

Navarro Almendros, G.; Román Vázquez, A.; Tovar Sánchez, A. Teledetección con drones y satélites para la monitorización medioambiental de la Antártida

Teledetección con drones y satélites para la monitorización medioambiental de la Antártida

Navarro Almendros, Gabriel ¹ Román Vázquez, Alejandro ¹ Tovar Sánchez, Antonio ¹

¹ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAC-CSIC), España

ORCID: Navarro Almendros 0000-0002-8919-0060 Román Vázquez 0000-0002-8868-9302 Tovar Sánchez 0000-0003-4375-1982

Correspondencia: gabriel.navarro@csic.es a.roman@csic.es a.tovar@csic.es

RESUMEN

La Antártida constituye un laboratorio natural excepcional para comprender las respuestas del sistema climático terrestre ante el calentamiento global. Sin embargo, la monitorización de sus ecosistemas resulta particularmente compleja debido a las condiciones meteorológicas extremas y la inaccesibilidad del territorio. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y la teledetección satelital se han consolidado como herramientas fundamentales para la investigación polar. Este trabajo presenta los principales avances obtenidos mediante la integración de sensores embarcados en drones (ópticos RGB, multiespectrales, hiperespectrales, térmicos y LiDAR) junto con imágenes del satélite Sentinel-2, en diversas campañas antárticas realizadas en las islas Shetland del Sur entre 2022 y 2025. Los resultados abarcan tres líneas de investigación complementarias: (i) la generación de conjuntos de datos topográficos y fotogramétricos de alta resolución a escala centimétrica, que cubre los ~35 km del anillo costero de la bahía de Port Foster en Isla Decepción; (ii) la estimación de la abundancia poblacional del pingüino barbijo mediante arquitecturas de aprendizaje profundo aplicadas a ortomosaicos de UAV en la colonia de Collado Vapor; y (iii) la detección y cuantificación de floraciones de algas rojas de nieve en los campos nevados costeros del archipiélago, combinando imágenes hiperespectrales de dron con clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2. Estos estudios evidencian el potencial de la teledetección aerotransportada y satelital para ampliar la capacidad de observación en regiones polares, reduciendo la perturbación sobre los hábitats vulnerables y generando información esencial para evaluar los efectos del cambio climático en el ecosistema antártico.



Palabras clave: Antártida, UAV, LiDAR, Sentinel-2, teledetección


Fecha de recepción: 16 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026

Teledetección con drones y satélites para la monitorización medioambiental de la Antártida

Navarro Almendros, Gabriel ⁽¹⁾, Román Vázquez, Alejandro ⁽¹⁾, Tovar Sánchez, Antonio ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Instituto de Ciencias Marinas de Andalucía (ICMAN-CSIC), España.

 0000-0002-8919-0060, gabriel.navarro@csic.es ;  0000-0002-8868-9302, a.roman@csic.es.

 0000-0003-4375-1982, a.tovar@csic.es.

Resumen: La Antártida constituye un laboratorio natural excepcional para comprender las respuestas del sistema climático terrestre ante el calentamiento global. Sin embargo, la monitorización de sus ecosistemas resulta particularmente compleja debido a las condiciones meteorológicas extremas y la inaccesibilidad del territorio. En este contexto, los vehículos aéreos no tripulados (UAVs) y la teledetección satelital se han consolidado como herramientas fundamentales para la investigación polar. Este trabajo presenta los principales avances obtenidos mediante la integración de sensores embarcados en drones (ópticos RGB, multispectrales, hiperspectrales, térmicos y LiDAR) junto con imágenes del satélite Sentinel-2, en diversas campañas antárticas realizadas en las islas Shetland del Sur entre 2022 y 2025. Los resultados abarcan tres líneas de investigación complementarias: (i) la generación de conjuntos de datos topográficos y fotogramétricos de alta resolución a escala centimétrica, que cubre los ~35 km del anillo costero de la bahía de Port Foster en Isla Decepción; (ii) la estimación de la abundancia poblacional del pingüino barbijo mediante arquitecturas de aprendizaje profundo aplicadas a ortomosaicos de UAV en la colonia de Collado Vapor; y (iii) la detección y cuantificación de floraciones de algas rojas de nieve en los campos nevados costeros del archipiélago, combinando imágenes hiperspectrales de dron con clasificación supervisada de imágenes Sentinel-2. Estos estudios evidencian el potencial de la teledetección aerotransportada y satelital para ampliar la capacidad de observación en regiones polares, reduciendo la perturbación sobre los hábitats vulnerables y generando información esencial para evaluar los efectos del cambio climático en el ecosistema antártico.

