

Tarazona Coronel, Y.; Mantas, V. Rendimiento del Normalized Radar Burn Ratio para la cartografía de áreas quemadas: más allá de índices ópticos

Rendimiento del Normalized Radar Burn Ratio para la cartografía de áreas quemadas: más allá de índices ópticos

Tarazona Coronel, Yonatan¹ **Mantas, Vasco**¹

¹ Department of Earth Sciences, Center for Earth and Space Research (CITEUC), University of Coimbra, Portugal

ORCID: Tarazona Coronel [0000-0002-5208-1004](https://orcid.org/0000-0002-5208-1004) Mantas [0000-0001-9602-7715](https://orcid.org/0000-0001-9602-7715)

Correspondencia: geoyons@gmail.com vasco.mantas@dct.uc.pt

RESUMEN

El índice Normalized Radar Burn Ratio (NRBR), basado en Sentinel-1 y recientemente publicado, presenta una alternativa robusta con rendimientos comparables y superiores a datos ópticos para la cartografía de áreas quemadas. Evaluado mediante un modelo de Aprendizaje Profundo U-Net entrenado en California y probado en España, el NRBR mostró un desempeño competitivo frente a enfoques multiespectrales y al índice óptico dNBR (delta Normalized Burn Ratio), con un coeficiente Dice del 83.51%. Este índice monovariante, que supera limitaciones como la nubosidad y la iluminación solar, ofrece generalización espacial (bajo diferentes tipos de cobertura), menor costo computacional y operatividad bajo condiciones adversas, posicionándose como una herramienta eficaz para el monitoreo de incendios a nivel global.


Palabras clave: mapeo de áreas quemadas, índice NRBR, sentinel-1, monitoreo de incendios


Fecha de recepción: 4 febrero 2026 · Fecha de aceptación: 4 febrero 2026

Rendimiento del Normalized Radar Burn Ratio para la cartografía de áreas quemadas: más allá de índices ópticos

Tarazona Coronel, Yonatan ⁽¹⁾, Mantas, Vasco ⁽¹⁾

⁽¹⁾ Department of Earth Sciences, Center for Earth and Space Research (CITEUC), University of Coimbra, Portugal.

 0000-0002-5208-1004, geoyons@gmail.com.

 0000-0001-9602-7715, vasco.mantas@dct.uc.pt.

Resumen: El índice Normalized Radar Burn Ratio (NRBR), basado en Sentinel-1 y recientemente publicado, presenta una alternativa robusta con rendimientos comparables y superiores a datos ópticos para la cartografía de áreas quemadas. Evaluado mediante un modelo de Aprendizaje Profundo U-Net entrenado en California y probado en España, el NRBR mostró un desempeño competitivo frente a enfoques multispectrales y al índice óptico dNBR (delta Normalized Burn Ratio), con un coeficiente Dice del 83.51%. Este índice monovariante, que supera limitaciones como la nubosidad y la iluminación solar, ofrece generalización espacial (bajo diferentes tipos de cobertura), menor costo computacional y operatividad bajo condiciones adversas, posicionándose como una herramienta eficaz para el monitoreo de incendios a nivel global.

Palabras clave: mapeo de áreas quemadas, índice NRBR, sentinel-1, monitoreo de incendios

Performance of the Normalized Radar Burn Ratio for Burned Area Mapping: Beyond Optical Indices

Abstract: *The recently published Sentinel-1 based Normalized Radar Burn Ratio (NRBR) index presents a robust alternative with performance comparable or superior to optical data for burned area mapping. Evaluated using a U-Net Deep Learning model trained in California and tested in Spain, the NRBR demonstrated competitive performance against multispectral approaches and the optical dNBR (delta Normalized Burn Ratio) index, achieving a Dice coefficient of 83.51%. This single-variable index overcomes limitations such as cloud cover and solar illumination, offering spatial generalization (across different land cover types), lower computational cost, and operational capability under adverse conditions, positioning itself as an effective tool for global fire monitoring.*

Keywords: *mapping burned areas, index NRBR, sentinel-1, wildfire monitoring*

1. INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales constituyen uno de los principales disturbios ambientales a escala global, con impactos significativos sobre los ecosistemas, el ciclo del carbono, la biodiversidad y los servicios ecosistémicos (Mansoor *et al.*, 2022). En las últimas décadas, la frecuencia e intensidad de los incendios han aumentado en numerosas regiones del mundo, incluyendo en zonas mediterráneas, como consecuencia de la combinación entre cambio climático, cambios en el uso del suelo y acumulación de combustible vegetal (Caon *et al.*, 2014). En este contexto, la cartografía precisa y oportuna de las áreas quemadas es fundamental para evaluar los impactos del fuego, apoyar la gestión post-incendio y mejorar la comprensión de los regímenes de fuego a diferentes escalas espaciales y temporales.

