

# Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia)

## Analysis of Land Cover in Forest Fires through Spectral Indexes: Studio Case Cerros Orientales-Bogotá, Colombia

Yezid Esteban Capador Aguilar<sup>1</sup>, Gina Paola González Angarita <sup>2</sup>, Paula Andrea Suárez Daza\*<sup>3</sup>

<sup>1</sup> <https://orcid.org/0000-0003-0033-5516> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, yezide-capadora@unilibre.edu.co

<sup>2</sup> <https://orcid.org/0000-0002-9436-5371> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, ginap.gonzaleza@unilibre.edu.co

<sup>3</sup> <https://orcid.org/0000-0003-1492-8750> Universidad Libre, Bogotá, Colombia, paulaa-suarezd@unilibre.edu.co

Fecha de recepción:22/11/2020 - Fecha de aceptación del artículo:06/02/2021



Esta obra está bajo una licencia de Creative Commons Reconocimiento-No comercial-SinObraDerivada 4.0 internacional.

DOI: <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6931>

Cómo citar: Capador Aguilar, Y. E. ., González Angarita , G. P., & Suarez Daza, P. A. (2021). Análisis de la cobertura vegetal en incendios forestales mediante índices espectrales: caso de estudio Cerros Orientales (Bogotá, Colombia): Español. Avances: Investigación En Ingeniería, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.1.6931>

## Resumen

Los incendios forestales son una problemática que se presenta en diversos lugares del mundo, ya sea por causas antropogénicas o naturales, y ello trae efectos adversos en el ambiente, entre ellos cambios en la cobertura vegetal. La investigación tuvo como objetivo analizar el cambio de la cobertura vegetal a través del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) y la Temperatura Superficial de la Tierra (LST) durante los incendios forestales. Mediante el uso de imágenes satélites Landsat 5, 7, 8 y su procesamiento, se estableció el NDVI y la LST en los Cerros Orientales de la ciudad de Bogotá. Los resultados encontrados muestran que la calidad de la cobertura vegetal en los Cerros Orientales varía, debido a la presencia de incendios forestales, que alteran el NDVI y el LST en la zona de estudio; a su vez, se evidencia que las localidades más susceptibles frente a estos eventos son Usaquén, Chapinero y Santa Fe, dado que la calidad de vegetación es moderada y escasa. El NDVI y la LST son indicadores útiles que evidencian el impacto en la actividad fotosintética de la vegetación, tras el acontecimiento de un incendio forestal.

**Palabras clave:** calidad de la vegetación, ecosistemas de montaña, fuego, índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI), temperatura de superficie de la tierra (LST).

## Abstract

Forest fires are a problem that arises in different places of the world, either for anthropogenic or natural causes bringing adverse effects on the environment like changes in the land cover. The aim of this research was to analyse land cover change through Normalized Difference Vegetation Index and Land Surface Temperature during forest fires. Using and processing satellite images Landsat 5, 7, 8 the NDVI and LST at the Cerros Orientales of Bogotá city were established. The results showed that land quality cover changes in Cerros Orientales, due to the wildfires, changing the NDVI and LST at a study area; also there is evidence that the most susceptible areas are Usaquén, Chapinero and Santa Fe, because the land cover quality is moderate and scarce. The NDVI and LST are useful indicators that show the impact of photosynthetic activity of vegetation, after forest fires.

**Keywords:** vegetation quality, mountain ecosystems, fire, land surface temperature (LST), normalized difference vegetation index (NDVI).

## Introducción

Los incendios forestales representan una amenaza en todo el mundo [1], porque repercuten en los sistemas ecológicos y climáticos, al incrementar la emisión de gases de efecto invernadero, y porque generan la pérdida de hábitats y fauna en las zonas afectadas, alteraciones en el recurso del suelo, cambios en la cobertura vegetal y, por tanto, cambios paisajísticos en los ecosistemas [2], [3]. Además de producir pérdidas ecológicas, también generan fuertes pérdidas económicas, dependiendo de la magnitud y de las consecuencias que produzca el incendio forestal en la zona afectada; por esto, la problemática ha tomado relevancia, con el objetivo de minimizar sus efectos adversos.

En Iberoamérica, los incendios forestales constituyen una problemática que tomó relevancia a partir del siglo XX [4]. Estos sucesos se incrementaron a lo largo del tiempo, debido al cambio climático, a cambios en los usos del suelo y a políticas para contrarrestar los efectos adversos que estos generan. Dicha problemática ha generado líneas de investigación en países como España, con las cuales se busca analizar el comportamiento de la vegetación durante la ocurrencia de estos eventos, estudiar cómo los incendios forestales generan cambios en las propiedades del suelo [4] y en la temperatura superficial de la tierra [5], y de esta forma correlacionar diferentes variables que permitan estudiar con mayor profundidad los efectos adversos que causan.

En Centroamérica, durante 1998 se presentó el número más alto de incendios forestales, al abarcar un área total de 9,4 millones de hectáreas (ha) de bosques tropicales perdidas, de los cuales México —con 14.445 incendios, que afectaron 849.632 ha— y Nicaragua —con 15.196 incendios que afectaron 531.860 ha de zonas forestales— fueron los países más afectados, debido a las quemadas extensivas para extender la frontera agropecuaria y por medio de este mecanismo facilitar los cambios en los usos del suelo, además de otros factores antrópicos (como fogatas, quemadas de basureros, entre otros), que representan el 85 %; mientras que las causas naturales representan el 12 % [6].

En Colombia, los incendios forestales ocurren en el primer trimestre del año, y de acuerdo con [7], cada año se ven afectadas 42.000 ha por estos eventos. Se definen como la propagación libre y no programada del fuego, que menoscaba la vegetación viva o muerta [8]. La región más dañada es la Andina, con el departamento de Cundinamarca, que perdieron más de 5000 ha a causa de 800 incendios forestales [9].

En Bogotá se han producido 139 incendios que han afectado aproximadamente 1000 ha, durante el periodo 2010-2018 [10]. El 1.º de febrero de 2016 ocurrió un incendio forestal que consumió más de 18 ha de cobertura vegetal en los Cerros Orientales de la ciudad. Estos eventos provocan cambios en la cobertura vegetal; por eso, se ve la necesidad de monitorear dichos cambios a través de diversos mecanismos. En la actualidad, los indicadores de medición de incendios forestales se desarrollan a partir de técnicas propuestas desde la teledetección, puesto que estudia las

variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y para analizar dicha problemática se emplean los índices de vegetación por su correlación espectral, de los cuales el índice más utilizado es el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), el cual se calcula como una diferencia de relación entre la banda del rojo y la banda del infrarrojo cercano [11], [12].

