



USACH



Brotos Científicos

REVISTA DE INVESTIGACIONES ESCOLARES

Artículo de Investigación
Research Article

ISSN 0719-8558

Vol. 7

Pag. 14-24 (2025)

Ciencias Naturales

Técnicas de Percepción Remota Cualitativa y Cuantitativa para Identificar Microalgas y sus Principales Causas de Crecimiento en las Islas Shetland del Sur



Estudiantes

Diego Illanes Gazmuri, III^oC
José Quijarro Ampuero, III^oC

*QUALITATIVE AND QUANTITATIVE REMOTE SENSING
TECHNIQUES TO IDENTIFY MICROALGAE AND THEIR
MAIN CAUSES OF GROWTH IN THE SOUTH
SHETLAND ISLANDS*

Profesor guía

Rodrigo Azócar Donoso
Colegio Capellán
Pascal, Viña del mar, V Región

- Artículo Recibido: 3 de diciembre, 2021
- Artículo Aceptado: 31 de diciembre, 2021
- Artículo Publicado: 20 de agosto, 2022

El Proyecto participó en

- * XIX FERIA ANTÁRTICA ESCOLAR 2022
- * Ganador mejor puntuación jurado ciudadano



Resumen

En este trabajo presentamos las estimaciones de vegetación presentes en las Islas Shetland del Sur a partir de teledetección. Utilizando la combinación de bandas proporcionadas por el satélite Sentinel-2, formulamos un índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), que es un indicador numérico altamente asociado al contenido de vegetación. Sus valores más altos corresponden a zonas que reflejan más el espectro del infrarrojo cercano, ya que una mayor reflectancia en esta banda indica mayor cobertura vegetal.

La biomasa de algas en la nieve provoca una reducción del albedo en comparación con la nieve limpia. Las manchas verdes visibles reducen el albedo de la nieve en aproximadamente un 40 %, mientras que las manchas rojas lo disminuyen en un 20 %, dado que los pigmentos de las algas no solo actúan como protectores, sino que también desempeñan un papel funcional en la fusión de la nieve y el hielo (Khan et al., 2021).

Con base en estos resultados de teledetección, pretendemos identificar aquellos lugares con mayor NDVI para analizar las principales causas del crecimiento y la floración de microalgas.

→ Palabras claves

Teledetección, NDVI, Islas Shetland del Sur, Microalgas, Albedo, Biomasa de algas, Sentinel-2.

Abstract

In this study, we present vegetation estimates for the South Shetland Islands based on remote sensing. Using the combination of bands provided by the Sentinel-2 satellite, we calculated a Normalised Difference Vegetation Index (NDVI), which is a numerical indicator strongly associated with vegetation content. Higher NDVI values correspond to areas that reflect more in the near-infrared spectrum, as greater reflectance in this band indicates higher vegetation cover.

Algal biomass on snow results in a reduction in albedo compared to clean snow. Visible green patches reduce snow albedo by approximately 40 %. In comparison, red patches reduce it by 20 %, since algal pigments not only act as protective compounds but also play a functional role in snow and ice melt (Khan et al., 2021).

Based on these remote sensing results, we aim to identify areas with higher NDVI values to analyse the main drivers of microalgae growth and bloom.

→ Keywords

Remote sensing, NDVI, South Shetland Islands, Microalgae, Albedo, Algal biomass.

Introducción

El aumento en la temperatura atmosférica y del Océano Antártico ha generado el retroceso de los glaciares en la Península Antártica, lo que ha provocado un incremento en la tasa de deshielo y junto a ello, el desmembramiento de los glaciares (Jeremy., 2021). En la región de las islas Shetland del Sur comenzamos a visibilizar un aumento en la floración de diferentes tipos de algas de nieve (Ganey et al., 2017; Lutz et al., 2016; Khan et al., 2021), las que producen en la nieve, hielos y glaciares una reducción de albedo general de la isla. El albedo es definido como la medida de la cantidad de radiación saliente de onda larga, reflejada del total de la radiación solar de onda corta entrante en una superficie (Steinmetz., 2018), es decir, el albedo es la proporción de radiación reflejada en la superficie por diferentes cuerpos. La nieve fresca y limpia tiene un albedo muy alto, de 0.8-0.9 (en escala de 0 a 1), en consecuencia, un albedo más bajo significa que se absorbe más radiación solar. Esta energía absorbida, calienta la nieve/hielo y conduce a un mayor derretimiento.

Por lo tanto, se produce un aumento de microalgas en la superficie. En recientes estudios se ha mencionado el “bioalbedo” como el impacto directo del material biológico en el albedo de la nieve y el hielo, siguiendo una abreviatura del término “albedo biológico” presentada por Kohshima et al. (1993).