Palabras clave: Antártida, UAV, LiDAR, Sentinel-2, teledetección

Drone and satellite remote sensing for Antarctic environmental monitoring

Abstract: Antarctica is an exceptional natural laboratory for understanding the responses of the Earth's climate system to global warming. However, monitoring its ecosystems is particularly challenging due to extreme weather conditions and territorial inaccessibility. In this context, Unmanned Aerial Vehicles (UAVs) and satellite remote sensing have become essential tools for polar research. This work presents the main advances obtained through the integration of drone-mounted sensors (optical RGB, multispectral, hyperspectral, thermal, and LiDAR) together with Sentinel-2 satellite imagery, across several Antarctic campaigns conducted in the South Shetland Islands between 2022 and 2025. The results cover three complementary research lines: (i) the generation of high-resolution topographic and photogrammetric datasets at centimeter scale, including the FosterCoast repository covering the ~35 km coastal ring of Port Foster Bay on Deception Island; (ii) the estimation of chinstrap penguin population abundance using deep-learning architectures applied to UAV orthomosaics at the Vapour Col colony; and (iii) the detection and quantification of red snow algae blooms on the archipelago's coastal snowfields, combining drone-based hyperspectral imagery with supervised classification of Sentinel-2 images. These studies demonstrate the potential of airborne and satellite remote sensing to expand observational capabilities in polar regions, while minimizing disturbance to vulnerable habitats and providing essential information for assessing the effects of climate change on the Antarctic ecosystem.

Keywords: Antarctica, UAV, LiDAR, Sentinel-2, remote sensing

1. INTRODUCCIÓN

La Antártida, junto con el océano Austral que la rodea, se encuentra entre las regiones del planeta más sensibles al cambio climático (Meredith *et al.*, 2019). Entender la dinámica de sus ecosistemas constituye un reto científico de primer orden para anticipar y mitigar riesgos tanto a escala regional como global. No obstante, la lejanía, las condiciones meteorológicas adversas y la orografía accidentada de estas regiones limitan considerablemente la aplicación de técnicas convencionales de observación terrestre.

En las últimas décadas, la teledetección satelital ha permitido importantes avances en el conocimiento de los ecosistemas polares. Sin embargo, las imágenes de muy alta resolución presentan restricciones significativas en la Antártida Marítima, derivadas de la cobertura nubosa casi permanente, los elevados costes de adquisición y la irregularidad temporal de las capturas (Pina y Vieira, 2022).

Los vehículos aéreos no tripulados (UAVs o drones) se han posicionado como plataformas intermedias entre la observación satelital y los muestreos de campo, proporcionando una alternativa ágil, económica y de mínima intrusión sobre la fauna. Gracias a la fotogrametría *Structure-from-Motion* (SfM) y a la integración de sensores LiDAR, es posible generar ortomosaicos georreferenciados con precisión centimétrica, modelos digitales de elevación (DEMs) y nubes de puntos tridimensionales de gran densidad (Tovar-Sánchez *et al.*, 2021). Por otra parte, la sinergia entre datos hiperespectrales de drones y las imágenes multiespectrales del satélite Sentinel-2 permite abordar estudios a escalas complementarias.

Este trabajo sintetiza los principales resultados obtenidos a lo largo de varias campañas antárticas españolas (2021-2025) en las islas Shetland del Sur (Figura 1). Se presentan tres líneas de investigación complementarias: la creación de repositorios topográficos de referencia, la estimación poblacional de pingüinos barbijo mediante aprendizaje profundo y la cartografía de floraciones de algas rojas de nieve mediante teledetección multiescalar.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Zona de estudio