Así mismo, se utiliza la Temperatura Superficial de la Tierra (Land Surface Temperature [LST]), que cambia por efecto de los incendios forestales. Esta variable puede aumentar aproximadamente 3°C [13]. Paralelamente, [14] en su investigación, “La temperatura superficial de la tierra un posible indicador de la gravedad de los incendios en los ecosistemas forestales Mediterráneos”, identificaron la utilidad de la LST, al definirla como un indicador que se correlaciona con la vegetación, pendiente y elevación de la zona de estudio. Los resultados de dicha investigación determinaron que la LST no solo aumenta conforme a los incendios presentados, sino que también con las condiciones meteorológicas de la zona, es decir, se encuentran valores mayores en las épocas de sequía.

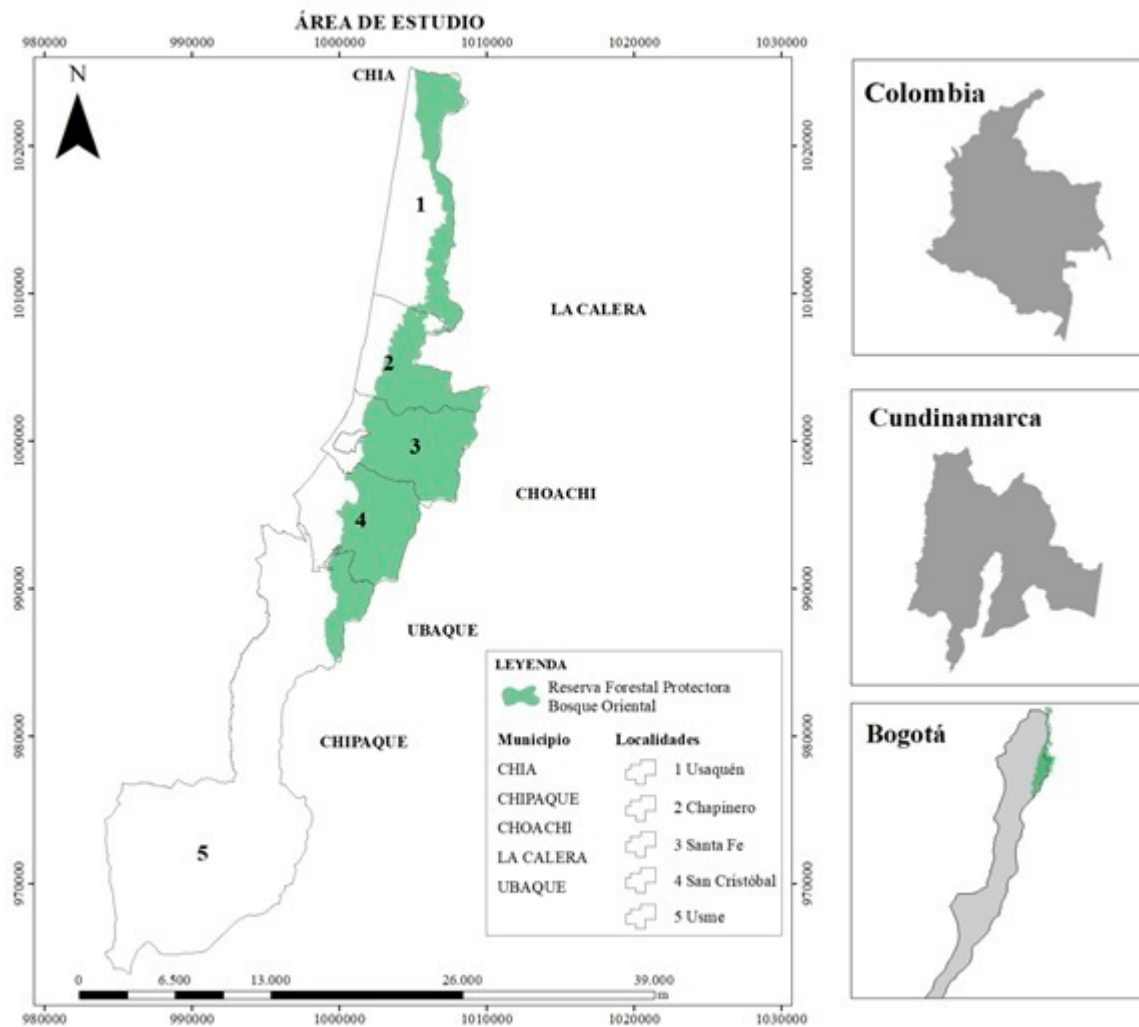
Por tanto, el aumento de temperatura es un determinante para la sobrecarga hídrica en la vegetación, la cual ocurre porque la demanda de agua excede la humedad disponible en el suelo [15]. En ese sentido, la sobrecarga hídrica afecta la actividad fotosintética y la respiración de la vegetación, haciendo que la cobertura vegetal presente mayor susceptibilidad con los incendios forestales, ya que al tener bajo contenido de agua se convierten en un material altamente comburente [13], [16].

En efecto, los incendios forestales han menoscabado la cobertura vegetal de los Cerros Orientales en la ciudad de Bogotá; por ello, es de gran interés analizar dicha problemática, debido a los pocos estudios existentes hasta el momento en Colombia y, a su vez, por el impacto que estos pueden generar en la salud humana, la calidad del aire y en el sector socioeconómico. La novedad de la investigación se justifica por su análisis en los cambios de vegetación a través del tiempo, porque aporta lineamientos importantes para la formulación de medidas sostenibles en la zona de estudio, que forman parte de la estructura ecológica principal [17]. El estudio tuvo como objetivo analizar los cambios en la cobertura vegetal durante un incendio forestal a través del NDVI y la LST, en los años 2001, 2015 y 2016 en los Cerros Orientales de la ciudad de Bogotá (Colombia).

## 1. Materiales y métodos

### 1.1. Área de estudio

El área de estudio se localiza en el oriente de la ciudad de Bogotá (Colombia), definida como reserva forestal protectora Bosque Oriental, representada por una cadena de montañas que forma parte de la estructura ecológica principal de la ciudad, con una extensión aproximada de 13.142,11 ha, y una altitud desde 2650 hasta los 3600 ms. n.m. La reserva limita al norte con el municipio de Chía, y al oriente, con los municipios de La Calera, Choachí, Ubaque y Chipaque [18] (figura 1).



**Figura 1.** Área de Estudio. Fuente: elaboración propia, 2020.

Con respecto a las características climáticas de la zona de estudio, se presentan cinco unidades climáticas:

1. Páramo bajo semihúmedo.
2. Páramo bajo húmedo.
3. Páramo frío semiárido.
4. Páramo frío semihúmedo.
5. Páramo frío húmedo.

