvese en (A) como queda descubierta la plataforma de abrasión oculta debajo de la playa, diferenciada con línea punteada amarilla.

Tabla 3.1. Volúmenes de arena medidos post-tormenta (2021) y en momento de recuperación de playa, 9 meses después (2022).

Secciones	Volumen de depósitos de playa 2021 [m ³]	Volumen de depósito de playa 2022 [m ³]	Diferencia de volumen [m ³]	Área del polígono [m ²]	Variación de altura de sedimentos de playa [m]
Sección 1	154.124,10	156.700,60	2.576,50	39.474,60	0,07
Sección 2	245.652,60	257.376,90	11.724,30	66.394,30	0,18
Sección 3	184.518,80	200.088,90	15.570,10	66.015,00	0,24
Sección 4	129.596,70	134.291,50	4.694,80	41.328,80	0,11
Sección 5	271.532,60	327.137,40	55.604,80	89.994,90	0,62
Sección 6	888.752,00	1.002.700,00	113.948,00	187.996,70	0,61
Sección 7	820.591,80	896.256,30	75.664,50	179.763,40	0,42

3.6 Retroceso de la línea de cresta de los acantilados

A partir de la delimitación de la línea de cresta de los acantilados en imágenes tomadas en distinto tiempo, es posible estimar el retroceso costero. Partiendo de la comparación entre las fotografías aéreas rectificadas del año 1969 y el ortomosaico obtenido en base a las imágenes adquiridas mediante el relevamiento con el VANT en el año 2021 (Fig.3.62) se pudo cuantificar el retroceso del acantilado para cada sección establecida en el presente trabajo (Tabla 3.2).

Los resultados arrojan que los valores aproximados de retroceso varían entre 3 y 6 m en los 52 años abarcados en el análisis. Estos valores indican un retroceso promedio entre 5.7 cm y 11.4 cm por año. La sección en la que se obtuvo mayor retroceso corresponde a la sección 5 (sector de las cuevas/grutas) con un promedio cercano a los 6 m. Luego, las secciones 4, 6 y 7 con valores altos, de 5.55 m, 4.56 m y 5.10 respectivamente, diferenciándose de las secciones 1, 2 y 3 con menores retrocesos, de 4.30 m, 3.01 m y 4.41 m respectivamente (Tabla 3.2).

El mayor retroceso puntual se dio en cercanía a la Bajada “La Rueda”, atribuido al emplazamiento del denominado “Desagüe del ACA” nombre recibido en referencia a su curso sobre las instalaciones de dicho predio. Cabe destacar que, a partir de los talleres dictados a la comunidad, brindados en conjunto con la Municipalidad de San Antonio Oeste, fue posible recabar a partir de los testimonios de antiguos pobladores, que antiguamente dicho desagüe natural escurría sobre el acantilado donde actualmente se encuentra un muro de contención de gaviones, habiéndose desviado mediante una obra civil el curso natural unos 20 metros hacia el Sur (Fig 3.63).