La teledetección satelital se ha consolidado como una herramienta clave para el monitoreo de áreas quemadas, gracias a la disponibilidad de sensores ópticos y radar de acceso abierto. Los sensores ópticos de resolución

media, como Landsat y Sentinel-2, han sido ampliamente utilizados mediante índices espectrales como el Normalized Burn Ratio (NBR) (Lutes *et al.*, 2006) y su versión diferencial (dNBR), que explotan los cambios en la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR) y de onda corta (SWIR) asociados a la pérdida de biomasa y humedad tras un evento de fuego. No obstante, más allá de la dependencia de la iluminación solar, la fuerte sensibilidad a la nubosidad y al humo que limitan la aplicabilidad operativa de estos índices después de un incendio, también se debe abordar su alta sensibilidad a la reflectancia del suelo con escasa vegetación en las estimaciones de áreas quemadas (Tarazona and Mantas, 2026). Adicionalmente, resulta fundamental optimizar el conjunto de variables de entrada en modelos de Deep Learning (DL), ya que una selección adecuada puede mejorar la eficiencia computacional (menos requerimientos computacionales), la capacidad de generalización y la robustez del modelo.

En este escenario, los sensores radar de apertura sintética (SAR por sus siglas en inglés), como Sentinel-1

en banda C, ofrecen una alternativa complementaria al proporcionar información independiente de las condiciones atmosféricas y de iluminación. Diversos estudios han demostrado el potencial de índices radar basados en cambios temporales de la retrodispersión para la detección de áreas quemadas (Fernandez-Carrillo *et al.*, 2019; Addison and Oommen, 2018); sin embargo, su rendimiento depende fuertemente de la polarización, el tipo de cobertura del suelo y las condiciones de humedad. Recientemente, se propuso el índice Normalized Radar Burn Ratio (NRBR) (Tarazona *et al.*, 2025), que integra de forma normalizada las respuestas complementarias de las polarizaciones VV (transmite vertical y recibe vertical) y VH (transmite vertical y recibe horizontal), mostrando resultados prometedores para la detección de cicatrices de incendio y una elevada correspondencia con índices ópticos como el dNBR.

Sobre esta base, el presente trabajo complementa las investigaciones previas de Tarazona *et al.* (2025) y Tarazona and Mantas (2026) evaluando el potencial del índice NRBR como variable de entrada para la segmentación de áreas quemadas mediante un modelo DL. El objetivo es analizar su capacidad de generalización espacial cuando el modelo se entrena en una única tesela y se aplica en una tesela independiente, comparando su desempeño con un enfoque multibanda basado en las 10 bandas de Sentinel-2 y con el índice óptico diferencial dNBR. A partir de datos y análisis previamente publicados, se examina hasta qué punto un índice radar monovariable como el NRBR puede ofrecer resultados robustos y transferibles bajo regímenes de fuego y coberturas contrastantes, destacando su potencial como alternativa o complemento operativo a los enfoques ópticos tradicionales en la cartografía de áreas quemadas.

2. AREA DE ESTUDIO Y DATOS

2.1. Área de estudio y datos de referencia

El estudio se centra en dos regiones (teselas) propensas a incendios claramente diferenciadas: California (sureste de los Estados Unidos de América) y Andalucía (sur de España) (Fig. 1). En ambos casos, se utilizaron teselas de una cuadrícula de 100 × 100 km para evaluar las predicciones de área quemada. La zona del sur de España es representada por bosques mediterráneos fuertemente afectados por grandes incendios. La zona californiana abarca ecosistemas típicos de chaparral y matorral, caracterizados por incendios forestales frecuentes de alta intensidad. Estas regiones difieren ligeramente en vegetación, clima y regímenes de fuego, lo que proporciona condiciones diferentes para evaluar el impacto de la estimación de áreas quemadas tanto con datos radar y ópticos. Para los datos de referencia se utilizaron los perímetros anuales de áreas quemadas obtenidos por la Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible-Junta de Andalucía y del California Department of Forestry and Fire Protection, rasterizados a 10 metros.

2.2. Datos Sentinel-2 y Sentinel-1

Los datos radar proceden de Sentinel-1, utilizando adquisiciones en modo Interferometric Wide Swath (IW) y formato Ground Range Detected procesadas en GEE. Se emplearon las polarizaciones VV y VH, integrando órbitas ascendentes y descendentes, con un preprocesado que incluyó eliminación de ruido térmico, calibración radiométrica y corrección geométrica.

