

SEP

POLIBOTÁNICA

ISSN 1405-2768

ISSN 2395-9525



Núm. 61

Ciencia y
Tecnología

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación

Enero 2026



Enero 2026

Núm. 61

POLIBOTÁNICA



PÁG.

CONTENIDO

- 1 La familia *Buxaceae* en México
The *Buxaceae* family in Mexico
Rafael Fernández N. | María de la Luz Arreguín Sánchez
- 23 Riqueza de epífitas vasculares en la reserva El Peñón, municipio de Valle de Bravo, Estado de México, México
Vascular epiphyte richness in The Peñón reserve, municipality of Valle de Bravo, Estado de México, Mexico
Ivonne Gomez | Bruno Téllez | Adolfo Espejo-Serna | Ana Rosa López-Ferrari
- 55 Variación de umbrales dnbr y rbr en la detección de incendios forestales en el área Iztaccíhuatl-Popocatepetl México
Variation of dnbr and rbr thresholds in forest fire detection in the Iztaccíhuatl-Popocatepetl area, Mexico
Ederson Steven Cobo Muelas | Pablito Marcelo López Serrano | Daniel José Vega Nieva | Jose Javier Corral Rivas | José López García | Lilia de Lourdes Manzo Delgado
- 75 Dinámica fenológica mensual de especies de bosque mixto.
Monthly phenological dynamics of mixed forest species.
Cynthia Judith Carranza Ojeda | Juan Antonio Reyes Agüero | Carlos Alfonso Muñoz Robles | Anuschka Van't Hooft | Jorge Alberto Flores Cano | José Villanueva Díaz
- 101 Servicios ecosistémicos de provisión en comunidades de pueblos Otomí y Matlazincas del Estado de México, México
Provision of ecosystem services in indigenous communities in the State of Mexico, Mexico
Laura White-Olascoaga | David García-Mondragón | Carmen Zepeda-Gómez
- 115 Comparación de tasas de respiración del suelo en ecosistemas agrícola, agostadero y urbano en una zona semiárida en Juárez, Chihuahua, México
Comparison of soil respiration rates in agricultural, rangeland, and urban ecosystems at semiarid areas in Juárez, Chihuahua, Mexico
Juan Pedro Flores Margez | Alejandra Valles Rodríguez | Pedro Osuna Avila | Dolores Adilene Garcia Gonzalez
- 133 Caracterización ecológica de la zona de proliferación del hongo blanco de pino (*Tricholoma mesoamericanum*) en “El Guajolote” Hidalgo, México
Ecological characterization of the fruiting area of the pine white mushroom (*Tricholoma mesoamericanum*) in “El Guajolote” Hidalgo, Mexico
Alvaro Alfonso Reyes Grimaldo | Ramón Razo Zárate | Oscar Arce Cervantes | Magdalena Martínez Reyes | Jesús Pérez Moreno | Rodrigo Rodríguez Laguna
- 145 Influencia de la variabilidad climática y del fenómeno ENOS en el crecimiento radial de *Pinus rzedowskii* y *P. martinezii* en Michoacán, México
Influence of climate variability and the ENSO phenomenon on the radial growth of *Pinus rzedowskii* and *P. martinezii* in Michoacán, Mexico
Ulises Manzanilla Quiñones | Patricia Delgado Valerio | Teodoro Carlón Allende
- 165 Caracteres morfométricos y patrones de germinación de semillas de *Pinus pseudostrobus* Lindl. de diferentes procedencias
Morphometric characteristics and germination patterns of *Pinus pseudostrobus* Lindl. seeds from different sources
Daniel Madrigal González | Nahum Modesto Sánchez-Vargas | Mariela Gómez-Romero | María Dolores Uribe-Salas | Alejandro Martínez-Palacios | Selene Ramos-Ortiz
- 181 Germinación de *Ormosia macrocalyx* Ducke (Fabaceae), árbol nativo en peligro de extinción
Germination of *Ormosia macrocalyx* Ducke (Fabaceae), an endangered native tree
Brenda Karina Pozo Gómez | Carolina Orantes García | Dulce María Pozo Gómez | Alma Gabriela Verdugo Valdez | María Silvia Sánchez Cortés | Rubén Antonio Moreno Moreno
- 193 Propagación in vitro de callos de morera (*Morus alba* L.) como alternativa alimenticia para larvas de gusanos de seda (*Bombyx mori*)
In vitro propagation of *Morus alba* L. calli as an alternative feed for silkworm (*Bombyx mori*) larvae
Alma Rosa Hernández Rojas | José Luis Rodríguez-de la O | Alejandro Rodríguez-Ortega | Elvis García-López | Manuel Hernández-Hernández | Jessica Lizbeth Sebastián-Nicolás | Rosita Deny Romero-Santos
- 205 Mejoras en un método comercial de extracción de ADN para obtener extractos de ácido nucleico de alta calidad a partir de yemas vegetativas de *Populus tremuloides* Michx.
Improvements to a commercial DNA extraction method for high-quality nucleic acid extractions from *Populus tremuloides* Michx. vegetative buds
Cecilia Gutierrez | Marcelo Barraza Salas | Ilga Mercedes Porth | Christian Wehenkel
- 221 Crecimiento de plántulas de *Laelia autumnalis* y *Encyclia cordigera* en función de la concentración de sacarosa y carbón activado.
Growth of *Laelia autumnalis* and *Encyclia cordigera* seedlings as a function of sucrose and activated charcoal concentration
Marcela Cabañas Rodríguez | María Andrade Rodríguez | Oscar Gabriel Villegas Torres | Iran Alia Tejacal | Porfirio Juarez López | José Antonio Chávez García
- 235 Dinámica fenologica mensual de especies de bosque mixto
Montly phenological dynamics of mixed forest species
Andrea Cecilia Acosta-Hernández | Eduardo Daniel Vivar Vivar | Marin Pompa-García

PÁG.

CONTENIDO

- 259 Efecto de hongos micorrízicos arbusculares sobre la supervivencia y el crecimiento de plantas de *Dalbergia congestiflora* propagadas in vitro y por semilla en condiciones de invernadero
Effect of arbuscular mycorrhizal fungi on the survival and growth of *Dalbergia congestiflora* plants propagated in vitro and from seed under greenhouse conditions
Enrique Ambríz | Carlos Juan Alvarado López | Yoshira López Antonio | Hebert Jair Barrales Cureño | Rafael Salgado Garciglia | Alejandra Hernández García
- 273 Crioconservación de explantes florales encapsulados de cacao (*Theobroma cacao* L.) mediante deshidratación y vitrificación
Cryopreservation of encapsulated floral explants of cacao (*Theobroma cacao* L.) by dehydration and vitrification
Eliud Rodríguez Olivera | Leobardo Iracheta Donjuan | José Luis Rodríguez de la O | Carlos Hugo Avendaño Arrazate
- 295 Análisis de la diversidad genética en cacao (*Theobroma cacao* L.) y pataxte (*T. bicolor* Humb. & Bonpl.) de los estados de Tabasco y Chiapas, México
Genetic diversity analysis in cocoa (*Theobroma cacao* L.) and pataxte (*T. bicolor* Humb. & Bonpl.) from Tabasco and Chiapas, Mexico
Fernanda Sarahi Hernández Montes | Guadalupe Concepción Rodríguez Castillejos | Guillermo Castañón Nájera | Octelina Ruiz Castillo | Christian Asur Christian Asur | Hernán Wenceslao Araujo Torres | Régulo Ruíz Salazar
- 311 Respuesta morfogénica de *Agave angustifolia* al gradiente auxina-citocinina durante el desarrollo de embriones somáticos indirectos
Morphogenetic response of *Agave angustifolia* to the auxin-cytokinin gradient during the development of indirect somatic embryos
Jesús-Ignacio Reyes-Díaz | Rosa María Nava-Becerril | Amaury-Martín Arzate-Fernández
- 329 Efecto del ácido salicílico en el incremento de biomasa y azúcares reductores en *Agave cupreata* y *Agave salmiana*
Effect of salicylic acid on increase of biomass and reducing sugars in *Agave cupreata* and *Agave salmiana*
Hilda Guadalupe GARCÍA NÚÑEZ | Amaury Martín Arzate-Fernández | Ana María Roque-Otero | Martín Rubí-Arriaga | Aurelio Domínguez-López
- 343 Contribución al conocimiento tradicional sobre el uso y manejo de los recursos vegetales en el municipio de Malinalco, Estado de México, México.
Contribution to traditional knowledge of plant resource use and management in Malinalco, State of Mexico, Mexico
Margarita Micaela Avila Uribe | Blanca Margarita Berdeja-Martínez | Ana María Mora-Rocha | Yajaira Cerón-Reyes | Karla Mariela Hernández-Sánchez | María Eugenia Ordorica Vargas | Lidia Cevallos-Villanueva
- 365 La agrobiodiversidad del agroecosistema traspatio como estrategia contra la pobreza extrema en Platón Sánchez, Veracruz, México
Agrobiodiversity in the backyard agroecosystem as a strategy against extreme poverty in Platon Sanchez, Veracruz, Mexico
Rubén Purroy-Vásquez | Gregorio Hernández-Salinas | Jorge Armida-Lozano | Alejandro Llaguno-Aguñaga | Karla Lissete Silva-Martínez | Nicolás Francisco Mateo-Díaz
- 385 Quelites entre cocineras tradicionales nahuas y totonacas de la Sierra Norte de Puebla, México
Quelites among nahua and totonac traditional cooks from the Northern Sierra of Puebla, Mexico
Victoria Ortiz-Trápala | Heike Vibrans | María Edelmira Linares-Mazari | Diego Flores-Sánchez
- 409 *Litsea glaucescens* y *Clinopodium macrostemon* recursos forestales no maderables en mercados tradicionales de los Valles Centrales de Oaxaca
Litsea glaucescens and *Clinopodium macrostemon* non-timber forest resources in traditional markets of the Central Valleys of Oaxaca
Domitila Jarquín-Rosales | Gisela Virginia Campos Angeles | Valentín José Reyes-Hernández | Salvador Lozano-Trejo | Juan José Alpuche-Osorno | Gerardo Rodríguez-Ortiz
- 427 Sistemas verticales rústicos para la producción de alimentos en espacios limitados: un aporte a la seguridad alimentaria familiar
Rustic vertical home gardens for food production in limited spaces: a contribution to household food security
Pablo Yax-Lopez | Kevin Manolo Noriega Elías | Jorge Rubén Sosof Vásquez
- 443 Orquídeas silvestres comercializadas en cinco mercados tradicionales de Oaxaca, México
Wild orchids sold in five traditional markets in Oaxaca, Mexico
María Hipólita Santos Escamilla | Gisela Virginia Campos Angeles | José Cruz Carrillo Rodríguez | Nancy Gabriela Molina Luna
- 457 Proceso artesanal de elaboración de jabón de corozo (*Attalea butyracea* (Mutis ex L.F.) Wess. Boer) en la región de la Chontalpa, Tabasco, México
Artisanal process of making corozo soap (*Attalea butyracea* (Mutis ex L.F.) Wess. Boer) in the Chontalpa region, Tabasco, Mexico
Elsa Chávez García
- 479 La comercialización de plantas del bosque tropical caducifolio y su importancia cultural en el centro de México
The commercialization of tropical deciduous forest plants and their cultural importance in central Mexico
Ofelia Sotelo Caro | Alejandro Flores Palacios | Susana Valencia Díaz | David Osvaldo Salinas Sánchez | Rodolfo Figueroa Brito

POLIBOTÁNICA

Núm. 61

ISSN electrónico: 2395-9525

Enero 2026

Portada



Sistema de cultivo vertical integrado por módulos contenedores uniformes que albergan diversas especies herbáceas y foliares. La disposición estratificada optimiza el uso del espacio y favorece la eficiencia en la captación de luz, mientras que la heterogeneidad morfológica de las plantas evidencia la plasticidad fenotípica asociada a condiciones de cultivo intensivo en ambientes urbanos. Este sistema representa una forma de infraestructura verde orientada a la producción vegetal sustentable y a la mejora microclimática en entornos metropolitanos.

