

DINÁMICA EROSIONAL Y DEPOSITACIONAL DE LA COSTANERA Y DEL ÁREA DEL PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA.

José M. Paredes, S. Mariela Ocampo, Mauro N. Valle, José O. Allard y Sebastián Bueti.

Laboratorio de Sedimentología y Estratigrafía – Departamento de Geología (FCNyCS, UNPSJB)





Informe Técnico 2023

DINÁMICA EROSIONAL Y DEPOSITACIONAL DE LA COSTANERA Y DEL ÁREA DEL PUERTO DE COMODORO RIVADAVIA

1. INTRODUCCIÓN

1.A. Marco Conceptual

En un contexto de calentamiento global tiene lugar un incremento del nivel del mar y el aumento de la intensidad y frecuencia de las tormentas en zonas costeras, que incrementan la erosión y el transporte de sedimento (Nicholls et al. 2007). En este espacio físico, los procesos erosionales y depositacionales pueden alterar la dinámica de los usuarios de los servicios costeros, por lo que el entendimiento de los mecanismos y condiciones ambientales que causan cambios de corto plazo y generan modificaciones de los procesos asociados son importantes para la planificación de las actividades o la defensa del espacio (Lanfredi et al., 1998). Un paso previo para la comprensión de esta dinámica requiere la identificación de los factores morfodinámicos que contribuyen a la dinámica natural de la zona costera (régimen de olas, mareas, intensidad y frecuencia de tormentas) así como las condiciones antecedentes de la zona costera. Complementariamente, los procesos de retrabajo de sedimento en las zonas costeras pueden estar influenciados por la actividad urbana, ya sea a través de la modificación del aporte sedimentario dentro de las cuencas de drenaje que desembocan en la zona costera o por la realización de obras en el espacio marino. Las medidas para mitigar procesos erosivos o depositacionales dependen de las condiciones locales de la

RESUMEN

Puerto de Comodoro FL Rivadavia está emplazado en una costa macromareal con régimen semidiurnal. EL estudio de mapas batimétricos del Puerto del período 1996-2022 permite la identificación de cuatro etapas del relleno. La etapa 1 (1996-2008) presenta tasas de agradación de ~10 cm/año, en tanto que la etapa 2 (2008-2016) tiene tasas de 5 cm/año. Entre los años 2016-2017. probablemente V relacionado al evento extremo de precipitaciones de marzo/17, las de tasas acreción vertical alcanzan +10 cm/año. La etapa 4 (2017-2022) tiene tasas de acreción de < 2 cm/año evidenciando el predominio de condiciones de *bypass* sedimentario. En el muelle de ultramar las 4 etapas se reconocen de igual forma, aunque las tasas son ligeramente mayores en todas las etapas.

Se evaluaron las tasas de retroceso de los acantilados costeros en el período 1968-2023, calculando tasas variables entre 0,67 m/año y a 1,18 m/año.

Paredes et al. (2023)

playa y la costa, el clima y el transporte de sedimentos (Pilarczyk, 2009). Un aspecto fundamental en relación a las opciones de manejo del entorno costero efectivo se relaciona con la comprensión detallada de las tasas de acreción y erosión costeras, su distribución temporal y espacial, y la forma en la que estos valores se pueden modificar en relación a escenarios futuros de cambio climático (Dawson et al., 2009).

Los estudios de dinámica costera utilizan diferentes métodos para cuantificar erosión y depositación, los cuales a) presentan una cobertura espacial grande, pero con una resolución gruesa o de baja calidad, o bien, b) adquieren datos de alta calidad y costosos, los cuales están restringidos espacialmente a áreas de interés y presentan un seguimiento temporal detallado. Por tanto, existe una necesidad de seleccionar un método de estudio que evalúe costos, precisión y frecuencias de monitoreo flexibles, y que se puedan implementar a escalas espaciales que sean relevantes para informar sobre el estado del espacio costero. Estos métodos varían entre mapas cartográficos históricos, fotografías aéreas y fotogrametría, imágenes satelitales, uso de sistemas satelitales de navegación global (GNSS), uso de estaciones totales, o el uso de vehículos aéreos no tripulados (drones). Todos estos métodos, a su vez, se pueden subdividir entre aquellos que producen mapas planimétricos 2D describiendo la forma en planta de rasgos erosionales y depositacionales, y aquellos que pueden representar la variación espacial de la distribución vertical de rasgos del paisaje costero, que permiten cuantificar los cambios en 3D.

En este contexto, se propone un estudio geomorfológico y sedimentológico que involucra la zona costera entre el puerto de Comodoro Rivadavia y el Chalet Huergo, identificado y caracterizando los procesos erosionales y depositacionales, y sus controles.

2. OBJETIVOS

Este proyecto de 6 meses tiene como principal objetivo la caracterización sedimentológica y geomorfológica del espacio costero entre el Puerto de Comodoro Rivadavia y el Chalet Huergo, a los efectos de identificar y caracterizar los principales agentes erosionales y depositacionales que influyen sobre la provisión de sedimentos a la zona de la costanera local y al puerto de Comodoro Rivadavia y el cálculo de tasas de acreción de sedimento dentro de la zona portuaria, el cual ha sufrido una reducción de su batimetría en años recientes.

Objetivos Específicos

El estudio de la dinámica costera de la zona de estudio tiene como objetivos específicos:

- Caracterizar las áreas erosionales y depositacionales, identificando procesos asociados, y, en lo posible, cuantificar las tasas de erosión y depositación con información previa o relevada durante el estudio.
- Examinar los cambios en la geomorfología costera y del área del Puerto de Comodoro Rivadavia.
- 3) Brindar un sustento conceptual para la elaboración de medidas de planeamiento y toma de decisiones en la zona costera y del Puerto de Comodoro Rivadavia.

Objetivos Secundarios

- 1) Elaborar y georeferenciar cartografía histórica y batimétrica de la zona costera.
- Disponer de una base de datos unificada con información climática, geomorfológica y sedimentológica.

3. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1) Actividades de campo

Las actividades de campo consistieron en un relevamiento con drones de la zona costera al inicio del estudio (octubre de 2022) y un relevamiento similar al final del estudio (abril de 2023), y la identificación periódica de bloques desplomados o deslizamientos al sur de la Playa de Tanques. Los modelos digitales fueron rectificados utilizando puntos de control relevados con GPS diferencial. Se realizó un relevamiento RTK con solución fija a partir de una posición de la estación base en proximidad del acantilado para garantizar la conexión de los puntos sobre la playa. La posición de la base se definió con una coordenada geodésica promedio a partir del promedio de 2080 épocas en 34,7 minutos. El sistema de proyección utilizado es POSGAR GK F2 y las alturas del proyecto están referidas al elipsoide WGS84. El cálculo de las alturas ortométricas se realizó a partir de la diferencia entre el valor elipsoidal y el parámetro N obtenido de la calculadora online Geoide-AR 16 del IGN.

3.2) Actividades de gabinete:

1) Las actividades de gabinete consistieron en la adecuación de la información planimétrica aportada por la Oficina Técnica del Puerto, que consiste en 8 mapas batimétricos del área del Puerto y de la

Costanera local con cobertura espacial variable y resolución vertical de centímetros. Los datos de batimetría de los mapas fueron cargados de forma individual en un entorno georeferenciado utilizando el software de acceso libre QGIS 3.28.

Mes/Año	11/96	03/05	11/06	07/08	03/13	10/16	11/17	08/22
Datos batimétricos digitalizados	311	10521	4214	6226	6337	6947	6205	6973

Nota: El mapa batimétrico del año 2020 no se utilizó por incertidumbre en el horizonte cero (0) de referencia respecto a los demás mapas.

2) Cálculo de las diferencias de volumen entre batimetrías realizadas. El cálculo de volumen se realizó en base a la interpolación de los datos batimétricos generando una superficie 2D. Luego se estableció un *datum* arbitrario, estableciendo una superficie horizontal ubicada por debajo del valor de batimetría mayor (-11,13 m). El uso de este datum permite la comparación de todos los planos de las batimetrías entre sí, y el dato volumétrico resulta de la resta de los planos batimétricos considerados, por lo que la elección de un *datum* más profundo no modifica los resultados de la diferencia de los planos. Finalmente, se calcula el volumen del polígono entre las dos superficies previamente definidas.

3) Se analizó la información aportada por la estación meteorológica ubicada en el predio del Puerto de Comodoro Rivadavia entre el 01 de enero de 2018 y el 10 de abril de 2023. A los efectos de este estudio se analizaron de forma sistemática los datos de dirección y velocidad de los vientos, precipitaciones, variaciones de presión y temperatura. Los datos de la estación meteorológica entre el 9 de febrero y el 15 de julio de 2021 no están disponibles.