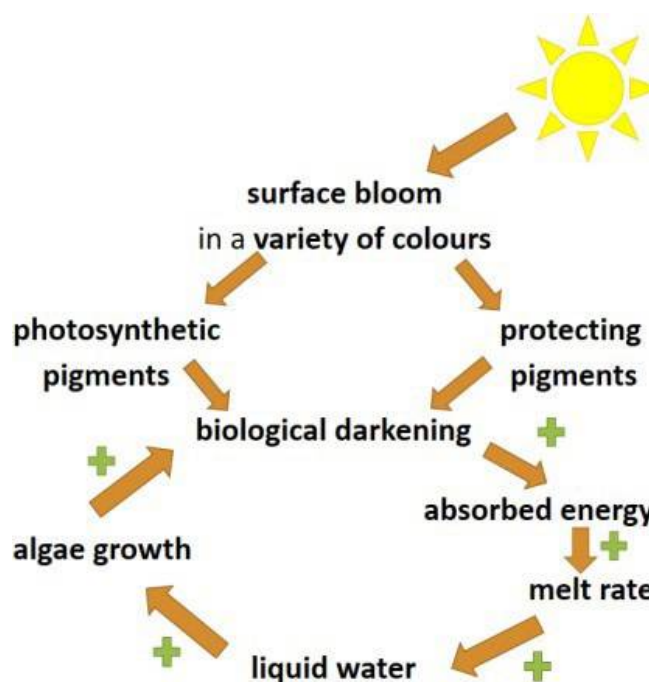


Figura 1 | Esquema del ciclo vital del bioalbedo de las algas, que ilustra el proceso de crecimiento proporcional de las algas con respecto al derretimiento de la nieve. Fuente | Steinmetz., 2018

El bioalbedo es un componente importante del balance energético de los glaciares y las capas de hielo. Este corresponde al impacto de impurezas biológicas en el albedo de la nieve y el hielo, además de que conduce a la reducción del albedo por medio de diferentes efectos de variables biológicas como la biomasa, la pigmentación y el tamaño de las células en el albedo de la superficie. Estudios anteriores han podido confirmar que las impurezas biológicas son componentes potencialmente significativos del albedo de la superficie, y se descubrió que las propiedades ópticas de las células son determinantes de la magnitud de su efecto de reducción del albedo (Cook et al., 2017).

Las algas de la nieve son favorecidas por las zonas de descongelación, ya que el deshielo proporciona entornos adecuados para el crecimiento, absorben la luz reduciendo así el albedo y agravando a su vez el deshielo.

El color que las algas le dan a la nieve está asociado a los pigmentos dominantes relacionados con la fase del ciclo vital. En relación con la nieve limpia, las manchas verdes de las algas visibles reducen el albedo de la nieve en un 40% y las manchas rojas en un 20% (Khan et al., 2021). Los diferentes pigmentos que producen las algas de nieve tienen un rol funcional en el derretimiento de la nieve y hielo, ya que facilitan tanto la capacitación del luz en el espectro visible como la disipación de energía en condiciones de irradiación excesiva (Cook et al., 2017; Remias et al., 2009; Remias et al., 2012; Yallop et al., 2012) además de que poseen grandes características de absorción, se descubrió que este tipo de pigmentos oscurecen los pigmentos primarios de capacitación de luz y de protección, y disminuye el albedo de la superficie de la capa de hielo. De toda la energía radiante que nos llega procedente del sol, aproximadamente el 30% es reflejado al espacio por el albedo, el 50% es absorbido en la superficie y el 20% restante es absorbido por la atmósfera (Santamaría J., 2010).

Las algas nivreas además de acelerar el deshielo a través de perturbaciones en el albedo de la nieve, logran el derretimiento mediante su Forzamiento Radiativo (RF) asociado. Este alude a la forma de cuantificar un desequilibrio energético impuesto al sistema climático. La mayor absorción de la irradiación solar se debe principalmente al oscurecimiento de la cobertura de nieve. Cuando las algas se encuentran en la superficie de la nieve o cerca de ella, estas reducen inmediatamente el albedo en las longitudes de onda visibles en las que la nieve es más reflectante, como se puede observar en la Fig.2. La disminución del albedo se ve agravada por un proceso conocido como retroalimentación del

tamaño del grano. Esta se describe como el calentamiento relacionado con las Partículas que Absorben Luz (LAP) las que aceleran el crecimiento de los granos de nieve disminuyendo aún más la reflectividad. Las LAPs comúnmente se componen de polvo, carbón negro, pero también de algas de nieve, y ahí se encuentra la relación que existe entre estas 2 (Skiles et al., 2018).

