

Esteban, J.; Navarro, J.; Tomé, J.; González, I. Aplicaciones de Google Satellite Embeddings en la cartografía de plantaciones forestales en Uganda

Aplicaciones de Google Satellite Embeddings en la cartografía de plantaciones forestales en Uganda

Esteban, Jessica ¹ Navarro, José Antonio ¹ Tomé, José Luis ¹ González, Isabel ¹

¹ Agresta S. Coop., España

ORCID: Esteban 0000-0001-8350-5343 Navarro 0000-0002-8994-3085 Tomé 0000-0003-2298-9115 González 0009-0002-1455-9174

Correspondencia: jesteban@agresta.org janavarro@agresta.org jltome@agresta.org igonzaalez@agresta.org

RESUMEN

El aumento de la disponibilidad de series temporales satelitales y de productos preparados para el análisis ha impulsado nuevas aproximaciones operacionales para la monitorización forestal. Este trabajo evalúa el potencial de Google Satellite Embeddings para la cartografía de plantaciones forestales en Uganda a escala nacional. La metodología combina tres componentes: (i) clasificación supervisada para generar una máscara bosque/no bosque, (ii) búsqueda por similitud en el espacio de embeddings a partir de un prototipo de plantación y (iii) análisis de la dinámica temporal para reducir omisiones en áreas con cambios recientes. La validación con la base de datos oficial SPGS mostró una exactitud del productor del 77,0%, con diferencias regionales relevantes y los peores resultados en la región South Western. En comparación con antecedentes basados en Sentinel-2 en entornos tropicales, los resultados obtenidos son comparables, aunque la escala nacional del presente estudio introduce una complejidad adicional en la modelización y la validación. En conjunto, los resultados muestran que los embeddings constituyen una entrada útil para la cartografía de plantaciones en paisajes dinámicos y heterogéneos, y apuntan a la necesidad de futuras validaciones basadas en muestreo estratificado para comparar de forma robusta este enfoque con clasificaciones convencionales.





Palabras clave: plantaciones forestales; Google Satellite Embeddings; series temporales.

Fecha de recepción: 18 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 18 febrero 2026

Aplicaciones de Google Satellite Embeddings en la cartografía de plantaciones forestales en Uganda

Esteban, Jessica ⁽¹⁾, Navarro, José Antonio ⁽¹⁾, Tomé, José Luis ⁽¹⁾, González, Isabel ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Agresta S. Coop., España.

 0000-0001-8350-5343, jesteban@agresta.org ;  0000-0002-8994-3085, janavarro@agresta.org
 0000-0003-2298-9115, jltome@agresta.org ;  0009-0002-1455-9174, igonzalez@agresta.org

Resumen: El aumento de la disponibilidad de series temporales satelitales y de productos preparados para el análisis ha impulsado nuevas aproximaciones operacionales para la monitorización forestal. Este trabajo evalúa el potencial de Google Satellite Embeddings para la cartografía de plantaciones forestales en Uganda a escala nacional. La metodología combina tres componentes: (i) clasificación supervisada para generar una máscara bosque/no bosque, (ii) búsqueda por similitud en el espacio de embeddings a partir de un prototipo de plantación y (iii) análisis de la dinámica temporal para reducir omisiones en áreas con cambios recientes. La validación con la base de datos oficial SPGS mostró una exactitud del productor del 77,0%, con diferencias regionales relevantes y los peores resultados en la región South Western. En comparación con antecedentes basados en Sentinel-2 en entornos tropicales, los resultados obtenidos son comparables, aunque la escala nacional del presente estudio introduce una complejidad adicional en la modelización y la validación. En conjunto, los resultados muestran que los embeddings constituyen una entrada útil para la cartografía de plantaciones en paisajes dinámicos y heterogéneos, y apuntan a la necesidad de futuras validaciones basadas en muestreo estratificado para comparar de forma robusta este enfoque con clasificaciones convencionales.

Palabras clave: plantaciones forestales; Google Satellite Embeddings; series temporales.

