

Gonzalo Martín, C.; Garcia Pedrero, Á.; Boumahdi, M.; Rodríguez Esparragón, D.; Marcello, J. Clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma mediante series temporales Sentinel-2 y Transformers

Clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma mediante series temporales Sentinel-2 y Transformers

Gonzalo Martín, Consuelo ^{1,2} Garcia Pedrero, Ángel ^{1,2} Boumahdi, Meryeme ^{1,2}
Rodríguez Esparragón, Dionisio ³ Marcello, Javier ³

¹ Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, España

² Centro de Tecnología Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid, Madrid, España

³ Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Unidad Asociada ULPGC-CSIC, Las Palmas de Gran Canarias, España

ORCID: Gonzalo Martín 0000-0002-0804-9293 Garcia Pedrero 0000-0002-6848-481X Boumahdi 0000-0003-0600-8137
Rodríguez Esparragón 0000-0002-4542-2501 Marcello 0000-0002-9646-1017

Correspondencia: consuelo.gonzalo@upm.es angelmario.garcia@upm.es m.boumahdi@alumnos.upm.es
dionisio.rodriguez@ulpgc.es javier.marcello@ulpgc.es

RESUMEN

La erupción volcánica de 2021 en la isla de La Palma generó cambios significativos en la cubierta forestal, lo que hace necesaria la actualización de la cartografía de cubiertas mediante técnicas robustas de teledetección. En este trabajo se presenta una metodología basada en series temporales de imágenes Sentinel-2 y el modelo de aprendizaje profundo SITS-former, una arquitectura Transformer capaz de modelar dependencias espacio-temporales. Se emplean composiciones mensuales de reflectancia superficial y se evalúa el modelo tanto en su versión base como en una versión mejorada que incorpora información topográfica (DEM, elevación, pendiente y orientación) mediante fusión tardía. Los resultados muestran que la inclusión de variables topográficas incrementa la precisión global del 60% al 71% en el conjunto de validación, mejorando especialmente la discriminación de clases forestales ecológicamente similares como Laurisilva y Fayal-Brezal. El enfoque propuesto demuestra el potencial de los modelos Transformer para la cartografía forestal en entornos complejos y afectados por perturbaciones naturales.

Palabras clave: *Sentinel-2; series temporales; Transformers; SITS-Former; topografía; cartografía forestal*

Fecha de recepción: 11 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 16 febrero 2026


Clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma mediante series temporales Sentinel-2 y Transformers

Gonzalo Martín, Consuelo ^(1,2), García Pedrero, Ángel ^(1,2), Boumahdi, Meryeme ^(1,2), Rodríguez Esparragón, Dionisio ⁽³⁾, Marcello, Javier ⁽³⁾



⁽¹⁾ Departamento de Arquitectura y Tecnología de Sistemas Informáticos, Universidad Politécnica de Madrid, España.

⁽²⁾ Centro de Tecnología Biomédica, Universidad Politécnica de Madrid, España.

 0000-0002-0804-9293, consuelo.gonzalo@upm.es ;  0000-0002-6848-481X, angelmario.garcia@upm.es.

 0000-0003-0600-8137, m.boumahdi@alumnos.upm.es.

⁽³⁾ Instituto de Oceanografía y Cambio Global, IOCAG, Unidad Asociada ULPGC-CSIC, Las Palmas de Gran Canarias, España.

 0000-0002-4542-2501, dionisio.rodriguez@ulpgc.es ;  0000-0002-9646-1017, javier.marcello@ulpgc.es.

Resumen: La erupción volcánica de 2021 en la isla de La Palma generó cambios significativos en la cubierta forestal, lo que hace necesaria la actualización de la cartografía de cubiertas mediante técnicas robustas de teledetección. En este trabajo se presenta una metodología basada en series temporales de imágenes Sentinel-2 y el modelo de aprendizaje profundo SITS-former, una arquitectura Transformer capaz de modelar dependencias espacio-temporales. Se emplean composiciones mensuales de reflectancia superficial y se evalúa el modelo tanto en su versión base como en una versión mejorada que incorpora información topográfica (DEM, elevación, pendiente y orientación) mediante fusión tardía. Los resultados muestran que la inclusión de variables topográficas incrementa la precisión global del 60% al 71% en el conjunto de validación, mejorando especialmente la discriminación de clases forestales ecológicamente similares como Laurisilva y Fayal-Brezal. El enfoque propuesto demuestra el potencial de los modelos Transformer para la cartografía forestal en entornos complejos y afectados por perturbaciones naturales.