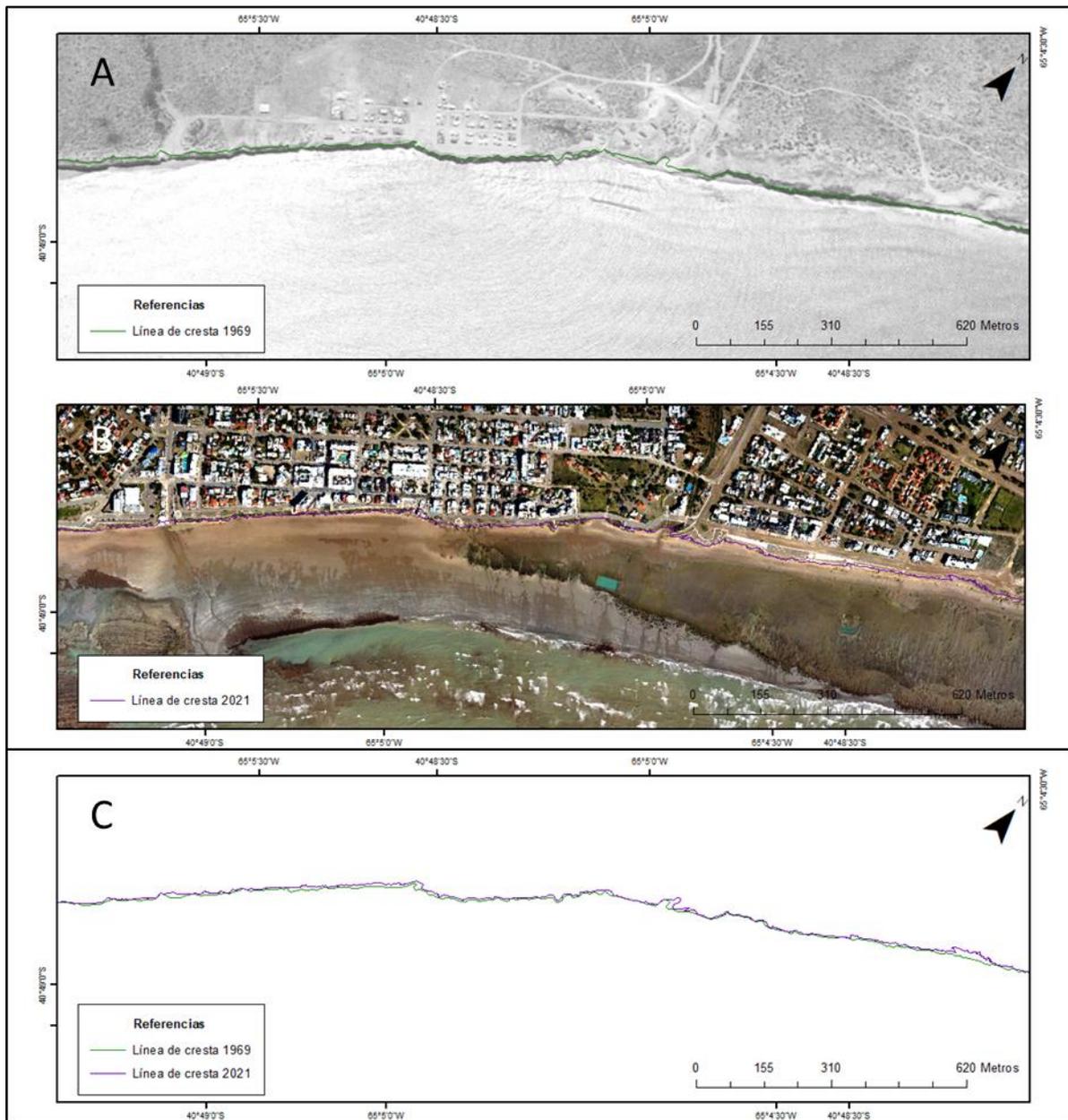


Fig. 3.62. Comparación de la línea de cresta de los acantilados entre 1969 y 2021. (A) Línea de cresta de del acantilado en fotografía aérea rectificada del año 1969; (B) Línea de cresta de del acantilado en ortomosaico obtenido a partir de imágenes del VANT en 2021; (C) Comparación de las líneas de cresta de los acantilados de ambas imágenes (1969-2021).

Tabla 3.2.- Valores totales medios de retrocesos de la línea de cresta (1969-2021) por sección.

	Retroceso (1969 - 2021)
Sección 1	4,30 m
Sección 2	3,01 m
Sección 3	4,41 m
Sección 4	5,55 m
Sección 5	5,94 m
Sección 6	4,56 m
Sección 7	5,10 m

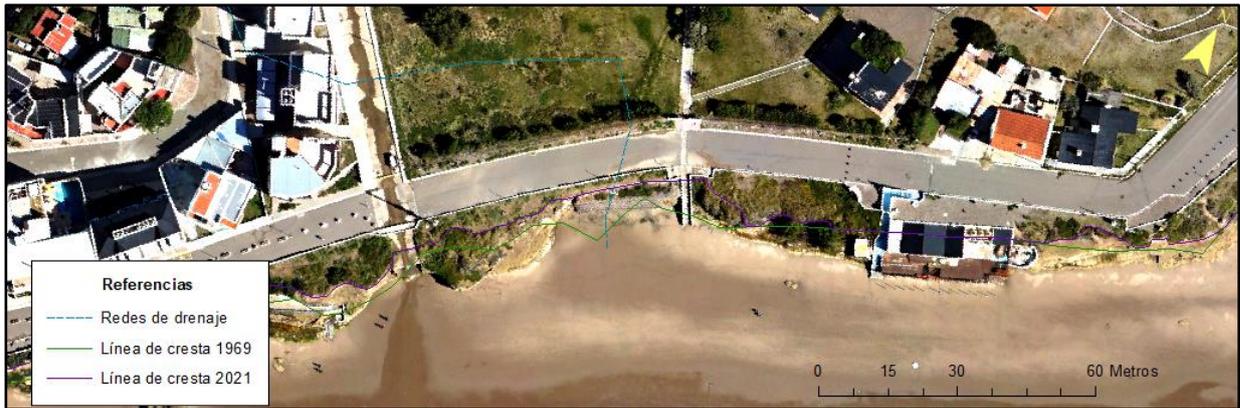


Fig. 3.63. Mayor retroceso puntual en cercanías a la Bajada “La Rueda”. Es posible observar que en ese sector antiguamente se encauzaba naturalmente el desagüe del ACA.