Las unidades de páramo bajo semihúmedo y bajo húmedo presentan temperaturas en el intervalo de 7-12 °C y se encuentran en una altitud comprendida entre los 3001 y los 3600 m.s.n.m. Cabe aclarar que dentro de la unidad de páramo bajo semihúmedo se encuentran ubicadas cinco localidades de la ciudad de Bogotá (Usaquén, Chapinero, Santa Fe, San Cristóbal y Usme). En el ecosistema de los Cerros Orientales se caracterizan zonas de páramo frío semiárido, frío semihúmedo y frío húmedo, cuyas temperaturas varían de 12 a 17,5 °C, las cuales se encuentran en una altitud que abarca desde los 2001 hasta los 3000 m.s.n.m. [18].

Al presentar diferentes unidades climáticas tiene gran biodiversidad, donde hay diferentes especies de flora como encenillales bajos, medios y altos (*Weinmannia tormentosa*), mano de oso (*Oreopanax floribundum*), uva camarona (*Macleania rupestris*), eucalipto (*Eucalyptus*), retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Genista monspessulana*). En el subpáramo encontramos matorrales nativos, y en el páramo, pajonales, rosetales y frailejones [19].

## 1.2. Procesamiento y datos utilizados

El procesamiento de las imágenes satelitales toma como referencia la base de datos de la hemeroteca del Instituto Distrital de Gestión del Riesgo y Cambio Climático. Seguidamente, los datos utilizados en la investigación estudian los incendios forestales de los años 2001, 2015 y 2016, pues los eventos seleccionados se determinaron de acuerdo con la disponibilidad de imágenes satelitales en la Unidad de Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Las imágenes satelitales empleadas en el estudio pertenecen a Landsat 5, 7 y 8, las cuales se caracterizan por contar con un equipo de exploración desde 7 hasta 11 bandas espectrales ubicadas entre la fracción visible, infrarrojo y térmico del espectro electromagnético [20].

En la tabla 1 se muestran las imágenes utilizadas para el desarrollo metodológico, sometidas a corrección atmosférica. Para las imágenes provenientes de Landsat 5 y 7, este proceso se ejecutó en el software ENVI, que utiliza el algoritmo Corrección Atmosférica Rápida. Finalmente, las imágenes Landsat 8 se corrigieron a través del software ArcGis y la herramienta Landsat 8, que fusiona las bandas con la banda pancromática y mejora la calidad visual de la imagen. Después se corrige la radiancia de cada una de las bandas para obtener la corrección atmosférica de la imagen.

**Tabla 1.** Imágenes de Landsat

Fecha	Instrumental	(código vinculado a la latitud)	(código vinculado a la longitud)
24/01/2001	Landsat 7 TM	8	57
29/01/2001	Landsat 5	8	57
04/01/2015	Landsat 8 OLI/TIRS	8	57
23/02/2015	Landsat 8 OLI/TIRS	8	57
15/01/2016	Landsat 8 OLI/TIRS	8	57
21/01/2016	Landsat 8 OLI/TIRS	8	57

Fuente: elaboración propia a partir de [21].

Los principales cálculos analizan el NDVI y la LST, los cuales se describen a continuación.

### 1.2.1. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

El NDVI se utiliza para observar los cambios de cobertura vegetal y analizar su calidad [22]. Esta se establece de acuerdo con los valores obtenidos del NDVI: los comprendidos entre 0,01 y 0,1 se clasifican en vegetación escasa o suelo desnudo, lo cual indica una baja reflectancia de la banda infrarrojo cercano (NIR). El NDVI entre 0,2 y 0,4 se cataloga como vegetación moderada y el NDVI >0,5 se atribuye a la vegetación alta y vigorosa [23]. Además, el NDVI permite monitorear la recuperación de la vegetación después de que haya ocurrido un incendio [24].

Para el cálculo del NDVI se utiliza el espectro de la luz visible e NIR; por tanto, analizar la vegetación sana se hace teniendo en cuenta la absorbancia de la luz visible que se refleja en el NIR. Por otro lado, la vegetación afectada por incendios forestales refleja menos luz en el NIR [25]. En la ecuación 1 se muestra la interacción de las bandas del NDVI, las cuales involucran las bandas del rojo y NIR, que comprenden diferentes longitudes de onda, dependiendo del satélite que se utilice. Para Landsat 5 y 7 la banda 4 corresponde al NIR que maneja longitudes onda de 630 a 690 nm, y la banda 3 corresponde al rojo, la cual maneja longitudes de onda 760 a 900 nm. En el caso de Landsat 8, el NIR hace referencia a la banda 5, la cual comprende longitudes de onda de 0,85 a 0,88  $\mu\text{m}$  y la banda 4 pertenece al rojo con longitudes de onda de 0,64-0,67  $\mu\text{m}$  [26].

$$\text{NDVI} = (\text{NIR} - \text{RED}) / (\text{NIR} + \text{RED}) \quad (1)$$

[27]

### 1.2.2. Temperatura Superficial de la Tierra

La LST es una propiedad física relevante para diversos procesos ecológicos, hidrológicos y atmosféricos. Se da por el intercambio de la energía superficial y el flujo de la humedad entre la atmósfera y la biósfera. Se obtiene a partir de mediciones espectrales infrarrojas térmicas tomadas por sensores terrestres, aéreos o satelitales [28]. Para los sistemas satelitales Landsat 5 y 7, la banda infrarroja térmica corresponde a la banda 6, cuya longitud de onda es de 10,40 a 12,50  $\mu\text{m}$  y comprende un radio de 120 m [29]. En cuanto a Landsat 8, corresponden a las bandas 10 y 11, que manejan una longitud de onda comprendida entre 10,6 y 11,19  $\mu\text{m}$  [26]. La LST se determina con algoritmos establecidos para cada uno de los satélites [30], [31], donde se utilizan elementos que son propios de las imágenes satelitales. El primer cálculo consiste en establecer el techo de la atmósfera conocido como ToA (techo atmosférico):

$$L\lambda = ML * Q_{\text{cal}} + AL \quad (2)$$

Donde  $L\lambda$  es el techo de la atmósfera, ML es la radiancia multiplicativa de la banda, AL es la radiancia aditiva de la banda y  $Q_{\text{cal}}$  representa los valores de los píxeles de las imágenes. Los datos de radiancia se pueden transformar en temperatura de brillo (BT), utilizando el valor del ToA y los valores de las constantes térmicas ( $K1$  y  $K2$ ), establecidos en el metadato de las imágenes satelitales utilizadas, como se muestra en la ecuación 3 [30], [31]:

$$\text{BT} = K2 / \ln(K1 / ((L\lambda + 1))) - 273,15 \quad (3)$$

Posteriormente, se calcula el NDVI mostrado en la ecuación (1). A partir de los valores mínimos y máximos del NDVI, se estima la proporción de vegetación presente la zona de estudio, como se muestra en la ecuación 4 [30], [31]:

$$\text{PV} = ((\text{NDVI} - \text{NDVI}_{\text{mín}}) / (\text{NDVI}_{\text{máx}} - \text{NDVI}_{\text{mín}}))^2 \quad (4)$$