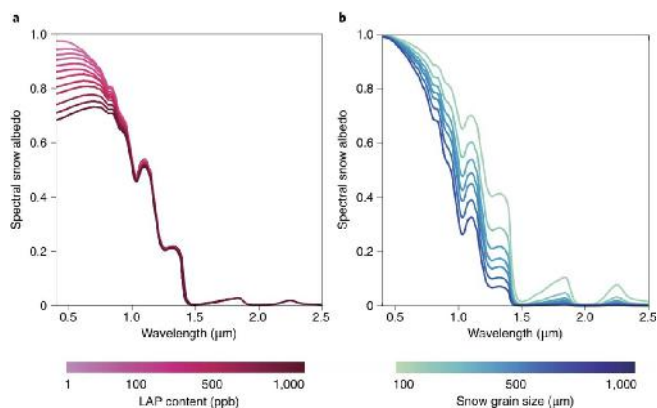


Figura 2 | Variación del albedo en la nieve en rango de reflectancia (expresadas en micrómetros (μm)) de la nieve con respecto al contenido de LAP y el tamaño del grano de la nieve. En a. el Albedo de la nieve, que muestra la disminución del albedo visible a medida que aumenta el contenido de Partículas que Absorben Luz (LAP) por partes por billón (ppb). En tanto que en b. el albedo de la nieve limpia, que muestra la disminución del albedo de la nieve en las longitudes de onda más largas a medida que aumenta el tamaño del grano de la nieve.

Fuente | Skiles et al., 2018

En conjunto, ésta RF directa (oscurecimiento) e indirecta (engrosamiento de los granos) relacionada con LAP, descubre antes la cobertura de nieve más oscura, aumentando la energía disponible para el deshielo (Skiles et al., 2018). Los distintos tipos de coberturas terrestres se distinguen por la energía que absorben, reflejan y emiten respecto de un emisor de energía electromagnética (en nuestro caso el Sol). Este comportamiento a diferentes longitudes de onda se conoce como firma espectral (Alonso et al., 1999). Cada objeto sobre la superficie terrestre tiene diferentes interacciones con la luz (energía electromagnética) debido a sus composiciones físicas y bioquímicas, por lo que cada cuerpo tendrá su propia firma espectral y podrán diferenciarse en cuanto su interacción con la luz sea diferente. En la Fig. 3 podemos observar que incluso las diferentes propiedades físicas de la nieve (grano fino, medio o grueso) producen algunas variaciones en sus firmas. En tanto que en la Fig. 4 podemos ver que diferentes cuerpos tienen diferentes propiedades de reflectancia, como el agua que absorbe la totalidad de la energía en las regiones del Infrarrojo cercano (NIR) en adelante.

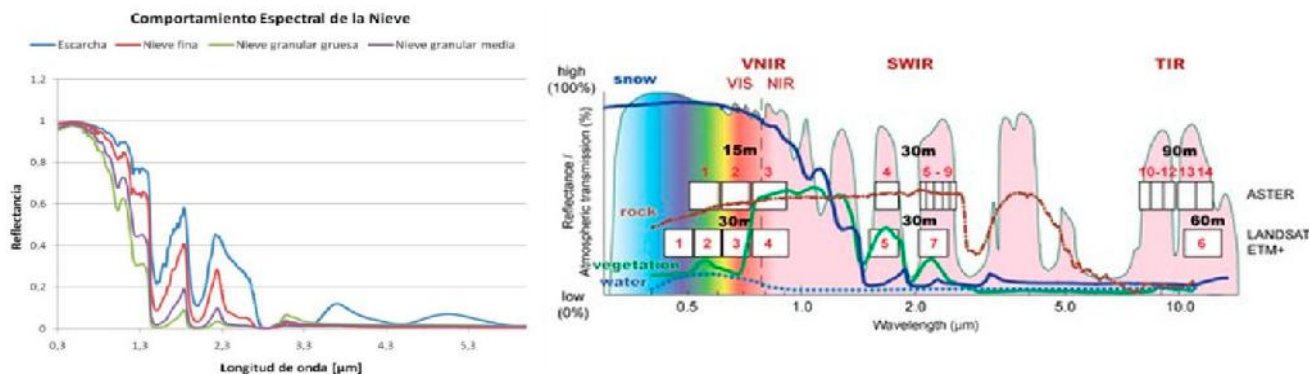


Figura 3 | Firma espectral de distintas coberturas de nieve. En eje x diferentes regiones del espectro magnético, y en eje y porcentaje de reflectancia (cantidad de energía devuelta).
Fuente | Cruz., 2020 como se citó en Hernández, 2007.

El objetivo de esta investigación es poder determinar a través de imágenes satelitales Sentinel-2, cómo la disminución de la nieve (debido a múltiples factores) ha producido el aumento de aparición de algas en la superficie. Las algas de nieve influyen en el albedo espectral de la nieve en el espectro visible, 400-700 nm (Warren y Wiscombe, 1980 como se citó en Khan A., et al 2021). El albedo espectral depende además de las propiedades físicas de la nieve, como dicho anteriormente el tamaño y la forma de este, el contenido de agua líquida, la rugosidad de la superficie, la profundidad de la nieve, el albedo del suelo subyacente (en el caso de paquetes de nieve finos) y la densidad de la nieve (Flanner et al., 2007 como se citó en Khan A., et al 2021).

Nuestra área de estudio son las islas Shetland del Sur (Fig. 5) las cuales son un conjunto de islas que están en la parte norte de la península antártica, por lo que están mayormente influenciadas por los cambios atmosféricos.