Forest Plantation Mapping in Uganda Using Google Satellite Embeddings

Abstract: *The increasing availability of satellite time series and analysis-ready data has enabled new operational approaches for forest monitoring. This study evaluates the potential of Google Satellite Embeddings for national-scale forest plantation mapping in Uganda. The methodology combines three components: (i) supervised classification to generate a forest/non-forest mask, (ii) similarity search in the embedding space based on a plantation prototype, and (iii) temporal analysis to reduce omission in recently disturbed areas. Validation against the official SPGS database showed a producer's accuracy of 77.0%, with marked regional differences and the lowest performance in the South Western region. Compared with previous Sentinel-2-based studies in tropical environments, the results are comparable, although the national scale of the present study introduces additional complexity in both modelling and validation. Overall, the results show that embeddings provide a useful input for plantation mapping in dynamic and heterogeneous landscapes, and point to the need for future stratified-sampling validation frameworks to support a more robust comparison between embedding-based and conventional classifications.*

Keywords: forest plantations; Google Satellite Embeddings; satellite time series.

1. INTRODUCCIÓN

El uso de datos satelitales ha transformado el conocimiento y la gestión de los bosques al proporcionar información periódica y con una cobertura espacial continua. El programa Landsat, por ejemplo, mantiene un registro continuo de imágenes desde 1972, constituyendo una de las series más largas disponibles para el análisis de cambios. Por su parte, el programa Copernicus, acumula ya más de una década de observaciones sistemáticas con Sentinel-2.

La disponibilidad creciente de datos satelitales de observación de la Tierra, junto con políticas de acceso abierto y mejoras en el preprocesado, ha impulsado flujos de trabajo operacionales a gran escala para la monitorización forestal (Wulder *et al.*, 2022). Frente a enfoques basados en un número reducido de imágenes, se ha transitado hacia el uso sistemático de series temporales y de datos preparados para el análisis (análisis-ready-data). En este contexto, destaca la reciente publicación de los *AlphaEarth Foundations' Annual Embeddings* (Brown *et al.*, 2025), un conjunto global de datos basados en modelos Deep Learning que ingiere y fusiona observaciones de múltiples sensores (como Sentinel-1, Sentinel-2, Landsat y variables climáticas) en un único dataset. Cada píxel de 10 metros se describe mediante un vector de 64 dimensiones que codifica las trayectorias temporales y características de la superficie a lo largo del año. Aunque no son interpretables a simple vista, estas representaciones resultan más potentes para técnicas de Machine Learning, como tareas de clasificación, similitud y análisis de cambio (Brown *et al.*, 2025).

Esta comunicación evalúa el potencial de estos embeddings para abordar el reto de cartografiar las plantaciones forestales en Uganda, un paisaje heterogéneo y dinámico con ciclos de corta y replantación.

2. MATERIAL Y MÉTODOS

2.1. Datos de entrada

El estudio se basó en la serie anual de Google Satellite Embeddings para el periodo 2017–2025, utilizada como fuente principal para la identificación y delimitación de plantaciones forestales.

Además, se emplearon dos bases de datos independientes para el entrenamiento y la validación de los resultados:

- Base datos de entrenamiento: Se construyó una base multiclase integrada por plantaciones forestales, bosque, no bosque y plantaciones no forestales. Las plantaciones forestales se digitalizaron a partir de coordenadas de plantaciones, proporcionadas por la FAO, y depuradas visualmente con imágenes de alta resolución. Las clases de bosque se apoyaron en la capa global del JRC (Burgoin *et al.*, 2024), mientras que las plantaciones no forestales (palma de aceite, té, café, cacao) y áreas no forestales se delimitaron utilizando el mapa de usos post-deforestación de África (Masolelet *et*

al., 2024) y ESA WorldCover (Zanaga *et al.*, 2022).

- Base de datos de validación: el mapa final de plantaciones se validó con la base de datos oficial del programa SPGS (*Sustainable Plantation Growth System*) del Ministerio del Agua y Medio Ambiente. La muestra estuvo compuesta por 384 puntos distribuidos regionalmente: 74 en Albertine, 47 en Central, 67 en Eastern, 25 en Northern, 55 en South Western y 112 en Western (Figura 1). Dado que esta base recoge localizaciones de plantaciones conocidas, la validación permitió estimar principalmente la exactitud del productor y el error de omisión, pero no evaluar de forma robusta el error de comisión.