El área de trabajo comprende las islas Decepción y Livingston, pertenecientes al archipiélago de las Shetland del Sur. Decepción (Smith *et al.*, 2003), emplazada entre 62°53' - 63°01'S y 60°29' - 60°45'W, representa el centro volcánico con mayor actividad de toda la región. En su interior se encuentra la bahía de Port Foster, una caldera inundada de 8 a 10 km de diámetro que se comunica con el océano abierto mediante el estrecho conocido como fuelles de Neptuno. El paisaje insular refleja la interacción entre procesos volcánicos y glaciares, con aproximadamente un 57 % del territorio ocupado por masas de hielo y materiales piroclásticos. La zona interna de la caldera concentra la actividad geotermal más intensa, registrándose temperaturas del suelo superiores a 110 °C en determinados puntos (ej. fumarolas). Junto a estas

singularidades geológicas, la isla sustenta comunidades de briófitas termófilas y dos colonias relevantes de pingüino barbijo en Collado Vapor y Morro Baily (Belyaev *et al.*, 2024).

Por su parte, Livingston (62°27' - 62°48'S, 59°45' - 61°15'W) constituye la segunda isla en extensión del archipiélago y exhibe una notable riqueza biológica, particularmente en las superficies libres de hielo estacional. La Península Hurd, donde se ubica la Base Antártica Española Juan Carlos I, destaca por su heterogeneidad tanto geológica como ecológica, con presencia de agrupaciones de pingüinos y una cobertura vegetal diversificada.

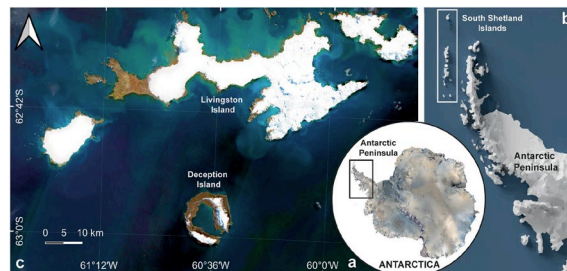


Figura 1. Mapa que muestra las ubicaciones de: (a) la Península Antártica en una vista general, (b) las Islas Shetland del Sur en la Península Antártica; y (c) escena Sentinel 2A de las islas Decepción y Livingston el 17 de marzo de 2023.

2.2. Drones y sensores

Para los diferentes estudios se emplearon plataformas aéreas no tripuladas: El cuadricóptero DJI Matrice 300 RTK equipado con sensores ópticos RGB (Zenmuse P1), multiespectrales (MicaSense RedEdge-MX), LiDAR (Zenmuse L1 y L2); el DJI Mavic 2 Enterprise Advanced con sensor RGB de 48 MP; y el hexacóptero DJI Matrice 600 Pro con sensor hiperespectral (Headwall Photonics VNIR-SWIR). La georreferenciación se realizó mediante tecnología RTK y Post-Processing Kinematic (PPK), alcanzando precisiones centimétricas sin necesidad de puntos de control terrestre. Los productos fotogramétricos se generaron con los softwares *Pix4D Mapper* y *DJI Terra*, mientras que el procesado hiperespectral se realizó con *SpectralView* y *ENVI*.

A escala satelital, se utilizaron imágenes Sentinel-2 Level 2A con resolución de 10 m, procesadas a través de *Google Earth Engine*. La detección de floraciones de algas rojas combinó una biblioteca espectral derivada de los datos hiperespectrales del dron con algoritmos de clasificación supervisada (*Spectral Angle Mapper* y *Support Vector Machine*) aplicados a las imágenes multiespectrales. Para el censo de pingüinos, se empleó la arquitectura de detección de objetos YOLOv8, entrenada con un conjunto de 349 imágenes anotadas a partir de los ortomosaicos de UAV, diferenciando individuos adultos y polluelos.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1. Repositorios fotogramétricos y LiDAR

Los conjuntos de datos generados comprenden dos repositorios públicos de referencia. El primero,

ShetlandsUAVmetry (Román *et al.*, 2024), recopila los productos fotogramétricos de 28 vuelos de UAV realizados durante la campaña 2021-2022, con un total de 15.691 capturas ópticas de alta resolución en las islas Decepción y Livingston (Figura 2), constituyendo el primer repositorio fotogramétrico basado en UAV de acceso abierto para un área antártica.