4) Se analizó la información disponible de la Tabla de Mareas para el Puerto de Comodoro Rivadavia en el año 2022 en el sitio web del Servicio de Hidrografía Naval, que brinda predicciones de las horas y alturas de las pleamares y bajamares.

4. ANTECEDENTES

Existe un limitado número de estudios geomorfológicos y de dinámica costera desarrollados en el área de estudio. Entre los estudios dentro de la cuenca del Golfo San Jorge se destacan las contribuciones cualitativas desarrolladas por Codignotto y del Valle (1995) sobre los factores de riesgo de la costa de Rada Tilly, la caracterización morfológica y granulométricas de las playas de Caleta Córdova y de la playa del Límite realizadas por Isla et al. (2002). Dentro del área de estudio, Kokot et al. (1996) caracterizan los procesos erosionales y depositacionales del área comprendida entre Punta Alta y Punta Borja, reconociendo concentración de energía en Punta Alta que se disipa en la bahía que queda al pie del cerro Chenque. Kokot et al. (1996) destacan que la construcción del espigón que

Paredes et al. (2023)

Lic. Natalia Suárez del Solar Responsable Técnico SERMAN & ASOCIADOS S.A.

Página 4

protege de la acción del oleaje a la bahía (Costanera local), y como consecuencia de procesos de refracción del oleaje y deriva litoral, originó un depósito sedimentario en la concavidad existente entre el muelle y la bahía, por lo que se considera que el depósito arenoso de la playa de la Costanera es de acreción inducida entrópicamente. Gómez et al. (2003) identifican escenarios erosionales y depositacionales entre la playa de Tanques de YPF y Punta Borja, presentando una breve descripción de las geoformas erosionales del sector ubicado al S de la Playa de Tanques, y de las problemáticas relacionadas al impacto producido por la acción del oleaje sobre la retracción de los acantilados costeros. En base al uso de fotografías aéreas, Gómez et al. (2003) asignan una tasa de retracción de los acantilados (que alcanzan 10-15 m en la Formación Chenque) de hasta 4 m cada 10 años y atribuyen a la acción de las olas de tormenta sobre la base de los acantilados y las marejadas como los elementos de mayor control sobre su retroceso.

Adicionalmente a los procesos relacionados a la dinámica del Océano Atlántico, la presencia del cerro Chenque ha aumentado el riesgo geológico del área a partir de los múltiples deslizamientos y desplomes de bloques. Estos procesos tuvieron su máximo impacto con el movimiento gravitacional ocurrido en febrero de 1995 en el que más de 150.000 m3 se deslizaron por debajo de la Ruta Nacional N° 3, involucrando la rotura de un importante volumen de roca "in situ" en la cabecera del movimiento (Hirtz y Blachakis, 2000), con el pie del deslizamiento alcanzando la zona costera. Los estudios y proyectos posteriores para asegurar su estabilización se pueden consultar en Hirtz y Blachakis (2004), Barletta et al. (2009), Francisca et al. (2017), Hirtz et al. (2019).

5. CONTEXTO GEOLÓGICO Y CLIMÁTICO

Los controles dominantes sobre los patrones de sedimentación y las características de sus depósitos en zonas costeras son (i) el transporte de sedimentos (régimen hidráulico), ii) el aporte sedimentario, y, iii) las variaciones relativas del nivel del mar. Otros factores secundarios incluyen el clima, los factores biológicos (interacciones entre organismos y sustrato), y factores químicos (química del agua de mar y composición del sedimento). En este contexto costero, el régimen hidráulico se caracteriza por la interacción de los procesos que tienen lugar en condiciones de buen tiempo, que operan en escalas temporales de días a meses, y la frecuencia e intensidad de los procesos de tormenta, con periodicidades de años a decenas de años. Los procesos de tormenta son particularmente importantes ya que modifican o eliminan completamente el registro que ocurre en condiciones de buen tiempo, y tienen un potencial de preservación mayor en la zona submarina (Johnson y Baldwin, 1996).

5.1. Geología local

La zona adyacente a la Costanera y al Puerto de Comodoro Rivadavia está conformado por rocas sedimentarias del Mioceno temprano incluidas dentro de la Formación Chenque (Bellosi 1990), con edades entre 19,69 y 15,37 millones de años (Cuitiño et al. 2015) y cubre depósitos de ceniza volcánica retrabajada en ambiente continental conocidas como Formación Sarmiento, expuestos en la restinga sobre la que se emplaza el Puerto de Comodoro Rivadavia. La Formación Chenque consiste de 350 metros de rocas sedimentarias friables y coloraciones grises a amarillentas, En el Cerro Chenque, alternan depósitos de calizas bioclásticas (conteniendo fósiles marinos) y areniscas glauconíticas de característico color verde, con intervalos más potentes en las que predominan las arcilitas, éstos últimos de coloraciones marrones a amarillas y de naturaleza friable. Las unidades de grano fino están caracterizadas por la presencia de arcillas del grupo de la montmorillonita, que modifican su volumen dependiendo de la disponibilidad de agua. De esta forma, cuando las arcillas se hidratan se hinchan y aumentan su volumen, y al secarse se contraen formando grietas superficiales, que hacen que se disgreguen en partículas pequeñas fácilmente removibles por procesos eólicos, gravitaciones o por la acción del agua. En los acantilados ubicados al norte de la Costanera local y en el cañadón del Infiernillo afloran los niveles basales del Cerro Chenque y su contacto con la subyacente Formación Sarmiento, donde se reconoce una alternancia de areniscas y arcilitas con niveles de coquinas de mayor consolidación. Esta unidad basal es una unidad resistente a la erosión, aunque al pie del Chenque está muy afectada por procesos de erosión costera durante tormentas intensas, que producen el constante retroceso de los acantilados al socavar su base. El intervalo estratigráfico que se encuentra sobre la posición de la Ruta Nacional Nº 3 y hasta el antiguo Mirador del Cerro Chenque es el que mayores riesgos presenta para el emplazamiento urbano y la seguridad de la población. Consiste mayormente de arcilitas expansivas, que en la vertical presenta areniscas medianas con glauconita y estratos tabulares con abundante contenido de fragmentos de valvas; estos últimos se encuentran fuertemente cementados y conforman cornisas sub-verticales con abundantes fracturas verticales a inclinadas. Las litologías finas contienen abundantes fracturas naturales producidas por procesos repetidos de desecación y humedecimiento. Estos materiales, durante precipitaciones intensas, se incorporan fácilmente al flujo y se desplazan pendiente abajo sobre laderas empinadas, produciendo torrentes de barro. Por otro lado, la presencia de estratos tabulares de areniscas consolidadas y calizas con fósiles generan cornisas en diferentes posiciones del cerro y bloques caídos sobre la ladera y al pie de los acantilados.

5.2. Datos climáticos.

Los datos de la estación meteorológica del aeropuerto General Enrique Mosconi de Comodoro Rivadavia indican que en el período 1963-2017 la temperatura media anual ha sido de 13.5°C, con los valores promedio más bajos en el mes de julio (6.6°C) y las temperaturas más altas en enero (19.4°C); las temperaturas máximas y mínimas absolutas de este registro de 61 años son 40.2°C y -

8.5°C, respectivamente. En el período considerado, la temperatura media anual muestra un incremento gradual de 0.7°C. La velocidad media del viento es de 32 km/h, con vientos predominantes del oeste con una frecuencia anual de 517/1000, seguidos por vientos desde el noroeste (111/1000), días calmos (93/1000) y del suroeste (63/1000), con vientos raros del sudeste (30/1000) (Montes et al. 2017). Vientos que superan los 200 km/h se han registrado en la estación meteorológica analizada dentro del período de registro, con valores de 215 km/h el 14/09/1976 y de 206 km/h el 28/04/1977 (Natalini y Natalini 2013). La precipitación media anual es de 244.8 mm, con gran parte de las precipitaciones cayendo en otoño-invierno (abril a julio), con valores entre 559 mm (año 2017) y 134 mm (año 2015). La media mensual es de 20 mm, con máximos de precipitación promedio durante el mes de mayo (34.5 mm/mes). Para el período 1963-2017, los eventos de precipitación diarios son intensos si se encuentran dentro del 5% mayor de todos los eventos de precipitación del período analizado (>15 mm/día), muy intensos cuando se encuentra en el 1% superior (>35 mm/día) y extremos cuando se encuentra en el 0.1% superior de todos los eventos de precipitación (>59 mm/día). Para el sector analizado, ni el promedio anual ni el promedio mensual de precipitaciones son representativos de la distribución de lluvias, que se caracterizan por lluvias dispersas, localizadas e intensas que concentran en corto plazo (2-3 días) entre el 30-40% de las precipitaciones medias anuales. La evapotransporación potencial de la región alcanza los 704 mm/año, mostrando un déficit anual del orden de 427 mm entre agosto y abril (Hernández et al. 2017).