Debido a la naturaleza remota e inaccesible de las costas de la península antártica, hacen que poder extraer muestras del terreno antártico o utilizar métodos de prospección en la nieve se dificulte. Por lo tanto, los métodos de teledetección por satélite que brindan imágenes de la cobertura regional son el único medio práctico para analizar la distribución de microalgas. La teledetección consiste en observar la reflectancia de las distintas ondas de luz que producen ciertos objetos en la superficie de la tierra. Los distintos tipos de satélites artificiales que existen y que orbitan alrededor de la tierra, se caracterizan por tener funciones específicas que varían según su tipo, éstos pueden ser con fines astronómicos, de navegación o de comunicaciones entre otros tipos, pero aquellos que sirven para analizar los cambios que sufre la tierra, son los satélites meteorológicos, estos nos sirven para observar constantemente el clima, además de poder dar detalles de la atmósfera y de la cartografía del planeta. Entre estos tipos de satélite, sobresalen dos, la serie norteamericana Landsat y el europeo Sentinel-2, los cuales pertenecen a la NASA y ESA respectivamente.

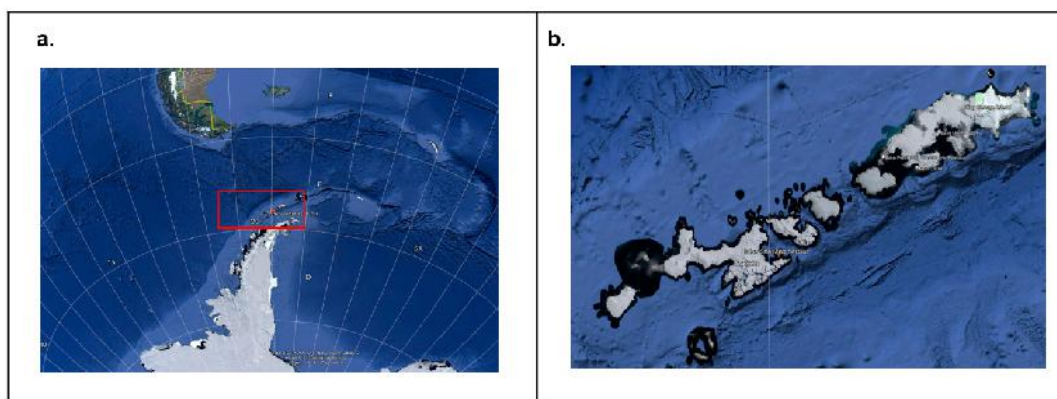


Figura 5 | Mapa de localización de Google Earth Pro. En a. la Antártica y parte del Sur de Chile con cuadro rojo del área de las Islas Shetland del Sur. En tanto que en b. un zoom a nuestra área de interés (cuadro rojo en a).

Para esta investigación, los satélites meteorológicos son de mayor utilidad ya que nos permiten analizar diferentes imágenes satelitales de varios lugares en toda la tierra, incluyendo el casquete polar y el continente antártico. Los datos de Sentinel-2 nos permiten observar con un detalle (resolución espacial) de 10x10 metros (en espectro visible e infrarrojo cercano) desde el año 2015 en adelante. A diferencia de las imágenes Landsat que, si bien hay disponibilidad desde el año 1986 en su catálogo mundial, el nivel de detalle es menor (30x30 metros).

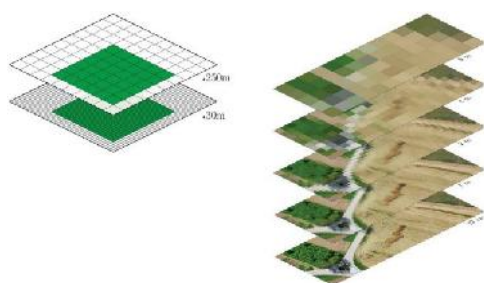


Figura 6 | Comparación entre distintos niveles de detalle espacial (resolución espacial o tamaño del píxel) sobre una misma área. Imagen de Martin Wegman (2016) en Remote Sensing and GIS for Ecologist.

El satélite Sentinel-2 posee trece bandas (Tabla 1) que van desde la luz visible hasta el infrarrojo de onda corta (SWIR), estas pueden captar los tipos de luz que reflejan distintos objetos. Estas bandas varían en una resolución que va desde los 10m hasta los 60m, y según lo que se vaya necesitando en las imágenes, es aquella banda que se va a ir ocupando.

Pregunta de investigación o problema que desean resolver

¿Cómo influye el efecto bioalbedo en el aumento de microalgas en los últimos años en las Islas Shetland del Sur?

Hipótesis de trabajo

El aumento de las temperaturas y derretimiento de nieve ha desencadenado en mejorar las condiciones para el desarrollo de las algas en tierra y nieve, por lo que la cobertura de estas aumentaría con el tiempo, aumentando así el bioalbedo en la superficie antártica.