Los datos ópticos proceden de Sentinel-2 (Copernicus) en Reflectancia de Superficie obtenidos de Google Earth Engine (GEE). La selección temporal se diseñó para maximizar el contraste inducido por el fuego, que normalmente ocurre durante el verano y se extiende hasta finales de año. En España, el periodo pre-incendio y post-incendio se definió entre el 1 de septiembre y el 30 de noviembre de 2020 y 2021 respectivamente. En California (USA), se utilizaron ventanas equivalentes entre el 15 de octubre y el 15 de diciembre de 2019 (pre-fuego) y 2020 (post-fuego). Se aplicó un enmascaramiento de nubes y cirros antes del cálculo de los índices espectrales. Estas mismas fechas fueron usadas para computar las imágenes radar.

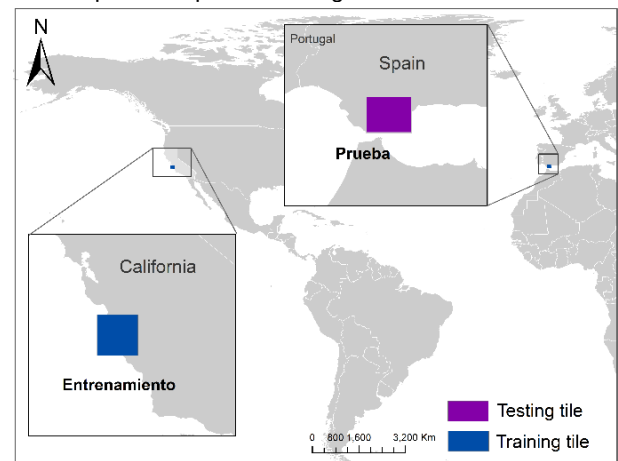


Figura 1. Área de estudio y las teselas (regiones) seleccionadas para el entrenamiento y prueba del modelo de DL. Los términos teselas y región son intercambiables, de modo que en algunas secciones del manuscrito se hace referencia a región como tesela.

3. METODOLOGIA

3.1. El índice Normalized Radar Burn Ratio

El NRBR (Ec. 1) es un índice basado en datos SAR de Sentinel-1 que mejora la detección de áreas quemadas mediante la integración de las respuestas complementarias de las polarizaciones VV y VH en banda C. Tras un incendio, la pérdida de estructura volumétrica reduce la retrodispersión en VH, mientras que la exposición de elementos verticales incrementa la señal en VV (Tarazona *et al.*, 2025, Fig. 2). El NRBR combina los cambios relativos pre- y post-incendio en una métrica normalizada que resalta las cicatrices de fuego con valores negativos y mantiene valores cercanos a cero o positivos en superficies no afectadas. Al basarse en relaciones temporales, el índice reduce parcialmente efectos topográficos y ruido speckle y, al ser independiente de la iluminación solar y la nubosidad,

constituye una alternativa robusta y complementaria a los índices ópticos para la cartografía de áreas quemadas.

$$NRBR = \frac{RBR_{VH} - RBR_{VV}}{RBR_{VH} + RBR_{VV}} \quad (1)$$

Donde, RBR_{VH} y RBR_{VV} corresponden al Radar Burn Ratio calculado para las polarizaciones VH y VV, respectivamente, en unidades de potencia. Los valores del NRBR (ver la Fig. 3) oscilan aproximadamente entre -1 y 1 .

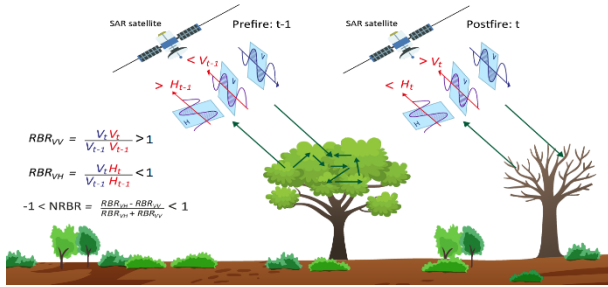


Figura 2. Esquema conceptual sobre el comportamiento de la retrodispersión de las polarizaciones VV y VH en la estructura de la vegetación en pre y post-incendio forestal. Adaptado de Tarazona and Mantas (2026).

3.2. El índice Normalized Burn Ratio

El NBR es un índice espectral ampliamente utilizado para la detección de áreas quemadas con datos ópticos de sensores como Sentinel-2, basado en el contraste entre el NIR y el SWIR. Su versión diferencial, el dNBR (Ec. 2 y Fig. 3), calculada como la diferencia entre el NBR post- y pre-incendio, permite aislar los cambios inducidos por el fuego.

$$dNBR = NBR_t - NBR_{t-1} \quad (2)$$

Donde t y $t-1$ representa post y pre-fuego respectivamente.