La costa de Comodoro Rivadavia es una costa macromareal (rango de mareas mayor a 4 m) en un contexto climático semiárido caracterizado por vientos estacionales de dirección variable, pero dominantes del oeste. Las olas, las corrientes y las mareas proveen la energía que modela el área costera.

RÉGIMEN DE VIENTOS. Los procesos de olas y tormentas generados en la zona costera se producen por fuerzas meteorológicas que actúan sobre la parte más somera de la plataforma. La energía se transfiere por la cizalla entre la masa de aire y la superficie del agua y por fluctuaciones en la presión barométrica, lo cual induce dos tipos de movimientos de las masas de agua: i) flujos oscilatorios y por corrientes de deriva (incluyendo corrientes de retorno y paralelas a la costa) desarrolladas mayormente en condiciones de buen tiempo, y ii) corrientes impulsadas por el viento, que operan en varias escalas temporales, y que involucran en su origen a la fuerza de Coriolis, siendo en caso particular las olas de tormenta, en las que se produce una reducción importante de la presión barométrica y/o altas velocidades del viento, produciendo niveles del mar anormalmente altos en la zona costera seguidos por una reducción drástica del nivel del mar.

El estudio de los vientos del área de estudio se realizó utilizando los datos de la estación meteorológica emplazada en el Puerto de Comodoro Rivadavia. Se representan las rosas de los

vientos del año 2019, 2020 (Fig. 1), y una rosa que reúne los datos del 2022 y parte del año 2023 (Fig. 2).



Figura 1. Rosa de los vientos de los años 2019 (A) y 2020 (B). En el año 2019 existe un predominio de vientos del Oeste con modas secundarias del OSO, ONO y NO, en tanto en el año 2020 el viento dominante ha sido desde el OSO, con modas secundarias al O y SO. Notar en los dos años el desarrollo de una moda de vientos desde el NE.



Figura 2. Rosa de los vientos de los años 2022 y 2023 (hasta el 12 de abril). Notar el predominio de los vientos del ONO, y modas secundarias de la misma importancia (en frecuencia e intensidad) para los vientos del ENE, S y NO.

La ciudad de Comodoro Rivadavia, y Patagonia en general, se encuentra dentro de la zona de circulación de los vientos occidentales del hemisferio sur (*westerlies*), causados por la interacción de las masas de aire polar y subtropical, que originan una alta actividad ciclónica en la región. La presencia de la barrera orográfica de los Andes hace que el aire húmedo del océano Pacífico descargue su humedad en la Cordillera de los Andes y luego los vientos continúan secantes (viento fohen) hacia el océano Atlántico (Prohaska, 1976). Esta faja de baja presión, bajas precipitaciones y turbulencia se encuentra entre los 40° y los 60° de latitud sur, y se mueve al norte en invierno debido a la acción del anticiclón Antártico, cuyos efectos influencian la dinámica atmosférica global (Iriondo, 2000). Es por ello que, en general, en la región costera existe un predominio de vientos desde el cuadrante Oeste, pero también se desarrollan componentes secundarias hacia el N-NE y hacia el S (**Figs. 1 y 2**). Se destaca de los datos relevados que existe una variabilidad interanual importante en las contribuciones de vientos con orientación diferente, con cambios estacionales cuya importancia requiere del análisis de series temporales más extensas.

El análisis de los datos de presiones y vientos obtenidos de la Estación Meteorológica del Puerto de Comodoro Rivadavia indican que existe una correlación negativa (p= -0,52) entre los valores de la presión atmosférica y la velocidad del viento (**Fig. 3.A**). La distribución de precipitaciones no presenta

Paredes et al. (2023)

un patrón predecible o estacional, con medias mensuales de gran variabilidad (Fig. 3.B) sin correlación con otras variables como la temperatura (Fig. 3.C).



Figura 3. Distribución de datos meteorológicos desde el 01 de enero de 2022 al 10 de abril de 2023. Los datos muestran los trenes de (**A**) presión atmosférica y velocidad del viento, (**B**) precipitaciones medias mensuales, y (**C**) temperatura y precipitaciones medias horarias.

ACCIÓN DE OLAS. Las olas que vemos cada día sobre los océanos, y las que son responsables de procesos de erosión costera, se generan por la acción del viento sobre la superficie del agua, y son importantes como agentes que transfieren energía: inicialmente obteniendo su energía del viento, transfiriéndola a través del océano, y finalmente liberándola en la zona costera donde pueden ser la causa principal de erosión, o generar una variedad de corrientes costeras con movilización de sedimento asociado. Las olas, al acercarse a la costa pueden estar afectadas por procesos de reflexión, refracción y difracción. La **reflexión** de olas es un fenómeno por el cual los trenes de olas que se acercan a la costa con fondo empinado son reflectados hacia el mar perdiendo poca energía relativa, un fenómeno poco común en ambientes naturales. En esta, los fondos empinados reducen gradualmente su inclinación por erosión y acumulación de sedimentos, haciendo que con el transcurso del tiempo el movimiento ondulatorio de las partículas de agua que conforman las olas interfiere con el fondo cercano, dando como resultado una reducción gradual de la energía de la ola

que llega a la línea de costa, llegando al punto en el que la reflexión es físicamente imposible. Este fenómeno es muy común en construcciones costeras como puertos, rompeolas y otras superficies reflectantes. La difracción es el fenómeno por el cual la energía de la ola se transmite lateralmente a lo largo de su cresta. El efecto de la difracción se manifiesta por la propagación de olas dentro del sector protegido de la costa, en la sombra geométrica de una barrera natural (Fig. 4). Un ejemplo ocurre cuando un sector del tren de olas es interceptado por un obstáculo natural o artificial. Si el obstáculo es una isla muy cercana a la costa se genera un tómbolo, que consiste en un depósito de material clástico que une la isla con la costa u otra isla. Lo mismo puede ocurrir con un obstáculo artificial, como por ejemplo un rompeolas paralelo a la costa. Los fenómenos de refracción y difracción arriba detallados se consideran separados por cuestiones de practicidad descriptiva, pero se producen en forma simultánea. En el caso de la **refracción**, la modificación de la geometría de los trenes de olas por la interferencia con la topografía submarina produce concentración de energía sobre los cabos y una disipación en las bahías. Por ello, en los cabos se produce un aumento de la masa acuosa y una disminución en las bahías, que origina una diferencia de potencial energético que se neutraliza a expensas de un flujo desde el cabo hacia la bahía. Esta corriente lleva sedimentos producidos por la destrucción de los cabos que son llevados a la bahía donde finalmente se depositan. El resultado de este proceso es el retroceso de los cabos y la progradación de las bahías. Esta corriente a lo largo de la costa constituye el elemento primordial en el modelado del paisaje, cuya evolución general tiende a la rectificación de la línea de costa original.

Aunque se reconoce que la dinámica de las olas desarrolla un rol crítico en ciencias ambientales y sus aplicaciones ingenieriles modulando el intercambio de energía, controlando la turbulencia y el transporte de sedimentos en condiciones de buen tiempo y durante las tormentas, en el área de estudio no se cuenta con datos *in situ* de su comportamiento en el entorno costero.



Figura 4. Procesos de difracción de olas en el puerto de Comodoro Rivadavia. El recuadro de la figura superior muestra la difracción idealizada en un rompeolas impermeable. La dirección del frente de avance de las olas es hacia el oeste. En la región del puerto, las olas difractan con los frentes de olas formando arcos circulares centrados en el extremo del rompeolas. En el extremo de los Muros Norte y Oeste se produce reflexión de olas, al igual que en la zona exterior de la estructura del Puerto. Las flechas rojas muestras las direcciones de propagación del frente de olas en relación a la infraestructura del puerto.