BA vertical cultivation system composed of uniform container modules housing a variety of herbaceous and foliage plant species. The stratified arrangement optimizes space use and enhances light capture efficiency, while the morphological heterogeneity of the plants reflects phenotypic plasticity under intensive cultivation conditions in urban environments. This system represents a form of green infrastructure aimed at sustainable plant production and microclimate improvement in metropolitan settings.

por/by
Rafael Fernández Nava

REVISTA BOTÁNICA INTERNACIONAL DEL INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

EDITOR EN JEFE

Rafael Fernández Nava

EDITORA ASOCIADA

María de la Luz Arreguín Sánchez

COMITÉ EDITORIAL INTERNACIONAL

Christiane Anderson
University of Michigan
Ann Arbor, Michigan, US

Delia Fernández González
Universidad de León
León, España

Heike Vibrans
Colegio de Postgraduados
Estado de México, México

José Angel Villarreal Quintanilla
Universidad Autónoma Agraria Antonio Narro
Saltillo, Coahuila, México

Hugo Cota Sánchez
University of Saskatchewan
Saskatoon, Saskatchewan, Canada

Luis Gerardo Zepeda Vallejo
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México

Fernando Chiang Cabrera
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

Claude Sastre
Muséum National d'Histoire Naturelle
Paris, Francia

Thomas F. Daniel
California Academy of Sciences
San Francisco, California, US

Mauricio Velayos Rodríguez
Real Jardín Botánico
Madrid, España

Francisco de Asis Dos Santos
Universidade Estadual de Feira de Santana
Feira de Santana, Brasil

Noemí Waksman de Torres
Universidad Autónoma de Nuevo León
Monterrey, NL, México

Carlos Fabián Vargas Mendoza
Instituto Politécnico Nacional
Ciudad de México, México

Julieta Carranza Velázquez
Universidad de Costa Rica
San Pedro, Costa Rica

José Luis Godínez Ortega
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

Tom Wendt
University of Texas
Austin, Texas, US

José Manuel Rico Ordaz
Universidad de Oviedo
Oviedo, España

Edith V. Gómez Sosa
Instituto de Botánica Darwinion
Buenos Aires, Argentina

Edith V. Gómez Sosa
Instituto de Botánica Darwinion
Buenos Aires, Argentina

Dr. Juan Ramón Zapata Morales
Universidad de Guanajuato
Guanajuato, México

Jorge Llorente Bousquets
Universidad Nacional Autónoma de México
Ciudad de México, México

DISEÑO Y FORMACIÓN ELECTRÓNICA

Luz Elena Tejeda Hernández

OPEN JOURNAL SYSTEM Y TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN

Pedro Aráoz Palomino

POLIBOTÁNICA, revista botánica internacional del Instituto Politécnico Nacional, incluye exclusivamente artículos que representen los resultados de investigaciones originales en el área. Tiene una periodicidad de dos números al año, con distribución y Comité Editorial Internacional.

Todos los artículos enviados a la revista para su posible publicación son sometidos por lo menos a un par de árbitros, reconocidos especialistas nacionales o internacionales que los revisan y evalúan y son los que finalmente recomiendan la pertinencia o no de la publicación del artículo, cabe destacar que este es el medio con que contamos para cuidar el nivel y la calidad de los trabajos publicados.

INSTRUCCIONES A LOS AUTORES PARA LA PUBLICACIÓN DE TRABAJOS

Se aceptarán aquellos originales que se ajusten a las prescripciones siguientes:

POLIBOTÁNICA incluye exclusivamente artículos que representen los resultados de investigaciones originales que no hayan sido publicados.

1. El autor deberá anexar una carta membretada y firmada dirigida al Editor, donde se presente el manuscrito, así como la indicación de que el trabajo es original e inédito, ya que no se aceptan trabajos publicados o presentados anterior o simultáneamente en otra revista, circunstancia que el autor(es) deberá declarar expresamente en la carta de presentación de su artículo.
2. Al quedar aceptado un trabajo, su autor no podrá ya enviarlo a ninguna otra revista nacional o extranjera.
3. Los artículos deberán estar escritos en español, inglés, francés o portugués. En el caso de estar escritos en otros idiomas diferentes al español, deberá incluirse un amplio resumen en este idioma.
4. Como parte de los requisitos del CONACYT, POLIBOTÁNICA ahora usa la plataforma del Open Journal System (OJS); para la gestión de los artículos sometidos a la misma. Así que le solicitamos de la manera más atenta sea tan amable de registrarse y enviar su artículo en la siguiente liga: www.polibotanica.mx/ojs/index.php/polibotanica
 - a) cargar el trabajo en archivo electrónico de office-word, no hay un máximo de páginas con las siguientes características:
 - b) en páginas tamaño carta, letra times new roman 12 puntos a doble espacio y 2 cm por margen
5. Las figuras, imágenes, gráficas del trabajo deben estar incluidas en el documento de Word original:
 - a) en formato jpg
 - b) con una resolución mínima de 300 dpi y un tamaño mínimo de 140 mm de ancho
 - c) las letras deben estar perfectamente legibles y contrastadas
6. Todo trabajo deberá ir encabezado por:
 - a) Un título tanto en español como en inglés que exprese claramente el problema a que se refiere. El formato para el título es: negritas, tamaño 14 y centrado;
 - b) El nombre del autor o autores, con sus iniciales correspondientes, sin expresión de títulos o grados académicos. El formato para los autores es: alineados a la izquierda, cada uno en un párrafo distinto y tamaño 12. Cada autor debe tener un número en formato superíndice indicando a qué afiliación pertenece;
 - c) La designación del laboratorio e institución donde se realizó el trabajo. La(s) afiliación(es) debe(n) estar abajo del grupo de autores. Cada afiliación deberá estar en un párrafo y tamaño

12. Al inicio de cada afiliación estará el número en superíndice que lo relaciona con uno o más autor/es.

d) El autor para correspondencia deberá estar en el siguiente párrafo, alineado a la izquierda, tamaño 12.

7. Todo trabajo deberá estar formado por los siguientes capítulos:

a) RESUMEN y ABSTRACT. Palabras clave y Key Words. El resumen debe venir después de la afiliación de los autores, alineado a la izquierda, tamaño 12. La palabra “Resumen: / Abstract:” debe venir en negritas y con dos puntos. El texto del resumen debe empezar en el párrafo siguiente, tamaño 12 y justificado. El texto “Palabras clave / Key Words:” debe venir en negritas seguido de dos puntos. Cada una de las palabras clave deben estar separadas por coma o punto y coma, finalizadas por punto.

b) INTRODUCCIÓN y MÉTODOS empleados. Cuando se trate de técnicas o métodos ya conocidos, solamente se les mencionará por la cita de la publicación original en la que se dieron a conocer. El formato para todas las secciones en esta lista es: negritas, tamaño 16 y centrado.

c) RESULTADOS obtenidos. Presentación acompañada del número necesario de gráficas, tablas, figuras o diagramas de tamaño muy cercano al que tendrá su reproducción impresa (19 x 14 cm).

d) DISCUSIÓN concisa de los resultados obtenidos, limitada a lo que sea original y a otros datos relacionados directamente y que se consideren nuevos.

e) CONCLUSIONES.

ESPECIFICACIONES DE FORMATO PARA EL CUERPO DEL TRABAJO

1. Secciones/Subtítulos de párrafo: Fuente tamaño 16, centrado, en negritas, con la primera letra en mayúscula.
2. Subsecciones/Subtítulos de párrafo secundarios : Fuente tamaño 14, centrado, en negritas, con la primera letra en mayúscula. Cuando existan subsecciones de subsección formatear en tamaño 13 negrita y centrado.
3. Cuerpo del texto: Fuente tamaño 12, justificado. NO debe haber saltos de línea entre párrafos.
4. Las notas de pie de página deben estar al final de cada página, fuente tamaño 12 justificadas.
5. Cita textual con mas de tres líneas: Fuente tamaño 12, margen izquierdo de 4 cm.
6. Título de imágenes: Fuente tamaño 12, centrado y en negritas, separado por dos puntos de su descripción. Descripción de las imágenes: tamaño 12.
7. Notas al pie de las imágenes: Fuente tamaño 12 y centradas con respecto a la imagen, la primera letra debe estar en mayúsculas.
8. Imágenes: deben estar en el cuerpo del texto, insertadas en formato png o jpg, a por lo menos 300 dpi de resolución y centradas. Las imagenes deben estar en línea con el texto. Se consideran imágenes: gráficos, cuadros, fotografías, diagramas y, en algunos casos, tablas y ecuaciones.
9. Tablas de tipo texto: El título de las columnas de las tablas debe estar en negritas y los datos del cuerpo de la tabla con fuente normal. Los nombres científicos deben estar en *italicas*. Se recomienda utilizar las Tablas como imágenes, estas deberán de ir centradas (a por lo menos 300 dpi de resolución).
10. Notas al pie de la tabla: Fuente tamaño 12 y centradas con respecto a la tabla, la primera letra debe estar en mayúsculas.
11. Ecuaciones pueden estar en Mathtype 1 o en imagen. En este último caso, seguir instrucciones del punto 8.
12. Citas del tipo autor y año deben estar entre paréntesis, con el apellido del autor seguido por el año (Souza, 2007), primera letra en mayúscula.

- 8. LITERATURA CITADA,** Se tomara como base el Estilo APA para las Referencias Bibliográficas, formada por las referencias mencionadas en el texto del trabajo y en orden alfabético. Es obligatorio utilizar Mendeley® (software bibliográfico). El propósito de utilizar este tipo de software es asegurar que los datos contenidos en las referencias están correctamente estructurados y corresponden a las citas del cuerpo del texto.

ESTRUCTURA Y FORMATO DE LOS AGRADECIMIENTOS Y REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Los Agradecimientos deberán estar después de la última sección del cuerpo del texto. Esta información debe tener como título la palabra “Agradecimientos”, o su equivalente en otro idioma, en negritas, tamaño 12 y centrado. El texto de esta información debe estar en tamaño 12 justificado.
2. Las Referencias bibliográficas deben estar en orden alfabético sin salto de línea de párrafo, alineados a la izquierda, en tamaño 12.
3. Apéndices, anexos, glosarios y otros materiales deben incluirse después de las referencias bibliográficas. En caso de que estos materiales sean extensos deberán ser creados como archivos PDF.

9. REVISIÓN Y PUBLICACIÓN

Todos los artículos enviados a la revista para su posible publicación serán sometidos a una revisión “doble ciego”, se enviarán por lo menos a un par de árbitros, reconocidos especialistas nacionales o internacionales que los revisarán y evaluarán y serán los que finalmente recomienden la pertinencia o no de la publicación del artículo, cabe destacar que este es el medio con que contamos para cuidar el nivel y la calidad de los trabajos publicados.

Una vez aceptado el trabajo, se cobrarán al autor(es) \$299 por página más IVA, independientemente del número de fotografías que contenga.

PUBLICATION GUIDELINES

POLIBOTÁNICA, an international botanical journal supported by the National Polytechnic Institute, only publishes material resulting of original research in the botanic area. It has a periodicity of two issues per year with international distribution and an international Editorial Committee.

All articles submitted to POLIBOTÁNICA for publication are reviewed by at least a couple of referees. National or international recognized experts will evaluate all submitted materials in order to recommend the appropriateness or otherwise of a publication. Therefore, the quality of published papers in POLIBOTÁNICA is of the highest international standards.

FOR PUBLICATION OF ARTICLES

Originals that comply with the following requirements will be accepted:

1. POLIBOTÁNICA includes only items that represent the results of original research which have not been published. The author should attach an official and signed letter to Editor stating that the work is original and unpublished. We do not accept articles published or presented before or simultaneously in another journal, a fact that the author (s) must expressly declare in the letter.
2. When an article has been accepted, the author can no longer send it to a different national or foreign journal.
3. Articles should be written in Spanish, English, French or Portuguese. In the case of be written in

languages other than Spanish, it should include an abstract in English.

4. The article ought to be sent to the POLIBOTÁNICA's Open Journal System <http://www.polibotanica.mx/ojs> in an office-word file without a maximum number of pages with the following features:

a) on letter-size pages, Times New Roman font type, 12-point font size, double-spaced and 2 cm margin

5. The figures, images, graphics in the article must be attached as follows:

a) in jpg format

b) with a minimum resolution of 300 dpi and a minimum size of 140 mm wide

c) all characters must be legible and contrasted

6. All articles must include:

a) a title in both Spanish and English that clearly express the problem referred to. The format for this section is: bold, font size 14 and centered.;

b) the name of the author or authors, with their initials, no titles and no academic degrees. The format for this section is: font size 12, aligned to the left, each name in a different paragraph but without spaces in-between and a superscript number indicating the affiliation;

c) complete affiliations of all authors (including laboratory or research institution). The format for this section is: font size 12, aligned to the left, each name in a different paragraph but without spaces in-between and a superscript number at the beginning of the affiliation;

d) correspondence author should be in the next paragraph, font size 12 and aligned to the left.

7. All work should be composed of the following chapters:

a) RESUMEN and ABSTRACT. Palabras clave y Key Words. The format for this section is: bold, font size 12 and centered. Both words (RESUMEN: and ABSTRACT:) must include a colon, be in bold and aligned to the left. The body of the abstract must be justified and in font size 12. Both palabras clave: and keywords: must include a colon, be in bold and aligned to the left. Keywords must be separated by a comma or semicolon, must be justified and in font size 12.

b) INTRODUCTION y METHODS. In the case of techniques or methods that are already known, they were mentioned only by appointment of the original publication in which they were released.

c) RESULTS. Accompanied with presentation of the required number of graphs, tables, figures or diagrams very close to the size which will be printed (19 x 14 cm).

d) DISCUSSION. A concise discussion of the results obtained, limited to what is original and other related directly and considered new data.

e) CONCLUSIONS. The format for sections Introduction, Results, Discussion and Conclusions is: bold, font size 16 and centered.