Para determinar la emisividad, que hace referencia a la radiación emitida por un objeto o una superficie, se utiliza la proporción de la vegetación —calculada en la ecuación (4)—. Entre tanto, la rugosidad de la superficie —que corresponde a 0,005— y el valor de la emisividad de la cobertura vegetal se establecen a partir de los valores del NDVI, los cuales están comprendidos en un intervalo de 0,2 a >0,5; por tanto, se le asigna un valor de 0,984 [30].

$$E=0,005*PV+0,984 \quad (5)$$

Efectuados estos cálculos, con los valores de ToA y emisividad se calcula la LST. El valor de 10,895 hace referencia a la longitud de onda de la radiancia emitida y 1,4388 es una constante, que se obtiene de la siguiente ecuación [32]:

$$\rho=h c/\sigma=1,4388 \text{ m K} \quad (6)$$

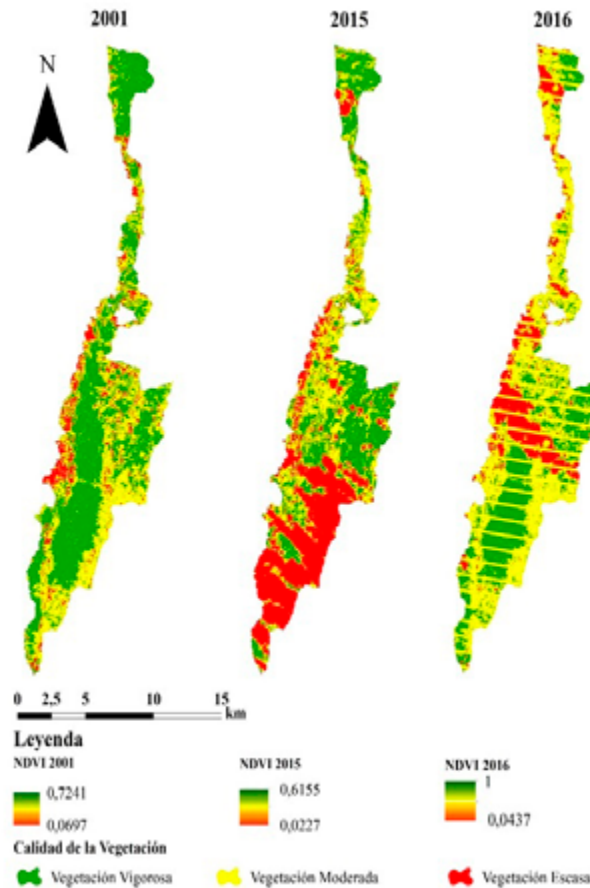
Donde  $\sigma$  es la constante de Boltzmann, cuyo valor es de  $1,38 * 10^{(-23)} \text{ J/K}$ ;  $h$  representa la constante de Planck ( $6,626 * 10^{(-34)} \text{ J s}$ ), y  $c$  es la velocidad de la luz ( $2,998 * 10^8 \text{ m/s}$ ) [32]. Finalmente, se calcula la temperatura superficial de la tierra como se muestra en la ecuación 7 [30], [31]:

$$LST=(BT/((1+((10,895*BT)/1,4388))) * \text{Ln}(E) \quad (7)$$

## 2. Resultados

### 2.1. NDVI

Los resultados obtenidos en la figura 2 permitieron analizar la calidad de vegetación en la zona de estudio, durante los años 2001, 2015 y 2016.



**Figura 2.** Calidad de vegetación en los Cerros Orientales durante 2001, 2015 y 2016. Fuente: elaboración propia.

En el 2001 se observó que el 53,47% de vegetación en los Cerros Orientales era de buena calidad, se caracterizaba por tener mayor absorbancia de la luz visible proveniente de la banda RED, que reflejaba gran parte del espectro NIR, con un valor máximo del NDVI de 0,7241, propio de las zonas boscosas, con alto vigor vegetativo. Seguidamente, la vegetación moderada representó el 37,89%; las particularidades de este tipo de cobertura vegetal presentan un índice con una menor reflectancia de la banda NIR, es decir, que la calidad de la vegetación es menor frente a la vegetación vigorosa y el NDVI tiene valores cercanos a 0,3272, lo cual indica que la cobertura vegetal predominante de la zona estaba compuesta por arbustos y matorrales. Finalmente, la vegetación escasa representó un 8,63% del área total de la zona de estudio, con un NDVI mínimo de 0,0697 producto de 13 incendios forestales, que afectaron un área aproximada de 68 ha. Estos eventos ocurrieron en las localidades de Chapinero, San Cristóbal y Usaquén, siendo esta última la localidad que presentó mayor afectación, con 6 incendios forestales y 31,38 ha consumidas por el fuego.

Al comparar los años 2001 y 2015, se evidenció una disminución del 21,44% en la vegetación de buena calidad; así mismo, se tuvo una reducción del NDVI, el cual pasó de 0,7241 a 0,6155. Sin embargo, el tipo de cobertura vegetal aún es densa y con alto vigor vegetativo. Con respecto a la vegetación moderada, se redujo en un 5,41% frente al 2001. Esto es, decreció el NDVI, al tomar valores cercanos a 0,2964, y ello afecta principalmente a las localidades de Usaquén y Chapinero. Al decrecer el área de vegetación vigorosa y moderada, se incrementó en un 26,85% el área de vegetación escasa, debido al acontecimiento de 14 incendios forestales cuya afectación consumió aproximadamente 46,25 ha, a pesar de que la cantidad de hectáreas afectadas es inferior a las consumidas en el 2001. El NDVI de la vegetación escasa en el 2015 es superior al del 2001, con un valor mínimo de 0,0227. El cambio en la cobertura vegetal presenta un mayor impacto en las localidades de San Cristóbal, Usme y Santa Fe, dado que en el 2001 estas localidades tenían una vegetación moderada y, por tanto, los incendios ocurridos en esta zona alteraron la cobertura vegetal, pasando de vegetación moderada a escasa.

En el 2016, la vegetación vigorosa ocupó un 27,57% del área total de la zona de estudio, pero tuvo una disminución del 25,91% frente a la vegetación del 2001 y una reducción del 4,46% con respecto al 2015; sin embargo, el NDVI obtuvo su valor máximo con 1, en otras palabras, disminuyó el área de vegetación vigorosa pero la calidad aumentó en relación con los años 2001 y 2015. La vegetación moderada fue la más representativa en este año, al incrementarse en un 19,9% con respecto al 2001 y un 25,31% frente al 2015. Así mismo, se ve una pérdida en la calidad de la vegetación moderada, ya que el NDVI tiene un valor de 0,2814, el cual es inferior en razón a los años anteriores. Este aumento se debe a los 30 incendios forestales que consumieron cerca de 377,9 ha y alteraron la calidad de la vegetación. Por último, la vegetación escasa abarcó el 14,63%, con un NDVI de 0,0437; esto es, aumentó un 6% en comparación con el año 2001 y decreció en un 20,85% con respecto al 2015.