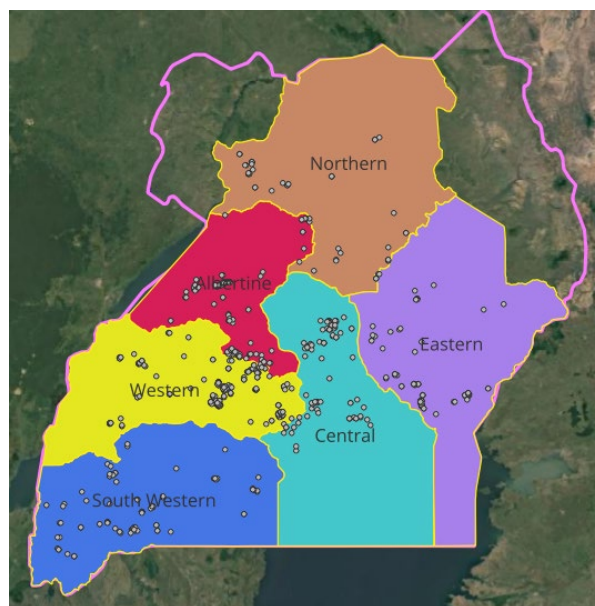


Figura 1. Distribución espacial de la base de datos de validación a lo largo de las regiones de Uganda.

2.2. Cartografía de plantaciones en Uganda

La metodología desarrollada explotó el espacio multidimensional de los embeddings mediante tres componentes complementarias, posteriormente integradas en un mapa final de plantaciones.

- **Clasificación supervisada (Máscara Bosque / No Bosque):** En una primera etapa, se entrenó un modelo Random Forest con la base de entrenamiento y los embeddings como variables predictoras. Este paso permitió generar una máscara general de bosque/no bosque, útil para excluir áreas agrícolas y otras coberturas herbáceas susceptibles de generar falsos positivos.
- **Búsqueda de similitud (Similarity Search):** A diferencia de las bandas espectrales, en el espacio de 64 dimensiones de los embeddings la similitud se mide por cómo de alineados están dos vectores, no por sus valores absolutos. Se extrajeron las firmas de las plantaciones forestales de entrenamiento para calcular un vector medio de referencia. Al

calcular el coseno del ángulo entre el vector de cada píxel de Uganda y este vector prototipo, se obtiene una puntuación de similitud: los píxeles más alineados (misma dirección) obtienen valores más altos; indicando una fuerte probabilidad de ser plantación. Posteriormente, sobre este ráster continuo de aplicaron umbrales de corte.

- **Detección de cambios temporales:** para reducir el error de omisión, se extrajo la dinámica temporal calculando un producto escalar pixel a pixel entre los embeddings de inicio y final de la serie temporal. De esta manera se logró identificar zonas sometidas a dinámicas de cortas recientes.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

La inspección visual sistemática muestra patrones coherentes con la realidad observada en las imágenes de alta resolución y una mejora práctica en la delimitación y caracterización del estado de las plantaciones (Figura 2).

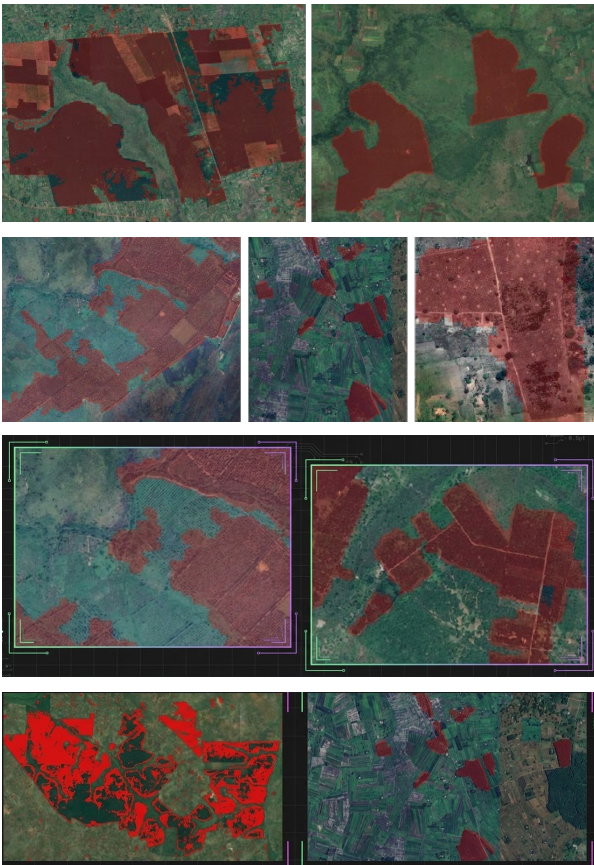


Figura 2. Ejemplos ilustrativos del resultado de clasificación en Uganda.