FORMAT SPECIFICATIONS FOR THE BODY OF WORK

1. Sections: Font size 16, centered, bold, with the first letter capitalized.
2. Subsections / Secondary Subtitles: Font size 14, centered, bold, with the first letter capitalized. When there are second grade subsections format in size 13 bold and centered.
3. Body: Font size 12, justified. There should NOT be line breaks between paragraphs.
4. Footnotes should be at the bottom of each page, font size 12 and justified.
5. Textual quotation with more than three lines: Source size 12, left margin of 4 cm.
6. Image Title: Font size 12, centered and bold, separated by two points from its description. Description of the images: size 12.
7. Images Footnotes: Font size 12 and centered with respect to the image, the first letter must be in capital letters.
8. Images: must be in the body of the text, inserted in png or jpg format, at least 300 dpi resolution and centered. Images should be in line with the text. Graphs, charts, photographs, diagrams and, in some cases, tables and equations are considered images.
9. Text Tables: Only The title of the columns of the tables must be in bold. Scientific names must be in italics. It is recommended to use the Tables as images, they should be centered (at least 300 dpi resolution).
10. Footnotes: Font size 12 and centered with respect to the table, the first letter must be in upper case.
11. Equations can be in Mathtype 1 or in image. In the latter case, follow the instructions in point 8.
12. Quotations of the author and year type must be in parentheses, with the author's last name followed by the year (Souza, 2007), first letter in capital letters.

8. LITERATURE CITED. All references must be cited using the APA stile. POLIBOTÁNICA requires the use of Mendeley® (free reference manager) for the entire bibliography.

STRUCTURE AND FORMAT OF ACKNOWLEDGMENTS AND BIBLIOGRAPHICAL REFERENCES

1. Acknowledgments must be after the last section of the body of the text. This information should be titled the word "Acknowledgments", or its equivalent in another language, in bold, size 12 and centered. The text of this information must be in size 12 justified.
2. Bibliographical references should be in alphabetical order without paragraph line jump, aligned to the left, in size 12.
3. Appendices, annexes, glossaries and other materials should be included after the bibliographic references. If these materials are extensive they should be created as PDF files.

9. REVIEW AND PUBLICATION

All articles submitted to the journal for publication will undergo a review "double-blind", they will be sent at least a couple of referees, recognized national or international experts that reviewed and evaluated and will be finally recommended the relevance or the publication of the article, it is noteworthy that this is the means that we have to take care of the level and quality of published articles.

Once accepted the article, the author will be charged \$15 USD per text page, regardless of how many pictures it contains.

Toda correspondencia relacionada con la revista deberá ser dirigida a:

Dr. Rafael Fernández Nava
Editor en Jefe de

POLIBOTÁNICA

Departamento de Botánica
Escuela Nacional de Ciencias Biológicas, Instituto Politécnico Nacional
Apdo. Postal 17-564, CP 11410, Ciudad de México

Correo electrónico:
polibotanica@gmail.com
rfernand@ipn.mx

Dirección Web
http://www.polibotanica.mx

POLIBOTÁNICA es una revista indexada en:

CRMICYT - Sistema de Clasificación de Revistas Mexicanas de Ciencia y Tecnología

SciELO - Scientific Electronic Library Online.

Google Académico - Google Scholar.

DOAJ, Directorio de Revistas de Acceso Público.

Dialnet portal de difusión de la producción científica hispana.

REDIB Red Iberoamericana de Innovación y Conocimiento Científico.

LATINDEX, Sistema regional de información en línea para revistas científicas de América Latina, el Caribe, España y Portugal.

PERIODICA, Índice de Revistas Latinoamericanas en Ciencias.



**Ciencia y
Tecnología**

Secretaría de Ciencia, Humanidades,
Tecnología e Innovación



INSTITUTO POLITÉCNICO NACIONAL

Director General: *Dr. Arturo Reyes Sandoval*

Secretario General: *M. en C. Ismael Jaidar Monter*

Secretario Académico: *M. en E.N.A. María Isabel Rojas Ruíz*

Secretario de Innovación e Integración Social: *M.C.E. Yessica Gasca Castillo*

Secretario de Investigación y Posgrado: *Dra. Martha Leticia Vázquez González*

Secretario de Servicios Educativos: *Dr. Marco Antonio Sosa Palacios*

Secretario de Administración: *M. en C. Javier Tapia Santoyo*

Director de Educación Superior: *Lic. Tomás Huerta Hernández*

ESCUELA NACIONAL DE CIENCIAS BIOLÓGICAS

Director:

Dr. Isaac Juan Luna Romero

Subdirectora Académica:

Biol. Elizabeth Guarneros Banuelos

Jefe de la Sección de Estudios de Posgrado e Investigación:

Lic. Edgar Gregorio Cárcamo Villalobos

Subdirector de Servicios Educativos e Integración Social:

Biól. Gonzalo Galindo BecerriL

POLIBOTÁNICA, Año 30, No. 61, enero 2026, es una publicación semestral editada por el Instituto Politécnico Nacional, a través de la Escuela Nacional de Ciencias Biológicas. Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas C.P. 11340 Delegación Miguel Hidalgo México, D.F. Teléfono 57296000 ext. 62331. <http://www.herbario.encb.ipn.mx/>, Editor responsable: Rafael Fernández Nava. Reserva de Derechos al Uso Exclusivo del Título No. 04-2015-011309001300-203. ISSN impreso: 1405-2768, ISSN digital: 2395-9525, ambos otorgados por el Instituto Nacional del Derecho de Autor. Responsable de la última actualización de este número, Unidad de informática de la ENCB del IPN, Rafael Fernández Nava, Unidad Profesional Lázaro Cárdenas, Prolongación de Carpio y Plan de Ayala s/n, Col. Santo Tomas CP 11340 Delegación Miguel Hidalgo México, D.F.

Las opiniones expresadas por los autores no necesariamente reflejan la postura del editor de la publicación.



Polibotánica

ISSN electrónico: 2395-9525

polibotanica@gmail.com

Instituto Politécnico Nacional

México

<http://www.polibotanica.mx>

VARIACIÓN DE UMBRALES DNBR Y RBR EN LA DETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ÁREA IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL MÉXICO

VARIATION OF DNBR AND RBR THRESHOLDS IN FOREST FIRE DETECTION IN THE IZTACCIHUATL-POPOCATEPETL AREA, MEXICO

Cobo Muelas, E.S., P.M. López Serrano, D.J. Vega Nieva, J.J. Corral Rivas, J. López García, L.L. Manzo Delgado

VARIACIÓN DE UMBRALES DNBR Y RBR EN LA DETECCIÓN DE INCENDIOS FORESTALES EN EL ÁREA IZTACCÍHUATL-POPOCATÉPETL MÉXICO

VARIATION OF DNBR AND RBR THRESHOLDS IN FOREST FIRE DETECTION IN THE IZTACCIHUATL-POPOCATEPETL AREA, MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 61: 55-73 México. Enero 2026

DOI: 10.18387/polibotanica.61.3



Este es un artículo de acceso abierto bajo la licencia Creative Commons 4.0 Atribución-No Comercial (CC BY-NC 4.0 Internacional).

Variación de umbrales dnbr y rbr en la detección de incendios forestales en el área Iztaccíhuatl-Popocatepetl México

Variation of dnbr and rbr thresholds in forest fire detection in the Iztaccihuatl-Popocatepetl area, Mexico

Ederson Steven Cobo Muelas,
Pablito Marcelo López
Serrano, Daniel José Vega
Nieva, Jose Javier Corral
Rivas, José López García, Lilia
de Lourdes Manzo Delgado

VARIACIÓN DE UMBRALES
DNBR Y RBR EN LA
DETECCIÓN DE
INCENDIOS FORESTALES
EN EL ÁREA
IZTACCÍHUATL-
POPOCATÉPETL MÉXICO

VARIATION OF DNBR AND
RBR THRESHOLDS IN
FOREST FIRE DETECTION
IN THE IZTACCÍHUATL-
POPOCATEPETL AREA,
MEXICO

POLIBOTÁNICA

Instituto Politécnico Nacional

Núm. 61: 55-73. Enero 2026

DOI:
10.18387/polibotanica.61.3

Ederson Steven Cobo-Muelas

Programa Institucional de Doctorado en Ciencias Agropecuarias y Forestales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan, Valle del Sur, 34120 Durango, México

Pablito Marcelo López-Serrano / p_lopez@ujed.mx 

Daniel José Vega-Nieva

José Javier Corral-Rivas

Facultad de Ciencias Forestales y Ambientales, Universidad Juárez del Estado de Durango. Río Papaloapan y Boulevard Durango. Col. Valle del Sur C.P. 34120. Victoria de Durango, Durango. México

José López-García

Lilia de Lourdes Manzo-Delgado

Instituto de Geografía, Universidad Autónoma Nacional de México. Circuito de la Investigación Científica. Coyoacán. C.P. 04510 Ciudad de México, México

RESUMEN Los incendios forestales son perturbaciones que influyen en la composición, estructura y funcionamiento de los ecosistemas, forman parte de ciclos ecológicos cuya frecuencia y severidad pueden variar anualmente. El uso de sensores remotos e índices espectrales permite analizar la dinámica de los incendios a través de los índices NBR (Índice Normalizado de Quemadas), dNBR (Índice Normalizado de Quemadas Diferenciado) y índice RBR (Índice Normalizado de Quemadas Relativizado). En este contexto, el objetivo del estudio fue determinar y analizar las variaciones espaciotemporales de umbrales dNBR y RBR para detectar áreas afectadas por incendios en el área natural Iztaccíhuatl-Popocatepetl para el periodo 2000 a 2012. Se utilizaron compuestos anuales de imágenes Landsat con percentil 10. Se calculó el índice RBR y dNBR a partir del NBR, los cuales permiten identificar áreas forestales afectadas por incendios. Se determinó la concordancia (K) entre áreas quemadas (AQ) y no quemadas (NOQ). Se ajustó un modelo lineal para el índice espectral con mejores métricas. Los resultados mostraron que los umbrales RBR se encuentran en un rango de 50 a 100 ($k=0.71-0.88$), mientras que los umbrales dNBR están en un rango de 50 a 130 ($k=0.59-0.83$). El modelo lineal explicó el 80% con un RMSE de 7.5 que representa la varianza total. Los resultados evidencian que el índice RBR ofrece una mayor precisión y consistencia que el dNBR para mapear áreas quemadas anuales, al presentar mayores valores de concordancia. La precisión y variación de los umbrales evidencia la importancia de incorporar otras variables explicativas, como factores climáticos y topográficos, que permitan fortalecer los análisis de en estudios multitemporales.

Palabras clave: incendios forestales, índices espectrales, coeficiente Kappa, umbral, Landsat.

ABSTRACT: Wildfires are disturbances that influence the composition, structure, and functioning of ecosystems, forming part of ecological cycles whose frequency and severity can vary annually. The use of remote sensors and spectral indices enables the analysis of wildfire dynamics through the Normalized Burn Ratio (NBR), Delta Normalized Burn Ratio (dNBR), and Relative Burn Ratio (RBR). In this context, the aim of the study was to determine and analyze the spatiotemporal variations of dNBR and RBR thresholds to detect areas affected by wildfires in the Iztaccihuatl-Popocatepetl natural area for the period 2000–2012. Annual Landsat image composites using the 10th percentile were utilized. The RBR and dNBR indices were derived from NBR, allowing the identification of forested areas affected by fires. Concordance (K) was calculated between burned (AQ) and unburned (NOQ) areas. A linear model was fitted for the spectral index with the best metrics. The results showed that RBR thresholds ranged from 50 to 100 ($K = 0.71\text{--}0.88$), while dNBR thresholds ranged from 50 to 130 ($K = 0.59\text{--}0.83$). These findings demonstrate that the RBR index provides higher accuracy and consistency than dNBR for annual burned-area mapping, as reflected by higher agreement values. The observed precision and variability in thresholds highlight the importance of incorporating additional explanatory variables, such as topographic and climatic factors, to strengthen multitemporal fire detection analyses.

Key words: Forest fires, Spectral indices, Kappa coefficient, Threshold, Landsat.

INTRODUCCIÓN

Los incendios forestales son un fenómeno recurrente a nivel mundial desde hace millones de años, provocados originalmente por causas naturales, como las descargas eléctricas, que todavía representan hasta el 50 % en determinadas regiones (Balch *et al.*, 2017). Sin embargo, en las últimas décadas se han visto intensificados por actividades antropogénicas, como la agricultura, la tala, los incendios intencionados y la expansión urbana. Estos eventos han actuado como un factor de perturbación frecuente en ecosistemas forestales, influyendo significativamente en su composición, estructura, dinámica y funcionamiento (Gallegos Rodríguez *et al.*, 2014; Kraus *et al.*, 2022). No obstante, en algunos ecosistemas como son los bosques templados los incendios forman parte integral del ciclo biológico que impacta directamente en la sucesión ecológica y el desarrollo de especies pirófitas (Nolan *et al.*, 2021; Bassaber-Zuñiga *et al.*, 2024).