ACCIÓN DE MAREAS. Otro factor importante para la ocurrencia y severidad de los procesos de erosión costera es el nivel del agua, influenciado por las mareas y por la acción superpuesta de olas de tormenta. La marea es el ascenso y descenso rítmico de la superficie del mar producido por el cambio en la distancia de la Tierra a la Luna y el Sol; estos movimientos verticales producen corrientes de agua horizontales que operan con regularidad en varias escalas de ciclicidad. Consideremos la tabla de predicción de mareas de la costa de Comodoro Rivadavia en el período entre el 1 de septiembre y el 15 de octubre de 2022 (Fig. 5). El rasgo más obvio del gráfico es que existen dos niveles altos y dos niveles bajos cada 25 horas (cada 24,84 horas exactamente). Sin embargo, los niveles de agua altos sucesivos (dos pleamares), y los niveles de agua bajos sucesivos (bajamares) son marcadamente diferentes, un rasgo que se ha llamado desigualdad diurna, relacionado con la declinación lunar (Allen, 1985; Bosboom y Stive, 2023). El siguiente rasgo a notar es que los niveles altos y bajos del mar cambian gradualmente, y también lo hace el rango de mareas, esto es, la diferencia máxima entre un nivel alto y el siguiente nivel bajo. El patrón, llamado ciclo de mareas de sicigia-cuadratura (vivas-muertas), ocurre cada 14,8 días. Las mareas de sicigia son aguellas caracterizadas por pleamares altas y rangos de marea grandes, en tanto que las mareas en cuadratura tienen pleamares menores y rangos de marea más pequeños. Dos veces por mes, en las lunas Nueva y Llena, la Tierra, Luna y el Sol se alinean (sicigia) de manera que las fuerzas de la Luna y El Sol se combinan y producen rangos de marea mayores llamadas mareas vivas (spring tides), en tanto que las mareas muertas (o de cuadratura) se producen cuando el efecto de las fuerzas mareales de la Luna y el Sol se cancelan por encontrase en forma ortogonal respecto a la Tierra. Las mareas semi-diurnas en el Puerto de Comodoro Rivadavia son macromareales con rangos de sicigias medias de 5,05 m y de cuadraturas medias de 3,16 m (datos del Servicio de Hidrografía Naval, 2022). Debido al tiempo que demanda a las olas desplazarse sobre el océano hasta alcanzar la zona costera, existe un desfasaje entre las fases de la Luna y la marea asociadas que se llama la "edad" de la marea. En el caso del Puerto de Comodoro Rivadavia se ha observado que las mareas vivas se encuentran retrasadas de 2,5 a 3 días con respecto al momento que se alcanza la luna nueva-llena (Fig. 5).

Si tiene lugar una tormenta en un momento de mareas altas, los niveles del agua de la marea alta permiten que las olas de tormenta rompan más cerca de la costa o directamente sobre la costa, y, por tanto, influencian el grado de erosión resultante. Por el contrario, si la tormenta se desarrolla en condiciones de cuadratura entre la Luna y el Sol los rangos de marea son más bajos y se desarrollan mareas muertas (*neap tides*). A modo de ejemplo, entre el 20 y 21 de septiembre de 2022 tuvo lugar un evento extremo de precipitaciones en la localidad de Comodoro Rivadavia con un total de lluvia acumulada de 71,25 mm, acompañado por fuertes vientos desde el suroeste-oeste. Este evento tuvo un impacto erosivo sobre la zona costera relativamente bajo debido a que la amplitud de marea se encontraba en su valor mínimo, del orden de los 3 metros (**Fig. 5**).





Figura 5. Serie temporal de los ciclos de mareas de sicigia (spring) y cuadratura (neap) en el período comprendido entre el 01 de septiembre y el 15 de octubre de 2022 en Comodoro Rivadavia. Las flechas verdes indican el retraso aproximado que existe entre las fases de la Luna (luna llena o nueva) y la marea asociada. Fuente: Elaboración propia a partir de datos del Servicio de Hidrografía Naval.

El análisis de las mareas durante el año 2022 muestra ciclos de mareas vivas-muertas con cierta regularidad (**Fig. 6**). El patrón anual de mareas en cuadratura (línea naranja) presenta valores mínimos en coincidencia con los equinoccios de otoño y primavera, y máximos en coincidencia con los solsticios de invierno y verano. Las mareas en sicigia presentan un patrón opuesto, con valores máximos en coincidencia con el equinoccio de primavera. Notar que entre enero-febrero de 2022 y en diciembre de 2022 las mareas de sicigia máximas se asociaron a la luna nueva, y el resto del año las mareas vivas máximas fueron aproximadamente coincidentes con la luna llena.



Figura 6. Predicción de las amplitudes de marea máximas en ciclos de mareas en sicigia (en azul) y cuadratura (en naranja) durante el año 2022 para el Puerto de Comodoro Rivadavia. La luna llena está representada por los círculos blancos. Claves: EO= equinoccio de otoño, SI= solsticio de invierno, EP= equinoccio de primavera, SV= solsticio de verano.

Paredes et al. (2023)

EROSIÓN COSTERA. Por su parte, la *erosión costera* en un lugar particular es el resultado de que una cantidad mayor de arena o sedimento deje un área en relación al sedimento que arriba a esa posición, por lo que se obtiene un balance deficiente o negativo (Bowen e Inman, 1966). En la práctica, para establecer el balance se evalúan las numerosas contribuciones sedimentarias y las pérdidas en un segmento de la costa durante un intervalo de tiempo **(Tabla I)**.



EXTRACCIÓN

BALANCE

Transporte por deriva litoral Transporte fluvial Erosión de acantilados costeros Transporte hacia la costa (tormentas) Depositación biogénica o bioquímica Transporte eólico hacia la playa Regeneración artificial de playas Transporte por deriva litoral Transporte eólico Transporte al ambiente marino abierto Depositación en cañones submarinos Disolución y abrasión Actividades mineras en la playa

Tabla I. Elementos naturales incluidos en el balance de sedimentos litorales (Bowen e Inman, 1966).

Las fuentes de sedimento naturales más importantes las constituyen los aportes desde redes de drenaje fluviales (efímeras o perennes), los procesos de carcavamiento, la erosión de acantilados costeros o procesos localizados de inestabilidad de acantilados, y los procesos de deriva litoral. Las fuentes no naturales (antrópicas) de sedimento pueden modificar cada una de las variables a través de la incorporación de sedimento en zonas puntuales (como material de relleno). Por su parte, las pérdidas de sedimento están contempladas en los procesos de deriva litoral que movilizan sedimento fuera del área considerada, y el transporte de sedimentos hacia condiciones marinas de mayor profundidad (al *offshore*); las pérdidas de sedimento por causas no naturales se pueden dar cuando se hace extracción de arenas/gravas de playas. Una fuente antrópica que opera en el área de estudio lo constituye el pluvial desarrollado en la ladera S del cerro Chenque, que con posterioridad del escalonamiento del cerro es altamente efectivo en transferir el sedimento durante eventos de precipitaciones hacia la Costanera local, incorporando sedimento mayormente arcilloso.

En la práctica, es muy dificultoso o imposible estimar de forma razonable algunas de las cantidades del balance de sedimentos. Los estudios de dinámica fluvial desarrollados en áreas costeras indican que el transporte es muy episódico, aún dentro de un mismo año, y que existen grandes diferencias en el aporte de sedimentos fluviales en años de El Niño vs. La Niña (por ej. Inman and Jenkins, 1999). Por tanto, el intervalo de tiempo que se requiere para monitorear la descarga de los arroyos individuales, y las dificultades involucradas en la medición confiable de las tasas de transporte de sedimentos (particularmente en condiciones de alta descarga) hacen que exista gran incertidumbre en la cuantificación de la fuente de sedimento más importante al estado de la playa. Por ejemplo, en el área del presente trabajo la principal fuente de acceso de sedimento arenoso durante las tormentas es el arroyo del Infiernillo, por lo que para minimizar la incertidumbre en relación a las cargas sólidas

transportadas se requiere una estación de monitoreo de descarga fluvial en el Arroyo del Infiernillo, el cual actualmente está siendo fuertemente modificado en su zona media y en sus cabeceras por acción antrópica.

Otro elemento de muy compleja cuantificación la constituyen las pérdidas o la ganancia de sedimento desde/hacia el offshore, los cuales pueden ser identificados (**Fig. 7**) pero cuya medición y sistematización requieren de instrumentación no disponible a la fecha en la zona de trabajo.

Por ello, frecuentemente los componentes más conocidos del balance están contenidos en el balance en sí mismo, obtenido por el monitoreo de la erosión o depositación sobre un período de tiempo conocido. Con ese conocimiento, se puede postular alguna causa que justifique los valores del balance.



Figura 7. Movilización de sedimento por deriva litoral (flechas azules) y extracción de sedimento desde el área del puerto de Comodoro Rivadavia hacia el ambiente marino abierto (flechas rojas). Aunque no se cuenta con datos de la orientación e intensidad de los vientos en las fechas indicadas por falta de operación de la estación meteorológica, la imagen inferior sugiere vientos del cuadrante SO.