La validación realizada con la base de datos SPGS mostró una **exactitud del productor del 77,0%**, correspondiente a un **error de omisión del 23%**. Este resultado indica que el modelo es capaz de identificar una proporción elevada de las plantaciones existentes, aunque mantiene limitaciones en la detección completa de todas las áreas plantadas. El análisis por especie no mostró diferencias significativas entre las principales

especies comerciales del país, con errores de omisión del 27% para pino y del 22% para eucalipto, lo que sugiere un comportamiento relativamente consistente del modelo entre tipologías de plantación.

Sin embargo, el rendimiento no fue homogéneo espacialmente. Las regiones Albertine (86%), Northern (80%) y Central (79%) presentaron los mejores resultados, mientras que Eastern (76%) y Western (75%) mantuvieron valores elevados. La principal debilidad se localizó en la región South Western, donde la exactitud del productor descendió al 49%, lo que evidencia una mayor dificultad en la detección de plantaciones en este contexto. El mayor relieve y la nubosidad más persistente podrían reducir la separabilidad de las plantaciones respecto a otras coberturas. Aunque en este trabajo se aplicó un flujo metodológico uniforme a escala nacional, estos resultados indican que en regiones con mayor complejidad ambiental podría ser conveniente explorar ajustes metodológicos específicos, por ejemplo, en los umbrales de similitud o en las reglas de integración de resultados.

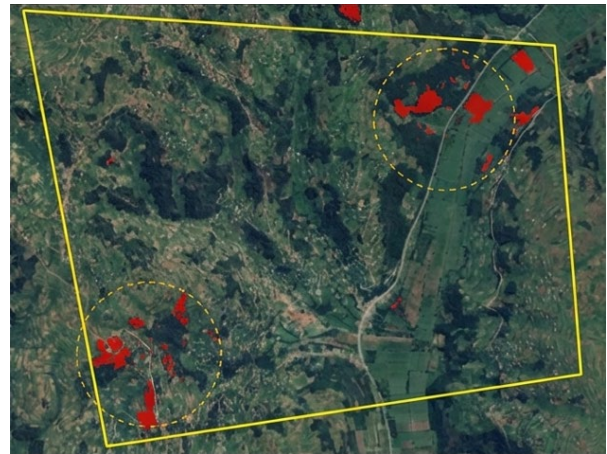


Figura 2. Omisiones detectadas en la región South Western.

En comparación con enfoques más convencionales basados en Sentinel-2, nuestros resultados son comparables a los obtenidos en otros estudios realizados en entornos tropicales complejos. En Hainan, Li *et al.* (2022) cartografiaron plantaciones de caucho en una gran región insular mediante composiciones fenológicas de Sentinel-2 y Random Forest, obteniendo una exactitud del productor del 81%, una exactitud del usuario del 84,4%. En el sur de Myanmar, Nomura y Mitchard (2018) mostraron que Sentinel-2 permite clasificar pequeñas plantaciones en paisajes forestales complejos, con exactitudes medianas del productor superiores al 93,5% entre clases y valores altos tanto para caucho como para palma aceitera. Asimismo, Htun *et al.* (2019) cartografiaron plantaciones de caucho y palma en Myanmar mediante la combinación de Landsat-8, Sentinel-2 y Sentinel-1, alcanzando una exactitud global del 84%. No obstante, la comparación directa entre estos trabajos y el presente estudio debe hacerse con cautela. Los antecedentes localizados se desarrollan en áreas subnacionales o regionales, con objetivos temáticos más específicos y diseños de validación distintos. En contraste, este trabajo aborda la cartografía de plantaciones a escala nacional en Uganda,

donde el mosaico de usos del suelo es altamente heterogéneo y dinámico, en un contexto en el que la superficie de bosque plantado se sitúa en el orden de varios cientos de miles de hectáreas según la FAO (FRA 2025).

