

Extracción, Visualización y Cuantificación de Cambios en Médanos Costeros: Análisis temporal realizado con imágenes Sentinel-2 de Monte Hermoso, Provincia de Buenos Aires

Alejandro Zambrano Zabaleta^{1,2}[0009-0006-9594-5825], Marina P. Cipolletti^{2,3}[0000-0002-1134-6344], and Gerardo M. E. Perillo¹

¹ Instituto Argentino de Oceanografía- CONICET- UNS, Bahía Blanca, Argentina

² Departamento de Ingeniería Eléctrica y de Computadoras- UNS, Bahía Blanca, Argentina

³ Departamento de Ciencias e Ingeniería de la Computación- UNS, Bahía Blanca, Argentina

alejandro.zambrano@uns.edu.ar

mpcipolletti@gmail.com

Abstract. Este trabajo plantea un método sistemático para la detección, extracción y medición de un médano de arena a lo largo de un período de 6 años. Se utilizaron imágenes satelitales con una resolución de 10 m extraídas de la misión Sentinel-2, por medio de la base de datos de Google Earth Engine, de las cuales se emplean las bandas normalizadas RGB y el infrarrojo cercano (NIR) de cada punto. Cada imagen es segmentada por medio de un algoritmo de aprendizaje automático no supervisado que agrupa la información en cinco categorías, identificando así las áreas correspondientes a los médanos y generando una máscara georeferenciada.

A partir de estas máscaras, se aplican técnicas de extracción de bordes de superresolución para delinear y discriminar polígonos correspondientes a los médanos que permitan calcular áreas y perímetros. Finalmente, se realiza una comparación de la información extraída para cada año en particular. Este enfoque proporciona una caracterización morfológica y una cuantificación temporal del avance o retroceso de los médanos, lo cual resulta fundamental para abordar y tomar decisiones frente a la importancia que representan para sus zonas de influencia.

Keywords: Dinámica costera · Segmentación · Imágenes multiespectrales · Aprendizaje automático.

1 Introducción

Usualmente, los estudios enfocados en caracterización morfológica en Ciencias de la Tierra presentes en la literatura se encuentran enfocados al análisis de datos y a búsqueda de patrones y modelos que respondan a la interpretación de las

variables involucradas [7, 6, 17]. Sin embargo, en lugares donde la información no se encuentra disponible, estas bases de datos deben ser generadas [14, 2].

En este contexto cobran especial importancia las imágenes de teledetección como fuente de información. Es evidente que la aplicación de algoritmos de procesamiento permite extraer los datos incluidos en la imagen y combinarlos con otras fuentes en el análisis de fenómenos para el desarrollo de modelos. En la actualidad, a la diversidad de modalidades, sensores, resoluciones temporales y espaciales (Landsat, Spot, Sentinel, Ikonos, etc.) se le suman la disponibilidad de bases de datos con información agregada confiable [10, 4]. La combinación entre el desarrollo de nuevas técnicas de procesamiento con información geológica, climática, sociológica, económica, etc., permite el abordaje integral en la definición de políticas de regulación y control de medio ambiente para la utilización de recursos naturales de manera sustentable.

Las zonas costeras contienen los ecosistemas más vulnerables del planeta, y resulta crucial encontrar métodos rentables de monitoreo y preservación. Sin embargo, el mapeo de hábitats y las observaciones a lo largo del tiempo representan un desafío significativo en este sentido [8]. En particular, los médanos de playa cumplen un rol esencial en los ecosistemas costeros al proporcionar protección contra la erosión, albergar vida silvestre, filtrar el agua dulce, regular el clima y ofrecer oportunidades para el turismo y la recreación [11, 12, 15]. La gestión adecuada y responsable es fundamental para su preservación garantizando la sostenibilidad de largo plazo de toda su zona de influencia [16]. El estudio y la caracterización de los procesos hidrodinámicos involucrados, las condiciones ambientales y la cuantificación de sus variables de cambio permiten a los investigadores obtener información de la compleja dinámica del transporte de sedimentos y sus cambios morfológicos [13].