4. DISCUSIÓN

En base a los relevamientos realizados en la zona de estudio detallados en apartados anteriores, es posible indicar que, pese a que la litología de los acantilados a lo largo de la costa es muy similar, es posible apreciar que existe una gran variación respecto a la tasa de retroceso del acantilado en los distintos sectores, exhibiendo distintas geformas que evidencian la ocurrencia de variados fenómenos modeladores de la costa, resultantes de los procesos erosivos ocurridos en cada sector. En la figura 4.1 se detallan los rasgos geomorfológicos, condiciones o factores presentes en cada una de las secciones de estudio y en algunos de ellos se indica además el grado de avance en el desarrollo del rasgo.

Rasgos Geomorfológicos/ Factores condicionantes	Sección 1	Sección 2	Sección 3	Sección 4	Sección 5	Sección 6	Sección 7
Playa	Acotada	Acotada	Extensa	Extensa	Acotada	Acotada	Acotada
Plataforma litoral	X	X	-	-	X	X	X
Surgencia de agua en el acantilado	-	X	X	-	X	-	-
Facies de las que surge el agua	-	FB1/FB2 - Playa	FB1	Playa	FB1/FB2	-	-
Cuevas / Grutas	-	-	Estadio primitivo	-	Estadio avanzado	-	-
Bloques caídos	-	-	-	-	< 1 m3	> 1 m3	> 1 m3
Discontinuidades en el macizo	-	-	-	// al frente	// al frente	3 FLIAS	3 FLIAS
Espesor de la facie "C"	0.70 m	1 m	2 m	2 m	3.5 m	3.5 m	6 m
Facies expuesta al pie del acantilado	FB1	FB1	FA	FB1	FA	FB1	FB2
Cto mar-acant. durante marea alta	NO	SI	SI	SI	SI	SI	SI

Fig. 4.1. Cuadro comparativo de las secciones con los rasgos geomorfológicos principales y factores condicionantes. En la fila correspondiente a la presencia de cuevas/grutas, se indica el estadio de desarrollo de las mismas, diferenciándose un sector con el rasgo en un estadio primitivo de desarrollo y otro sector en un estadio más evolucionado o avanzado.

Los resultados obtenidos a partir del análisis realizado en base a la fotografía aérea de 1969 (9 años luego de la fundación del balneario Las Grutas) y la imagen obtenida con el VANT correspondiente al año 2021, determinan una estimación de la tasa de recesión del acantilado para cada una de las secciones de la zona de estudio. Dicho valor corresponde a la media de las distintas mediciones realizadas para cada sección durante todo el período analizado (1969 – 2021). Se analizan las secciones en orden decreciente de retroceso total acumulado.

La Sección 5 contiene el sector de costa con mayor retroceso acumulado para el período analizado (1969 - 2021), arrojando un valor medio de 5,94 m. Este sector posee la cota más baja respecto al nivel del mar de toda la zona de estudio, ocasionando que sea afectado por olas de mayor amplitud y por más tiempo en cada ciclo de mareas, y por lo tanto sea más prolongado el efecto erosivo. Es el único sector de la costa que exhibe grandes cuevas/grutas en los acantilados, con diaclasas paralelas a la cara del acantilado, condicionando la caída de los techos de estas al perder estabilidad en la base. Además, es donde mayor flujo de agua surge desde el acantilado, de manera constante durante todo el año, incrementándose durante los meses de verano, meses con mayor afluencia turística y mayor riego en los jardines. A su vez es el sector donde mayor variación de volumen de sedimentos de playa ocurre durante los eventos de tormenta, pese a tener mayor porcentaje de su superficie cubierta por plataforma litoral que por depósitos de playa/arena. Es necesario considerar que el constante flujo de agua subterránea ácida, producto de la materia orgánica disuelta en ella, ocasiona disolución de la matriz carbonática de la que se compone gran parte de la roca, evidenciada esta disolución en la precipitación de sales en el frente del acantilado.

Luego se ubica la Sección 4 con un retroceso medio estimado en 5,55 m, siendo una de las tres secciones con menor altura sobre el nivel del mar al pie del acantilado de la zona de estudio. A diferencia de la Sección 5, en este sector no existe una plataforma litoral, sino que consta totalmente de depósitos de arena de playa, actuando ésta como atenuante de la erosión marina. La surgencia de agua en este sector se manifiesta desde la playa, pudiéndose inferir que es producto del soterramiento del contacto entre las facies FA y FB1, que como se indicó anteriormente funciona como piso hidrófugo debido a las características litológicas de la facies FA. Es posible también que ésto se deba a que la concentración de agua subterránea en este sector sea menor en comparación con la Sección 5, por lo que logra escurrir hasta el contacto entre FA- FB y no surge desde toda la pared del acantilado a diferencia de la Sección 5. Si bien esta sección no posee cuevas/grutas en el acantilado, si exhibe diaclasas paralelas a la cara frontal del acantilado, al igual que la Sección 5, pero en esta sección solo ocasionan pequeños desmoronamientos. Pese a que en este sector dominan los depósitos de arena en la playa, presenta una de las variaciones de volumen de depósitos de playa más bajos luego de las tormentas.