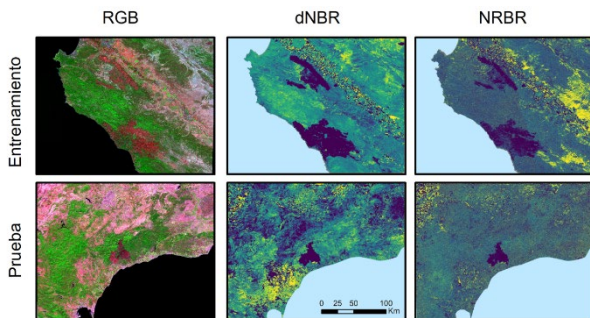


Figura 3. Composición de Sentinel-2 (SWIR, NIR, Red), dNBR y NRBR para áreas de entrenamiento y prueba. Segmentación de áreas quemadas

La segmentación de áreas quemadas se realizó mediante un enfoque de DL basado en la arquitectura U-Net, implementada a través del paquete scikit-eo (Tarazona *et al.*, 2024). El modelo fue entrenado utilizando una tesela en California y posteriormente se aplicó para estimar áreas quemadas en una tesela

independiente de España, lo que permitió evaluar su capacidad de generalización espacial.

3.3. Evaluación de métricas de exactitud

La evaluación de la segmentación de áreas quemadas se realizó utilizando el Error de Omisión (OE), el Error de Comisión (CE) y el Coeficiente Dice (CD). La métrica CD se empleó para evaluar la calidad de la segmentación, al ser robusto frente al desbalance de clases.

4. RESULTADOS Y DISCUSIONES

El modelo entrenado con las 10 bandas ópticas Sentinel-2 (RGB en Tabla 1) obtuvo el menor EC: 12.63% y el mayor valor CD: 87.52%, indicando una segmentación más equilibrada entre falsos positivos y falsos negativos. En cambio, el modelo basado en el índice óptico dNBR mostró un comportamiento inestable. Aunque su EO fue bajo de 7.08%, presentó una comisión extremadamente alta de 96.90% y un CD residual (6.05%), consistente con una marcada sobreestimación de áreas quemadas (Fig. 4). El modelo con el índice radar NRBR alcanzó un desempeño competitivo, un EO de 11.81%, EC de 17.56% y un CD de 83.51%, situándose como la mejor alternativa monovariable frente al dNBR y aproximándose al rendimiento del enfoque multibanda (RGB). En términos de coste computacional, dNBR redujo el tiempo de entrenamiento (3.9') frente al NRBR (5.1') y RGB (6.8'), aunque con pérdida severa de calidad de segmentación (i.e., alta comisión). Para aplicaciones a escala regional o global que prioricen tanto la precisión como la optimización del conjunto de variables de entrada, el enfoque NRBR ofrece el mejor equilibrio entre exactitud y eficiencia computacional, claramente.

Tabla 1. Métricas de la segmentación de áreas quemadas.

	RGB	dNBR	NRBR
EO	12.46	7.08	11.81
EC	12.63	96.90	17.56
CD	87.52	6.05	83.51
Tiempo (minutos)	6.8'	3.9'	5.1'

Estos resultados sugieren que, con entrenamiento limitado a una única tesela (región de California) y prueba en una tesela independiente (región del sur de España), los enfoques multiespectrales (RGB) y radar (NRBR) generalizan mejor que un índice óptico diferencial como el dNBR, cuyo rendimiento puede degradarse cuando el modelo aprende patrones poco transferibles y termina sobreprediciendo cicatrices de fuego. Este comportamiento contrasta con análisis a mayor escala en Portugal llevado a cabo por Tarazona and Mantas (2026), donde el diseño por teselas y la separación espacial entre entrenamiento y prueba permitió evaluar la transferencia bajo heterogeneidad ambiental y de coberturas, mostrando que el desempeño puede variar por región, tipo de cobertura y por escala de investigación. Además, nuestros hallazgos sobre el buen desempeño del NRBR puede estar reforzado por el uso combinado de órbitas ascendentes y descendentes de Sentinel-1 a diferencia del trabajo de Tarazona and

Mantas (2026) que solo usó la órbita ascendente de Sentinel-1, lo que incrementa la densidad temporal y estabiliza la señal frente a variabilidad de adquisición, apoyando su robustez como entrada única en segmentación de áreas quemadas.