El objetivo metodológico de este estudio se centra en la validación de un método automático para la segmentación y extracción de zonas correspondientes a médanos costeros a partir de imágenes satelitales. Este enfoque busca superar las limitaciones y retos asociados con los métodos manuales tradicionales, que son costosos en términos de tiempo y recursos humanos. Para llevar a cabo esta metodología, se utilizan imágenes satelitales de Sentinel-2 y se aplican algoritmos de aprendizaje automático no supervisado para segmentar regiones con similitudes en un espacio de atributos. La validación del método se lleva a cabo mediante la evaluación visual de un experto en el campo. Este enfoque nos permitirá avanzar hacia el desarrollo de una herramienta efectiva y confiable para monitorear y estudiar la evolución y dinámica de las médanos costeros en diversas regiones de Argentina.

2 Metodología

En este estudio, se utilizaron imágenes del satélite Sentinel-2, en las cuales se seleccionaron cuatro bandas específicas: TCI_R, TCI_G y TCI_B para representar rojo, verde y azul, en el espectro visible respectivamente, junto con la banda del infrarrojo cercano B8, todas con una resolución de 10 metros. Las ban-

das TCI (*True Color Image*) son una combinación RGB formada por las bandas B2 (azul), B3 (verde) y B4 (rojo), donde los valores de reflectancia se codifican en un rango de 1 a 255. El valor máximo de 255 corresponde a reflectancias de 3558 para productos L1C o 2000 para L2A, mientras que el valor 0 se reserva para *No Data* [3]. Además de estas bandas, se incluyó información espacial mediante la coordenada de píxel normalizada como parte de los atributos utilizados, con el fin de evitar sesgos relacionados con el tamaño de la imagen.

El estudio se aplicó, a modo de prueba, sobre una zona de interés que incluye un médano principal situado en la ciudad de Monte Hermoso Provincia de Buenos Aires, Argentina. La delimitación de esta zona se realiza mediante un polígono definido por las siguientes coordenadas en el sistema de referencia EPSG: 4326 - WGS84, ordenadas como latitud y longitud respectivamente:

- -61.343527030944834, -38.99068298894624
- -61.33039493560792, -38.99068298894624
- -61.33039493560792, -38.978073344128255
- -61.343527030944834, -38.978073344128255

A través de la plataforma Google Earth Engine [4], se adquirieron un total de 6 imágenes de la zona, capturadas durante el mes de diciembre entre los años 2018 y 2023 asegurando que la cobertura de nubes fuera inferior al 30%. Las imágenes seleccionadas corresponden al catálogo de *Sentinel-2 Surface Reflectance Level-2A* [5]. Posteriormente, se realizó un recorte de cada imagen para obtener únicamente la región de interés (ROI) estipulada para el estudio, permitiendo garantizar la disponibilidad de imágenes de calidad y libres de nubes para el análisis y la comparación entre los diferentes años seleccionados.

La segmentación se llevó a cabo en dos etapas. En primer lugar, se utilizó la biblioteca scikit-learn de Python [9] para aplicar el algoritmo no supervisado de clustering K-means, configurado con 5 clases como parámetro de entrada. Luego, un experto seleccionó y unificó las clases correspondientes a los médanos en una sola categoría para obtener una máscara binaria con la información del médano versus el fondo. En la Fig. 1 se muestra el resultado de cada paso de la segmentación.

La segmentación de los bordes se realizó con un algoritmo de superresolución [1] con el cual se generaron cadenas de puntos consecutivos cuyos puntos inicial y final están marcados y etiquetados. Puntos con la misma etiqueta se conectan para formar polígonos cerrados uniendo el punto final al inicial mediante una línea. Cada cadena se georeferenció y se calcularon sus áreas y perímetros designando como el médano costero principal el polígono con mayor área.

El médano principal queda representado como una superficie compacta. Sin embargo, en su interior pueden existir regiones clasificadas como fondo que aumentan de manera errónea la superficie del mismo y deben ser excluidas del análisis. Para esto, se calculó la diferencia entre el polígono de mayor área y las demás estructuras no pertenecientes al médano principal empleando lógica de conjuntos.