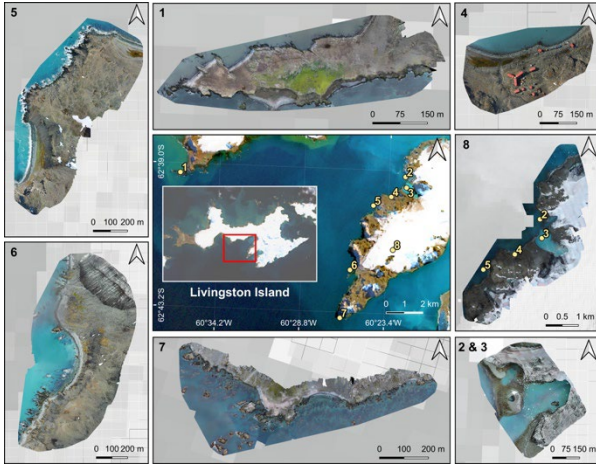


Figura 2. Resumen de los ortomosaicos ópticos RGB generados tras el proceso fotogramétrico para cada zona de estudio en la Isla Livingston (panel central, escena S2A de la Isla Livingston del 17/03/2023). 1) Punta Hannah, 2) Cresta Charrúa, 3) Johnsons Dock, 4) BAE Juan Carlos I, 5) Caleta Argentina, 6) Sally Rocks, 7) Miers Bluff y 8) Península Hurd.

El segundo repositorio, *FosterCoast* (Román *et al.*, 2025a), recoge los datos LiDAR y fotogramétricos de 13 vuelos que cubren íntegramente el anillo interior de la bahía de Port Foster (~35 km), realizado durante la campaña 2024-2025 (Figura 3). Este conjunto incorpora 5.631 capturas RGB con posicionamiento PPK, ortomosaicos con resolución media de 4,7 cm/px, DEMs y nubes de puntos con densidad de 20 cm. La validación frente al modelo de referencia REMA arrojó un RMSE de 1,124 m y un R^2 de 0,99, confirmando la idoneidad del conjunto de datos para aplicaciones geomorfológicas, glaciológicas y de seguridad en la navegación.

3.2. Censo de pingüino barbijo mediante aprendizaje profundo

El modelo YOLOv8 aplicado en la colonia de Collado Vapor (Isla Decepción, Figura 4) detectó 12.097 ± 1.573 individuos adultos y 12.357 ± 3.090 polluelos, con errores totales del ~13 % y ~25 % respectivamente (Belyaev *et al.*, 2024). Dado que el vuelo se realizó en enero de 2022 —fuera del pico de puesta—, se aplicó un modelo estocástico de corrección fenológica basado en fechas de inicio de puesta, obteniéndose una estimación de entre 13.250 y 22.000 parejas reproductoras durante la temporada 2021-2022, cifra coherente con censos previos. Adicionalmente, la modelización de escorrentías superficiales a partir del DEM permitió identificar cinco rutas principales de descarga de guano al medio marino, proporcionando información para el establecimiento de estaciones de muestreo biogeoquímico costero.

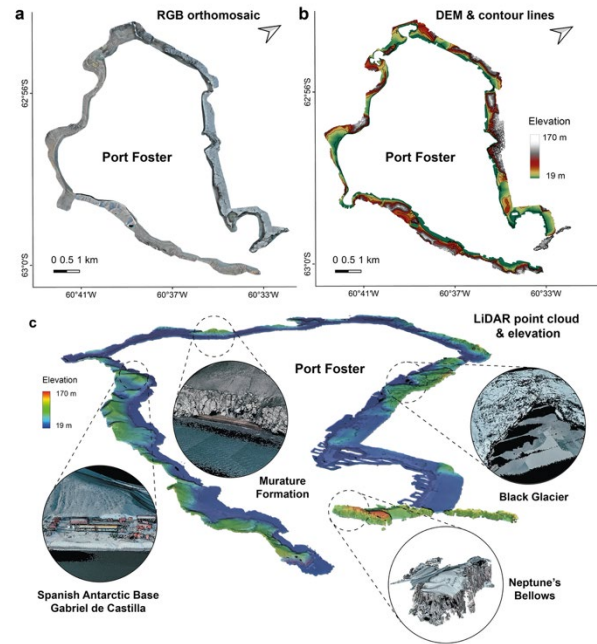


Figura 3. Mapas del anillo interior completo de Port Foster en Isla Decepción: (a) ortomosaico RGB; (b) DEM y curvas de nivel; (c) nube de puntos LiDAR con elevaciones superpuestas.