Objetivo general

Analizar imágenes Sentinel-2 de manera cualitativa y cuantitativa para determinar si la superficie de algas ha aumentado en el tiempo en las Islas Shetland del Sur.

Objetivos específicos

- Obtener imágenes satelitales de Sentinel-2 desde el portal de la USGSS (EarthExplorer).
- Calcular el Índice de Diferencia Normalizada de Vegetación (NDVI) para la detección de algas en superficie.
- Comparar la cantidad de píxeles de imágenes satelitales de distintos años de la isla Rey Jorge.
- Contribuir con datos duros a la demostración del cambio climático y la importancia de mantener estables los ecosistemas antárticos

N°	Bandas	Ancho de banda (µm)	Resolución espacial (m)
1	Aerosol	0.43 – 0.45	60
2	Blue	0.45 – 0.52	10
3	Green	0.54 – 0.57	10
4	Red	0.65 – 0.68	10
5	Red edge 1	0.69 – 0.71	20
6	Red edge 2	0.73 – 0.74	20
7	Red edge 3	0.77 – 0.79	20
8	Near Infrared 1 (NIR 1)	0.78 – 0.90	10
8A	Near Infrared 2 (NIR 2)	0.85 – 0.87	20
9	Water vapour	0.93 – 0.95	60
10	Cirrus	1.36 – 1.39	60
11	Short wave Infrared 1 (Swir 1)	1.56 – 1.65	20
12	Short wave Infrared 2 (Swir 2)	2.10 – 2.28	20

- Exponer a la ciudadanía la importancia del hielo antártico y las consecuencias de su derretimiento con el aumento de las temperaturas globales.
- Fortalecer la conciencia e identidad antártica nacional, a través de la investigación científica escolar en nuestro establecimiento educacional.

Metodología

La descarga de imágenes se realizó desde la web del EarthExplorer (earthexplorer.usgs.gov/), que pertenece al Servicio Geológico de los Estados Unidos. Se seleccionaron imágenes de la isla Rey Jorge, de las fechas 29/12/2021 y del 20/11/2019. En ese sitio web se pueden obtener imágenes de distintos satélites y a su misma vez de diferentes años. Un punto importante, es que es necesario crearse una cuenta para poder descargar una imagen junto a sus bandas correspondientes.

Para descargar alguna imagen, se tiene que seleccionar un rango de fechas que se quiera analizar, después de eso, se tiene que limitar un bajo porcentaje de nubosidad que puede haber en una foto, posterior a esto, se tiene que seleccionar el satélite del cual se quiera la imagen. Habiendo seleccionado los parámetros que se requieren, se debe seleccionar entre alguna que favorezca el lugar que se desee analizar. Una vez descargada la imagen junto a sus bandas, se tiene que descargar y abrir el software de procesamiento GIS llamado "QGIS" que es gratis y abierto a todo público. Luego, para nuestro análisis cualitativo, utilizamos una de las técnicas más sencillas de la percepción remota que es la combinación de bandas. Para ello tuvimos que crear un raster virtual con las bandas del espectro visible (Blue-Green-Red) y el infrarrojo cercano (NIR) para poder realizar realces sobre la vegetación que permitan discriminar visualmente de mejor manera. Debido a que las propiedades reflectivas de las colonias de microalgas hacen que su mayor porcentaje de reflectancia lo tengan en el NIR, pusimos dicha banda en el canal verde, la banda roja en el canal rojo, y la

banda azul en el canal azul, para que la vegetación con mayor biomasa verde se vea de color verde intenso como se muestra en la Fig. 7 en el caso de la zona central de Chile.

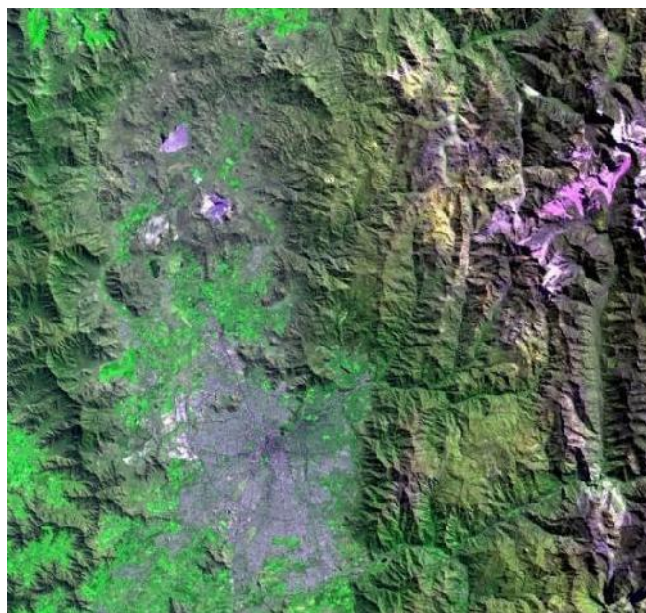


Figura. 7 | Combinación de bandas en falso color R-NIR-B en canales RGB. Esta combinación permite realzar las grandes concentraciones de biomasa verde en verde intenso debido a que la vegetación refleja más en el infrarrojo cercano. Adicionalmente la nieve adquiere tonalidades rosas. Elaboración propia.