Para el estudio temporal, se llevó a cabo un análisis preliminar de los cambios en la morfología de los médanos a lo largo de cada año, considerando su

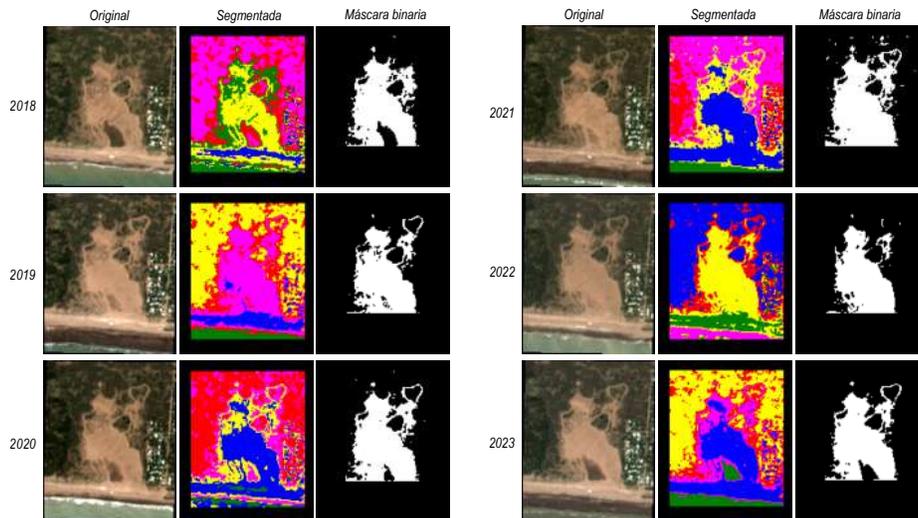


Fig. 1. Proceso de segmentación del médano costero principal a lo largo de seis años (2018-2023) utilizando imágenes Sentinel-2. Cada representación incluye: imagen de color verdadero RGB (*Original*), resultados del algoritmo K-means (*Segmentada*) y las zonas identificadas como médanos costeros en blanco (*Máscara binaria*).

distribución y extensión. Se graficó la superposición correspondiente a dos años consecutivos. Para cada gráfico, se identificaron tres regiones importantes donde se comparó un año actual con el anterior: médano que se mantuvo constante en ambos años, zona que desapareció y superficie nueva. Por último, se superpusieron las máscaras de todo el período para determinar la región estable durante los 6 años.

3 Resultados

En el año 2019 se observó una disminución en la superficie del médano respecto del año anterior, con una aparente tendencia desde la dirección izquierda (Oeste). Además, se redujo significativamente la extensión de un espejo de agua ubicado en el centro del médano. En cambio, en diciembre del 2020 la superficie aumentó superando incluso el registro del 2018, sin mostrar un sesgo evidente en ninguna dirección. El espejo de agua también experimentó dicho incremento en su extensión, aunque en menor medida que en 2018.

En el año 2021, la superficie del médano continuó aumentando de manera uniforme en tamaño. Según la clasificación automática, el espejo de agua se secó por completo durante este lapso. Sin embargo, en el año 2022 se detectó una reducción significativa en la superficie del médano, particularmente notoria en los márgenes izquierdo y derecho. Es importante resaltar que la zona Este del médano, si bien fue clasificada como médano durante el proceso de segmentación,

quedó desconectada del médano principal y, por lo tanto, fuera del análisis en este período. Por último, en el año 2023 el médano aumentó su superficie volviendo al formato observado en el 2021, incluyendo la presencia del espejo de agua. La superposición de todas las máscaras nos permitió determinar que durante el período estudiado la superficie estable del médano fue de 217188.03 m^2 y la zona total de influencia de 361369.60 m^2 . En la Fig. 2 se muestran todos los gráficos de superposición discriminando entre las tres zonas analizadas y en la Tabla 1 la superficie neta correspondiente a cada una.