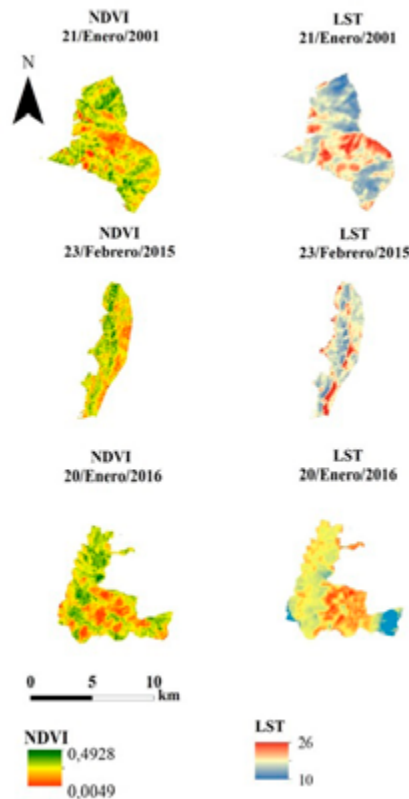
## 2.2. NDVI durante los incendios forestales

El 21 de enero de 2001 se presentó un incendio forestal en la localidad de Usaquén, que consumió aproximadamente 800 m<sup>2</sup> de cobertura vegetal. En la figura 3 se observa cómo el fuego alteró el comportamiento del NDVI. Las zonas más críticas presentaron valores de 0,0266 y los lugares menos afectados alcanzaron valores de 0,3673. Al comparar los valores del NDVI obtenidos en la figura 3 con los enseñados en la figura 2 se ve un cambio significativo en la calidad de la



vegetación, puesto que la vegetación escasa presenta una reducción en el NDVI, al pasar de 0,0697 a 0,0266 y disminuir un 61,84 %, es decir, que la calidad de la cobertura vegetal empeoró, debido al incendio forestal. Por otra parte, la vegetación que no se vio afectada por el incendio forestal también mostró alteraciones en el índice, dado que la vegetación en mejor estado tiene un índice de 0,3673; mientras que la vegetación vigorosa en la figura 2 tiene un NDVI máximo de 0,7241. Por lo tanto, tuvo una reducción del 49,27 % y la vegetación en mejor estado durante el incendio no se caracteriza como vegetación vigorosa, sino como vegetación moderada, de acuerdo con los valores encontrados.

En las localidades de Chapinero y Santa Fe, el 23 de febrero de 2015 tuvo lugar un incendio forestal que afectó 3 ha de vegetación; frente al incendio del 2001 tuvo mayores repercusiones, puesto que el área consumida durante este año solo representa el 2,6 % del área afectada en el incendio del 2015. Al analizar el comportamiento del NDVI se encontró que las zonas más afectadas por el evento registran valores de 0,0049, lo cual representa una disminución del 78,41 % frente al valor mínimo del NDVI mostrado en a figura 2 para la vegetación escasa. De igual forma, al compararlo con el porcentaje de reducción del 2001, se muestra la relación entre la magnitud del incendio forestal y el cambio entre la calidad de la vegetación: a medida que aumenta el área consumida por el fuego mayor es el menoscabo en la cobertura vegetal. En las zonas con poca afectación, el NDVI tiene un valor de 0,4928, aun cuando presentó un decrecimiento del 19,94 % frente al valor registrado antes del incendio; sin embargo, mostró un cambio menor con respecto al 2001, pues en este año se tuvo una reducción mayor. A pesar de esto, la vegetación vigorosa, al igual que en el 2001, cambia de calidad, a vegetación moderada.



**Figura 3.** Comportamiento del NDVI y de la LST durante incendios forestales 2001, 2015 y 2016 en los Cerros Orientales. Fuente: elaboración propia.

El 20 de enero de 2016 se identificó el incendio forestal de mayor impacto en la localidad de Chapinero, donde se vieron afectadas 10 ha de cobertura vegetal. La vegetación vigorosa registró el porcentaje más bajo, al abarcar únicamente el 27,57% y registrar una reducción del 25,91% con respecto al 2001 y del 4,46% en relación con el 2015. El NDVI en el incendio del 2016 obtuvo un valor máximo de 0,3965; por consiguiente, se evidencia una disminución del 60,35% en razón al valor máximo del índice mostrado en la figura 2, cuyo valor es de 1. Las zonas más damnificadas por el evento tuvieron un NDVI mínimo de 0,0321 y, en consecuencia, se registró un decrecimiento del 26,54%, teniendo en cuenta el valor registrado en la figura 2, el cual corresponde a 0,0437. No obstante, en el 2016 se refleja una reducción del 20,85% en el área de vegetación escasa, al contrastar este resultado con los obtenidos en el año 2015. Esto indica la relación entre la calidad de vegetación (figura 2) presente en los Cerros Orientales y su incidencia en los incendios forestales mostrados en la figura 3, dado que en las localidades que tenían una cobertura vegetal con calidad moderada y escasa ocurrieron dichos eventos. En la tabla 2 se muestran los cambios del NDVI en los Cerros Orientales antes de que ocurrieran los incendios forestales y durante el transcurso de estos.

**Tabla 2.** Cambios del NDVI con incendios forestales y sin estos, porcentaje de reducción del NDVI en los años bajo estudio

Año	NDVI sin incendios forestales		NDVI con incendios forestales		Porcentaje de reducción NDVI máx.	Porcentaje de reducción NDVI mín.
	NDVI máx	NDVI mín	NDVI máx	NDVI mín		
2001	0,7241	0,0697	0,3673	0,0266	49,27	61,84
2015	0,6155	0,0227	0,4928	0,0049	19,94	78,41
2016	1	0,0437	0,3965	0,0321	60,35	26,54

Fuente: elaboración propia.

### 2.3. Temperatura Superficial de la Tierra

El comportamiento de la LST en los tres incendios es análogo, puesto que se registran temperaturas mínimas de 10,00 °C y máximas de 26,54 °C. En cada evento se evidencia un incremento aproximado de 12,87 °C en relación con la temperatura ambiente de la zona de estudio. En el evento del 2001 se muestra que el foco del incendio tuvo una temperatura de 26,54 °C, y a pesar de que es el evento de menor magnitud, registra la temperatura más alta; mientras que en el 2015 la LST presentó un valor máximo de 24,66 °C y en el año 2016 obtuvo un valor de 23,41 °C.