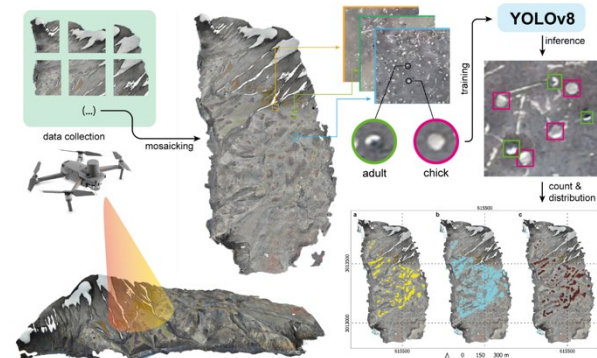


Figura 4. Descripción esquemática del censo de pingüinos mediante la combinación de UAV y aprendizaje profundo. a) Recopilación de los datos fotográficos con el UAV y generación del ortomosaico. b) Selección de áreas representativas dentro de la colonia para crear un conjunto de datos de entrenamiento, incluyendo adultos y polluelos de pingüino barbijo sobre distintos tipos de sustrato para añadir variabilidad. c) Despliegado de modelo sobre la totalidad del ortomosaico de la colonia, obteniéndose el recuento y la distribución espacial de cada individuo.

3.3. Floraciones de algas rojas de nieve

El análisis de 45 escenas Sentinel-2 libres de nubes entre 2018 y 2024 reveló que las floraciones de algas rojas pueden cubrir hasta el 12% de la superficie total de una isla individual del archipiélago durante la temporada de crecimiento, equivalente a unos 176 km² (Román *et al.*, 2025b). La comunidad microalgal, dominada por *Sanguina nivaloides* (61%) y la diatomea *Nitzschia amplexans* (26%), reduce el albedo de la nieve hasta un 20 %, acelerando la fusión de campos de nieve costeros

(Figura 5). La distribución espacial de estas floraciones forma un patrón anular en torno a las costas insulares (Figura 6), posiblemente vinculado al aporte de nutrientes procedentes de colonias de pingüinos y mamíferos marinos. Estos resultados subrayan la relevancia de las algas de nieve como productores primarios fotoautotróficos extensivos en la Antártida y su papel en los mecanismos de retroalimentación climática.

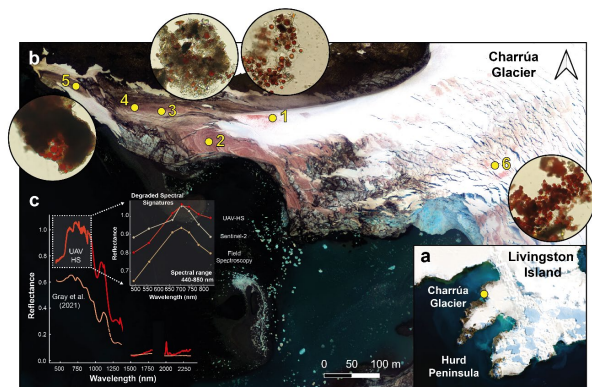


Figura 5. a) Mapa del Glaciar Charrúa en la Península Hurd, Isla Livingston, basado en una imagen Sentinel-2A del 17/03/2023. b) Ortomosaico RGB obtenido con dron en el Glaciar Charrúa el 6/03/2022, con puntos amarillos numerados que señalan las localizaciones de muestreo. c) Firma espectral media de la floración de algas rojas de nieve obtenida a partir de imágenes hiperespectrales de dron (línea rojo oscuro) y espectros de campo recogidos por Gray et al. (2021) (línea rojo claro).