Le sigue en orden decreciente de retroceso, la Sección 7 registrando un retroceso total de 5,10 m para el período analizado, que a pesar de tener una de las cotas al pie del acantilado más altas de toda la zona de estudio, restringiendo el tiempo y altura de ola al que se somete el acantilado durante mareas altas, tiene uno de los retrocesos más altos, el cual se infiere que se deba principalmente a la caída de bloques del acantilado, producto de una sumatoria de factores entre los que se contemplan la desestabilización por erosión basal y condicionamientos geomecánicos, debido a las 3 familias de diaclasas que limitan grandes bloques en la facies FC, única facies representada en los bloques caídos, pero a diferencia de otros sectores, aquí posee los mayores espesores, por lo que los bloques caídos son los de mayores dimensiones, superando los 2 m³. No se observa surgencia de agua desde el acantilado ni grutas/cuevas. Respecto a la variación en el volumen de los sedimentos de playa, se ubica en tercer lugar, luego de la Sección 6, presentando ambas secciones (Sección 6 y Sección 7) variaciones producto principalmente de la caída de bloques desde el acantilado.

La Sección 6 se ubica en cuarto lugar en orden decreciente de retroceso, arrojando un valor medio para el período analizado de 4,56 m, se estima que el principal factor de retroceso al igual que la sección anterior, se debe principalmente a la caída de bloques desde el acantilado debido a los mismos condicionamientos geomecánicos y de pérdida de estabilidad en la base. Sus bloques también se encuentran limitados por 3 familias de diaclasas y poseen grandes dimensiones (mayores a 1 m³), aunque son de menor tamaño que en la Sección 7, debido a la pérdida de espesor de la facies FC hacia el sur. No se observa surgencia de agua desde el acantilado, ni grutas/cuevas, aunque si es posible observar erosión basal.

Continúa la Sección 3, con una tasa de retroceso total de 4,41 m para el período analizado siendo la segunda sección con menor cota al pie del acantilado (llegando el mar a contactar el acantilado diariamente), pero que a diferencia de la Sección 5, esta sección no posee plataforma litoral, sino que los depósitos de playa están conformados en su totalidad por arena, que como se indicó anteriormente ocasiona una disminución de energía de las olas de choque. Exhibe surgencia de agua desde el acantilado principalmente desde la facies FB1 y es posible observar en los lugares donde aflora el contacto FA-FB1 indicios de un estadio menos evolucionado en la formación de oquedades similares a las cuevas/grutas de la Sección 5, pero de menores dimensiones. Respecto a las propiedades geomecánicas exhibe una familia de diaclasas paralela a la cara frontal del acantilado afectando todo su frente, pero no se observan bloques desprendidos sobre la playa.

La Sección 1 por su parte es la segunda sección con menor retroceso de la línea de cresta del acantilado, estimado en 4,30 m para el período analizado. Es la sección de mayor cota al pie del acantilado, por lo que normalmente el mar no suele contactar al acantilado durante mareas altas, a excepción de mareas extraordinarias, esto se ve evidenciado por la casi nula erosión basal y la vegetación ubicada al pie del

acantilado, dando indicios de estabilidad en el tiempo del sustrato. Asimismo, es la sección con menor variación de volumen de sedimentos de playa luego de los eventos de tormenta en toda la zona de estudio, pese a presentar una playa acotada y una extensa plataforma litoral. No se observan cuevas/grutas ni discontinuidades en el acantilado, así como tampoco es posible observar bloques desprendidos desde el mismo.

La Sección 2 registra el menor retroceso medio de la línea de cresta, estimado en 3,01 m para el período analizado. Se ubica entre las secciones con una cota intermedia al pie del acantilado, variando a lo largo de su extensión, por lo que durante las mareas altas la mayor parte de dicho sector permanece sin ser contactado por el mar, sólo lo hace en el extremo NE, en cercanías a la Bajada 3, donde es posible observar erosión basal. Exhibe surgencia de agua tanto desde el acantilado como desde la playa, en el extremo SO lo hace desde toda la pared del acantilado, mientras que en el extremo NE el agua surge desde los planos de estratificación de FB1 y principalmente del contacto FA-FB1. En el sector central, donde no aflora FA, la surgencia de agua ocurre desde la playa, por lo que es posible inferir que es debido al soterramiento de dicho contacto. Presenta una playa acotada, aunque más extensa que la Sección 1 y no exhibe grutas/cuevas ni discontinuidades en el acantilado.