Palabras clave: Imágenes multiespectrales, Aprendizaje Profundo, Topografía, Cartografía Forestal

English Title: Mapping Forest Habitats on La Palma island with Sentinel-2 Time Series and Transformer Models

Abstract: The 2021 volcanic eruption on the island of La Palma generated significant changes in the forest cover, which makes it necessary to update the habitat mapping using robust remote sensing techniques. This work presents a methodology based on time series of Sentinel-2 images and the deep learning model SITS-former, a Transformer architecture capable of modeling spatial-temporal dependencies. Monthly surface reflectance composites are used, and the model is evaluated both in its base version and in an improved version that incorporates topographic information (elevation, slope, and aspect) through late fusion. The results show that the inclusion of topographic variables increases overall accuracy from 60% to 71% on the validation set, especially improving the discrimination of ecologically similar forest classes such as Laurisilva and Fayal-Brezal. The proposed approach demonstrates the potential of Transformer models for forest mapping in complex environments affected by natural disturbances.

Keywords: Multispectral images, Deep Learning, Topography, Forest Cartography

1. INTRODUCCIÓN

La cartografía precisa de cubiertas forestales constituye un elemento esencial para la gestión ambiental, la conservación de la biodiversidad y la evaluación del impacto de perturbaciones naturales. En Europa, esta obligación viene marcada por la Directiva Hábitats (92/43/EEC), que exige actualizaciones periódicas del

estado de conservación de los ecosistemas. Sin embargo, la complejidad estructural y fenológica de algunos hábitats dificulta la elaboración de cartografías fiables apoyadas únicamente en métodos tradicionales o en imágenes mono-temporales. En este contexto, las series temporales provenientes del satélite Sentinel-2 han demostrado mejorar la discriminación de tipos de vegetación al capturar dinámicas fenológicas claves,

especialmente en áreas heterogéneas como las regiones montañosas y volcánicas del sur de Europa (Pesaresi *et al.*, 2022).

En la isla de La Palma, la reciente actividad volcánica de la erupción de Cumbre Vieja en 2021, ha generado cambios significativos en la distribución y estructura del paisaje, lo que subraya la necesidad de herramientas avanzadas de teledetección para monitorizar la evolución de la vegetación y evaluar la resiliencia de los ecosistemas forestales. Los estudios basados en el sensor Sentinel-2 han mostrado su utilidad para proporcionar información detallada sobre la dinámica espacial y temporal de esta isla (Stoyanov, 2023).

Los recientes avances en aprendizaje profundo para series temporales satelitales han mejorado notablemente la clasificación de coberturas y hábitats, especialmente gracias a los modelos basados en Transformers, capaces de capturar dependencias espacio-temporales complejas (Voelsen *et al.*, 2024). Entre ellos, las variantes del Swin Transformer han mostrado mejoras significativas frente a arquitecturas tradicionales, al integrar información temporal y espacial de las series temporales de imágenes. En este contexto, SITS-Former (Yuan *et al.*, 2022) destaca como uno de los primeros modelos pre-entrenados específicamente para Sentinel-2, empleando auto-supervisión, siendo capaz de extraer características espaciales, temporales y espectrales de las imágenes. Este modelo incluye un mecanismo de autoatención que modela las relaciones y dependencias espaciales y temporales de forma global. Todo ello, le permite aprender representaciones temporales robustas y adaptables, incluso con datos etiquetados limitados, lo que se traduce en una mayor precisión y un alto potencial para la cartografía de cubiertas.

En este trabajo se evalúa la aplicación del modelo SITS-Former para la clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma, modelo base, analizando además el efecto de incorporar variables topográficas (modelo mejorado). La complejidad ambiental y volcánica de la isla hace que combinar series temporales Sentinel-2 con

modelos Transformer sea una opción prometedora para generar cartografías de cubiertas forestales precisas y robustas.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

Como datos de referencia (verdad-terreno) para el refinamiento y la evaluación de los modelos, se empleó el Mapa de Vegetación del Gobierno de Canarias (GRAFCAN, 2021), rasterizado a 10 m y reagrupado en siete clases forestales de interés: Coníferas, Laurisilva, Fayal-Brezal, Castaño, Otras especies arbóreas, Suelo y Otros.