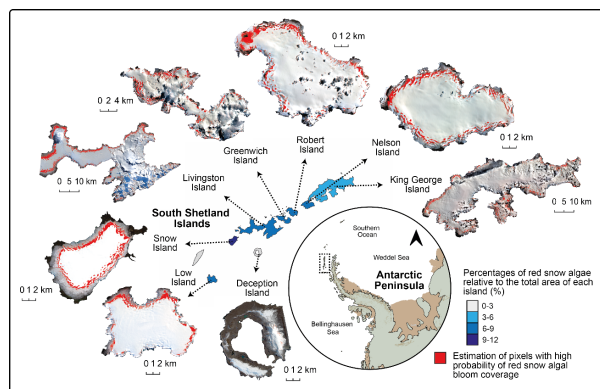


Figura 6. Extensión representativa de las floraciones de algas rojas de nieve con una superposición de clasificación supervisada en las Islas Shetland del Sur, mostrando una escena libre de nubes para cada isla correspondiente al periodo de máximo crecimiento dentro del periodo de estudio. Los porcentajes de cobertura de floraciones algales respecto a la superficie total de cada isla se presentan en el mapa central

4. CONCLUSIONES

Los resultados presentados demuestran que la combinación de plataformas UAV con teledetección satelital constituye un enfoque robusto y escalable para la investigación medioambiental antártica. Los repositorios fotogramétricos y LiDAR de acceso abierto generados representan recursos de referencia para la

comunidad polar internacional, mientras que las aplicaciones de aprendizaje profundo y clasificación supervisada abren nuevas posibilidades para el seguimiento automatizado de fauna y fenómenos biogeoquímicos en ecosistemas remotos. La continuidad de estas series temporales resultará esencial para evaluar la evolución de los ecosistemas antárticos bajo los distintos escenarios de cambio climático.

5. AGRADECIMIENTOS

Esta investigación fue financiada por los proyectos RTI2018-098048B-100 (PiMetAn) y PID2021-1257830B-100 (DICHOSO) de la AEI, PIE 202530E177 (TAMIMAR) y MMT24-ICMAN-01 (DIGIDRON). A. Román, personal contratado bajo la iniciativa Generación D, promovida por Red.es, organismo adscrito al MTDFP, destinada a la atracción y retención de talento mediante becas y contratos de formación, financiada por el PRTR a través de los fondos *Next Generation* de la UE.

6. REFERENCIAS

- Belyaev, O., Román, A., Belliure, J., Navarro, G., Barbero, L., y Tovar-Sánchez, A. (2024). Assessing topographic features and population abundance in an Antarctic penguin colony through UAV-based deep-learning models. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 134, 104124. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2024.104124>
- Meredith, M. et al. (2019). Polar regions. IPCC Special Report on the Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/chapter-3-2/>
- Pina, P. y Vieira, G. (2022). UAVs for Science in Antarctica. *Remote Sensing*, 14, 1610. <https://doi.org/10.3390/rs14071610>
- Román, A., Tovar-Sánchez, A., Olivé-Abelló, A., y Navarro, G. (2024). ShetlandsUAVmetry: unmanned aerial vehicle-based photogrammetric dataset for Antarctic environmental research. *Scientific Data*, 11, 202. <https://doi.org/10.1038/s41597-024-03045-1>
- Román, A., Tovar-Sánchez, A., Larrad, M., Alva, F., y Navarro, G. (2025a). LiDAR-based topographic data for the coastline of Port Foster (Deception Island, Antarctica). *Scientific Data*, 12, 1363. <https://doi.org/10.1038/s41597-025-05726-x>
- Román, A., Navarro, G., Barbero, L., Fernández-Marín, B., García-Plazaola, J. I., González-Ortegón, E., Caballero, I., y Tovar-Sánchez, A. (2025b). Unveiling the large coverage of red snow algae blooms in Antarctic coastal snowfields. *Communications Earth & Environment*, 7, 53. <https://doi.org/10.1038/s43247-025-03156-6>
- Smith, K., Baldwin, R., Kaufmann, R., y Sturz, A. (2003). Ecosystem Studies at Deception Island, Antarctica: An Overview. *Deep-Sea Research II*, 50, 1595-1609. [https://doi.org/10.1016/S0967-0645\(03\)00081-X](https://doi.org/10.1016/S0967-0645(03)00081-X)
- Tovar-Sánchez, A., Román, A., Roque-Atienza, D., y Navarro, G. (2021). Applications of unmanned aerial vehicles in Antarctic environmental research. *Scientific Reports*, 11, 21717. <https://doi.org/10.1038/s41598-021-01228-z>