Las variaciones en la LST se dan por el tipo de cobertura vegetal que conforman los Cerros Orientales, la cual se caracteriza por la alta presencia de árboles, vegetación herbácea y arbustos. Los árboles presentan baja ignición, es decir, que no se prenden con facilidad; sin embargo, cuando el fuego ataca este tipo de vegetación, la duración del incendio tiende a prolongarse (se estima que los eventos pueden durar aproximadamente 10 horas, puesto que es más difícil controlar las llamas debido a la altura que tienen los árboles) [33]. En la zona de estudio se identifican 946,30 ha de *Eucalyptus globulus* (árbol altamente comburente), el cual presenta una frecuencia de ignición del 90% y un tiempo de ignición 2-58,95 s [34].

En relación con los arbustos y la vegetación herbácea, tienen un punto de ignición medio; pero, a pesar de esto, la duración del incendio también se aproxima a las 10 h. Dentro del grupo de los arbustos se encontraron dos especies que influyen en los incendios forestales: retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Genista monspessulana*). Se estima que hay 84,14 ha de estas

especies provenientes del continente europeo, caracterizadas por ser altamente invasoras y constituir una amenaza para la biodiversidad y, con ello, a los hábitats propios de la flora y fauna nativa. Además, en el caso del retamo espinoso, es un riesgo latente para la generación de incendios forestales, dado que tienen bajo contenido de humedad y gran cantidad de taninos, los cuales se constituyen principalmente por compuestos fenólicos, que son altamente comburentes, es decir, arden con facilidad y alimentan el fuego [18]. Como los árboles, los arbustos y la vegetación herbácea se encuentran en altas cantidades, se incrementa la intensidad del fuego y, a su vez, los valores de la temperatura que incide en el comportamiento del NDVI, como se observa en la figura 3.

### 3. Discusión

#### 3.1. Comportamiento del NDVI antes de los incendios forestales

El NDVI es uno de los índices de vegetación más utilizados para analizar el estado y la calidad de la vegetación. El comportamiento de esta variable se ve influenciado por factores como las condiciones meteorológicas de la zona de estudio, el tipo de vegetación e, incluso, la temperatura, como se logró evidenciar en esta investigación. Al analizar el NDVI encontrado en los Cerros Orientales, observamos que la cobertura vegetal se encuentra en un buen estado, pues el índice registró valores superiores a 0,5, y ello indica que la vegetación representativa de la zona de estudio es de tipo boscosa con alto vigor vegetativo. En otros estudios desarrollados por [35] y [36] se registraron valores similares entre 0,6 y 0,7 en ecosistemas montañosos. Estas similitudes se dan porque el NDVI tiene patrones análogos de acuerdo con la clasificación de las plantas por tamaño. Así, sin importar las especies que conformen los ecosistemas, los árboles, los arbustos y la vegetación herbácea, tendrán valores similares, como se refleja en la investigación desarrollada por [35].

#### 3.2. Comportamiento del NDVI durante los incendios forestales

Durante el desarrollo de los incendios forestales en los Cerros Orientales se mostró cómo la cobertura vegetal de la zona disminuye su calidad drásticamente (un 19%-78% en el peor de los escenarios). Los porcentajes de reducción más altos se evidencian en los valores del NDVI mínimo durante los años 2001, 2015 y 2016; por tanto, el tipo de vegetación más afectada por estos incidentes es aquella que antes de las llamas ya presentan una baja calidad, catalogada como vegetación escasa.

Estudios desarrollados en países latinoamericanos como Bolivia muestran comportamientos similares en el NDVI antes del incendio y después de este. En Bolivia se analizó el comportamiento de la vegetación en la cuenca del Titicaca para determinar las áreas afectadas por incendios forestales, y los resultados mostraron que el NDVI antes del incendio tenía valores superiores a 0,6. Posterior al fuego, el NDVI tenía valores mínimos de 0,1, que disminuyeron la calidad de vegetación y su actividad fotosintética. Se observa que el decrecimiento en el Titicaca es análogo al registrado en los Cerros Orientales, debido a que las características climáticas de ambas zonas de estudio son parecidas; sin embargo, el ecosistema del Titicaca tiene una mayor resiliencia, pues su vegetación consiste en grandes plantaciones de totora (*Typha latifolia*), plantas que se dan alrededor de los cuerpos de agua, tienen alto contenido de humedad, y al estar en las condiciones propicias, poseen una alta tasa de regeneración, convirtiéndose en una especie invasora [37].

La investigación [38] desarrollada en Ecuador evidenció cómo la vegetación más afectada es la que posee una mala calidad, donde el área más susceptible catalogada como suelo desnudo incrementó en un 69,96% después del incendio, con un NDVI de 0,05, cuyo valor antes del incendio era de 0,17; por tanto, tuvo un decrecimiento del 70,58%, y se ve un comportamiento similar en el incendio forestal de los Cerros Orientales durante el 2015, el cual presenta una reducción del 78,41%. Esta similitud se debe a que las dos zonas de estudio poseen plantaciones de eucalipto que incrementan la severidad del fuego [38].

En el estudio desarrollado por [5], ubicado en Las Hurdes (Extremadura, España), ocurrió un incendio forestal que disminuyó la calidad de la vegetación. Antes de que tuviera lugar el evento, la zona registraba un NDVI de 0,65, y después del incidente se registró un NDVI de 0,2. Se evidenciaron reducciones similares en las dos zonas de estudio, tanto en los Cerros Orientales como en Las Hurdes, porque la vegetación en los Cerros Orientales es más susceptible frente a los incendios forestales, dado que se encuentran especies inflamables como el eucalipto y retamo espinoso. Por su parte, Las Hurdes se caracteriza por la alta presencia de *Pinus pinaster*, una especie pirófito, es decir, resiliente al fuego y con altas tasas de regeneración que ayudan al ecosistema a recuperar su actividad fotosintética y verdor de manera más rápida; por esto, a pesar de que el incendio de los Cerros Orientales es de menor magnitud, trae los mismos efectos, pues las especies presentes en el ecosistema no presentan características pirófitas.

Otro caso, como el estudiado por [39] en Italia, presenta de qué modo la cobertura vegetal durante los incendios forestales registra un NDVI de 0,423, valor que al compararlo con los resultados encontrados en el presente estudio no implica una reducción tan significativa, dado que aún el NDVI registra valores relativamente altos, lo que permite inferir que la calidad de la vegetación en Fonte della Vetica (Italia) es mejor con respecto a la calidad encontrada en los Cerros Orientales en condiciones normales (sin la presencia de incendios forestales). Por otro lado, en la investigación desarrollada en Italia se encontró que dentro de la zona de estudio hay presencia de *Pinus pinaster* (especie pirófito), que argumenta por qué la calidad de la vegetación no presenta cambios abruptos [39].