Se utilizaron imágenes de los satélites Sentinel-2A y Sentinel-2B con un nivel de procesado 2A, una cobertura nubosa inferior al 10% y una extensión temporal del 2021 al 2023. El preprocesado se llevó a cabo en la plataforma Google Earth Engine, usando el algoritmo Sen2Cor, además se incluyó la detección de nubes mediante S2cloudless con un umbral del 25%, la detección de sombras por proyección en función del azimut solar y un filtrado adicional mediante la capa de calidad de escena (SCL) de las imágenes. A partir de 287 imágenes con diez bandas espectrales remuestreadas a 10 m de resolución, se generaron mosaicos mensuales mediante una agregación de mediana.

La clasificación se realizó mediante el modelo SITS-Former. Para generar el modelo base de clasificación se llevó a cabo un ajuste fino a partir del modelo preentrenado, usando todas las imágenes disponibles del 2022, y de enero a agosto del 2023. Se definieron parches de 5x5 píxeles, utilizando el píxel central como etiqueta de referencia y se utilizó una longitud temporal de 12 meses. Por lo que el tamaño de los patrones de entrenamiento fue 12x10x5x5, siendo 10 el número de bandas espectrales. Se realizó una división en parches sin solapamiento, obteniendo 2 millones de unidades para el análisis. Se seleccionaron aleatoriamente 100 muestras por clase para el conjunto de entrenamiento y 100 para validación, reservando el resto para prueba. La Tabla 1 muestra los hiperparámetros utilizados en el ajuste del modelo.

Tabla 1. Hiperparámetros de entrenamiento.

Épocas	Batch size	Parche	Meses	Bandas	Dim. latente	# bloques Transformer	Cabeza atención	Optimizador
80	128	5x5 píxeles	12	B2, B3, B4, B5, B7, B8, B8A, B11, B12	256	3	8	Adam

Con el fin de mejorar la separabilidad de clases, se desarrolló una versión mejorada del modelo que integra información topográfica, incluyendo el modelo digital de elevaciones (MDE), la pendiente, la orientación y el sombreado de elevación. Estas variables se incorporaron como entradas adicionales procesadas mediante un codificador convolucional y fusionadas con la representación temporal del Transformer en una etapa tardía (fusión tardía), previa a la clasificación, con objeto de incluir en el modelo información sobre la distribución de la vegetación, los patrones de iluminación y la variación microclimática, factores no considerados en las relaciones espaciotemporales.

3. RESULTADOS

El rendimiento de los modelos, tanto en su versión base como mejorada, se evaluó íntegramente con datos del año 2021, primero se determinó la precisión del modelo a partir del conjunto de validación y posteriormente, se compararon los mapas de clasificación generados para toda la isla con los datos de referencia del mismo año.

El modelo base alcanzó para el conjunto de validación una precisión global del 60%, un coeficiente Kappa de 0.533 y un F1-score macro del 60%. Se emplea el F1-score macro como métrica global de comparación entre

modelos. Las métricas de clasificación por clase para este caso, para cada clase, se han incluido en la Tabla 2. Las clases mejor identificadas son Coníferas y Suelo, cuyas características espectrales son muy diferentes del resto de las cubiertas arbóreas, mientras que los valores más bajos de las métricas corresponden a Laurisilva y Fayal-Bretal, debido a su similitud espectral y ecológica. El rendimiento del modelo mejoró de forma notable, cuando se incluyó la información topográfica (Tabla 2). La precisión global en el conjunto de validación alcanzó

un 71.29% y el coeficiente Kappa fue de 0.665. Además, se obtuvo un F1 score macro de 70.57%, lo que una mejora global más equilibrada entre clases. Estas mejoras indican no solo un incremento en las predicciones acertadas, sino también una menor confusión entre categorías, especialmente en tipos de vegetación con características similares.

Tabla 2. Resultados de clasificación en el conjunto de validación, para el modelo base y el mejorado.

Clase	Modelo base			Modelo mejorado		
	precisión	exhaustividad	F1-score	precisión	exhaustividad	F1-score
Coníferas	0.72	0.68	0.70	0.72	0.77	0.74
Laurisilva	0.55	0.61	0.58	0.69	0.85	0.76
Fayal-Brezal	0.52	0.47	0.49	0.65	0.57	0.61
Castaño	0.62	0.66	0.64	0.86	0.90	0.88
Otras esp. Arb.	0.67	0.56	0.61	0.77	0.71	0.74
Suelo	0.67	0.70	0.68	0.72	0.79	0.75
Otros	0.47	0.52	0.50	0.53	0.40	0.46