En base a lo anteriormente detallado, es posible indicar que es notorio como las aguas subterráneas acidificadas que surgen desde el acantilado ocasionan disolución de la matriz carbonática del mismo, aprovechando principalmente las zonas de debilidades establecidas por los planos de estratificación, lo que se ve evidenciado en las oquedades que se forman a partir de dichos planos y a la precipitación de espeleotemas en el frente del acantilado. Sin embargo, a diferencia de otros autores como Bonuccelli *et al.* (2021) es posible considerar que la formación de las cuevas/grutas no ocurre únicamente por disolución carbonática del acantilado producto de la circulación de aguas ácidas, sino que ocurre por una sumatoria de factores erosivos, acentuados en ciertos sectores. La disolución de la matriz carbonática es uno de los factores que aumenta la facilidad con la que la erosión mecánica marina actúa, acentuándose en mayor medida en los sectores de las secciones 5 y 3, lugares que poseen las cotas más bajas al pie del acantilado, siendo los sectores expuestos durante más tiempo a la erosión marina y sometidos a olas de mayor amplitud. Dada una mayor amplitud de ola, el mar contacta el acantilado a mayor altura provocando erosión en sectores más altos del mismo, mientras que en la Sección 3 el mismo proceso ocurre a una altura menor, y se acentúa principalmente a partir del plano de estratificación determinado por el contacto de las facies FA - FB1, piso por el cual, además, circula la mayor cantidad de agua subterránea debido a las características hidrófugas de FA. Además de este proceso de disolución de la matriz carbonática de la roca, resulta necesario considerar la posible ocurrencia de “*Piping*”, ocasionando que el agua subterránea que circula por el acantilado provoque remoción grano a grano de las partículas arcillosas, incrementando aún más la porosidad secundaria de la roca y desencadenando una suma de factores que se potencian con el tiempo de exposición a estos procesos, exponiendo al acantilado ya vulnerado química y físicamente a la acción mecánica marina durante mayores períodos de tiempo que en los sectores aledaños y frente a olas de mayor amplitud, abarcando mayor superficie en la cara del acantilado y actuando todos estos procesos en conjunto, a modo de sinergia, dando como resultado grandes cuevas/grutas.

Se suma a estos procesos erosivos la pérdida de protección del acantilado posterior a los eventos de tormenta, donde grandes volúmenes de arena y bloques son removidos de los sectores de playa, principalmente en la Sección 5, disminuyendo el efecto atenuante que provocan ante la acción marina. A partir de esto, la formación de cavernas condiciona la estabilidad del macizo rocoso, ocasionando que durante la caída de los techos de estas estructuras se registren los retrocesos de la línea de costa más grandes en la zona de estudio.

Es posible indicar también que el segundo factor que más afecta el retroceso de la línea de costa en la zona de estudio se debe a la caída de bloques desde el acantilado, reflejado en el extremo NE de la zona de estudio (secciones 6 y 7) donde las características geomecánicas del macizo delimitan bloques que en conjunto con las características litológicas (friabilidad) y el gran espesor de la facies FC (facies con mayor presencia de estructuras que las demás) constituyen los mayores desmoronamientos en toda la zona de estudio.

En cuanto al análisis del retroceso del acantilado el presente trabajo es coincidente con los trabajos realizados por Fucks *et al.* (2011); Kokot y Chomnalez (2012); Fucks *et al.* (2015), adheriendo a que los sectores de la costa que presentan mayor retroceso se ubican en el sector centro y norte de la zona de estudio, principalmente entre las Bajadas 0 y 1, ocasionados por el colapso del techo de las cavernas en el sector centro y por la caída de bloques de gran volumen en el sector norte, entre las secciones 6 y 7. Respecto a la tasa de retroceso, Fucks *et al.* (2015) indica ser coincidente con los valores obtenidos por Kokot y Chomnalez (2012) asegurando que el mayor retroceso, registrado en el sector central de la zona de estudio, arroja un valor aproximado de 3 metros. Cabe destacar que existe una diferencia en los períodos de tiempo analizados por los distintos autores, siendo de 39 años el analizado por Kokot y Chomnalez (2012) y de 47 años el analizado por Fucks *et al.* (2015). Por otra parte, es necesario mencionar también que anteriormente Fucks *et al.* (2011) realizaron una estimación de retroceso indicando que el valor aproximado de retroceso era de 8 m, ubicado también en el sector central de la zona de estudio.