En conjunto, los resultados sugieren que el enfoque es adecuado para una aplicación nacional, pero también que una metodología aplicada de forma uniforme puede no capturar de forma óptima la variabilidad regional del país. Como línea de trabajo futuro, se propone el desarrollo de una validación basada en muestreo estratificado siguiendo las recomendaciones de Olofsson *et al.* (2014), que permita estimar de forma no sesgada tanto errores de omisión como de comisión, así como superficies ajustadas por error. Este marco permitiría además comparar de forma más robusta una clasificación convencional basada en Sentinel-2 con la clasificación basada en embeddings, utilizando un mismo diseño muestral y un mismo protocolo de evaluación.

4. CONCLUSIÓN

Este trabajo muestra que Google Satellite Embeddings pueden utilizarse para apoyar la cartografía nacional de plantaciones forestales en Uganda mediante un flujo metodológico basado en similitud, clasificación supervisada y análisis temporal. El enfoque ha permitido generar un producto cartográfico útil en un contexto espacialmente heterogéneo, confirmando el interés de este tipo de representaciones para aplicaciones operacionales en paisajes forestales dinámicos.

Los resultados también ponen de manifiesto que la respuesta del método no es uniforme en todo el territorio, lo que sugiere la conveniencia de explorar ajustes metodológicos específicos en regiones más complejas.

5. AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a FAO responsable del proyecto desarrollado en Uganda por la financiación y el apoyo técnico proporcionado para la realización de este trabajo. Asimismo, los autores agradecen a Google por la publicación de los Google Satellite Embeddings a través de Google Earth Engine, que han facilitado el desarrollo del análisis

6. REFERENCIAS

Bourgoin, Clement; Verhegghen, Astrid; Carboni, Silvia; Amezttoy, Iban; Ceccherini, Guido; Colditz, Rene; Achard, Frederic (2024): Global map of forest types 2020 - version 0. European Commission, Joint Research Centre (JRC) [Dataset] PID: <http://data.europa.eu/89h/037ca376-ba92-49db-a8f7-0c277c1e5436>.

Brown, C. F., Kazmierski, M. R., Pasquarella, V. J., Rucklidge, W. J., Samsikova, M., Zhang, C., Shelhamer, E., Lahera, E., Wiles, O., Ilyushchenko, S., Gorelick, N., Zhang, L. L., Alj, S., Schechter, E., Askay, S., Guinan, O., Moore, R., Boukouvalas, A., & Kohli, P. (2025). *AlphaEarth Foundations: An*

embedding field model for accurate and efficient global mapping from sparse label data. arXiv. <https://arxiv.org/abs/2507.22291>

FAO (2025). Global Forest Resources Assessment 2025. Rome, Food and Agriculture Organization of the United Nations. <https://doi.org/10.4060/cd6709en>

Htun, N. Z., Mizoue, N., Kajisa, T., & Yoshida, S. (2019). Mapping Plantations in Myanmar by Fusing Landsat-8, Sentinel-2 and Sentinel-1 Data along with Systematic Error Quantification. *Remote Sensing*, 11(7), 831. <https://doi.org/10.3390/rs11070831>

Li, H., Zhao, L., Sun, L., Li, X., Wang, J., Han, Y., Liang, S., & Chen, J. M. (2022). Capability of Phenology-Based Sentinel-2 Composites for Rubber Plantation Mapping in a Large Area with Complex Vegetation Landscapes. *Remote Sensing*, 14(21), 5338. <https://doi.org/10.3390/rs14215338>

Masolele, R.N., Marcos, D., De Sy, V. *et al.* Mapping the diversity of land uses following deforestation across Africa. *Sci Rep* 14, 1681 (2024). <https://doi.org/10.1038/s41598-024-52138-9>

Nomura, K., & Mitchard, E. T. A. (2018). More Than Meets the Eye: Using Sentinel-2 to Map Small Plantations in Complex Forest Landscapes. *Remote Sensing*, 10(11), 1693. <https://doi.org/10.3390/rs10111693>

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42-57. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>

Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., Huntington, J. L., *et al.* (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280, Article 113195.

Zanaga, D., Van De Kerchove, R., Daems, D., De Keersmaecker, W., Brockmann, C., Kirches, G., Wevers, J., Cartus, O., Santoro, M., Fritz, S., Lesiv, M., Herold, M., Tsendbazar, N. E., Xu, P., Ramoino, F., & Arino, O. (2022). *ESA WorldCover 10 m 2021 v200* [Data set]. Zenodo. <https://doi.org/10.5281/zenodo.7254221>