### 3.3. Comportamiento de la LST durante los incendios forestales

La LST es un indicador utilizado frecuentemente que identifica la relación de dicha variable con los incendios forestales o su comportamiento en las áreas quemadas antes de los incidentes, durante y después de estos [5], [14] [36]. En diversas investigaciones se observó cómo la LST incrementa sus valores conforme a la magnitud de los incendios forestales, las condiciones meteorológicas de la zona y las características de la imagen satelital (azimut, ángulo de elevación del sol, fecha de adquisición de la imagen, entre otros) [5]; sin embargo, también se evidenció cómo la LST disminuye en el transcurso de los meses y años siguientes, debido a la recuperación de la vegetación.

En los Cerros Orientales, la LST registró una temperatura máxima de 26 °C y durante los incendios forestales tiene un incremento aproximado de 12 °C frente a la temperatura ambiente que presenta la zona de estudio. En España, la LST durante esta clase de incidentes alcanza una temperatura de 48 °C con respecto a la temperatura ambiente de 30 °C que se tiene en la época seca o en la estación de verano [5]. La LST en cada zona de estudio difiere, puesto que

las condiciones geográficas son diferentes. La de España tiene una elevación de 130 a 2400 ms.n.m.; por tanto, su clima se caracteriza por ser más cálido y registrar temperaturas más altas en épocas secas. Al contrario, los Cerros Orientales tienen una elevación desde los 2650 hasta los 3600 ms.n.m., y al tener mayor elevación posee una menor temperatura en condiciones normales; por ende, cuando ocurren incendios forestales, se registrarán incrementos superiores en la zona de estudio de España que en los Cerros Orientales. También se debe tener en cuenta la magnitud del incendio, ya que entre mayor sea el área afectada por el fuego, el incremento en la LST será mayor [4].

En función de lo anterior, se deduce que cuanto más largo sea el periodo seco en esas zonas, más puede descender la humedad del combustible forestal [40], [41]. El peligro de ignición se incrementará a medida que se prolonga el déficit hídrico o la influencia de la sequía meteorológica, debido al menor contenido de humedad en la vegetación, con cierto retraso se irán secando también los combustibles vegetales pesados que, una vez iniciado el fuego, lo alimentarán aportando su gran reserva de energía [41], [42].

Como se acaba de explicar, los periodos de sequía prolongados crean las condiciones adecuadas de humedad en la vegetación para que un pequeño aporte de calor pueda ser el origen de una gran conflagración [43]-[45]. De esta manera, queda evidenciada la influencia directa de la sequía meteorológica y los demás factores meteorológicos en la iniciación de los incendios, tal y como los reportan los estudios en llanos venezolanos [46]-[48].

Al respecto, es conveniente discutir la importancia del NDVI en la detección de la fase de combustión del carbón. Justamente en esa fase se consume el carbono combinado con el oxígeno y quedan las cenizas formadas por sustancias minerales que no arden. La magnitud de este contenido de humedad no es un dato meteorológico, sino el resultado de los efectos acumulativos de los elementos meteorológicos, que dan lugar al llamado equilibrio higroscópico entre la humedad de la materia vegetal [49] y la humedad del aire [50], [51], según lo reportan los valores del NDVI en sabanas tropicales de Venezuela [41], [52].

El contenido de humedad de la madera, considerada combustible, determina la iniciación y propagación del fuego. Cuando es alto, los fuegos se prenden con dificultad y no se propagan. Cuando es bajo, el foco inicial de calor no necesita ser muy grande para producir un fuego, en cuya propagación el viento [53] y la topografía del terreno serán decisivos [54], [55]. Finalmente, los resultados aquí mostrados representarán la base para el cálculo de un índice potencial de ignición que sirva como entrada para la creación de cartografía temática de zonas de alto riesgo de incendios forestales en Colombia, por condiciones de sobrecarga hídrica, en conjunto con otras variables relevantes en el inicio o la propagación del fuego como: el factor humano, la incidencia de rayos, la vulnerabilidad del territorio, entre otros, usando como herramienta un sistema de información geográfica [56], [57].

## Conclusiones

El NDVI aportó información importante para analizar los cambios de la calidad de la vegetación, causados por efectos de los incendios forestales en los Cerros Orientales de Bogotá (Colombia). De acuerdo con los resultados encontrados, las localidades que tienen una baja calidad en

la vegetación fueron: Chapinero, Santa Fe y Usaquén, susceptibles al desarrollo de incendios forestales por el tipo de vegetación predominante.

Se ha demostrado que la conjunción de índices de vegetación como el NDVI y la LST resulta de gran interés para este tipo de estudios ya que, cuanto mayor es el valor del índice y menor la LST, la planta ofrecerá mejores condiciones vitales en la zona de estudio. La LST no solo está relacionada con el NDVI, sino que a su vez permite identificar si la vegetación se encuentra en sobrecarga hídrica, lo cual es determinante en la incidencia y propagación de los incendios forestales.

Este estudio da bases para analizar la problemática de los incendios forestales en el país mediante el uso del NDVI y la LST, aportando información relevante para cuantificar las repercusiones de este escenario de riesgo, bajo condiciones antrópicas y naturales.

## Agradecimientos

Los autores agradecen la asesoría y contribución de la doctora Gina Paola González Angarita, en el desarrollo de esta investigación, y a la Universidad Libre, por abrirnos sus puertas y formarnos como ingenieros ambientales.