Diversos estudios destacan la degradación de la cobertura vegetal por causas antrópicas, como cambios de uso de suelo, pero también señalan un deterioro asociado a la intensificación de sequías, fenómeno de El Niño y a la incidencia de incendios forestales, factores que disminuyen el vigor de la vegetación (Zuluaga Gómez *et al.*, 2021). De acuerdo con Jones *et al.* (2022), la superficie de cobertura natural afectada por incendios oscila entre 3 y 5 millones de kilómetros cuadrados anuales. Estos cambios contribuyen a crear condiciones favorables para incendios más frecuentes y de mayor extensión generando graves impactos ambientales como alta mortalidad de especies, aumento de la erosión y de emisiones de CO_2 (Van Mantgem *et al.*, 2018; Neger *et al.*, 2022; Cisneros-Vaca *et al.*, 2023; Gajendiran *et al.*, 2024). En este sentido, las características ambientales de ciertas regiones influyen en la magnitud de los incendios, ya que algunos ecosistemas son más susceptibles a incendiarse (Smichowski *et al.*, 2022), por lo tanto, es importante conocer la dinámica espacio-temporal de incendios anuales en ciertas regiones y su detección a través de imágenes satelitales e índices espectrales.

Por otro lado, el uso de los sensores remotos ha permitido evidenciar de manera efectiva la distribución e impacto de los incendios forestales (Barmpoutis *et al.*, 2020; Manzo-Delgado & López-García, 2020). La combinación de imágenes satelitales de alta resolución y datos de campo, facilitan una mejor comprensión de la distribución y ocurrencia espacial de los incendios en ecosistemas, como se ha documentado en España y México (Zúñiga-Vásquez *et al.*, 2017; Fernández-García *et al.*, 2018). Los datos capturados por los sensores remotos son procesados mediante algoritmos aplicados a las imágenes satelitales de diferente temporalidad, lo que permite identificar y evaluar el impacto del fuego en las coberturas vegetales (Chuvienco *et al.*,

2005; Nolè A *et al.*, 2022; Sánchez *et al.*, 2023). Dichos procesos, son realizados con índices espectrales de vegetación, que son ampliamente utilizados para estudiar diversos aspectos, principalmente en relación con el estado de las plantas y respuesta a perturbaciones, ya que se basan en la interpretación de la firma espectral de los objetos en la superficie terrestre los cuales interactúan con la radiación solar (Vargas-Sanabria & Campos-Vargas, 2020).

La respuesta espectral de la vegetación antes y posterior a un incendio, evidencia el efecto del fuego en las hojas, ramas y troncos, permitiendo así la detección de áreas quemadas con índices espectrales (Manzo-Delgado & López-García, 2020). Entre los índices más utilizados para detectar y evaluar áreas quemadas se encuentran el NBR (Índice Normalizado de Quemadas), dNBR (Índice Normalizado de Quemadas Diferenciado) y índice RBR (Índice Normalizado de Quemadas Relativizado), los cuales han demostrado buenos resultados en la precisión al evaluar áreas quemadas en ecosistemas forestales mediante umbrales, los cuales son un valor específico que clasifican las áreas quemadas (Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). Se ha reportado que estos índices, comparados con otros índices como el NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), tienen una mayor confiabilidad para detectar incendios. Esto se debe a que se utiliza una combinación de bandas del NIR (Infrarrojo Cercano) y SWIR (Infrarrojo de Onda Corta), que tienen mayor sensibilidad al fuego, que los índices basados en bandas NIR y Roja (Vlassova *et al.*, 2014). Como resultado, presentan una mejor respuesta espectral en términos de separabilidad de áreas quemadas (Chuvienco *et al.*, 2019). Sin embargo, es importante destacar que no existe un consenso claro entre los trabajos realizados sobre las debilidades y fortalezas específicas de los índices derivados del NBR (RBR, dNBR y el dNBR Relativizado [RdNBR]), su eficacia varía en relación con la severidad, el tipo de cobertura, la temporalidad y sobre todo con las condiciones climáticas (Barmpoutis *et al.*, 2020).

En algunos estudios, se han encontrado que las fluctuaciones en la precisión, coeficiente Kappa (K) y los respectivos umbrales, están relacionadas con el tipo de cobertura vegetal afectada y el clima después de un incendio, lo que ocasiona la regeneración de ciertas especies (Fornacca *et al.*, 2018; Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). Sin embargo, los valores de los índices espectrales también dependen del tiempo transcurrido entre la ocurrencia del fuego y la adquisición de las imágenes satelitales, ya que la reflectancia varía conforme avanza la regeneración de la vegetación y se van reduciendo las evidencias de la quema (Key & Benson, 2006; French *et al.*, 2008). Aunque la mayoría de estudios sobre detección de incendios se enfocan en análisis específicos o estacionales, existen investigaciones que utilizan series temporales anuales, aunque son todavía escasas. Por ejemplo, un estudio en la sabana del sur de Burkina Faso realizó un análisis de áreas quemadas utilizando imágenes Landsat e índices espectrales entre el 2000 y 2016, evidenciando la viabilidad del monitoreo anual de incendios (Liu *et al.*, 2021).

En este sentido es importante evaluar como varían anualmente los umbrales obtenidos con los índices RBR y dNBR, ya que estas variaciones influyen en la delimitación y precisión de detección de incendios forestales. La comparación entre ambos índices permite identificar cual ofrece mayor confiabilidad y precisión para representar la extensión de áreas afectadas anuales, como un método importante para una gestión más efectiva en la respuesta a los incendios forestales. Para reducir la influencia de la variabilidad temporal y de valores atípicos en los datos, esta investigación utilizó el percentil 10 en la descarga de las imágenes satelitales, lo que permite trabajar con los valores más bajos y representativos de cada año, minimizando el efecto de nubes, sombras o reflectancia extrema, y enfocándose en la condición mínima observada de la vegetación, relevante para la evaluación de incendios anuales. En este contexto, el presente trabajo tiene como objetivo evaluar cómo cambian los umbrales de dNBR y RBR a lo largo del tiempo y del espacio, utilizando datos de los sensores Landsat 5 y 7 entre el periodo 2000 y 2012 en el Área Natural Protegida Iztaccíhuatl-Popocatepetl y zonas adyacentes. Enfocándose en la detección anual de áreas quemadas, lo que permite construir series temporales suficientemente largas para analizar patrones representativos de los eventos de incendio a lo largo de los años, en una zona que combina bosques de coníferas, encinos y praderas de alta montaña, ofrece un escenario representativo para analizar la dinámica de los incendios forestales en distintos tipos de cobertura y condiciones ecológicas.

MATERIALES Y METODOS

Área de estudio

El área de estudio se localiza en el Eje Neovolcánico Transversal, específicamente en la zona de los volcanes Iztaccíhuatl y Popocatepetl al sureste de la Ciudad de México (López-García, 2019). Esta región se ubica en la confluencia de los estados de México, Morelos, Puebla y Tlaxcala (Figura 1). El área en estudio abarca el Área Natural Protegida (ANP) Iztaccíhuatl-Popocatepetl y áreas adyacentes, con una superficie total de 153,394 ha, dentro de la cual se evaluaron diferentes incendios ocurridos entre los años 2000 y 2012. Este periodo fue seleccionado para generar una serie histórica que permitiera analizar, a escala anual, las variaciones de los umbrales de RBR y dNBR en la delimitación de áreas quemadas, asegurando un número suficiente de eventos representativos para estudiar los cambios temporales consistentes en la zona.

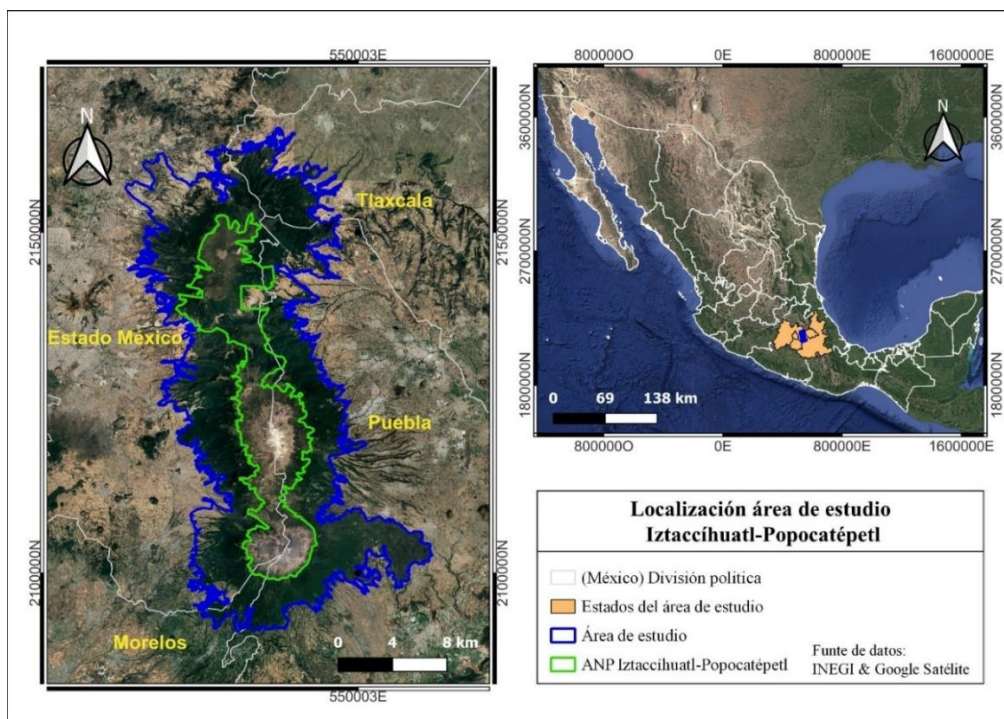


Figure 1. Location of the Iztaccíhuatl-Popocatepetl study area.

Figura 1. Localización área de estudio Iztaccíhuatl-Popocatepetl.

Las características ecológicas del área de estudio donde se encuentran los volcanes Iztaccíhuatl-Popocatepetl, incluye una gran diversidad de climas y vegetación, en donde alberga ecosistemas de alta montaña de tipo templado subhúmedo, con un rango altitudinal que oscila entre los 2589 a 5454 msnm, con predominancia de bosques de coníferas y encinos, así como pastizales y matorrales subalpinos, que hacen parte de las 55 especies de pinos y 138 de encinos del país (Arriola Padilla *et al.*, 2014; López-García, 2019). Entre las comunidades vegetales que predominan esta área, destacan los bosques de pino, pino-encino, oyamel, páramo de altura y el zacatonal (Luna-Rosales *et al.*, 2007). El área en estudio incluye al parque nacional Iztaccíhuatl-Popocatepetl y presenta una variada tenencia de tierras que incluye ejidos, comunidades, propiedades privadas y terrenos federales. Además, constituye el remanente más importante de bosques de coníferas y praderas de alta montaña en el centro de México, lo que resalta su importancia ecológica y su valor para la conservación (Almeida-Leñero *et al.*, 2015; Quiroz-Ibarra *et al.*, 2020). Estas características hacen que el área sea un modelo representativo para

estudiar los incendios forestales en un entorno con diversidad vegetal y tenencia de tierras, permitiendo analizar de manera anual e histórica la variación de umbrales en incendios forestales bajo estas condiciones.

Datos e imágenes satelitales

Los polígonos de entrenamiento de áreas quemadas para este estudio fueron recopilados de García (2019). Sin embargo, estos polígonos no se emplearon directamente; previamente fueron filtrados y validados mediante imágenes satelitales en color RGB, el índice BAI (Índice de Área Quemada), el NBR y los puntos de calor MODIS C6.1. Este procedimiento permitió delimitar con precisión las áreas que efectivamente correspondían a incendios y descartar aquellas que no presentaban evidencia de quema, optimizando así la calidad de los polígonos utilizados en los análisis posteriores. Debido a que la cantidad de polígonos de entrenamiento de áreas quemadas variaron entre los años y con ello la superficie, se estableció un criterio anual para estandarizar los análisis: para cada año se definieron dos categorías con superficie equivalente entre área quemada (AQ) y área no quemada (NOQ). Esta división equitativa permitió comparar estadísticamente de manera consistente las condiciones de cada año y analizar las diferencias en los umbrales espectrales de las zonas afectadas por incendios.

Table 1. Burned area polygons analyzed within the study area.
Tabla 1. Polígonos analizados de área quemada en el área de estudio.

Id	Año	Superficie (ha)	Número de Polígonos
1	2000	3,548	56
2	2001	5,063	43
3	2002	1,816	28
4	2003	5,233	53
5	2005	2,382	42
6	2006	7,318	50
7	2008	448	9
8	2009	10,979	63
9	2011	8,123	68
10	2012	263	18

Se utilizaron compuestos anuales de imágenes de los satélites Landsat 5 y 7 con una resolución espacial de 30 metros para los respectivos años de estudio. Descargadas a través de la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando la colección 2, debido a que incluye corrección atmosférica y mejores datos de reflectancia, específicamente las series LANDSAT/LT05/C02/T1_L2 y LANDSAT/LE07/C02/T1_L2. A partir de estas colecciones, se descargaron y procesaron compuestos anuales del periodo de estudio 2000 a 2012, mediante una versión modificada del código automatizado de GEE (Parks *et al.*, 2018). Este proceso se utilizó tanto para la composición de bandas como para el cálculo del índice NBR pre y post incendio de cada año. En el NBR pre incendio se verificó que los polígonos de entrenamiento no hubieran sido afectados por incendios en el año anterior, asegurando que representaran áreas no quemadas antes del evento. La configuración de descarga de las imágenes satelitales incluyó el percentil 10, es decir, los valores más bajos de cada compuesto anual, lo que permite capturar la condición mínima observada de la vegetación y los datos más representativos para el análisis de áreas quemadas.