Adicionalmente, las diferencias observadas en el rendimiento entre el índice radar NRBR y los índices ópticos pueden explicarse a partir de los mecanismos físicos que gobiernan cada señal. En el caso del NRBR, basado en datos SAR en banda C, la detección de áreas quemadas está controlada principalmente por cambios estructurales en la vegetación. Tras el fuego, la pérdida de dispersión volumétrica produce una disminución en la señal VH, mientras que la exposición de elementos verticales incrementa la retrodispersión en VV, generando un contraste consistente entre condiciones pre y post-incendio. Por el contrario, los índices ópticos como el dNBR dependen de cambios en la reflectancia en el NIR y SWIR, los cuales, además de estar asociados a la pérdida de biomasa y humedad, son altamente sensibles a la reflectancia del suelo desnudo, condiciones de iluminación y variabilidad fenológica. Esta naturaleza espectral introduce ambigüedad en escenarios heterogéneos, favoreciendo la sobreestimación observada en el dNBR. En este contexto, el NRBR ofrece una representación más directamente vinculada a la estructura física del dosel, lo que favorece una mayor estabilidad y transferibilidad espacial.

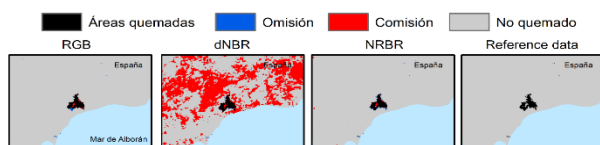


Figura 4. Estimaciones de áreas quemadas para diferentes variables de entrada en el Sur de España.

5. CONCLUSIONES

En conclusión, el mensaje principal es que el NRBR ofrece una vía monovariante sólida y transferible para detección de áreas quemadas por cuatro razones: i) trabaja bajo condiciones ópticas adversas, ii) poco influenciado por el tipo de cobertura, iii) menor costo computacional y iv) su alto grado de operabilidad.

El enfoque multibanda RGB maximiza ligeramente la exactitud, pero requiere más costo computacional y no opera bajo condiciones adversas. Finalmente, el rendimiento del dNBR es influenciado por el tipo de cobertura y composición (e.g., suelo desnudo), requiere

estrategias de entrenamiento más amplias (más regiones/teselas) para evitar sobreajuste espacial y mejorar generalización.

6. AGRADECIMIENTOS

El trabajo de Yonatan Tarazona Coronel fue financiado por la “Fundação para a Ciência e a Tecnologia” (FCT) – Portugal, a través de UI/BD/154831/2023 como parte de un proyecto de doctorado. Queremos agradecer a las sugerencias y comentarios de revisores anónimos que han mejorado el contenido del manuscrito.

7. REFERENCIAS

- Addison, P., and Oommen, T. Utilizing satellite radar remote sensing for burn severity estimation. *Int. J. Appl. Earth Observ. Geoinf.*, vol. 73, pp. 292–299, Dec. 2018.
- Caon, L., Vallejo, V.R., Ritsema, C. J., Geissen, V. (2014). Effects of wildfire on soil nutrients in Mediterranean ecosystems. *Earth-Science Reviews*, 139, 47-58.
- Fernandez-Carrillo, L. McCaw, and M. A. Tanase, Estimating prescribed fire impacts and post-fire tree survival in eucalyptus forests of western Australia with L-band SAR data. *Remote Sens. Environ.*, vol. 224, pp. 133–144, Apr. 2019.
- Mansoor, S., Farooq, I., Kachroo, M. M., Mahmoud, A. E. D., Fawzy, M., Popescu, S. M., Alyemeni, M. N., Sonne, C., Rinklebe, J., & Ahmad, P. (2022). Elevation in wildfire frequencies with respect to the climate change. *Journal of Environmental Management*, 301, 113769.
- Lutes, D.C., Keane, R.E., Caratti, J.F., Key, C.H., Benson, N.C., Sutherland, S., Gangi, L.H. (2006). FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System. USDA Forest Service- General Technical Report RMRS-GTR.
- Tarazona, Y., Tanase, M.A., Mantas, V.M. (2025). Normalized Radar Burn Ratio: A Case Study for Burned Area Mapping in Mediterranean Forests. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 22.
- Tarazona, Y., Mantas, M. (2026). Advancing burned area mapping using the Normalized Radar Burn Ratio (NRBR). *Remote Sensing Applications: Society and Environment*, In review.
- Tarazona, Y., Benitez-Paez, F., Nowosad, J., Drenkhan, F., and Timaná, M. (2024). scikit-eo: A Python package for Remote Sensing Data Analysis. *Journal of Open Source Software*, 9(99), 6692.