6. RESULTADOS

6.1. Extracción de sedimento en suspensión al ambiente marino abierto.

El transporte del sedimento fino hacia el ambiente marino profundo está fuertemente condicionado por las características de las olas, y de las olas de tormenta, datos con los que no se cuenta de forma sistemática dentro del área de estudio. Los procesos de oleaje disminuyen en intensidad de la superficie hasta una profundidad de aproximadamente igual a la mitad de la longitud de onda de las olas, por debajo de la cual no existe movimiento de sedimento perceptible. Esta profundidad se conoce como nivel de base del oleaje (*wave base*) y en condiciones de buen tiempo la profundidad es del orden de 8-10 metros. En la zona del puerto de Comodoro Rivadavia, la batimetría de todos los puntos se encuentra por encima de la cota de -10 m, por lo que prácticamente todas las olas tienen algún efecto sobre el material fino, y éste puede ser movilizado de forma casi continua.

Uno de los aspectos particularmente relevantes en relación a la movilización de los componentes arcillosos dentro del entorno portuario y de la Costanera local se refiere a la acumulación y preservación de sedimento arcilloso incorporado al área costera por fuentes antrópicas. Particularmente, la ladera sur del cerro Chenque se encuentra actualmente con su aterrazamiento completo, el cual se realizó para evitar el anegamiento por fangos arcillosos del casco céntrico durante eventos de precipitaciones. En el proyecto de ingeniería del escalonamiento se propuso proteger de la erosión la superficie resultante del escalonamiento con un recubrimiento de material granular compactado (gravas arenosas). Asimismo, se contempló el encauzamiento sistematizado del drenaje de las aguas de lluvia sobre el talud mediante una red integrada de canaletas revestidas en hormigón sobre las bermas y zanjas colectoras, transversales a aquellas para conducir el escurrimiento pluvial en su descenso por la pendiente, para su colección integrada cercana a la base del talud y su derivación al mar (Hirtz et al., 2019). Desde su puesta en funcionamiento, el traslado de arcillas de la ladera del cerro Chenque durante las tormentas es altamente efectivo, ingresando a la Costanera local desde la ladera sur desde un colector ubicado en el acceso a la calle Sarmiento, en tanto que en el material arcilloso de la cara norte del Chenque ingresa por un colector ubicado al N del Club Náutico Comandante Espora (Fig. 8). Sin embargo, se destaca que la zona de la Costanera local presenta granulometría arena fina a muy fina sin evidencias de arcillas en ningún sector, y los datos granulométricos y análisis realizados para caracterizar arcillas no presentan fracción arcillosa medible por métodos analíticos (Baigorri, en preparación). Es por ello que, en base a la evidencia empírica, el ingreso de fangos arcillosos durante los eventos de precipitaciones no genera acumulaciones que se preserven en el ámbito de la Costanera, siendo completamente exportados hacia el ambiente marino abierto por la acción de las corrientes de buen tiempo y por flujos extraordinarios de tormenta.



Figura 8. Pluviales urbanos que desaguan en la Costanera local. (A) Ubicación de los drenajes superficiales y subterráneos que trasladan el sedimento desde las laderas del cerro Chenque. (B-D) Detalles de los pluviales.

Para este estudio no se cuenta con datos sistemáticos de las características de las corrientes en la zona del Puerto de Comodoro Rivadavia, por lo que las condiciones para el traslado de materiales están limitadas a la inspección de imágenes satelitales complementadas con datos de dirección e intensidad de los vientos en los días de las imágenes. En base al uso de imágenes históricas de Google Earth[™] del área de trabajo (de los días 5 de julio de 2019 y 15 de julio de 2022) se reconoce que los materiales finos generados entre la Playa de Tanques de Km. 3 y la Costanera local se movilizan hacia el ambiente marino abierto por vientos del O-NO a O-SO, que son dominantes y de mayor intensidad (**Fig. 9**). Además, el traslado de los sedimentos tiene lugar también con vientos desde el cuadrante NE, los cuales en general presentan velocidades y frecuencias menores (**Fig. 10**). Estas condiciones, y la diferencia evidente de la intensidad de ambos vientos, indican que la exportación de finos fuera del ámbito del área analizada es un proceso efectivo y podría ser ininterrumpido, sin requerimiento de vientos excepcionales.



Figura 9. Movilización y exportación de material fino transportado en suspensión desde la Costanera local al ambiente marino profundo. La imagen satelital muestra una pluma de sedimento el día 5 de julio de 2019, transportada en la forma de un flujo superficial con carga de sedimento menor a la densidad del agua de mar (overflow). La Rosa de los Vientos de ese día indica vientos dominantes del O y velocidades de 20-30 km/hora.



Figura 10. Movilización y exportación de material fino transportado en suspensión desde la Costanera local al ambiente marino profundo. La imagen satelital muestra una pluma de sedimento el día 15 de julio de 2022, transportada en la forma de un flujo superficial con carga de sedimento menor a la densidad del agua de mar (overflow). La Rosa de los Vientos de ese día indica vientos dominantes del N-NNO, mayormente con velocidades de 20-30 km/hora.

Sur

Paredes et al. (2023)

6.2. Variaciones en la batimetría entre el período 1996-2022.
Las variaciones de la batimetría del área de trabajo se han evaluado a partir de la construcción de mapas batimétricos (años 1996, 2005, 2006, 2008, 2013, 2016, 2017 y 2022) aportados por la Oficina Técnica de la APPCR en formato PDF. Los mapas oportunamente relevados toman áreas de cobertura diferentes, por lo que se seleccionó el área máxima con cobertura batimétrica en todos los años disponibles. El área común en adelante se la denomina "Área A" y es de 205.269,83 m² (Fig. 11).



Figura 11. Mapa de ubicación del área del Puerto de Ultramar (y su zona de influencia) con cobertura batimétrica de los años 1996, 2005, 2006, 2008, 2013, 2016, 2017 y 2022.







Paredes et al. (2023)











De manera general se reconoce una reducción de batimetría en el período analizado. Las variaciones de profundidad no son uniformes dentro del "Área A", y su distribución evidencia un proceso de relleno mayormente agradacional con ingreso de sedimento desde el O-ONO (desde la Costanera) que ha favorecido el crecimiento de un cuerpo arenoso de techo convexo en el acceso al muelle de ultramar. Los cuerpos sedimentarios con techo convexo en ambientes subacuáticos se vinculan a cambios de pendiente y desconfinamiento de flujos tractivos, que desarrollan patrones de flujo distributarios. El origen de este cuerpo arenoso parece estar relacionado a la escarpa vertical generada en el dragado y ubicada hacia la zona norte del área A (Fig. 12), con el cuerpo sedimentario presentando una dirección de crecimiento oblicua a la escarpa, relacionada con la dirección dominante del transporte de sedimento a escala local. A los efectos de ilustrar los cambios reconocidos se presentan dos cortes arbitrarios (Fig. 20) en direcciones longitudinal y transversal al cuerpo sedimentario identificado en el acceso al muelle de ultramar. El corte transversal es particularmente ilustrativo, ya que permite advertir el desarrollo episódico de un cuerpo con techo convexo y naturaleza agradacional, que ha presentado en el período 2005-2022 una agradación vertical que excede los 150 centímetros. Por su parte, el corte longitudinal muestra un relleno agradacional, sin evidencias claras de progradación. Este último rasgo podría estar asociado al retrabajamiento del sedimento luego del acceso a la depresión artificial producida luego del dragado, removilización que ocurre en condiciones de buen tiempo y mayormente durante las tormentas.





Figura 20. Estilos de relleno del puerto de Comodoro Rivadavia. (A) Ubicación de secciones batimétricas arbitrarias, seleccionadas en base a los cambios batimétricos reconocidos en las figuras 12 a 19. (B) El corte 1 presenta los cambios en batimetría en el período 1996-2022 en una dirección aproximadamente longitudinal respecto a la morfología general del relleno, con patrón agradacional. (C) Corte SO-NE, evidenciando el desarrollo de un cuerpo de base plana y techo convexo que ha agradado más de 1,5 m luego de alcanzar el nivel de roca del sustrato. En ambos cortes en color gris se representa la topografía del año 1996.

Paredes et al. (2023)

Los datos relevados permiten realizar cálculos que aproximen las tasas de agradación promedio en el Área A (Tabla II). Para su realización se utilizó como plano basal horizontal el dato batimétrico más bajo (-11,13 m) realizado con posterioridad al dragado realizado en el año 1996, y se calcularon los volúmenes incluidos entre ese plano basal y la superficie batimétrica de los años 1996 a 2022 (ver Fig. 21.B). La elección del plano horizontal de base es arbitraria y no influye sobre los resultados siempre que incluya todos los datos batimétricos de todos los relevamientos.