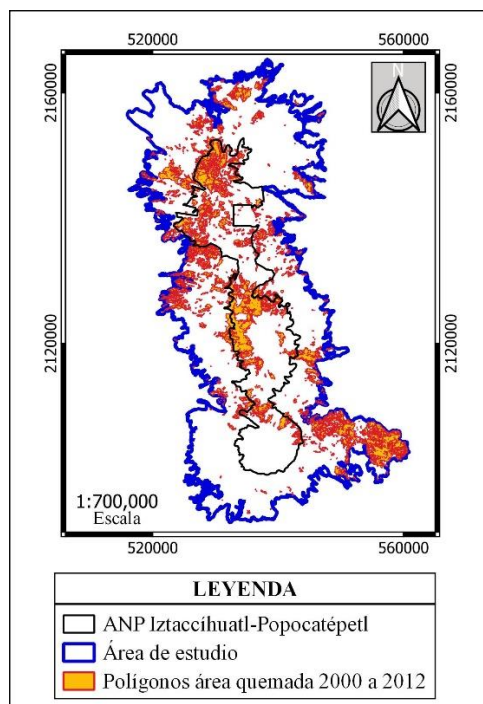


Figure 2. Training polygons of burned areas between 2000 and 2012.

Figura 2. Polígonos de entrenamiento de áreas quemadas entre el periodo 2000 y 2012.

Así mismo, se utilizaron datos de puntos de calor obtenidos del sensor MODIS C6.1 para cada año evaluado, aunque tienen una resolución espacial de 1 km y capturan la mayoría de incendios. Estos puntos detectan anomalías de calor en la superficie terrestre y se emplearon como referencia complementaria para validar algunos polígonos de entrenamiento y áreas mapeadas como quemadas. El área de estudio fue filtrada para excluir zonas agrícolas, asentamientos humanos y el cono volcánico desértico. Esta filtración, realizada mediante capas temáticas geoespaciales, asegurando que los polígonos utilizados correspondieran exclusivamente a áreas forestales susceptibles a incendios.

Índices espectrales

La firma espectral de la vegetación sana se caracteriza por una alta reflectancia en el infrarrojo cercano (NIR) y una baja reflectancia en el infrarrojo de onda corta (SWIR) del espectro electromagnético. En contraste, la firma espectral de la vegetación quemada muestra un comportamiento opuesto. Para cuantificar estas diferencias y obtener los valores del Índice dNBR y RBR estos se calcularon a partir del índice NBR pre y post. Posteriormente, a partir de las imágenes satelitales obtenidas de Landsat se realizó una extracción de los valores de estos índices con el fin de tener una heterogeneidad espacial de los datos. Utilizando puntos de muestreo a 30 metros de distancia dentro de los polígonos delimitados de AQ y en las áreas NOQ se seleccionaron puntos aleatorios de áreas forestales no perturbadas. Estos puntos seleccionados fueron de la misma proporción de AQ para cada año de estudio. Este proceso permitió una comparación precisa y homogénea de las características espectrales entre las zonas afectadas y no afectadas por los incendios.

Para el Índice NBR, se procesaron los valores de cada pixel seleccionado de las imágenes satelitales Landsat mediante la reflectancia de las bandas NIR y SWIR que permite diferenciar la respuesta espectral entre la vegetación sana y quemada, mediante la siguiente fórmula (García & Caselles, 1991):

$$NBR = ((NIR - SWIR))/((NIR + SWIR))$$

Donde: *NIR* es el infrarrojo cercano (Near Infrared) y el *SWIR* es el infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared), siendo para Landsat 5 y 7 (banda 4 y banda 7).

El Índice dNBR (Delta Normalized Burn Ratio) se calculó para medir la diferencia entre las condiciones de la vegetación antes y después del incendio, este índice se obtiene mediante la siguiente ecuación (Miller & Thode, 2007):

$$dNBR = (NBR_{pre} - NBR_{post}) \times 1000$$

Esta ecuación es la diferencia de los *NBR*, donde *NBR_{pre}* hace referencia al valor antes del incendio y *NBR_{post}* hace referencia al valor después del incendio.

El índice RBR (Relative Burn Ratio) el cual se calcula a partir del dNBR y NBR, permite cuantificar y mapear áreas quemadas, en función de los cambios de reflectancia de la vegetación. Este índice es usado para evaluar el impacto de los incendios en los ecosistemas forestales, ya que proporciona información detallada sobre la extensión y severidad de las áreas afectadas. A continuación, se presenta la ecuación utilizada para calcular el RBR (Parks *et al.*, 2014):

$$RBR = dNBR / (NBR_{post} + 1.001)$$

Donde: *dNBR* es la diferencia de *NBR_{pre}* y *post*. El *NBR* es la diferencia entre el *NIR* – *SWIR* y se suma 1.001 al denominador para garantizar que este nunca sea cero. Esta adición evita que la ecuación produzca valores infinitos o resultados erróneos.

Análisis estadístico

La exactitud de los índices espectrales para la detección de áreas quemadas, fue evaluado mediante una matriz de confusión (método K), construida a partir de los datos observados (polígonos de entrenamiento) y los valores predichos según cada percentil de RBR (calculados a partir de los valores observados) para representar la distribución real de los datos y establecer los umbrales de clasificación. Para ello, se calcularon percentiles separados para cada categoría (P01–P50 para AQ y P55–P99 para NOQ), generando umbrales que reflejan tanto la variabilidad espacial dentro del año como la variación temporal entre años. A partir de esta matriz, se calcularon las métricas: precisión (porcentaje de aciertos sobre el total de píxeles), la sensibilidad (capacidad de identificar correctamente las áreas quemadas), la especificidad (capacidad de identificar correctamente las áreas no quemadas) y el índice Kappa, que proporciona una medida más robusta de concordancia entre la clasificación predicha y los datos de referencia.

El uso del coeficiente Kappa (K) permitió evaluar objetivamente la precisión de índices espectrales como el dNBR y RBR en la detección perturbaciones forestales, brindando información valiosa sobre su desempeño y confiabilidad para este tipo de análisis (Valdez-Zavala *et al.*, 2019; Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). La matriz de confusión con el método de K, permitió medir la concordancia. Este coeficiente analiza la proporción de concordancias observadas sobre el total de observaciones y varía en un rango de -1 a +1, donde valores más cercanos a +1 indican una mayor concordancia, mientras que valores próximos a cero reflejan una menor de concordancia (Amaya & Chuvieco, 2012). La fórmula se expresa de la siguiente manera:

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^k n_{ii} - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+j}}{n^2 - \sum_{i=1}^k n_{i+} n_{+j}}$$

Donde *n* es el número total de validación de píxeles en la matriz, *n_{ii}* es el número de observaciones del elemento en la fila *i* y la columna, *n_{i+}* número de píxeles clasificados en la categoría *i* (no quemado) y *j* (quemado), *n_i* son las observaciones de la fila y *n_{+j}* son las observaciones en la columna.

Para analizar la distribución de los valores del índice RBR y dNBR en áreas quemadas y no quemadas, se generaron gráficos de densidad de Kernel para estimar la distribución de

probabilidad de los valores en cada grupo. Así mismo, para evaluar el comportamiento y el potencial explicativo de los umbrales del índice espectral con mejor desempeño, se ajustó un modelo de regresión lineal simple para explorar la relación entre los umbrales y los valores del índice RBR. Si bien el número de muestras es reducido, cada año incluye superficies y número de polígonos distintos, lo que aporta variabilidad espacial y temporal significativa y fortalece la representatividad de los 10 años analizados. Para la evaluación del modelo se determinó el coeficiente de determinación (R^2) y la raíz del error cuadrático medio (RMSE), calculándose estos como:

$$R^2 = \frac{SQ_{residuo}}{SQ_{Total\ corregida}}$$

Donde: $SQ_{\square\square\square\square\square\square}$ es la suma de cuadrados del residuo y $SQ_{Total\ corregida}$ es la suma de cuadrados total corregida para la media.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum (y_{\square} - \hat{y}_i)^2}{n}}$$

Dónde: y_{\square} es el valor observado, \hat{y}_{\square} es el valor estimado por los modelos y n es el número de observaciones.

RESULTADOS

Los resultados del análisis del índice RBR muestran una variabilidad en la precisión de detección de AQ y NOQ, con umbrales entre 50 y 100 a lo largo del periodo de estudio. Estos valores presentaron una precisión entre 85.3% (mínima en 2008) y 95.3% (máxima en 2001). Por su parte el índice Kappa, que mide la concordancia entre la clasificación del modelo y la observada, varió entre 0.71 (mínimo en 2005 y 2008) y 0.88 (máximo en 2003). En cuanto a los errores de clasificación la omisión fluctuó entre 9.1% a 21.5%, mientras que la comisión varió entre 1.6% a 13.2% de comisión. Donde el año 2008 presentó los valores más altos y el año 2003 con los valores más bajos de omisión y comisión (Tabla 2).

Estos valores presentaron una precisión entre 85.3% (mínima en 2008) y 95.3% (máxima en 2001). Por su parte, el índice Kappa varió entre 0.71 (mínimo en 2005 y 2008) y 0.88 (máximo en 2003), reflejando la concordancia ajustada por azar.

Table 2. Performance metrics for RBR thresholds.
Tabla 2. Métricas de desempeño para umbrales RBR.

Año	Precisión %	Umbrales RBR	Valores Kappa	Sensibilidad	Especificidad
2000	93.8	60	0.82	0.888	0.939
2001	95.3	90	0.81	0.906	0.908
2002	93.1	50	0.84	0.898	0.946
2003	94.4	90	0.88	0.909	0.984
2005	85.3	100	0.71	0.823	0.889
2006	90.5	80	0.80	0.865	0.954
2008	85.3	90	0.71	0.785	0.868
2009	90.5	50	0.81	0.872	0.944
2011	93.9	80	0.88	0.904	0.980
2012	90.5	70	0.81	0.866	0.952

El índice dNBR a lo largo del periodo de estudio, también presentó una variabilidad en los datos obtenidos (Tabla 3). Sin embargo, con los valores en las métricas más bajos en comparación con RBR. La precisión de clasificación osciló entre 79.3% a 91.5%, con su valor máximo en el 2003 y su mínimo en el 2008. La concordancia de los datos con los valores de K se ubicó entre 0.59 y 0.83. Respecto a los errores de clasificación, la omisión (Sensibilidad) fluctuó entre 9.4% a 23.2% y la comisión (Especificidad) entre 5.1% a 17.6%. Finalmente se puede evidenciar que el índice dNBR presenta un menor desempeño en las métricas de detección de áreas quemadas anuales frente al RBR.

Table 3. Performance metrics for dNBR thresholds.
Tabla 3. Métricas de desempeño de umbrales dNBR.

Año	Precisión %	Umbrales dNBR	Valores Kappa	Sensibilidad	Especificidad
2000	89.5	90	0.79	0.861	0.937
2001	88.5	130	0.77	0.873	0.898
2002	91.1	80	0.82	0.879	0.949
2003	91.5	100	0.83	0.906	0.924
2005	83.2	130	0.67	0.813	0.855
2006	84.9	120	0.70	0.823	0.88
2008	79.3	120	0.59	0.768	0.824
2009	89.8	50	0.80	0.905	0.892
2011	88.6	120	0.77	0.876	0.897
2012	87.3	90	0.75	0.857	0.892

Los gráficos de densidad muestran la distribución de los datos de NOQ y AQ para los índices analizados (Figura 3). El RBR presenta una mayor separación entre NOQ y AQ con una mayor concentración de los datos, lo cual sugiere un mejor desempeño en comparación con el dNBR, que presenta una superposición más significativa para ambas categorías y una dispersión de los datos. Por lo tanto, una menor superposición disminuye la probabilidad en los errores de clasificación y establecer un umbral claro para la clasificación de áreas afectadas por incendios.