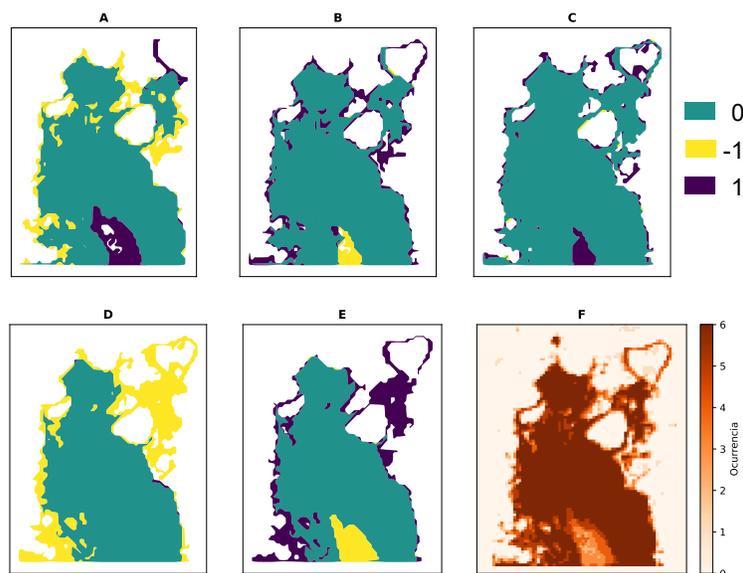


Fig. 2. Comparativa vectorial para dos años consecutivos: (A) 2018 - 2019, (B) 2019 - 2020, (C) 2020 - 2021, (D) 2021 - 2022 y (E) 2022 - 2023. Se destaca la superficie que se mantiene en ambos años (valor de 0 en verde), superficie de médano presente el año anterior que desaparece en el año actual (valor de -1 en amarillo) y superficie nueva del médano (valor de 1 en violeta). (F) Superposición de todas las máscara binarias (Fig. 1) cuya intensidad de color naranja indica la ocurrencia de detección de médano costero para el periodo entre 2018 y 2023

4 Discusión

En términos generales, no se observaron diferencias significativas entre la validación realizada por el experto en humedales costeros y playas [13], en comparación con los resultados obtenidos mediante la clasificación automática. Sin embargo, es importante destacar que las principales discrepancias no surgieron debido a fallos en la clasificación, sino que se atribuyen al proceso de selección de

Table 1. Superficie del médano principal en m^2 . 0: superficie que se mantiene en ambos años, -1: superficie de médano presente el año anterior que desaparece en el año actual y 1: superficie nueva del médano. Las etiquetas corresponden al color verde, amarillo y violeta, respectivamente (Fig. 2)

Año	2019	2020	2021	2022	2023
0	260457.39	277372.93	319977.74	250547.47	233395.90
-1	42622.71	7549.97	1502.88	100701.37	17924.98
1	24465.51	44107.68	31271.10	773.41	66512.04

la estructura principal. Específicamente, el año 2022 exhibió la mayor disparidad entre las observaciones realizadas por el experto para lo que se consideró médano y los resultados obtenidos mediante la metodología propuesta. Tras evaluar esta discrepancia, se identificó que una parte de la región no delimitada corresponde a un área cuyo polígono no está conectado de la geometría con mayor área extraída. Esta situación podría abordarse mediante la aplicación de un filtro morfológico de cierre.

Por otro lado, se encontró que el clasificador no siempre detectó adecuadamente el sector correspondiente al espejo de agua. Dicha zona presenta una depresión central con presencia de agua o un alto porcentaje de humedad. Al igual que otras regiones comunes a lo largo de los años evaluados y que no corresponde incluirlos dentro de la superficie del médano. Estas áreas con presencia de vegetación o alto porcentaje de humedad generan alta probabilidad de confusión en el proceso de clasificación debido a su similitud cromática con las zonas del médano. Algunas alternativas para solucionar este problema podría ser la inclusión de espacios cromáticos diferentes al RGB, donde la correlación lineal entre cada canal sea menor (por ejemplo: HSV y Lab). Además, se pueden aplicar filtros que permitan resaltar la textura de las regiones y utilizar índices espectrales como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada).

5 Conclusión

El desarrollo de este trabajo, permite demostrar la factibilidad de obtener información vectorial precisa sobre médanos costeros de manera no supervisada a partir de imágenes satelitales. Incluso en resoluciones consideradas inicialmente insuficientes, como 10 m, durante períodos cortos.

En futuros trabajos, se plantea ajustar los parámetros de clasificación con el objetivo de minimizar las discrepancias entre el método no supervisado y la extracción manual. También se pretende ampliar la zona de estudio para abarcar toda el área de interés y reducir al mínimo el intervalo de tiempo entre las muestras recopiladas. Por último, incorporar información sobre eventos naturales atípicos y la correlación con datos meteorológicos locales que permitan profundizar en el entendimiento de la dinámica morfológica hallada en este estudio.