Luego, para detectar con mayor precisión las algas, calculamos el Índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI) a través de la calculadora ráster Fig. 8 de acuerdo con la siguiente fórmula (Fórmula 1):

$$NDVI = \frac{\rho NIR - \rho RED}{\rho NIR + \rho RED}$$

Formula 1 | Índice de diferencia normalizada de vegetación (NDVI).



Figura. 8 | Ejemplo de cálculo de NDVI utilizado la calculadora ráster del software QGIS

El índice NDVI ocupa las bandas 4 (Red) y 8 (NIR). Después de que finalice, se mostrará una imagen en escala de grises con valores que pueden ir de -1 a 1 (ya que es normalizado) en el que los valores positivos sobre 0.2 de NDVI corresponden a vegetación.

Para cambiarle los colores se debe apretar la capa que se creó, abrir la simbología, ahí las bandas que aparecen en la izquierda (Fig 9) en donde se debe seleccionar en la parte superior “tipo de redendizador” y seleccionar el que dice “pseudocolor monobanda” después, se debe seleccionar la “interpolación”, se pasa de “lineal” a “discreto”, luego se eliminan todos los valores intermedios que aparecen en la parte inferior. Después de esto, deberán quedar dos valores, el menor y el mayor de la imagen. El que está arriba es el menor y se debe cambiar su valor a 0.2 para que los píxeles que tengan un índice mayor a este reflejen los colores que se elijan. Posterior a esto, se cambiará la opacidad del valor mínimo, bajándole lo máximo posible. Una vez hecho esto se mostrará una imagen con el color resaltado que se eligió.

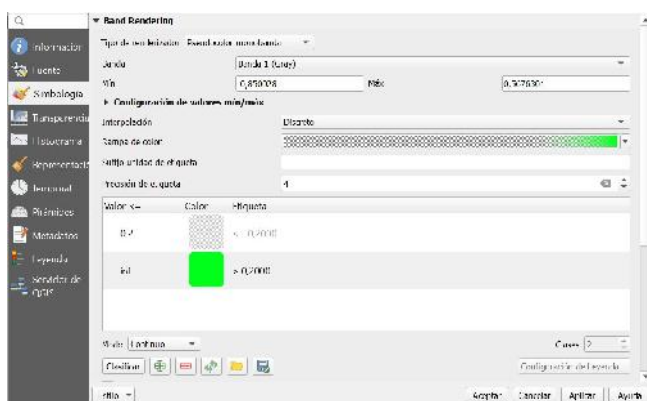


Figura 9 | Ejemplo de cómo se debería mostrar la simbología una vez estén hechos todos los arreglos.

Al tener la imagen satelital procesada, con la capa virtual y el índice (NDVI), se puede calcular la cantidad de píxeles que están coloreados con el índice mayor a 0.2, para hacer esto, se necesita ir a la caja herramientas y buscar la opción de “reclasificar por tabla”, donde se elegirá la capa de índice.

Una vez elegida la opción, se creará una tabla donde se añadirán 2 filas, la primera tendrá un valor mínimo de -1 y un valor máximo de 0.2 y a esos píxeles se les dará un valor de 0. En la segunda fila, el valor mínimo que se le asignará será de 0.2 y el máximo de 1, a estos se les dará un valor de píxel

1. Esto se hace para poder organizar los píxeles según los valores que reflejan en el índice, de manera que se

dividen entre aquellos que tengan un valor que puede tener microalgas, y aquellos que no pueden tener o tienen una baja probabilidad. Una vez terminada la tabla, se deberá seleccionar el botón de ejecutar, y se le dará automáticamente el nombre de “Ráster reclasificado”. Habiendo reclasificado los píxeles, junto con agregar su capa, se deberá abrir la función de “SCP Plugin” en donde se selecciona “postprocesamiento”, luego se selecciona “reporte de clasificación” y en la opción que da a elegir la capa a la cual se le quiera aplicar el reporte, se elegirá la que se creó recién. De esta forma, se calculará una tabla con la cantidad de píxeles que están con un valor de 0 y a su misma vez, la cantidad de píxeles que reflejan un valor de 1. Además, esta tabla también calculará la cantidad de porcentaje de cada valor asignado con respecto al total de la imagen, así como la cantidad de metros cuadrados que los píxeles cubren con sus respectivos valores. (tablas comparativas).