Teniendo en cuenta lo anteriormente mencionado, es posible recalcar que existe una correlación respecto al año de inicio del período de tiempo analizado por Kokot y Chomnalez (2012) y el presente trabajo, ambos utilizando como base fotografías aéreas de 1969, por lo que si se hiciera una comparación de los resultados obtenidos como retrocesos máximos indicados por ambos trabajos, sería posible inferir que exista una tendencia al aumento en la velocidad de retroceso, teniendo en cuenta que el período analizado por los autores mencionados comprende desde 1969 a 2008, arrojando un valor máximo de retroceso de 3 m y que el presente trabajo analiza desde 1969 hasta el 2021, extendiéndose por 12 años el período analizando y arrojando un resultado cercano a los 6 m de retroceso, por lo que si se hiciera una estimación del retroceso anual para el período de tiempo analizado en ambos trabajos, el análisis de Kokot y Chomnalez (2012) indicaría un valor promedio de retroceso anual cercano a los 7.69 cm/año, mientras que el presente arrojaría un valor de 11.5 cm/año.

Por otra parte, es necesario tener en consideración la importancia que reviste la ubicación del mayor retroceso registrado en la zona de estudio (entre Bajada 1 y Bajada La Rueda) teniendo en cuenta que este sector es un lugar muy concurrido tanto en el sector de playa como en el paseo de la costanera, pudiendo ser un sector propenso al desmoronamiento de grandes bloques que podrían ocasionar la pérdida de vida de las personas que transiten por el lugar durante un evento de colapso del techo de las cavernas. Además de esto es necesario considerar también el continuo desarrollo en profundidad de las grandes cavernas registradas, pudiendo en un futuro ocasionar grandes pérdidas materiales a los inmuebles construidos sobre los sectores hacia donde estas geomorfologías se desarrollan.

5. CONCLUSIONES

- En base a las secciones del acantilado, fue posible determinar que existe un retroceso diferencial, pese a presentar cierta homogeneidad en cuanto a la litología expuesta.
- La cota a la que se ubica el pie del acantilado es el factor condicionante más importante, ocasionando en conjunto con la circulación de aguas subterráneas acidificadas que el efecto erosivo de la erosión mecánica marina sea mucho mayor. En cotas bajas al aumentar el tiempo de exposición del acantilado (con su matriz ya debilitada) a la acción marina, sumado a que es expuesto a olas de mayor altura, la erosión mecánica marina resulta en grandes cavernas.
- A partir del colapso de los techos de las cavernas se registran los mayores retrocesos, ocurridos en la Sección 5 (sector centro) con un retroceso acumulado de 5,94 m para el período analizado (1969-2021). Sin embargo, es posible afirmar que no en todos los sectores donde surge agua desde el acantilado ocurre la formación de cavernas, por lo que es posible inferir que el efecto sinérgico de la combinación de factores mencionados anteriormente hace posible la conformación de las cavernas.
- El segundo proceso erosivo que mayor retroceso ocasiona en la zona de estudio es la remoción en masa por caída vertical de grandes bloques desde el acantilado (fenómenos erosivos sub-aéreos), ocurridos principalmente en el sector NE, entre la Bajada La Rueda y La Rinconada, abarcando las Secciones 6 y 7.
- Los bloques caídos de mayores dimensiones se ubican en la Sección 7 debido a que los mismos se componen principalmente de la facies FC, la cual incrementa su espesor hacia el NE de la zona de estudio, acumulando esta sección un retroceso total de 5,10 m para el período analizado.
- Es posible inferir que, aunque sean más perceptibles los derrumbes ocurridos en la zona NE (secciones 6 y 7), debido a la frecuencia con la que ocurren, estos retrocesos instantáneos son menores frente al retroceso instantáneo que ocurre en la Sección 5 al colapsar el techo de una de las cavernas de unos cuantos metros de profundidad.

Finalmente, se sugiere un monitoreo periódico sobre la dinámica costera en la zona de estudio, a fines de establecer con antelación los sectores propensos a derrumbes, pudiendo realizar acciones preventivas en pos de salvaguardar la vida de las personas que transitan por estos sectores. Además, se sugiere analizar medidas a adoptar en los sectores de la costa donde las cavernas se desarrollan en profundidad, con la finalidad de mitigar la erosión marina, pudiendo resguardar también los inmuebles ubicados sobre los sectores con mayores retrocesos registrados.

Agradecimientos

En primer lugar, agradecer a la universidad pública, herramienta fundamental de la movilidad social ascendente, por haberme formado como profesional y enriquecido como persona, ya que, sin la existencia de esta institución, para muchos alumnos nos sería muy difícil llegar a formarnos como profesionales.

Al anterior Ministerio de CyT por brindar los fondos necesarios mediante el Proyecto Federal de Innovación a partir del cual fue posible financiar los gastos de las campañas de campo y de material de gabinete. Al IIPG por brindarme un espacio físico y herramientas para poder llevar a cabo relevamientos y procesamientos asociados al trabajo.