Los dos modelos entrenados se utilizaron para clasificar el territorio de toda la isla, para el año 2021. En la Figura 1a se muestra la distribución de cubiertas según GRAFCAN (referencia), así como los mapas temáticos generados por los modelos SITS-Former base (Fig 1b) y mejorado (Fig. 1c), respectivamente. Se puede observar que el mapa de referencia GRAFCAN muestra el predominio de la clase Suelo y otros, seguida por Coníferas, Fayal-Brezal y Laurisilva, mientras que Castaño y Otras especies arbóreas presentan extensiones más reducidas. En la Figura 1 también se

puede apreciar que de forma global la cartografía generada por el modelo mejorado es más próxima a la de GRAFCAN que la del modelo base. Las mejoras más notables se observaron en las clases Castaño, Laurisilva y Otras especies arbóreas, mientras que las clases Suelo y Otros continuaron siendo las más ambiguas debido a su carácter heterogéneo. No obstante, persisten confusiones entre clases espectralmente similares, como Laurisilva y Fayal-Brezal, así como en zonas de transición. Parte de estas discrepancias se asocia también a incertidumbres presentes en la cartografía de referencia.

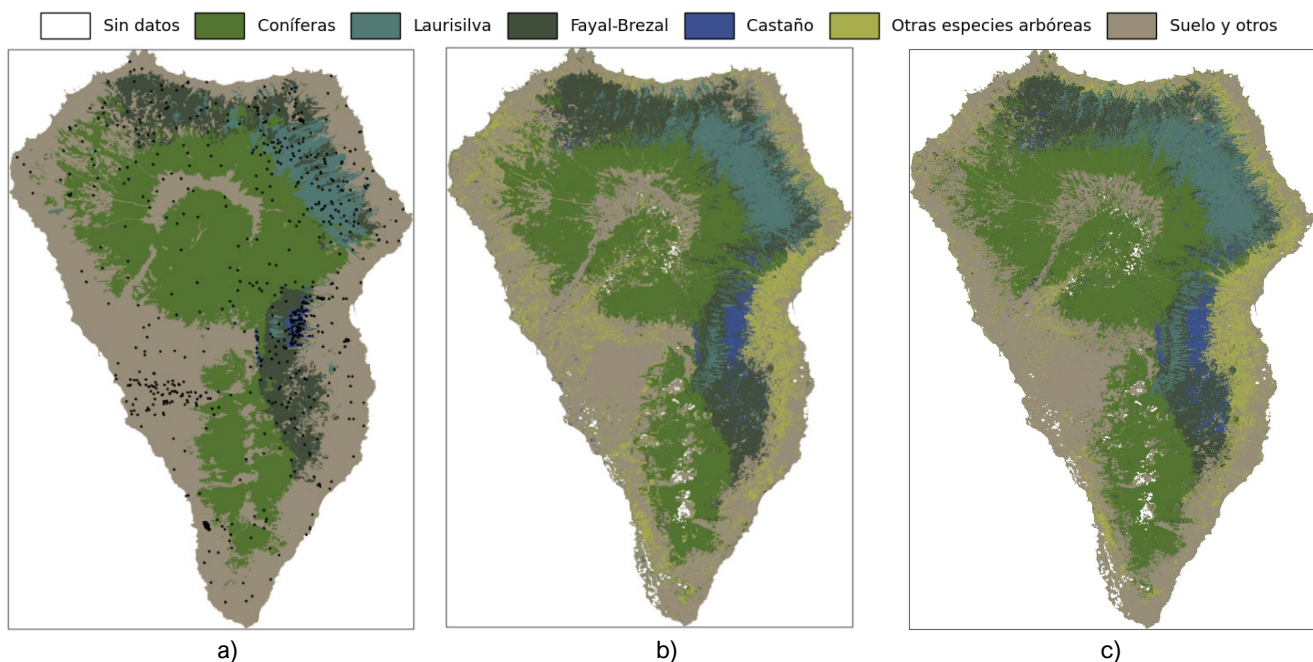


Figura 1: a) Land Cover de GRAFCAN (2021), incluyendo la distribución espacial de los parches de entrenamiento. Y mapas generados con SITS-Former base (b) y mejorado (c).

Estos resultados visuales, están refrendados por las métricas obtenidas, que en el caso del modelo base son: una precisión global del 59.12% y un coeficiente Kappa de 0.47, lo que refleja un nivel de acuerdo moderado más allá del azar. El F1-score macro fue del 46.17%,

evidenciando diferencias notables en el rendimiento entre clases con distinta representatividad. Mientras que, en el modelo mejorado, se alcanzó una precisión global del 60.04%, un coeficiente Kappa de 0.47 y un F1-score macro del 44.45%.