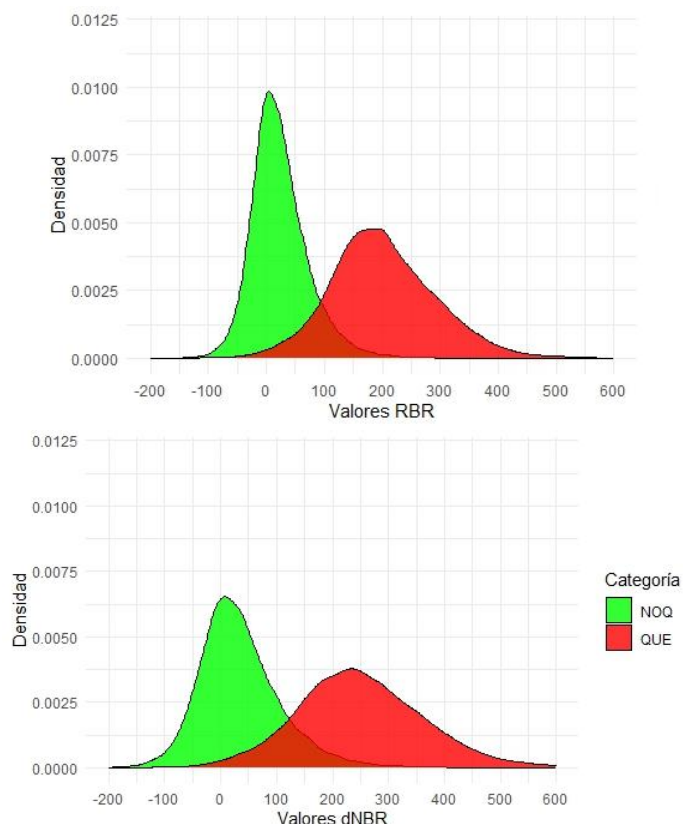


Figure 3. Comparison of the density distributions of the RBR and dNBR indices in burned (AQ) and unburned (NOQ) areas.
Figura 3. Comparación de las distribuciones de densidad de los índices RBR y dNBR en áreas quemadas (AQ) y no quemadas (NOQ).

El análisis de la relación entre los umbrales RBR de área quemada y los percentiles que van de P01 a P99, se encontró una correlación lineal positiva ($r=0.90$) entre el P70 y los umbrales anuales. Así mismo, en la Figura 4, se muestra el ajuste del modelo lineal, el cual explicó el 80% de la variabilidad total ($R^2 = 0.80$; $RMSE = 7.4$). Este comportamiento podría estar relacionado con cambios en la condición de la vegetación entre años, como periodos de sequía que inducen cambios fenológicos, las cuales se reflejan valores del RBR.

El análisis de los residuales del modelo lineal ajustado, muestra que los datos se distribuyen alrededor de la línea de referencia en cero. Sin embargo, se observa que la varianza de los residuales tiende a aumentar a medida que aumentan los valores predichos, indicando la presencia de heterocedasticidad. Aunque este patrón sugiere que la suposición de homocedasticidad no se cumple completamente, los residuales extremos identificados no parecen afectar de manera significativa la relación lineal entre las variables ni la interpretación general del modelo. Cabe destacar que, aunque el análisis se realizó con datos correspondientes a solo 10 años, cada año incluyó múltiples polígonos y superficies de distinta extensión, lo que aporta variabilidad espacial significativa y permite calcular los umbrales del índice RBR de manera representativa para cada año. Esta variabilidad permite estimar los umbrales de manera representativa para cada año, lo que reduce el riesgo de regresiones espurias, aunque se recomienda interpretar los resultados con cautela debido al tamaño temporal limitado.

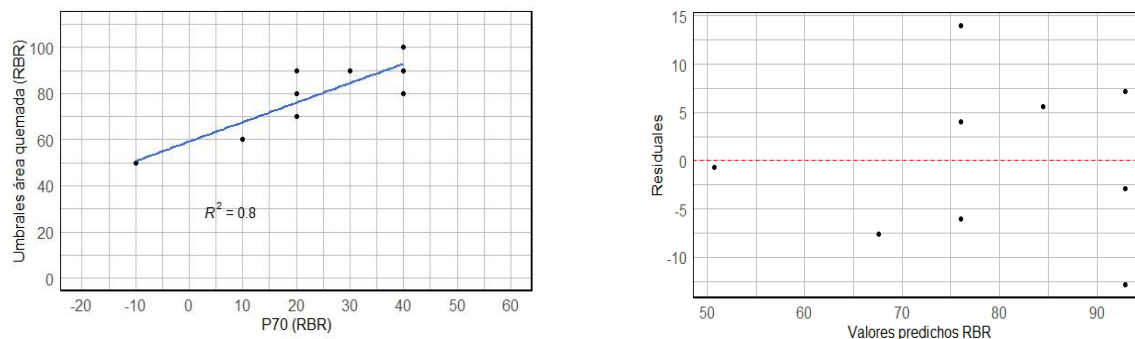


Figure 4. Scatter plot showing the linear model fit between the 70th percentile of RBR (P70, X-axis) and the burned area thresholds (Y-axis), accompanied by a residuals plot against the predicted values.

Figura 4. Diagrama de dispersión del ajuste del modelo lineal entre el percentil 70 de RBR (P70, eje X) y los umbrales de área quemada (eje Y), junto con el gráfico de residuales frente a las predicciones.

Mapeo de área quemada

El mapa de área quemada para los 2000 al 2012 de los índices RBR y dNBR (Figura 5 y 6) muestran las áreas afectadas por incendios resaltadas en color amarillo, mientras que las áreas no quemadas aparecen en color negro. Además, se integra los puntos de calor y área de entrenamiento que permiten apreciar y explicar visualmente los errores de omisión y comisión en la clasificación.

Estas variables permiten una evaluación más detallada de la precisión en ambos índices, identificando zonas donde se puede haber omitido áreas quemadas o donde se han clasificado incorrectamente áreas que no lo están presentando errores de comisión.

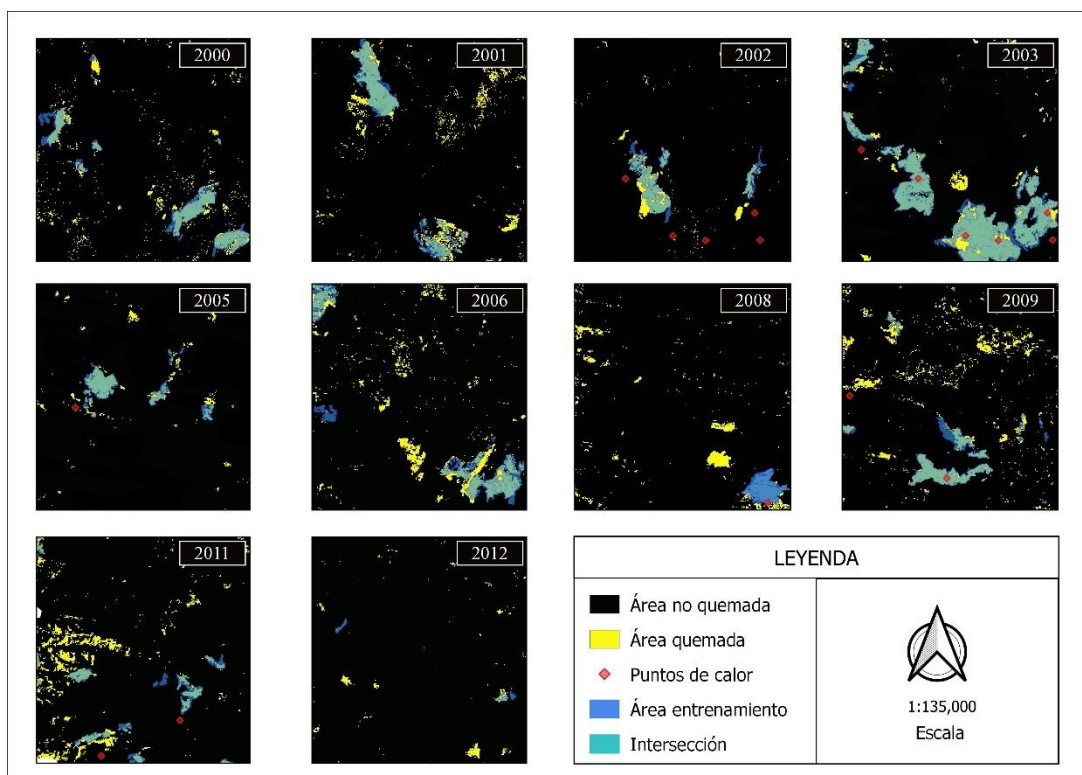


Figure 5. RBR thresholds for burned (AQ) and unburned (NOQ) areas for the study period between 2000 and 2012.

Figura 5. Umbrales RBR de área quemada (AQ) y no quemado (NOQ) para el periodo de estudio entre el 2000 y 2012.

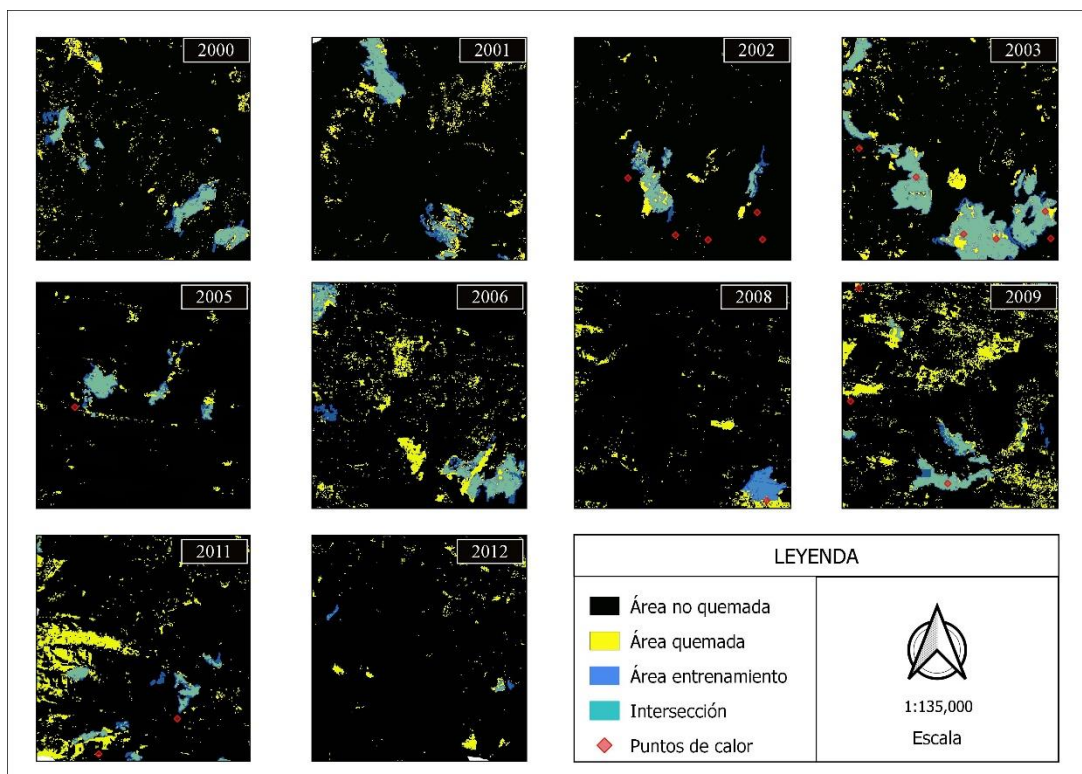


Figure 6. dNBR thresholds for burned (AQ) and unburned (NOQ) areas for the study period between 2000 and 2012.
Figura 6. Umbrales dNBR de área quemada (AQ) y no quemado (NOQ) para el periodo de estudio entre el 2000 y 2012.

Al analizar los mapas de área quemada RBR y dNBR se observan las diferencias en el mapeo, así como los errores en la clasificación para los respectivos índices. Donde a pesar de que el RBR tiene umbrales más bajos (50 a 100) respecto al dNBR (50 a 130), el RBR sigue siendo más eficiente en el mapeo de incendios anuales, tal como se evidencia en la Figura 4 y 5 y en las Tablas 2 y 3. Además, se evidencia que existen puntos de calor donde posiblemente hubo incendios los cuales explican las zonas de comisión en el mapeado para los diferentes años. Así mismo es importante mencionar que la variabilidad de los umbrales puede estar relacionada con las épocas de sequía, según en el periodo de estudio donde la vegetación de áreas no quemadas presenta cambios fenológicos con la sequedad debido a las condiciones de temperaturas altas y bajas precipitaciones, elevando los umbrales y sobreestimando las áreas quemadas.

DISCUSIÓN

Mapeo de área quemada

Las áreas afectadas por el fuego mapeadas con imágenes Landsat y el uso de umbrales de RBR anuales, para detectar incendios mediante percentiles específicos, fue importante para capturar la variabilidad espacial y temporal, manteniendo la confiabilidad. Con este enfoque, la precisión para ambos índices se encontró entre 79.3% y 95.3%, con un coeficiente Kappa de 0.59 a 0.88. Estos valores son consistentes a lo reportado por Mallinis *et al.* (2018), quienes con el uso de imágenes Landsat en la detección de áreas quemadas, se alcanzó una precisión del 92% y un coeficiente Kappa de 0.85, lo que respalda la fiabilidad de este sensor y justifica su elección en el presente estudio. En el caso de los índices derivados del NBR, se ha encontrado que el RBR y el dNBR calculados a partir de imágenes Landsat tiene un buen desempeño para el monitoreo

de incendios (Howe *et al.*, 2022). Esto demuestra la confiabilidad de las imágenes Landsat para el monitoreo de la vegetación, teniendo una ventaja en la clasificación de áreas quemadas, en conjunto con la optimización de algoritmos e índices espectrales que mejoran la detección. Por lo tanto, el análisis de series de tiempo con imágenes Landsat, permite desarrollar métodos específicos de detección temporal, a partir del comportamiento espectral de las áreas de estudio, aportando información importante sobre los impactos del fuego y la dinámica de regeneración (Chuvieco *et al.*, 2019). En este sentido la validación de mapas de incendios requiere metodologías flexibles que permitan ajustar umbrales a la realidad espacial y temporal de cada región.