Resultados

Es de conocimiento público que la Antártica es una zona que se ha mantenido desierta durante mucho tiempo, lo que genera que su flora y fauna sean todavía desconocidas para el ser humano. A su vez, el deshielo de las acumulaciones masivas de nieve y hielo han tenido un gran impacto en los procesos físicos y biológicos en los entornos cercanos a las costas de la península antártica. Esto ha dado paso tanto a un aumento de colonias de diferentes variedades de microorganismos, como a un aumento en la floración de microalgas sobre la nieve, coloreando si está de rojo o verde, dependiendo de la composición de los pigmentos que éstas tengan. Es a través de estos distintos efectos, que uno puede dar cuenta de las dimensiones y el impacto que se están produciendo en el ecosistema antártico. El hecho de que haya un crecimiento progresivo de microalgas en las costas del continente blanco es preocupante, de modo que se tiene que hacer un llamado a la ciudadanía, para informarse sobre esto y actuar en pos de lograr un reconocimiento de los problemas que están sucediendo en la Antártica.

Es por esto que la metodología presentada puede ser ocupada para poder visualizar los cambios y variaciones que han tenido las colonias de microalgas presentes en las costas de las islas Shetland del Sur. Esto teniendo en cuenta que las imágenes deben ser tomadas en un mismo mes con una diferencia de gran cantidad de años, para poder evidenciar algún tipo de fenómeno que juegue un rol en el ecosistema, como lo podría ser el cambio climático.

Una vez detectadas las zonas con mayor índice de vegetación, esperamos encontrar en estos lugares crecimiento masivo de microalgas y luego poder determinar en campo, cuáles son las principales razones por las que se produce este crecimiento de las microalgas, deduciendo que éstas podrían ser:

- Retroceso de glaciares, dejando zonas libres de hielo y nieve.
- Formación de pozas de agua que, debido a los deshielos, propicien un ambiente ideal para el crecimiento de algas.
- Un suelo óptimo para el crecimiento de vegetación (idealmente recoger muestras de suelo para analizar pH y materia orgánica)
- Corroborar si en estos lugares hay poblaciones de animales que, a través del aporte de guano, generen nutrientes para la proliferación y crecimiento de las algas.

En la última parte de nuestra investigación, a través de un albedómetro, realizaremos mediciones de radiación solar para comparar los datos entregados por la teledetección y así poder tener un mapa de vegetación en la Isla Rey Jorge y en el mismo, indicar cuáles son las causas de la floración y crecimiento de las microalgas que allí se encuentran.

Nuestra intención con este estudio es contribuir a visibilizar en la ciudadanía, el impacto que generan las alteraciones en el ecosistema antártico y que este, se vea reflejado en las actividades diarias de cada persona a través del cuidado del ambiente, ya que no existe la educación ambiental necesaria para poder generar un cambio en nuestro estilo de vida.

Alonso, C. V. (1999). Determinación experimental de la firma espectral de la vegetación. Una sencilla práctica de introducción a la teledetección. Teledetección. Avances y Aplicaciones. VIII Congreso Nacional de Teledetección, 429-432. <http://www.aet.org.es/congresos/viii/alb99.pdf>

British Antarctic Survey (BAS) is a component of the Natural Environment Research Council (NERC). (05 de agosto de 2021). British Antarctic Survey (BAS) is a component of the Natural Environment Research Council (NERC). <https://www.bas.ac.uk/?s=artificial+sate-llites>

Cook, J., Hodson A., Gardner A., Flanner A., Tedstone A., Williamson C., Irvine-Fynn T., Nilsson J., Bryant R. y Tranter M. Quantifying bioalbedo: a new physically based model and discussion of empirical methods for characterising biological influence on ice and snow albedo. (2017). The Cryosphere, 11(6), 2611–2632. <https://doi.org/10.5194/tc-11-2611-2017>
Cook, J. M., Hodson, A. J., Taggart, A. J., Mernild, S. H., and Tranter, M.: A predictive model for the spectral “bioalbedo” of snow. (2017) J. Geophys. Res.-Earth Surf. 122, 434–454, <https://doi.org/10.1002/2016JF003932>

Cordero R., Sepúlveda E., Feron S., Damiani A., Fernandoy F., Neshyba S., Rowe P., Asencio V., Carrasco J., Alfonso J., Llanillo P., Wachter P., Seckmeyer G., Stepanova M., Carre-ra J., (2022) Black carbon footprint of human presence in Antarctica. <https://www.nature.com/articles/s41467-022-28560-w>

Davey M., Norman L., Sterk P., Huete-Ortega M., Bunbury F., Kin Wai Loh B., Stockton S., Peck S., Convey P., Newsham K. and Smith A. (2019) Snow algae communities in Antarctica: metabolic and taxonomic composition. New Phytologist, 222, 1242-1255 <https://nph.onlinelibrary.wiley.com/doi/epdf/10.1111/nph.15701>

Donaire J. (2021), Carga Sedimentaria de los Icebergs de Bahía Fildes Antártica y su efecto sobre su tasa de derretimiento. Universidad Andrés Bello: Facultad de Ingeniería, Escuela de Ciencias de la Tierra, Viña del Mar, Chile.
Earth observatory sistem <https://eos.com/es/blog/indices-de-vegetacion/>