Agradecer también a todas aquellas personas que me han acompañado en este proceso de aprendizaje tan importante. A mi director Alberto Caselli y co-director Gerardo Barión por la paciencia, el incentivo y su tiempo dedicado a este trabajo de investigación. A toda mi familia, mis hermanos, mis amigos y compañeros de estudio. A mi compañera de vida, por la paciencia y la tranquilidad que ha sabido transmitirme en momentos difíciles. A mis padres por haberme dado el apoyo imprescindible para poder estudiar, fundamentalmente a mi madre que ha sido siempre un pilar fundamental para mí. Gracias.

6. BIBLIOGRAFÍA

- Allison, R. J. (1989). Rates and mechanisms of change on hard rock coastal cliffs. *Zeitschrift für Geomorphologie Neue Folge, Supplementband 73*:125–138.
- Angulo, R., Fidalgo F., Gómez Peral M. y Schnack E. (1978). Las ingresiones marinas cuaternarias en la bahía de San Antonio y sus vecindades, provincia de Río Negro. *Actas 7º Congreso Geológico Argentino*, 1: 271-283. Buenos Aires.
- Anthony, E.J. (2005). Beach erosion. En: Schwartz, M.L. Ed. *Encyclopedia of Coastal Science*. Springer. Dordrecht, 140-145.
- Bird, E. (2008). *Coastal geomorphology: an introduction*. 2nd Ed. John Wiley y Sons. New York.
- Bonuccelli R.S., Narvarte M, Saad J.F. (2021) Disolución de rocas carbonatadas: estudio preliminar sobre un proceso de karstificación en los acantilados de las grutas. Informe Técnico N°01/2021. Escuela Superior de Ciencias Marinas, Universidad Nacional del Comahue, 23p.
- Bray M. J. y Hooke J. M. (1997). Prediction of soft-cliff retreat with accelerating sea-level rise. *Journal of Coastal Research* 13:453–467.
- Castedo, R. (2012). Modelización de costas rocosas acantiladas. Tesis doctoral, Universidad Politécnica de Madrid. 253 pp.
- Celemín, A. H. (1984). Meteorología práctica. *Edición del autor*. Buenos Aires. Congreso Geológico Argentino, Actas III: 593 - 606. Buenos Aires, 284pp.
- Del Río, J. L., Álvarez, J., López de Armentia, A., Bó, M.J., Martínez, J. y Camino, M. (2004). Estudio y desarrollo metodológico para la determinación de la velocidad de retroceso de la costa entre Punta Mejillón y el Balneario El Cóndor, Provincia de Río Negro. Dirección de minería de la provincia de Río Negro, Reporte Técnico, Viedma, 88pp.
- Elorza, M.G. (2008). Geomorfología. Pearson Educación, S.A. Universidad de Saragoza, Madrid, España. 920 p.
- Emery, K. O. y Kuhn, G. G. (1982). Sea cliffs: Their processes, profiles, and classification. *Geological Society of America Bulletin* 93, 7:644–654.
- Fryklund, B., Marshall, A. y Stevens, J. (1996). La cuenca del Colorado. En Ramos, V., y Turic (eds.) *Geología y Recursos Naturales de la Plataforma Continental Argentina*. 13er Congreso Geológico Argentino y 3er Congreso de Exploración de Hidrocarburos. Relatorio 8: 135-158. Buenos Aires.
- Fucks, E., Scalise, A. H. y Schnack, E. J. (2011). Evaluación de alternativas para la conservación y manejo del frente costero en Las Grutas. Consejo Federal de Inversiones, 81 p.
- Fucks, E., Schnack, E. J., y Charó, M. (2012). Aspectos geológicos y geomorfológicos del sector N del golfo San Matías, Río Negro, Argentina. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 25.
- Fucks, E.E., Schnack, E.J., Scalice, A., Ahrendt, K., Vafeidis, N., y Sterr, H. (2015). Procesos modeladores en los acantilados de Las Grutas, provincia de Río Negro. *Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente*, (34): 57-73.
- Galán, C., y Nieto, M. (2015). Cuevas de tubificación y cárcavas en arcilla: pseudokarst de las Bardenas. *Publ. Dpto. Espeleol. SC Aranzadi. Web aranzadi-sciences.org*.
- Gelós, E., Schillizzi, R. y Spagnuolo, J. (1992). El Mesozoico superior-Cenozoico de la costa occidental del golfo San Matías. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 47: 423-426. Ginsburg, R. N.1953. Beachrock in South Florida. *Journal of Sedimentary Petrology* 23:85-92.
- Gelós, E., Schillizzi, R., y Spagnuolo, J. (1993). El Cenozoico de la costa norte del Golfo San Matías, Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 47: 135-140.