Variabilidad de umbrales

El estudio muestra que los umbrales de RBR oscilan entre 50 y 100, mientras que para el dNBR estuvieron entre 50 y 130. Estos valores son similares en algunas investigaciones con imágenes Landsat e índices espectrales, donde reportan umbrales que varían de 35 a los 400 (Botella-Martínez & Fernández-Manso, 2017; Viedma *et al.*, 2020; Holsinger *et al.*, 2022). Sin embargo, las diferencias entre estudios pueden atribuirse al enfoque metodológico, la severidad, la geografía, las condiciones del suelo y el tipo de ecosistemas, que influyen en la información percibidas por los satélites (Parks *et al.*, 2014; Jiménez *et al.*, 2016). Debido a que los índices espectrales específicos de vegetación, reportan el estado de salud de las coberturas vegetales en un periodo determinado. Lo cual puede influir en la no discriminación entre daños causado por fuego, sequías u otros cambios fenológicos (Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). De hecho, se ha encontrado que las fluctuaciones anuales en la precipitación, tiene influencia en los valores de los índices de vegetación (Galicia *et al.*, 2014). Como por ejemplo en condiciones de clima cálido y sequía pueden inducir cambios fenológicos negativos (Allen *et al.*, 2015). Lo que reduce los valores NBR pre y post incendio y aumenta la probabilidad de que áreas no afectadas sean clasificadas erróneamente como quemadas (Choat *et al.*, 2018). Este fenómeno provoca un alto potencial en errores de clasificación en la detección de áreas afectadas por el fuego (Anaya *et al.*, 2018). Por lo tanto, aunque los índices espectrales representan una herramienta valiosa, es necesario contextualizar los umbrales en función de las condiciones ecológicas y climáticas de cada región, con el fin de mejorar la confiabilidad en la detección de áreas afectadas por el fuego. La variabilidad observada en los umbrales para ambos índices sugiere que el desempeño de cada índice espectral depende tanto de las condiciones del año evaluado como de la sensibilidad propia de cada métrica encontrada. En general, el RBR mostró umbrales relativamente más bajos y mejor rendimiento que el dNBR, lo que coincide con estudios que destacan su mayor capacidad para discriminar áreas afectadas por incendios, comportamiento similar a los hallados por Botella-Martínez & Fernández-Manso (2017), donde el índice presentó umbrales más bajos, pero con mejores métricas para la delimitación de áreas quemadas con el RBR. Este comportamiento también se relaciona con las características del fuego y el tipo de cobertura, ya que en impactos bajos ocasionados por el incendio y en paisajes heterogéneos el RBR tiende a presentar valores más bajos en comparación con otros índices (NDVI, dNBR, RdNBR) (Gómez-Sánchez *et al.*, 2017; Konkathi & Shetty, 2019). De esta manera, resulta fundamental considerar las características de cada región, el impacto del fuego y el tipo de cobertura en la determinación de umbrales, lo que refuerza la necesidad de metodologías adaptativas en lugar de valores fijos.

El índice RBR tiende a mostrar una mayor precisión que el dNBR, lo que sugiere una mayor capacidad de discriminación. Comportamiento similar a lo reportado en otra investigación, aunque en esos casos la precisión del RBR fue más baja entre 66% y 70.5%, donde resaltan que factores como el tipo de clima, la extensión y la frecuencia de los incendios pueden influir significativamente en la delimitación de áreas quemadas (Parks *et al.*, 2014; Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). En términos de errores de clasificación, el RBR tiende a presentar menores tasas de omisión y comisión en comparación con el dNBR, aunque ambos índices pueden verse afectados por la extensión de los incendios y la variabilidad ambiental, considerando que el estudio se basa en detección anual de incendios. Estos resultados coinciden con investigaciones, donde se reporta que el RBR puede sobreestimar áreas quemadas hasta en un 8.2% y subestimar áreas no quemadas en un 7.2% (Alcántara & Fernandes, 2020). Esta menor discriminación espectral durante temporadas prolongadas, como es el caso de este estudio, se relaciona con la influencia de factores

ambientales y ecológicos a lo largo del periodo, como eventos climáticos, regeneración de la vegetación y cambios en el material quemado, que pueden generar confusión con áreas afectadas por estrés no relacionado con el fuego (De Luca *et al.*, 2022). A pesar de estas limitaciones, el RBR ha demostrado ser un índice relativamente preciso en diferentes tipos de vegetación, incluyendo pastizales, bosques de coníferas, mixtos y de transición (Flores-Rodríguez *et al.*, 2021; Fotakidis *et al.*, 2023). En el área de estudio predominan bosques de coníferas y encinos, donde la investigación también refleja la capacidad del índice RBR para discriminar áreas quemadas en ecosistemas con alta diversidad de especies.

En general, para los años evaluados, se observa una variación significativa en la superficie quemada y en los umbrales utilizados. La eficiencia del índice RBR se ve reflejado una R^2 alta y una raíz del error cuadrático medio (RMSE) relativamente baja, lo que indica que el índice captura adecuadamente la variabilidad de los datos. Este comportamiento es coherente con lo reportado por Gale *et al.*, (2022), quienes también encontraron un buen ajuste del RBR al delimitar áreas quemadas, respaldando su utilidad como un índice confiable para el monitoreo de incendios en distintos tipos de vegetación. El comportamiento del modelo lineal del RBR sugiere que, durante ciertos periodos, los cambios fenológicos de la vegetación podrían influir en los valores del RBR, posiblemente reflejando variaciones en la salud y densidad de la cobertura vegetal. Esta influencia puede modificar los índices, dando lugar a umbrales más altos para la identificación de áreas quemadas en algunos años. La variación en los umbrales y en la precisión del índice podría estar relacionada con factores fenológicos y ambientales que afectan la vegetación. Estudios previos han mostrado que la vegetación experimenta cambios significativos a lo largo del año, lo que puede afectar la precisión en la delimitación de áreas quemadas (Key & Benson, 2006; Parks *et al.*, 2014; Flores-Rodríguez *et al.*, 2021). Estos hallazgos resaltan la importancia de desarrollar métodos adecuados que consideren las condiciones regionales y temporales, incluyendo la integración de datos climáticos, para mejorar el desempeño de los índices de detección de áreas quemadas.

CONCLUSIONES

El uso de imágenes Landsat en conjunto con los índices espectrales RBR y dNBR y analizados mediante el percentil 10, calculados a partir de las bandas del infrarrojo cercano (NIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), muestra una variabilidad en sus umbrales y precisión a lo largo de los años analizados, esto influenciado posiblemente por la superficie de área quemada anual y las condiciones ambientales que pudieran influir en ese periodo. La variabilidad de estos umbrales para detectar áreas quemadas anuales para los índices RBR y dNBR, muestran diferencias en las métricas de desempeño a lo largo de los años, alternando periodos de alta efectividad y otros con algunas dificultades en la detección. Esto confirma la solidez de este sensor y su idoneidad para el monitoreo de incendios forestales en diferentes periodos y coberturas vegetales.

La detección de áreas afectadas por incendios forestales a través del índice RBR presentó mejores resultados en el mapeo, precisión y errores de clasificación de área quemada en comparación con el dNBR, el cual las métricas fueron más bajas. Confirmando su utilidad como herramienta confiable para el monitoreo de incendios en ecosistemas de coníferas, encinos y vegetación mixta. Estos resultados resaltan la necesidad de ajustar los umbrales de clasificación según las características del sitio y el periodo de análisis, con el fin de mejorar la precisión y reducir los errores en la identificación de áreas quemadas.

Finalmente, los umbrales encontrados en este estudio son comparables a los reportados en otros estudios que utilizan imágenes de Landsat, aunque varían según el enfoque, como la vegetación, las condiciones climáticas y el tiempo transcurrido desde el incendio. Siendo importante tener en cuenta en la interpretación de los resultados no solo el fuego, sino también otras variables que afectan el desarrollo de las plantas. En consecuencia, resulta fundamental tener en cuenta las condiciones específicas de cada periodo y la vegetación al aplicar metodologías de detección de áreas afectadas por incendios, con el fin de mejorar la precisión y fiabilidad de los resultados obtenidos para estimar áreas afectadas por incendios.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen la colaboración brindada por el proyecto PAPIIT IN304123 de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), así como el apoyo proporcionado por la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI, anteriormente CONACYT), que hicieron posible la realización de este estudio.

LITERATURA CITADA

- Alcântara, E. F. de, & Fernandes, R. D. O. (2020). Mapeamento e análise dos níveis de severidade de áreas de queimadas no semiárido Brasileiro com o uso técnicas de geoprocessamento. *Revista de Geografia*, 37(3), 148. <https://doi.org/10.51359/2238-6211.2020.245683>
- Allen, C. D., Breshears, D. D., & McDowell, N. G. (2015). On underestimation of global vulnerability to tree mortality and forest die-off from hotter drought in the Anthropocene. *Ecosphere*, 6(8). <https://doi.org/10.1890/ES15-00203.1>
- Almeida-Leñero, JI., Giménez de Azcárate, J., González-Trápaga, T., & Cleef, A. M. (2015). Vegetación alpina de los volcanes Popocatepetl, Iztaccíhuatl y Nevado de Toluca. In I. Luna, J. J. Morrone, & D. Espinosa (Eds.), *Biodiversidad de la Faja Volcánica Transmexicana* (pp. 179–198). FES- Zaragoza-CONABIO. <https://www.researchgate.net/publication/40099917>
- Amaya, J. A., & Chuvieco, E. (2012). Accuracy Assessment of burned area products in the Orinoco Basin. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 78, 53–60. <https://doi.org/10.14358/PERS.78.1.53>
- Anaya, J. A., Sione, W. F., & Rodríguez-Montellano, A. M. (2018). Identificación de áreas quemadas mediante el análisis de series de tiempo en el ámbito de computación en la nube. *Revista de Teledetección*, 61–73. <https://doi.org/10.4995/raet.2018.8618>
- Arriola Padilla, V. J., Martínez Estrada, E., Ortega-Rubio, A., Pérez Miranda, R., & Gijón Hernández, A. R. (2014). Deterioro en áreas naturales protegidas del centro de México y del Eje Neovolcánico Transversal. *Investigación y Ciencia de La Universidad Autónoma de Aguascalientes*, 60, 37–49. <http://www.redalyc.org/articulo.oa?id=67431160005>
- Balch, J. K., Bradley, B. A., Abatzoglou, J. T., Chelsea Nagy, R., Fusco, E. J., & Mahood, A. L. (2017). Human-started wildfires expand the fire niche across the United States. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 114(11), 2946–2951. <https://doi.org/10.1073/pnas.1617394114>
- Barmpoutis, P., Papaioannou, P., Dimitropoulos, K., & Grammalidis, N. (2020). A review on early forest fire detection systems using optical remote sensing. *Sensors (Switzerland)*, 20(22), 1–26. <https://doi.org/10.3390/s20226442>
- Bassaber-Zuñiga, A. I., Maldonado Villegas, M. M., Curiel-Guevara, S., Rojas-Arias, M. L., & Valdez-Rosas, J. S. (2024). Revisión de causas, consecuencias y medidas de respuesta frente a los incendios forestales: un enfoque en el estado de jalisco. *E-CUCBA*, 11(21), 100–114. <https://doi.org/10.32870/e-cucba.vi21.327>
- Botella-Martínez, M. A., & Fernández-Manso, A. (2017). Estudio de la severidad post-incendio en la comunidad Valenciana comparando los índices dNBR, RdNBR y RBR a partir de imágenes Landsat 8. *Revista de Teledetección*, 2017(49), 33–47. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7095>
- Choat, B., Brodribb, T. J., Brodersen, C. R., Duursma, R. A., López, R., & Medlyn, B. E. (2018). Triggers of tree mortality under drought. *Nature*, 558(7711), 531–539. <https://doi.org/10.1038/s41586-018-0240-x>
- Chuvieco, E., Mouillot, F., van der Werf, G. R., San Miguel, J., Tanasse, M., Koutsias, N., García, M., Yebra, M., Padilla, M., Gitas, I., Heil, A., Hawbaker, T. J., & Giglio, L. (2019). Historical background and current developments for mapping burned area from satellite