Fragão J., Bessa F., Otero V., Barbosa A., Sobral P., Waluda C., Guímaro H., y Xavier J. (2021) Microplastics and other anthropogenic particles in Antarctica: Using penguins as biological samplers. Science of the Total Environment. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.147698>

Fretwell P., Convey A., Fleming H., J. Peat K., Hughes A. (2021) Detecting and mapping vegetation distribution on the Antarctic Peninsula from remote sensing data. Polar Biol 34:273–281 <https://doi.org/10.1007/s00300-010-0880-2>

Ganey, G. Q., Loso, M. G., Burgess, A. B., and Dial, R. J. (2017): The role of microbes in snowmelt and radiative forcing on an Alaskan icefield, Nat. Geosci., 10., 754–759. <https://doi.org/10.1038/NGEO3027>, 2017.

Gray, A., Krolkowski, M., Fretwell, P. et al. (2020) Remote sensing reveals Antarctic green snow algae as important terrestrial carbon sink. Nat Commun 11, 2527. <https://doi.org/10.1038/s41467-020-16018-w>

Hernández Palma, J. (2007). PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES. En J. Hernández, C. De la Maza, & C. Estados, Manejo y Conservación de Recursos Forestales (pág. 803). Santiago de Chile: Editorial Universitaria.

Hodson, A. J., Nowak, A., Sabacka, M., Cook, J., Wharfe, E. S., Pearce, D. A., Convey, P., and Viera, G. (2017) Microbes influence the biogeochemical and optical properties of maritime Antarctic snow, *J. Geophys. Res.-Biogeo.*, 122, 1456–1470.

Hodson, A. (2006), Biogeochemistry of snowmelt in an Antarctic glacial ecosystem, *Water Resour. Res.*, 42, W11406, doi:10.1029/2005WR004311.

Huovinen, P., Ramírez J., Gómez I. (2018) Teledetección de algas nivales reductoras de albedo e impurezas en la Antártida Marítima. *Revista de Fotogrametría y Teledetección de la ISPRS*, 146, 507-517.

Santamaría, J. Forzamiento Radiativo y Cambios Químicos en la Atmósfera. *Rev. R. Acad. Cienc. Exact. Fis. Nat.*, 104 (1):149-173

Khan, A. L., Dierssen, H. M., Scambos, T. A., Höfer, J. & Cordero, R. R. (2021) Spectral characterization, radiative forcing and pigment content of coastal Antarctic snow algae: approaches to spectrally discriminate red and green communities and their impact on snowmelt. *Cryosphere* 15, 133–148. <https://doi.org/10.5194/tc-15-133-2021>

Lutz, S., Anesio, A. M., Edwards, A. & Benning, L. G. (2016) Linking microbial diversity and functionality of arctic glacial surface habitats. *Environ Microbiol.* 19 (2):, 551–565

Lutz, S. , Anesio, A., Raiswell, R. et al. (2016) The biogeography of red snow microbiomes and their role in melting arctic glaciers. *Nat. Commun.* 7, 11968 DOI: 10.1038/ncomms11968.

Remias, D., Holzinger A., and Lutz, C. (2009) Physiology, ultrastructure and habitat of the ice alga *Mesotaenium berggrenii* (Zygnema- phyceae, Chlorophyta) from glaciers in the European Alps, *Phycologia*, 49, 302–312.

Remias, D., Schwaiger, S., Aigner, S., Leya, T., Stuppner, H., and Lutz, C. (2012) Characterization of an UV- and VIS-absorbing, purpurogallin-derived secondary pigment new to algae and highly abundant in *Mesotaenium berggrenii* (Zygnematophyceae, Chlorophyta), an extremophyte living on glaciers, *FEMS Microbiol. Ecol.*, 79(3): 638–648, <https://doi.org/10.1111/j.1574-6941.2011.01245.x>

Scientific Committee on Antarctic Research. <https://www.scar.org/>

Soto D., Franzetti A., Gómez I., Huovinen P. (2022). La alteración funcional y los procesos aleatorios afectan al ensamblaje de las comunidades microbianas de las floraciones de algas de nieve en la Antártida Marítima. *Science of the Total Environment*, 805. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150305>

Steinmetz S. B.Sc. (2018), The Role of Algae in the context of Bioalbedo: Taxonomy, Pigmentation and Productivity. Universität Innsbruck, Institute of Ecology, - Faculty of Biology, Innsbruck, Austria.

USGS, Science for a changing world. EarthExplorer. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Yallop, M. L., Anesio, A. J., Perkins, R. G., Cook, J., Telling, J., Fagan, D., MacFarlane, J., Stibal, M., Barker, G., Bellas, C., Hodson, A., Tranter, M., Wadham, J., and Roberts, N. W. (2012) Photophysiology and albedo changing potential of the ice-algal community on the surface of the Greenland ice sheet., *ISME J.* 6, 2302–2313.