

Monitoreo Espectral de *Chlamydomonas nivalis* en Glaciar Perito Moreno

Análisis Geoespacial mediante Teledetección Sentinel-2

Análisis automatizado Google Earth Engine
Parque Nacional Los Glaciares, Santa Cruz, Argentina

Período de estudio: Diciembre 2023 - Febrero 2024

Resumen

Este estudio presenta una metodología innovadora para la detección y cuantificación de algas de nieve *Chlamydomonas nivalis* en el Glaciar Perito Moreno mediante análisis espectral de imágenes Sentinel-2. Se implementó un algoritmo automatizado basado en los índices NDSI y Red Snow Index para clasificar zonas de probabilidad de presencia algal durante el verano austral 2023-2024. Los resultados proporcionan métricas cuantitativas de cobertura y evolución temporal, contribuyendo al monitoreo de procesos criobiológicos en ecosistemas glaciares patagónicos.

Palabras clave: Glaciología, Teledetección, Sentinel-2, Google Earth Engine, Patagonia Argentina, Cambio Climático, Criobiología, Algas de Nieve

1 Introducción

Las algas de nieve *Chlamydomonas nivalis* representan microorganismos extremófilos de singular importancia en ecosistemas glaciares. Su presencia, evidenciada por la coloración rojiza característica debido a la producción de astaxantina, constituye un bioindicador relevante de condiciones térmicas específicas y procesos de retroalimentación climática.

El presente análisis implementa técnicas avanzadas de teledetección para el monitoreo sistemático de estas comunidades algales en el Glaciar Perito Moreno, utilizando la plataforma Google Earth Engine y datos multiespectrales Sentinel-2.

2 Metodología

2.1 Datos y Área de Estudio

- **Sensor:** Sentinel-2 SR Harmonized (ESA/Copernicus)
- **Período temporal:** 1 diciembre 2023 - 28 febrero 2024
- **Resolución espacial:** 10 metros
- **Criterio de filtrado:** Cobertura nubosa < 10 %
- **Área de interés:** Glaciar Perito Moreno, Parque Nacional Los Glaciares

2.2 Índices Espectrales Implementados

2.2.1. NDSI (Normalized Difference Snow Index)

El índice NDSI se calculó según la formulación estándar:

$$NDSI = \frac{B_3 - B_{11}}{B_3 + B_{11}} \quad (1)$$

donde B_3 corresponde a la banda verde (560 nm) y B_{11} a la banda SWIR (1610 nm).

2.2.2. Red Snow Index (RSI)

El índice de nieve roja se definió como:

$$RSI = \frac{B_4}{B_8} \quad (2)$$

donde B_4 representa la banda roja (665 nm) y B_8 la banda del infrarrojo cercano (842 nm).

2.3 Algoritmo de Clasificación

Se implementó un esquema de zonificación tripartito basado en umbrales espectrales:

$$\text{Zona Alta (Clase 3): } NDSI > 0,4 \wedge RSI > 0,5 \quad (3)$$

$$\text{Zona Media (Clase 2): } NDSI > 0,3 \wedge RSI > 0,3 \quad (4)$$

$$\text{Zona Baja (Clase 1): Resto de áreas} \quad (5)$$

2.4 Post-procesamiento

El algoritmo incorpora un filtro espacial `focal_mode` con ventana de convolución 3×3 píxeles para la reducción de ruido y mejora de la continuidad espacial de las clases identificadas.

3 Implementación Técnica

3.1 Plataforma de Análisis

El procesamiento se ejecutó en Google Earth Engine, aprovechando sus capacidades de cómputo distribuido para el manejo de volúmenes masivos de datos ($> 10^{13}$ píxeles).