Los datos derivados de los mapas batimétricos permiten reconocer cuatro etapas evolutivas en relación a la batimetría original (Fig. 21.C). En una primera etapa (Etapa 1), el relleno del Área A ocurrió de forma rápida y sostenida a través de un proceso de agradación que suavizó el relieve deprimido generado en el dragado con una tasa de agradación vertical promedio de 10,6 cm/año y abarca el período 1996-2008. En este contexto, los datos de la tasa negativa (-0,8 cm/año) obtenidas entre marzo de 2005 y noviembre de 2006 pueden estar relacionados a un problema de calibración de los datos batimétricos por el prestador del servicio de batimetría. La segunda etapa de relleno (Etapa 2) abarca el período entre julio de 2008 y octubre de 2016, en el que las tasas de acreción sedimentaria se reducen a prácticamente la mitad del período anterior. La Etapa 3 abarca el período entre octubre de 2016 y noviembre de 2017, en donde se reconoce un incremento importante de los valores de acreción (10,9 cm/año), presumiblemente relacionados con la incorporación de grandes volúmenes de sedimento arenoso a la Costanera desde la cuenca de drenaje del Infiernillo o por deriva litoral en relación al temporal ocurrido entre el 29 de marzo y el 08 de abril de 2017. En este evento, que totalizó 399,4 mm de lluvia caída se caracterizó por la movilización hacia las zonas bajas de las cuencas de drenaje de grandes volúmenes de sedimento transportados conjuntamente con el agua de lluvia, que originó sistemas deltaicos transitorios en la zona costera (Paredes et al., 2020). Finalmente, la Etapa 4abarca el período entre noviembre de 2017 y agosto de 2022, y se caracteriza por valores de la tasa de agradación bajas (1,7 cm/año), reflejando condiciones limitadas de generación de espacio, con predominio de condiciones de retrabajamiento y bypass sedimentario. Para esta última etapa se considera que las geoformas depositacionales preservadas en el entorno del Área A han alcanzado las condiciones de equilibro con los agentes erosionales.

FECHA DE	Volumen	Aumento de	Diferencias de	Volumen	Tasa de
REALIZACIÓN DE	(m ³)	Volumen (m ³)	volumen (m ³)	promedio anual	acreción
LA BATIMETRÍA	sobre el	respecto a la	respecto a	entre	vertical
	datum	medición previa	1996	mediciones (m ³)	(cm/año)
Noviembre de 1996	687359	-	-	-	
Marzo de 2005	918702	231343	231343	28042	10,6
Noviembre de 2006	915206	-3496	227847	-2098	-0,8
Julio de 2008	963202	47996	275843	27426	10,3
Marzo de 2013	1016636	53434	329277	11658	4,4
Octubre de 2016	1069626	52990	382267	15140	5,7
Noviembre de 2017	1098582	28956	411223	28956	10,9
Agosto de 2022	1118857	20275	431498	4424	1,7

Tabla II (página anterior). Cálculos realizados sobre el "Área A" (= 265.268,83 m²) a los efectos de visibilizar los cambios anuales en los volúmenes de sedimento incorporados y la tasa anual de agradación promedio.

En virtud de las múltiples fuentes de sedimentos de origen antrópico en el entorno del puerto, que incluyeron en las décadas pasadas el relleno del área actualmente ocupada por la Zona Franca, la realización de un balance en el que se discrimine la importancia de los procesos naturales y antrópicos es improbable y requiere el aporte de información no disponible durante el desarrollo de este estudio.



Figura 21. Cambios en los volúmenes de sedimento y tasas de acreción vertical. (A) Área máxima que contiene datos batimétricos de los años 2005, 2006, 2008, 2013, 2016, 2017 y 2022. (B) Bloque diagrama ilustrando la metodología utilizada para el cálculo de volúmenes de sedimento. Los datos reflejan un incremento sostenido en la incorporación de sedimento al "Área A", que se puede representar como una tasa de acreción vertical promedio entre mediciones batimétricas. Notar la reducción de volumen entre los años 2005 y 2006, y los valores máximos que superan los 10 cm/año entre 1996-2008 y entre 2017-2017. Desde el año 2017, la tasa de acreción anual es marcadamente inferior (< 2 cm/año), sugiriendo condiciones dominantes de bypass sedimentario.

6.3. Cálculo de las tasas de acreción del Muelle de Ultramar

A los efectos de conocer el comportamiento de la batimetría de la zona adyacente al muelle de ultramar, se evaluaron las variaciones de espesor registradas entre los años 1996 y 2022, variaciones de volumen de sedimento y tasas de acreción de un área de 30.350,54 m² ubicada adyacente al muelle (**Fig. 22.A**). El mapa de espesor sedimentario, obtenido de la resta de las superficies batimétricas de 2022 y 1996 muestra incrementos mayores a los 4 m en el extremo oriental del área del muelle, con un eje de sedimentación mínima orientada oeste-este en la que la superficie batimétrica muestra incrementos entre 0,98 a 1,94 metros.



Figura 22. Muelle de Ultramar. (*A*) Ubicación del área seleccionada para los cálculos de tasas de acreción del muelle de ultramar. (*B*) Diferencias de espesor entre las batimetrías de los años 1996 y 2022.

Del análisis de los mapas batimétricos se ha reconocido que las etapas identificadas para el "Área A" guardan relación comparable con las que tuvieron lugar en el Muelle de Ultramar, aunque los valores de las tasas de acreción son sistemáticamente mayores. La Etapa 1 (período 1996-2008) en el área del Muelle de Ultramar presenta tasas de acreción entre 11,2 y 14,4 cm/año, en tanto la Etapa 2 (período 2008-2016) presenta tasas de alrededor de 7 cm/año. La Etapa 3 (año 2017) presenta las

Paredes et al. (2023)

tasas de sedimentación más altas (32,1 cm/año) y la Etapa 4 (2017-2022) presenta valores de 3,7 cm/año. Los valores mayores de las tasas de sedimentación en la zona más profunda se relacionan con la posición más central de este espacio, y con la incapacidad del sedimento de ser extraído una vez que alcanza el mismo. Por ello, las tasas de sedimentación, siendo máximas, son las más representativas del entorno analizado. En zonas de batimetrías menores, los eventos que producen retrabajo y dispersión de los componentes son más frecuentes.

FECHA DE	Volumen	Aumento de	Diferencias de	Volumen	Tasa de
REALIZACIÓN	(m ³) sobre	Volumen (m ³)	volumen (m ³)	promedio anual	acreción
DE LA	el datum	respecto a la	respecto a	entre	vertical
BATIMETRÍA		medición previa	1996	mediciones (m ³)	(cm/año)
Noviembre de 1996	54494	-	-	-	
Marzo de 2005	90437	35944	35944	4357	14,4
Noviembre de 2006	96092	5655	41599	3393	11,2
Julio de 2008	102489	6397	47996	3655	12,0
Marzo de 2013	111812	9323	57319	2034	6,7
Octubre de 2016	119366	7554	64873	2158	7,1
Noviembre de 2017	129097	9730	74603	9730	32,1
Agosto de 2022	134265	5168	79771	1128	3,7

Tabla III. Cálculos de las tasas de acreción del área adyacente al muelle de ultramar.

6.4. Balance de la Costanera y el Puerto en el período 2005-2022.

Las batimetrías utilizadas en este informe cubren áreas diferentes, y las dos de mayor área (años 2005 y 2022) fueron utilizadas para obtener un mapa de diferencia de espesor sedimentario en la Costanera y el Puerto de Comodoro Rivadavia (**Fig. 23**). A los efectos de incluir todos los datos batimétricos del periodo se utilizo como *datum* horizontal el plano de -9,76 m, que es el punto más bajo del mapa batimétrico del año 2005.



Figura 23. Área con cobertura común de las batimetrías de los años 2005 y 2022.







A partir de la comparación de los mapas batimétricos de los años 2005 (Fig. 24) y 2022 (Fig. 25) se obtuvo la diferencia de volumen dentro del área común a ambos mapas de 295.381 m³. Adicionalmente, se generó un mapa de la diferencia de profundidad de ambas batimetrías (mapa del 2022 - mapa del 2005), que refleja la incorporación/extracción de sedimento en la Costanera y el Puerto en el período considerado (Fig. 26). Todos los puntos del mapa de espesores presentan valores positivos, indicando un balance positivo sobre toda el área. Las áreas con agradación mínima se relacionan a zonas de tránsito (bypass) de los materiales sedimentarios, mayormente localizados sobre áreas de restinga o con afloramientos rocosos. Existen dos áreas con mayor acumulación dentro del área de estudio: La primera está conformada por la zona más alta de la playa Costanera, representando la acumulación de sedimento mayormente gravosos en bermas de tormenta, y el retrabajo local de gravas y bloques derivados de la rotura del muro de contención del relleno utilizado en la Zona Franca. En base al uso de un modelo digital de afloramiento del sector el volumen faltante representa alrededor de 8.500 m³. La segunda zona de acumulación preferencial la conforma el área original de dragado, como se presentó en las secciones previas. Alrededor de 2/3 del volumen total adicionado al área calculada se encuentra dentro de la zona dragada en 1996 (Tabla II), en tanto el resto del sedimento se localiza en la zona alta de la playa Costanera.