- Genchi, S.A. (2012). Geomorfología regional y dinámica costera del sector occidental del golfo San Matías. Tesis doctoral. Universidad Nacional del Sur, 237 pp.
- Genchi S.A., Carbone M.E., Piccolo M.C., Perillo G.M.E., (2011). Hydrologic response of the drainage basins that intersect Las Grutas town, Argentina. *Revista Investigaciones Geográficas (México)*, 75: 23-36.
- Genchi S.A., Vitale, A. J., Piccolo, M. C., Perillo, G. M. E., y Carbone, M. E. (2013). Acantilados que retroceden: El caso del Balneario Las Grutas (Río Negro).
- Giacosa, R. (1997). Geología y petrología de las rocas precretácicas de la región de Sierra Pailemán, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 52 (1): 65-80.
- Higgins, C.G. (1982). Drainage systems developed by sapping on Earth and Mars: *Geology*, 10:147-152.
- Howard, A.D. y McLane, C.F., (1988). Erosion of cohesionless sediment by groundwater seepage: *Water Resources Research*, 24:1659-1674.
- Kaaschieter, J., (1965). Geología de la Cuenca del Colorado. *Actas 2as Jornadas Geológicas Argentinas*, 3: 251-269. Buenos Aires.
- Kokot, R.R. y Chomnalez, F. (2012). Retroceso de la línea de costa en Las Grutas, provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 69 (1): 88-96.
- Kokot, R.R. y Favier Dubois, C. M. (2009). Evolución geomorfológica de la bahía de San Antonio (Río Negro, Argentina). Su importancia para el registro de ocupaciones humanas. 4º Congreso Argentino de Cuaternario y Geomorfología; 12º Congresso da Associação Brasileira de Estudos do Quaternário; 2ª Reunión sobre el Cuaternario de América del Sur:125. La Plata.
- Kokot, R.R. y Favier Dubois, C. M. (2017). Evolución geomorfológica de la bahía de San Antonio, Provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 74 (3): 315-325.
- Kokot, R. R., Salminci, J.G., Luna, F.S., y Tunstall, C. (2013). Retroceso costero y su relación con parámetros geotécnicos: Las Grutas, Río Negro.
- Lawrence, P. L. (1994). Natural hazards of shoreline bluff erosion: a case study of Horizon View, Lake Huron. *Geomorphology* 10:65–81.
- Lizuain, A. y Sepúlveda, E. (1978). Geología del Gran Bajo del Gualicho (Provincia de Río Negro) 7º Congreso Geológico Argentino (Neuquén), *Actas* 1: 407-422, Buenos Aires.
- López Alfonsín, R., Coccia, M. E., Fauqué, L. E., Castaños, C. y Olvar, N. M. (2012). Estudio para el ordenamiento territorial de la Orla Atlántica Rionegrina. Desde La Lobería a Bahía Creek. Consejo Federal de Inversiones, Buenos Aires, 108 p.
- Martínez, H., Nández C., Lizuain A., Dal Molin C., Turel A., Dalponte M., Faroux A., (2001). Descripción de la Hoja Geológica 4166-II-San Antonio Oeste, Provincia de Río Negro. Servicio Geológico Minero Argentino, Buenos Aires.
- McGreal. S. (1979). Cliffline recession near Kilkeel, N. Ireland; an example of a dynamic coastal system. *Geografiska Annale, Series A, Physical Geography* 61:211–219.
- Mouzo, F.H. (2014). Edad del golfo San Matías, plataforma continental Argentina y la estratigrafía en el gran bajo de San Antonio, Provincia de Río Negro. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 71(1): 125-138.
- Richards K. y Lorriman N. R. (1987). In *Slope Stability: Geotechnical Engineering and Geomorphology, Basal erosion and mass movement*, eds Anderson M. G., Richards K. S. (Wiley, New York): 331-357.
- Schillizzi, R., Gelos, E. M., y Spagnuolo, J. (2004). Procesos de retracción de los acantilados patagónicos entre la desembocadura de los ríos Negro y Chubut. Argentina. *Revista de la Asociación Argentina de Sedimentología*, 11(1), 17-26.

- Stipanovic, P.N. y Methol, E.J. (1972). Macizo de Somún Curá. En A.F. Leanza (Ed.): Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias: 582-599. Córdoba.
- Sunamura, T. (1992). The geomorphology of rocky coasts. Wiley, Chichester, 302 pp.
- Toffani, M. (2018). Dinámica costera y bases para el ordenamiento territorial en el balneario Bahía Creek, Provincia de Río Negro. Tesis de grado.
- Turner, R.J. (1981). Ground water conditions in Encinitas, California as they relate to sea cliff stability: Fullerton, California State University, Master of Science thesis, 81 p.
- Violante, C. (2009). Rocky coast: geological constraints for hazard assessment. Geological Society, London, Special Publications, 322:1-3.
- Zambrano, J. J. (1980). Comarca de la cuenca cretácica de Colorado. 2º Simposio de Geología Regional Argentina, Academia Nacional de Ciencias 2: 1033-1070, Córdoba.