References

1. Cipolletti, M.P., Delrieux, C.A., Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C.: Superresolution Border Segmentation and Measurement in Remote Sensing Images. *Computers & Geosciences* **40**(0), 87–96 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.cageo.2011.07.015>
2. Cipolletti, M., Delrieux, C., Perillo, G.: Automatic determination, feature-extraction, and classification of tidal-courses through remote-sensing images: Preliminary studies. In: 2021 XIX Workshop on Information Processing and Control (RPIC) (2021). <https://doi.org/10.1109/RPIC53795.2021.9648432>, <https://ieeexplore.ieee.org/document/9648432>
3. Copernicus: Sentinel-2 msi, <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/user-guides/sentinel-2-msi>
4. Engine, G.E.: A planetary-scale platform for earth science data & analysis, <https://earthengine.google.com/>
5. Engine, G.E.: Sentinel 2 - surface reflectance. https://developers.google.com/earth-engine/datasets/catalog/COPERNICUS_S2_SR_HARMONIZED
6. Hugenholtz, C., Levin, N., Barchyn, T., Baddock, M.: Remote sensing and spatial analysis of aeolian sand dunes: A review and outlook. *Earth-Science Reviews* **111**(3), 319–334 (2012). <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2011.11.006>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S001282521100170X>
7. Hugenholtz, C., Wolfe, S.: Biogeomorphic model of dunefield activation and stabilization on the northern great plains. *Geomorphology* **70**(1), 53–70 (2005). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2005.03.011>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X05001224>
8. Marzialetti, F., Giulio, S., Malavasi, M., Sperandii, M., Acosta, A.T.R., Caranza, M.L.: Capturing coastal dune natural vegetation types using a phenology-based mapping approach: The potential of sentinel-2. *Remote Sensing* **11**(12) (2019). <https://doi.org/10.3390/rs11121506>, <https://www.mdpi.com/2072-4292/11/12/1506>
9. Pedregosa, F., Varoquaux, G., Gramfort, A., Michel, V., Thirion, B., Grisel, O., Blondel, M., Prettenhofer, P., Weiss, R., Dubourg, V., Vanderplas, J., Passos, A., Cournapeau, D., Brucher, M., Perrot, M., Duchesnay, E.: Scikit-learn: Machine learning in Python. *Journal of Machine Learning Research* **12**, 2825–2830 (2011)
10. Pekel, J., Cottam, A., Gorelick, N., A.S., B.: High-resolution Mapping of Global Surface Water and its Long-term Changes. *Nature* **540**, 418–422 (2016)
11. Perillo, G.M.E., Piccolo, M.C., Parodi, E., Freije, R.H.: The Bahia Blanca Estuary, Argentina. In: Seeliger, U., Kjerfve, B. (eds.) *Coastal Marine Ecosystems of Latin America*, vol. 144, pp. 205–217. Springer Berlin Heidelberg (2001)
12. Perillo, G., Wolanski, E., Cahoon, D., Brison, M.: *Coastal Wetlands, An Integrated Ecosystem Approach*. Elsevier Science, Netherlands (2009)
13. Perillo, G., Wolanski, E., Cahoon, D., Hopkinson, C.: *Coastal Wetlands*. Elsevier (2019). <https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63893-9.05002-4>
14. Revollo-Sarmiento, G., Cipolletti, M., Perillo, M., Delrieux, C., Perillo, G.M.: Methodology for classification of geographical features with remote sensing images: Application to tidal flats. *Geomorphology* **257**, 10 – 22 (2016). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2015.12.020>
15. Suanez, S., Yates, M., Floc'h, F., Accensi, M.: Using 17 years of beach/dune profile monitoring to characterize morphological dynamics related to significant extreme water level events in north brittany (france). *Geomorphology* **433**, 108709 (2023). <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2023.108709>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0169555X23001290>

16. Wright, L., Short, A.: Morphodynamic variability of surf zones and beaches: A synthesis. *Marine Geology* **56**(1), 93–118 (1984). [https://doi.org/10.1016/0025-3227\(84\)90008-2](https://doi.org/10.1016/0025-3227(84)90008-2), <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/0025322784900082>
17. Zheng, Z., Du, S., Taubenböck, H., Zhang, X.: Remote sensing techniques in the investigation of aeolian sand dunes: A review of recent advances. *Remote Sensing of Environment* **271**, 112913 (2022). <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.112913>, <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S003442572200027X>