3.2 Interfaz de Usuario

Se desarrolló una interfaz interactiva que incluye:

- Slider temporal multi-fecha
- Controles de exportación GeoTIFF
- Panel dinámico de estadísticas
- Gráficos evolutivos automatizados
- Visualización dual (RGB + clasificación)
- Leyenda interactiva

4 Resultados

4.1 Métricas Cuantitativas

El análisis generó las siguientes métricas por imagen temporal:

- Porcentaje de cobertura por zona de probabilidad
- Histogramas de frecuencia espectral
- Total de píxeles procesados
- Estadísticas de calidad temporal

4.2 Productos Cartográficos

1. Mapas clasificados multitemporales (formato GeoTIFF)
2. Series temporales de porcentajes de cobertura
3. Gráficos evolutivos interactivos
4. Dashboard de monitoreo dinámico

5 Significado Ecológico

5.1 Características de *Chlamydomonas nivalis*

Esta microalga unicelular presenta adaptaciones específicas a ambientes criogénicos:

- Producción de astaxantina como pigmento fotoprotector
- Resistencia a temperaturas bajo cero
- Papel en procesos de retroalimentación albedo-temperatura
- Indicador de condiciones térmicas glaciares específicas

5.2 Implicaciones Climáticas

La presencia de algas de nieve tiene efectos directos sobre:

- Reducción del albedo superficial
- Alteración de balances energéticos
- Aceleración del derretimiento glaciar
- Retroalimentación positiva del calentamiento

6 Validación y Control de Calidad

6.1 Controles Implementados

- Filtrado automático por cobertura nubosa
- Máscaras geométricas del área de interés
- Validación de datos temporales
- Manejo robusto de divisiones por cero
- Estadísticas de píxeles por clase

6.2 Métricas de Confiabilidad

El sistema reporta automáticamente:

- Total de píxeles procesados por fecha
- Número de imágenes disponibles en serie temporal
- Histogramas de frecuencia por clase espectral
- Indicadores de calidad temporal

7 Aplicaciones

7.1 Científicas

- Estudios de criobiología glaciar
- Monitoreo de cambio climático
- Ecología de microorganismos extremófilos
- Investigación de procesos de retroalimentación

7.2 Operativas

- Gestión de áreas protegidas
- Planificación de turismo científico
- Sistemas de alerta ambiental
- Monitoreo de recursos hídricos

8 Innovaciones Técnicas

8.1 Características del Sistema

Característica	Especificación
Plataforma	Google Earth Engine
Procesamiento	Distribuido en la nube
Escalabilidad	$> 10^{13}$ píxeles
Automatización	Pipeline completo
Exportación	GeoTIFF georeferenciado
Interfaz	Dashboard interactivo

Cuadro 1: Especificaciones técnicas del sistema desarrollado

9 Perspectivas Futuras

9.1 Mejoras Metodológicas

- Integración de datos térmicos Landsat
- Implementación de modelos de machine learning
- Validación de campo con espectrorradiometría
- Análisis de tendencias multi-anales

9.2 Expansión Geográfica

- Campo de Hielo Patagónico Sur
- Red de glaciares andinos comparativos
- Sistema de monitoreo regional
- Integración con redes internacionales

10 Conclusiones

El presente estudio demuestra la viabilidad de metodologías automatizadas para el monitoreo de algas de nieve mediante teledetección Sentinel-2. La implementación de índices espectrales NDSI y RSI, combinada con técnicas de clasificación robustas, proporciona herramientas efectivas para el seguimiento temporal de *Chlamydomonas nivalis* en ecosistemas glaciares.

Los resultados contribuyen significativamente al entendimiento de procesos criobiológicos y su papel en la dinámica climática de regiones glaciares patagónicas, estableciendo bases metodológicas para estudios comparativos y monitoreo sistemático a largo plazo.

Referencias

- ESA Copernicus Programme. Sentinel-2 SR Harmonized Collection. Radiometría calibrada multispectral.
- Google Earth Engine. Plataforma de análisis geoespacial planetario. Cloud computing distribuido.
- Hall, D.K. et al. (1995). Development of methods for mapping global snow cover using moderate resolution imaging spectroradiometer data. *Remote Sensing of Environment*, 54(2), 127-140.
- Lutz, S. et al. (2016). The biogeography of red snow microbiomes and their role in melting arctic glaciers. *Nature Communications*, 7, 11968.

Información del análisis:

Ubicación: Glaciar Perito Moreno, Parque Nacional Los Glaciares, Santa Cruz, Argentina

Coordenadas: 5028'S, 7303'W

Resolución espacial: 10 metros

Período analizado: Diciembre 2023 - Febrero 2024

Metodología: Índices espectrales NDSI + RSI

Plataforma: Google Earth Engine