6.5. Erosión de los acantilados costeros al norte de la Costanera

El área norte de la zona costera incluida en este estudio presenta procesos erosionales de múltiples orígenes, que generan acantilados que se encuentran en fuerte retroceso. La combinación de la acción de oleaje de tormenta sobre el pie del acantilado, sumado a la naturaleza friable de los depósitos basales de la Formación Chenque, en la que alternan horizontes de arcillas intensamente fracturadas (fácilmente erosionables por acción del viento y de las variaciones de humedad) alternando con estratos de areniscas consolidadas hace que se produzcan pequeños desplomes y caída de material desde el acantilado de forma casi continua. Actualmente, se desarrollan dos tipos principales de deslizamientos en la zona de acantilados de la zona de estudio. El primero de ellos implica movimientos de masa relativamente pequeños y se inician en la mitad inferior de la pared de los acantilados, asociados fundamentalmente a la inestabilidad relacionada con el choque de las olas de tormenta y los cambios de humedad en las arcilitas (de naturaleza expansiva, montmorrillonitas), que favorecen la liberación lenta y continua de materiales arcillosos de la base del acantilado, favoreciendo la pérdida de sustentación de la parte inferior del acantilado. Este movimiento traslada hacia la berma de playa mayormente arcilitas de un horizonte intensamente fracturado (Fig. 27.A). Los datos relevados durante el período de estudio confirman la naturaleza episódica de los aportes de sedimento desde los acantilados costeros, aunque la cuantificación de su traslado hacia la plataforma no es posible con los datos relevados. Algunos desplomes de mayor envergadura se producen con posterioridad a lluvias intensas, desencadenando los movimientos gravitaciones que afectan a la ladera completa (de mayor volumen) por el efecto combinado del aumento de peso de la sucesión y el efecto de lubricante que produce el agua sobre los planos de debilidad natural de la roca. Previo al inicio del estudio tuvo lugar un desplome del acantilado sobre la ladera norte del cañadón del Infiernillo de forma posterior al evento extremo de precipitaciones del 20 de septiembre de 2022 (Fig. 27.B). La falta de sustentación basal del acantilado se considera que es el precursor del segundo tipo de movimiento gravitacional reconocido, que se caracteriza por el desarrollo de fracturas verticales (extensionales) desarrolladas en los horizontes de areniscas consolidadas ubicadas por encima del horizonte de arcilitas, y el desarrollo de fracturas verticales desarrolladas en

materiales cuaternarios, dispuestos en la parte más alta del acantilado, Estas fracturas verticales se disponen de forma paralela a la línea de acantilados (Fig. 27.C).



Figura 27. Retracción de los acantilados costeros del sector norte de la Costanera y hasta la Playa de Tanques de YPF. (A) Desplomes de la parte baja del acantilado, desarrollados mayormente en niveles de arcilitas fracturadas. Fecha de la fotografía 05 de noviembre de 2022. (B) Desplome gravitaciones ocurrido con posterioridad al evento extremo de precipitaciones del 20 de septiembre de 2022, abarcando la pared completa del acantilado. (C) Desarrollo de fracturas verticales en la parte alta del acantilado, abarcando el relleno moderno y parte de la Formación Chenque.

A partir de dos relevamientos realizados con drones se realizaron secciones longitudinales a la playa (Fig. 28), que ilustran los cambios laterales en la distribución de sedimento. La zona Norte tiene expuesta la restinga, por lo que no permite la acumulación de sedimento excepto en pequeños

Paredes et al. (2023)

pozones o al resguardo de bloques de mayor tamaño. La zona de acumulación se inicia al norte del enrocado emplazado en la parte central de la bahía, y es la que presenta mayor variación de espesor entre las mediciones, en tanto que hacia la zona sur las diferencias de espesor son mínimas (Fig. 28).





Figura 28. Perfiles comparados de playa obtenidos en base a relevamiento realizado el 05 de octubre de 2022 (en verde) y el 05 de abril de 2023 (en rojo). Las variaciones de la cota topográfica son mínimas (o nulas) en la zona de restinga aflorada al norte (perfil D) y presenta acumulaciones en el intervalo en la zona ubicada al norte del enrocado (perfil C, parte norte), con modificaciones mínimas en la zona sur. Notar que los perfiles tienen diferente escala vertical y horizontal diferentes.

Por su parte, la realización de cortes topográficos transversales a los acantilados refleja estabilidad relativa de los acantilados (**Fig. 29**), ya que los procesos son eventuales y localizados, mensurables en intervalos de tiempo de décadas.

Figura 29. Cortes transversales a los acantilados costeros. La línea verde representa el relevamiento de octubre de 2022, en tanto la línea roja marca la topografía de abril de 2023. No se advierten cambios significativos en la posición de ninguna de las posiciones seleccionadas en el período de seis meses. Ubicación en Figura 28.



A los efectos de establecer tasas de retracción de los acantilados costeros se georeferenció una fotografía aérea del 6 de mayo de 1968, y se la comparó con el relevamiento realizado en abril de 2023 (Fig. 30). La comparación utilizando puntos fijos ubicados por detrás del acantilado permitió reconocer variaciones laterales en la tasa de retracción de los acantilados entre 0,67 m/año y 1,18 m/año.



Paredes et al. (2023)

Fotografía Figura 30. aérea del 6/5/1968 y modelo digital de afloramiento relevado el 6/5/2023. La comparación del sector permite evaluar el retroceso de los acantilados en un período de 55 años.

Lic. Natalia Suárez del Solar Responsable Técnico SERMAN & ASOCIADOS S.A.



Figura 31. Ubicación de rasgos costeros de 1968 en un ortomosaico actual (2023). La línea azul, verde y punteado rojo indican posición de la línea de costa, las vías del tren y acantilado en 1968, respectivamente. También se indica el acantilado actual. Las mediciones indican el retroceso de la línea de costa y/o acantilado. Se destacan en la posición actual los rasgos de erosión marina activa: plataforma de abrasión, caída de bloques y acantilados activos. Los depósitos de playa son mínimos. Los valores de retroceso de la línea de acantilados varían entre 0,67 m/año y 1,18 m/año.

Paredes et al. (2023)

7. CONCLUSIONES

Se analizó la información batimétrica disponible del área del Puerto de Comodoro Rivadavia y la Costanera local, complementada con información climática obtenida de la estación meteorológica del puerto, datos de las mareas del SHN, observaciones de campo realizadas entre la Playa de Tanques de YPF y el Puerto de Comodoro Rivadavia, y relevamientos con VANT de la zona costera.

Las conclusiones del estudio son las siguientes:

- La costa de Comodoro Rivadavia se encuentra en una costa macromareal con régimen semidiurnal, que para el año 2022 presentan sicigias medias de 5,05 m y cuadraturas medias de 3,16 m. Los patrones de distribución y velocidad de los vientos muestran predominio de vientos fuertes del cuadrante Oeste, con modas subordinadas del S y NE que presentan variabilidad interanual significativa.
- 2) Las arcillas expansivas son el constituyente más abundante de la geología expuesta en los alrededores del área de estudio. Sin embargo, la preservación de la fracción arcillosa en el área de estudio es muy escasa, por lo que los mecanismos de transporte de carga suspendida parecen operar en diferentes condiciones de vientos y de oleaje. El traslado de material hacia la plataforma ocurre en condiciones de vientos moderados a intensos provenientes del NE y O.
- 3) Los mapas batimétricos del período 1996 a 2022 reflejan condiciones de agradación continua en la zona del Puerto de Comodoro Rivadavia, vinculados a aportes naturales por deriva litoral y acción de tormentas, y a fuentes antrópicas. En relación a la geomorfología del área dragada en 1996, el relleno de la misma ocurrió mayormente por transporte de sedimento clástico desde el ONO. El relleno presenta un patrón agradacional, con el desarrollo de un cuerpo de base plana y techo convexo de 150 cm de altura en el acceso del muelle de ultramar.
- 4) Se determinaron las tasas de acreción vertical de un área con cobertura batimétrica de los años 1996, 2005, 2006, 2008, 2013, 2016, 2017 y 2022, y que incluye el área dragada en el año 1996. El relleno del área se puede dividir en cuatro etapas. La primera etapa abarca en período 1996-2008, en el que las tasas de acreción son de alrededor de 10 cm/año. La segunda etapa tiene lugar entre 2008 y 2016, con tasas de acreción alrededor de 5 cm/año. La etapa 3 abarca parte del 2016 y el 2017, y se caracteriza por tasas de acreción de más de 10 cm/año; los valores altos en la tasa de acreción de esta etapa están presumiblemente relacionadas con el evento de precipitación extremo ocurrido entre el 29 de marzo y el 08 de abril de 2017. La etapa 4 abarca el período entre fines de 2017 y 2022, y presenta tasas de acreción de < 2 cm/año. Las condiciones actuales que predominan en el área analizada son de *bypass* sedimentario, ya que se ha alcanzado la superficie en equilibrio con las condiciones de disipación de energía del ambiente costero.
- **5)** En el muelle de ultramar, que contiene la zona con mayor batimetría del espacio analizado, las cuatro etapas identificadas del relleno presentan similar comportamiento, pero por encontrarse en posición mas profunda, todos los valores de las tasas de agradación son ligeramente mayores.
- 6) Se analizó mediante fotografías aéreas de 1968 y un modelo digital de afloramiento de abril de 2023 el retroceso de los acantilados costeros del sector norte del área de estudio. Se determinaron tasas de retroceso variables entre 0,67 m/año en la zona adyacente a la Playa de Tanques de YPF y de 1,18 m/año en la zona de mayor retroceso, próxima al centro de la bahía.

8. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Allen J.R.L., 1985. Principles of Physical Sedimentology. Chapman & Hall, London, pp. 1-272.

- Barletta, R., Barletta, G., Capdevila, E. y Galazzi, G., 2009. IATASA. Propuesta de estabilización de taludes en la Ruta Nacional Nº 3 (Faldeo Este del Cerro Chenque). XV Congreso Argentino de Vialidad y Tránsito, 17 p. Buenos Aires.
- **Bellosi, E.S., 1990.** Formación Chenque: registro de la transgresión patagoniana de la Cuenca del Golfo San Jorge. 11º Congreso Geológico Argentino, Actas 2: 57-60. San Juan.
- **Bosboom, J., Stive, M.J.F., 2023.** Coastal Dynamics. Delft University of Technology (LibreText), pp. 1-577, Delft, The Netherland.
- **Bowen, A.J., Inman, D.L., 1966.** Budget of littoral sands in the vicinity of Point Arguello, California. U.S. Army Coastal Engineering Research Center. pp. 1-41.
- **Codignotto, J.O. y del Valle, M.C., 1995.** Evaluación cualitativa de los factores de riesgo geológico en Playa Rada Tilly, Chubut. Revista de la Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería 9: 64-77.
- Cuitiño, J.I., Scasso, R., Ventura Santos, R. y Mancini, L., 2015. Sr ages for the Chenque Formation in the Comodoro Rivadavia region (Golfo San Jorge basin, Argentina): stratigraphic implications. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis, 22 (1): 3-12.
- Dawson, R.J., Dickson, M.E., Nicholls, R.J., Hall, J.W., Walkden, M.J.A., Stansby, P.K., Mokresh, M., Richards, J., Zhou, J., Milligan, J., Jordan, A., Pearson, S., Rees, J., Bates, J., Koukoulas, S., Watkinson, A.R., 2009. Integrated analysis of risks of coastal flooding and cliff erosion under scenarios of long-term change. Climatic Change, 95, 249-288.
- Francisca, F., Pinto, F., Abril, E., van de Velde, G., Álvarez-Muguerza, M., 2017. Proyecto de estabilización del faldeo sur del cerro Chenque, Comodoro Rivadavia. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente, 38: 1-12.
- **Gómez, A., lantanos, N., Jones, M., 2003.** Dinámica costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia. SEGEMAR, Serie Contribuciones Técnicas, 19 páginas.
- Hernández, M.A., González, N. y Hernández, L. 2017. Hydrogeology of a Large Oil-and-Gas Basin in Central Patagonia. San Jorge Gulf Basin, Argentina. Springer Briefs in Latin American Studies, Springer, 1-95, New York.
- Hirtz, N. y Blachakis, A., 2000. Deslizamientos en una franja costera de la ciudad de Comodoro Rivadavia, Chubut, Argentina. Revista de Geología Aplicada a la Ingeniería y al Ambiente,15: 41-55. ASAGAI. Buenos Aires.
- **Hirtz, N., y Blachakis, A., 2004.** Análisis de peligrosidad geológica en los faldeos de los cerros Chenque y Viteau en un sector del casco urbano de la ciudad de Comodoro Rivadavia. Chubut. Argentina. SINERGIA 2004: XVII Congreso Argentino de Mecánica de Suelos e Ingeniería Geotécnica. Córdoba.

Paredes et al. (2023)

- Hirtz, N.R., Barletta, R.H., Paredes, J.M., 2019. La estabilización de los faldeos sur y este del cerro Chenque: una reseña del pasado reciente, diagnóstico presente y visión a futuro. En: Paredes, J.M. (Compilador). Comodoro Rivadavia y la catástrofe de 2017: visiones múltiples para una ciudad en riesgo. Editorial Universitaria de la Patagonia, p. 205-220. Comodoro Rivadavia.
- Inman, D.L., Jenkins, S.A., 1999. Climate change and the periodicity of sediment flux of small California rivers. The Journal of Geology, 107, 251-270.
- Isla, F., Iantanos, N. y Estrada, N. 2002. Playas reflectivas y disipativas macromareales del Golfo San Jorge, Chubut. Latin American Journal of Sedimentology and Basin Analysis 9: 155-164.
- Iriondo, M., 2000. Patagonian dust in Antarctica. Quaternary International. Elsevier, Oxford 68-71:83-86.
- Johnson, H.D., Baldwin, C.T., 1996. Shallow clastic seas. En: Reading, H. (Ed.) Sedimentary Environments: Processes, Facies and Stratigraphy. Blackwell Science Ltd., p. 232-280, London.
- Kokot, R.R., M C. del Valle y J. O. Codignotto, 1996. Aspectos ambientales y riesgo geológico costero en zonas urbanas del Golfo San Jorge. Asociación Argentina de Geología Aplicada a la Ingeniería, Actas X: 169-186.
- Lanfredi, N.W., Pousa, J.L., D'Onofrio, E.E., 1998. Sea-level Rise and related potential hazards in the Argentine coast. Journal of Coastal Research, 14 (1): 47-60.
- Montes, A., Rodríguez, S.S., Domínguez, C.E., 2017. Geomorphology context and characterization of dunefields developed by the southern westerlies at drying Colhué Huapi shallow lake, Patagonia, Argentina. Aeolian Research, 28, 58-70.
- Natalini, B. y Natalini, M.B. 2013. Revisión de velocidades de viento extremas en tres localidades del sur de Argentina. Revista Internacional de Desastres Naturales, Accidentes e Infraestructura Civil 13 (2): 235-248.
- Nicholls, R.J., Wong, P.P., Burkett, V.R., Codignotto, J.O., Hay, J.E., McLean, R.F., Ragoonaden, S. y Woodroffe, C.D., 2007. Coastal systems and low-lying areas. Climate Change 2007: Impacts, Adaptation and Vulnerability. Contribution of Working Group II to the Fourth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change, M.L. Parry, O.F. Canziani, J.P. Palutikof, P.J. van der Linden and C.E. Hanson, Eds., Cambridge University Press, Cambridge, UK, pp. 315-356.
- Paredes, J.M., Ocampo, Foix, N., Olazábal, S.X., Valle, M.N., Montes, N., Allard, J.O., 2020. Precipitaciones extremas e inundaciones repentinas en ambiente semiárido: impactos del evento de marzo-abril de 2017 en Comodoro Rivadavia, Chubut. Revista Asociación Geológica Argentina, 77 (2): 294-316. https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/10
- **Prohaska, F., 1976.** The climate of Argentina, Paraguay and Uruguay. En: Schwerdtfeger, W. (Ed.), Climates of Central and South America. Elsevier, New York, pp. 13-112.
- **Pilarczyk, K., 2009.** Remarks on coastal stabilization and alternative solutions. En: Kim, Y.C. (Ed.) Handbook of Coastal and Ocean Engineering, Word Scientific, p. 521-551.

Paredes et al. (2023)