- Earth observation. *Remote Sensing of Environment*, 225, 45–64. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.02.013>
- Chuvieco, E., Ventura, G., Martín, M. P., & Gómez, I. (2005). Assessment of multitemporal compositing techniques of MODIS and AVHRR images for burned land mapping. *Remote Sensing of Environment*, 94(4), 450–462. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.11.006>
- Cisneros-Vaca, C., Calahorrano, J., Abarca, M., & Manzano, M. (2023). Detección semiautomática de áreas quemadas en Chimborazo-Ecuador utilizando medias compuestas de dNBR con umbrales ajustados. *Revista de Teledetección*, 2023(62), 89–99. <https://doi.org/10.4995/raet.2023.19428>
- De Luca, G., Silva, J. M. N., & Modica, G. (2022). Regional-scale burned area mapping in Mediterranean regions based on the multitemporal composite integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data. *GIScience and Remote Sensing*, 59(1), 1678–1705. <https://doi.org/10.1080/15481603.2022.2128251>
- Fernández-García, V., Quintano, C., Taboada, A., Marcos, E., Calvo, L., & Fernández-Manso, A. (2018). Remote sensing applied to the study of fire regime attributes and their influence on Post-Fire greenness recovery in Pine Ecosystems. *Remote Sensing*, 10(5). <https://doi.org/10.3390/rs10050733>
- Flores-Rodríguez, A. G., Flores-Garnica, J. G., González-Eguiarte, D. R., Gallegos-Rodríguez, A., Zarazúa-Villaseñor, P., & Mena-Munguía, S. (2021). Análisis comparativo de índices espectrales para ubicar y dimensionar niveles de severidad de incendios forestales. *Investigaciones Geográficas UNAM*, 106. <https://doi.org/10.14350/rig.60396>
- Fornacca, D., Ren, G., & Xiao, W. (2018). Evaluating the best spectral indices for the detection of burn scars at several post-fire dates in a Mountainous Region of Northwest Yunnan, China. *Remote Sensing*, 10(8). <https://doi.org/10.3390/rs10081196>
- Fotakidis, V., Chrysafis, I., Mallinis, G., & Koutsias, N. (2023). Continuous burned area monitoring using bi-temporal spectral index time series analysis. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 125. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2023.103547>
- French, N. H. F., Kasischke, E. S., Hall, R. J., Murphy, K. A., Verbyla, D. L., Hoy, E. E., & Allen, J. L. (2008). Using Landsat data to assess fire and burn severity in the North American boreal forest region: An overview and summary of results. *International Journal of Wildland Fire*, 17(4), 443–462. <https://doi.org/10.1071/WF08007>
- Gajendiran, K., Kandasamy, S., & Narayanan, M. (2024). Influences of wildfire on the forest ecosystem and climate change: A comprehensive study. In *Environmental Research* (Vol. 240). Academic Press Inc. <https://doi.org/10.1016/j.envres.2023.117537>
- Gale, M. G., Cary, G. J., Yebra, M., Leavesley, A. J., & Van Dijk, A. I. J. M. (2022). Comparison of contrasting optical and LiDAR fire severity remote sensing methods in a heterogeneous forested landscape in south-eastern Australia. *International Journal of Remote Sensing*, 43(7), 2559–2580. <https://doi.org/10.1080/01431161.2022.2064197>
- Galicía, L., Cuevas Fernández, M. L., González Ramírez, L. M., & Couturier, S. (2014). Detección de cambio ambiental en selvas y bosques de México con percepción remota: un enfoque multiescalar de espacio y tiempo. *Interciencia*, 39(6), 368–374. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=33931213002>
- Gallegos Rodríguez, A., Alberto González Cueva, G., Gerardo Cabrera Orozco, R., Marcelli Sánchez, C., & Hernández Álvarez, E. (2014). Efecto de la recurrencia de incendios forestales en la diversidad arbórea. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 5(24). https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-11322014000400010&script=sci_arttext
- García, M. J. L., & Caselles, V. (1991). Mapping burns and natural reforestation using thematic mapper data. *Geocarto International*, 6(1), 31–37. <https://doi.org/10.1080/10106049109354290>
- García Sampayo, J. C. (2019). *Teledetección de áreas quemadas asociadas a incendios forestales en la Sierra Nevada México (1998-2017)* [Tesis de Licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2019/abril/0788060/0788060.pdf>

- Gómez-Sánchez, E., de las Heras, J., Lucas-Borja, M., & Moya, D. (2017). Ajuste de metodologías para evaluar severidad de quemado en zonas semiáridas (SE peninsular): incendio Donceles 2012. *Revista de Teledetección*, 2017(49), 103–113. <https://doi.org/10.4995/raet.2017.7121>
- Holsinger, L. M., Parks, S. A., Saperstein, L. B., Loehman, R. A., Whitman, E., Barnes, J., & Parisien, M. A. (2022). Improved fire severity mapping in the North American boreal forest using a hybrid composite method. *Remote Sensing in Ecology and Conservation*, 8(2), 222–235. <https://doi.org/10.1002/rse2.238>
- Howe, A. A., Parks, S. A., Harvey, B. J., Saberi, S. J., Lutz, J. A., & Yocom, L. L. (2022). Comparing Sentinel-2 and Landsat 8 for Burn Severity Mapping in Western North America. *Remote Sensing*, 14(20). <https://doi.org/10.3390/rs14205249>
- Jiménez, A. M., Urrego, L. E., & Toro, L. J. (2016). Evaluación del comportamiento de incendios de la vegetación en el norte de Antioquia (Colombia): Análisis del paisaje. *Colombia Forestal*, 19(2), 161–180. <https://doi.org/10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2016.2.a03>
- Jones, M. W., Abatzoglou, J. T., Veraverbeke, S., Andela, N., Lasslop, G., Forkel, M., Smith, A. J. P., Burton, C., Betts, R. A., van der Werf, G. R., Sitch, S., Canadell, J. G., Santín, C., Kolden, C., Doerr, S. H., & Le Quéré, C. (2022). Global and Regional Trends and Drivers of Fire Under Climate Change. In *Reviews of Geophysics* (Vol. 60, Issue 3). John Wiley and Sons Inc. <https://doi.org/10.1029/2020RG000726>
- Key, C. H., & Benson, N. C. (2006). Landscape Assessment: Ground measure of severity, the Composite Burn Index, and remote sensing of severity, the Normalized Burn Ratio. In R. E. Lutes, J. F. Keane, C. H. Caratti, Key N.C., S. Benson, Sutherland L.J., & Gangi. (Eds.), *FIREMON: Fire Effects Monitoring and Inventory System*. USDA Forest Service, Rocky Mountain Research Station. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0202034>
- Konkathi, P., & Shetty, A. (2019). Assessment of burn severity using different fire indices: a case study of Bandipur National Park. *Recent Advances in Geoscience and Remote Sensing: Technologies, Standards and Applications (TENGARSS)*. <https://doi.org/10.1109/TENGARSS48957.2019.8976036>
- Kraus, D., Wohlgemuth, T., Castellnou, M., & Conedera, M. (2022). Fire in Forest Ecosystems: Processes and Management Strategies. In T. Wohlgemuth, A. Jentsch, & R. Seidl (Eds.), *Disturbance Ecology* (Springer, Vol. 32, pp. 143–171). https://doi.org/10.1007/978-3-030-98756-5_7
- Liu, J., Maeda, E. E., Wang, D., & Heiskanen, J. (2021). Sensitivity of spectral indices on burned area detection using landsat time series in savannas of southern Burkina Faso. *Remote Sensing*, 13(13). <https://doi.org/10.3390/rs13132492>
- López-García, J. (2019). Changes in forest cover in Sierra Nevada, Mexico, 1994–2015. *Journal of Maps*, 15(2), 418–424. <https://doi.org/10.1080/17445647.2019.1603125>
- Luna-Rosales, B. S., Barba-Alvarez, A., Romero-Tirado, R., Pérez-Toledano, E., Perea-Morales, O., Padrón-Hernández, S., Sierra-Jiménez, H., De la Cruz, R., & Jardón-Sánchez, D. (2007). Diversidad de Orquídeas en el “Parque Nacional Iztaccihuatl-Popocatepetl” (México) y sus áreas de influencia. *Lankesteriana International Journal on Orchidology*, 7(1–2), 56–59. <https://www.redalyc.org/pdf/443/44339813011.pdf>
- Mallinis, G., Mitsopoulos, I., & Chrysafi, I. (2018). Evaluating and comparing sentinel 2A and landsat-8 operational land imager (OLI) spectral indices for estimating fire severity in a mediterranean pine ecosystem of Greece. *GIScience and Remote Sensing*, 55(1), 1–18. <https://doi.org/10.1080/15481603.2017.1354803>
- Manzo-Delgado, L. L., & López-García, J. (2020). Análisis espacial y temporal de áreas quemadas en 1998, 2003 y 2015 en la Reserva de la Biosfera Montes Azules, Chiapas, México. *Bosque (Valdivia)*, 41(1), 11–24. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0717-92002020000100011>
- Miller, J. D., & Thode, A. E. (2007). Quantifying burn severity in a heterogeneous landscape with a relative version of the delta Normalized Burn Ratio (dNBR). *Remote Sensing of Environment*, 109(1), 66–80. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2006.12.006>

Recibido:
10/abril/2025

Aceptado:
26/noviembre/2025

- Neger, C., de Manzo Delgado, L. L., & Galicia Sarmiento, L. (2022). La investigación geográfica de los incendios forestales en México: una perspectiva bibliométrica y territorial. *Investigaciones Geográficas*, 108. <https://doi.org/10.14350/ig.60488>
- Nolan, R. H., Collins, L., Leigh, A., Ooi, M. K. J., Curran, T. J., Fairman, T. A., Resco de Dios, V., & Bradstock, R. (2021). Limits to post-fire vegetation recovery under climate change. *Plant Cell and Environment*, 44(11), 3471–3489. <https://doi.org/10.1111/pce.14176>
- Nolè, A., Rita, A., Spatola, M. F., & Borghetti, M. (2022). Biogeographic variability in wildfire severity and post-fire vegetation recovery across the European forests via remote sensing-derived spectral metrics. *Science of the Total Environment*, 823. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2022.153807>
- Parks, S. A., Dillon, G. K., & Miller, C. (2014). A new metric for quantifying burn severity: The relativized burn ratio. *Remote Sensing*, 6(3), 1827–1844. <https://doi.org/10.3390/rs6031827>
- Parks, S. A., Holsinger, L. M., Voss, M. A., Loehman, R. A., & Robinson, N. P. (2018). Mean composite fire severity metrics computed with Google Earth Engine offer improved accuracy and expanded mapping potential. *Remote Sensing*, 10(6). <https://doi.org/10.3390/rs10060879>
- Quiroz-Ibarra, A., Torres-Lima, P., & Conway-Gómez, K. (2020). Community adaptive capacity in Peri-urban natural protected areas: A case study near Mexico City. *Sustainability (Switzerland)*, 12(11). <https://doi.org/10.3390/su12114416>
- Smichowski, H., Montiel, M. del R., Romero, V., Kowalewski, M., & Contreras, F. I. (2022). Evaluación de incendios en áreas periurbanas de la ciudad de Corrientes (Argentina) durante el año 2020. *Papeles de Geografía*, 67, 151–167. <https://doi.org/10.6018/geografia.486441>
- Valdez-Zavala, K. M., Bravo-Peña, L. C., & Manzo-Delgado, L. L. (2019). Áreas quemadas y cambio de uso del suelo en el suroeste de Chihuahua (México) durante el periodo 2013-2017: Identificación con el índice Normalized Burn Ratio (NBR). *Acta Universitaria*, 29(2007–9621). <https://doi.org/10.15174/au.2019.2418>
- Van Mantgem, P. J., Falk, D. A., Williams, E. C., Das, A. J., & Stephenson, N. L. (2018). Pre-fire drought and competition mediate post-fire conifer mortality in western U.S. National Parks. *Ecological Applications*, 28(7), 1730–1739. <https://doi.org/10.1002/eap.1778>
- Vargas-Sanabria, D., & Campos-Vargas, C. (2020). Comparación multitemporal de áreas quemadas en un bosque seco tropical utilizando el índice de área quemada (IAQ). *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, 17(41), 29–36. <https://doi.org/10.18845/rfmk.v17i41.5280>
- Viedma, O., Chico, F., Fernández, J. J., Madrigal, C., Safford, H. D., & Moreno, J. M. (2020). Disentangling the role of prefire vegetation vs. burning conditions on fire severity in a large forest fire in SE Spain. *Remote Sensing of Environment*, 247. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2020.111891>
- Vlassova, L., Pérez-Cabello, F., Mimbreno, M. R., Llovería, R. M., & García-Martín, A. (2014). Analysis of the relationship between land surface temperature and wildfire severity in a series of landsat images. *Remote Sensing*, 6(7), 6136–6162. <https://doi.org/10.3390/rs6076136>
- Zuluaga Gómez, O. A., Patiño Quinchía, J. E., & Valencia Hernández, G. M. (2021). Modelos implementados en el análisis de tiempo de temperatura superficial e índices de vegetación: una propuesta taxonómica en el contexto de cambio climático global. *Revista de Geografía Norte Grande*, 78, 323–344. <https://doi.org/http://dx.doi.org/10.4067/S0718-34022021000100323>
- Zúñiga-Vásquez, J. M., Cisneros-González, D., Pompa-García, M., Rodríguez-Trejo, D. A., & Pérez-Verdín, G. (2017). Spatial modeling of forest fires in Mexico: an integration of two data sources. *Bosque*, 38(3), 563–574. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002017000300014>