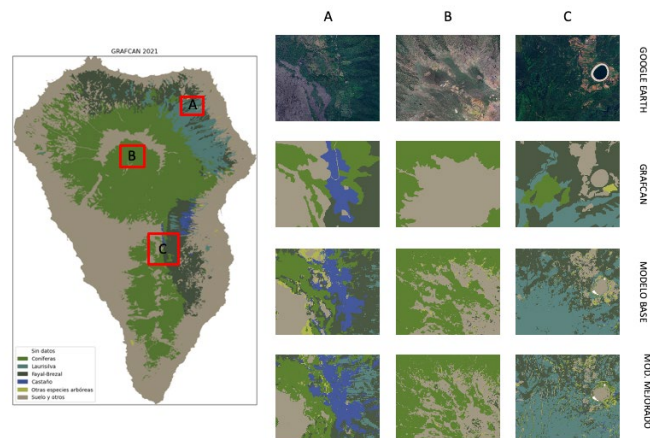


Figura 2: Ubicación y resultados de clasificación para tres áreas representativas

Para contextualizar los resultados de clasificación, se realizó un análisis visual en tres zonas de La Palma (A, B y C), comparando imágenes originales (Google Earth), datos de referencia (GRAFCAN) y las clasificaciones de los modelos base y mejorado (Figura 2). Se puede apreciar que el modelo base reproduce las clases dominantes, pero muestra discrepancias relevantes, como la confusión entre Laurisilva y Fayal-Brezal en el área A o la clasificación errónea de zonas desnudas en el área B. En cambio, el modelo mejorado se ajusta mucho mejor a la referencia, reduce confusiones y refleja con mayor precisión la heterogeneidad espacial, especialmente en el área C, donde representa con mayor exactitud los límites y patrones de cobertura.

4. CONCLUSIONES

En este estudio se ha evaluado el rendimiento del modelo SITS-Former para la clasificación de cubiertas forestales en la isla de La Palma, analizando el efecto de la incorporación de información topográfica en los resultados de clasificación de esta zona volcánica de elevada complejidad ecológica. La integración de dicha información mejoró las métricas analizadas, confirmando que el relieve aporta un contexto discriminativo clave para separar clases espectralmente próximas. La estrategia de fusión tardía resultó especialmente eficaz, ya que preserva la capacidad del SITS-Former para modelar la dinámica espectro-temporal mientras añade información estática que refuerza la separabilidad entre categorías.

A pesar de esta mejora, persisten limitaciones relevantes, como son: la heterogeneidad de la clase *Otros* y la baja precisión en categorías minoritarias, especialmente. Estos resultados, que muestran un acuerdo moderado con los datos de validación, reflejan la complejidad ecológica y espectral del territorio y la dificultad de discriminar clases transicionales o poco representadas. Futuros trabajos deberían revisar la definición de clases, aumentar la representación de

categorías minoritarias e incorporar información estacional o datos de mayor resolución para mejorar la robustez y la capacidad discriminativa del modelo.

5. AGRADECIMIENTOS

Trabajo financiado por el MITECO, el Gobierno de Canarias y el Cabildo de La Palma (ref. 316/2023/ACU) y por el Organismo Autónomo Parques Nacionales (Proyecto SPIP2022-02897). Se agradece la disponibilidad del MDT a partir de los vuelos LiDAR del PNOA, así como a GESPLAN y al Excmo. Cabildo Insular de La Palma el acceso a la cartografía de referencia.

6. REFERENCIAS

Pesaresi, S., Mancini, A., Quattrini, G., & Casavecchia, S. (2022). Functional Analysis for Habitat Mapping in a Special Area of Conservation Using Sentinel-2 Time-Series Data. *Remote Sensing*, 14(5), 1179.

Andrey Stoyanov, A. (2023). Monitoring and spatial distribution of lava and volcanic eruptions from Cumbre Vieja ridge on island La Palma in the Canary Islands occurred in 2021 by methods of remote sensing, Proc. SPIE 12734, Earth Resources and Environmental Remote Sensing/GIS Applications XIV, 127341J (19 October 2023).

Voelsen, M., Rottensteiner, F., & Heipke, C. (2024). Transformer models for land cover classification with satellite image time series. *PFG-Journal of Photogrammetry, Remote Sensing and Geoinformation Science*, 92(5), 547-568

Yuan, Y., Lin, L., Liu, Q., Hang, R., & Zhou, Z. (2022). SITS-Former: A pre-trained spatio-spectral-temporal representation model for Sentinel-2 time series classification. *Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf.*, 106, 102651.

GRAFCAN 2021. https://www.idecanarias.es/listado_servicios/mapa-de-vegetacion