## Referencias

- [1] E. Chuvieco, "Satellite observation of biomass burning", en *Earth Observation of Global Change*. Dordrecht: Springer, 2008, pp. 109-142, 2008. [https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6358-9\\_6](https://doi.org/10.1007/978-1-4020-6358-9_6)
- [2] M. Cochrane, "Fire science for rainforests", *Nature*, vol. 421, pp. 913-919, 2003. <https://doi.org/10.1038/nature01437>
- [3] F. Avelino, J. Collatz, L. Giglio, E. Kasischke, O. Seth, K. Prasad, J. Randerson y G. van der Werf, "Continental-scale partitioning of fire emissions during the 1997 to 2001 El Niño/La Niña period", *Science*, vol. 303, pp. 73-76, 2004. <https://doi.org/10.1126/science.1090753>
- [4] L. Calvo, E. Calabuig, V. Fernández, E. Marcos, C. Quintano y L. Valbuena, "Evaluation of composite burn index and land surface temperature for assessing soil burns severity in mediterranean fire-prone pine ecosystems", *Forests*, pp. 1-16, 2018. <https://doi.org/10.3390/f9080494>
- [5] L. Vlassova, F. Pérez Cabello, M. Rodrigues Mimbrero, R. Montorio Llovería y A. García-Martín, "Analysis of the relationship between land surface temperature and wildfire severity in a series of Landsat images", *Remote Sens.*, vol. 6, n.º 7, pp. 6132-6162, 2014. <https://doi.org/10.3390/rs6076136>
- [6] R. Martínez Domínguez y D. A. Rodríguez Trejo, "Los incendios forestales en México y América Central", en *Memorias del Segundo Simposio Internacional sobre Políticas, Planificación y Economía de los Programas de Protección contra Incendios Forestales: Una visión global*, Albany, California, 2008. [En línea]. Disponible: [https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw\\_gtr208es/psw\\_gtr208es\\_767-780\\_dominquez.pdf](https://www.fs.fed.us/psw/publications/documents/psw_gtr208es/psw_gtr208es_767-780_dominquez.pdf)
- [7] Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, "Los incendios forestales", 25 agosto 2011. [En línea]. Disponible: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=428:plantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-23#documentos>
- [8] Ministerio de Ambiente, "Ministerio de Ambiente", 2012. [En línea]. Disponible: <http://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article?id=428%3Aplantilla-bosques-biodiversidad-y-servicios-ecosistematicos-23#documentos>
- [9] IDEAM, *Estadísticas de incendios en Colombia*, Bogotá, 2016.
- [10] Instituto Distrital de Gestión de Riesgos y Cambio Climático, "Caracterización general del escenario

- de riesgo por incendio forestal”, 28 agosto 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.idiger.gov.co/rincendiof>
- [11] P. Nageswara, S. Shobha, R. Ramesh y K. Somashekhar, Evaluación por satélite de la sequía agrícola en el estado de Karnataka, Filadelfia: SpringerLink, 2005, pp. 429-434. <https://doi.org/10.1007/BF02990014>
- [12] L. Serrano, V. Serrano, H. Flores, L. Chávez y D. Vázquez, “Variabilidad espacio-temporal de las sequías en la cuenca pacífico norte de México”, Cuad. Investig. Geog., pp. 185-204, 2016. <https://doi.org/10.18172/cig.2857>
- [13] L. Vlassova y F. Pérez-Cabello, “Effects of post fire wood management strategies on vegetation recovery and land surface temperature (LST) estimated from Landsat Images”, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., vol. 44, pp. 171-183, 2016. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2015.08.011>
- [14] C. Quintano, A. Fernández-Manoso, L. Calvo, E. Marcos y L. Valbuea, “Land Surface Temperature as potential indicator of burn severity in forest Mediterranean ecosystems”, Int. J. Appl. Earth Obs. Geoinf., vol. 36, pp. 1-12, 2014. <https://doi.org/10.1016/j.jag.2014.10.015>
- [15] S. Liang, Quantitative Remote Sensing of Land Surfaces. New Jersey: Wiley, 2004.
- [16] D. Quattrchi y J. Luvall, Thermal Remote Sensing in Land Surface Processing. London: CRC Press, 2004.
- [17] Alcaldía Mayor de Bogotá, Decreto 190 de 2004, por medio del cual se compilan las disposiciones contenidas en los Decretos Distritales 619 de 2000 y 469 de 2003, 2004. [En línea]. Disponible: <https://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Normal.jsp?i=13935>
- [18] Corporación Autónoma Regional, “Modificación al Plan de Manejo Reserva Forestal Protectora Bosque Oriental de Bogotá”, CAR, Bogotá, 2016.
- [19] Alcaldía Mayor de Bogotá; Secretaría Distrital de Planeación; Secretaría Distrital de Hábitat, Así se viven: los cerros experiencias de habitabilidad. Bogotá: Sergio Apráez Oviedo, 2015.
- [20] M. Bonase, R. Bazán, M. Pagot, L. Pinotti, C. Ledesma y C. Rodríguez, “Utilización de imágenes ráster y landsat para el monitoreo de la concentración de clorofila en el Emalse de los Molinos. Córdoba, Argentina”, Biol. Acuát., pp. 69-77, 2014.
- [21] USGS, “Base de imágenes satelitales”, 2018.
- [22] G. Meera Gandhi, S. Pathirban, N. Thummalu, y A. Christy, “NDVI: Vegetation change detection using remote sensing and gis: A case study of Vellore District”, Procedia Comput. Sci., vol. 57, pp. 1199-1210, 2015. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2015.07.415>
- [23] F. Blanco, F. Bodoira, M. Fernández, L. Guzmán, C. Merg, R. Montalva, M. Nini, D. Petri, K. Rodríguez, F. Schmidt y F. Selzer, “Mapas digitales regionales de lluvias, índice estandarizado de precipitación e índice verde”, Revista Pilquen, pp. 1-11, 2011.
- [24] G. Casady, W. Leeuwen y J. Romo, “Using MODIS-NDVI for the modeling of post wildfire vegetation response as function of environmental conditions and pre-fire restoration treatments”, Remote Sens., pp. 597-621, 2012. <https://doi.org/10.3390/rs4030598>
- [25] G. Toribio, “Cursos de tele-detección”, 25 octubre 2019. [En línea]. Disponible: <https://www.cursosdeledeteccion.com/ndvi-que-es-y-para-que-sirve/>
- [26] M. Amani, B. Salehi, S. Mahdavi y B. Brisco, “Spectral analysis of wetlands using multi-source optical satellite imagery”, Photogramm. Rem. S., pp. 119-136, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2018.07.005>
- [27] J. Rouse, “Seguimiento de sistemas de vegetación en las grandes llanuras con ERST”, NASA, pp. 309-317, 1974.
- [28] D. Mutibwa, S. Strachan y T. Albright, “Land surface temperature and surface air temperature in complex terrain”, J. Sel. Top. App. Earth Obs. Remote Sens., vol. 8, n.º 10, pp. 4762-4774, 2015. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2015.2468594>
- [29] USGS, “USGS Science for Changing World”, 1984. [En línea]. Disponible: [https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-5?qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con=0#qt-science\\_support\\_page\\_related\\_con](https://www.usgs.gov/land-resources/nli/landsat/landsat-5?qt-science_support_page_related_con=0#qt-science_support_page_related_con)

- [30] U. Advan y G. Jovanovska, "Algorithm for automated mapping of land surface temperature using LANDSAT 8 satellite data", *J. Sensors*, pp. 1-8, 2016. <https://doi.org/10.1155/2016/1480307>
- [31] NASA, *Landsat 7 Science Data Users Handbook*, Estados Unidos, 2007.
- [32] Q. Weng, D. Lu y J. Schubring, "Estimation of land surface temperature-vegetation abundance relationship for urban and heat island studies", *Remote Sens. Environ.*, vol. 89, n.º 4, pp. 434-440, 2004. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2003.11.005>
- [33] C. E. Torres Becerra, "Documento técnico de soporte amenaza por incendios forestales", Bogotá, 2019. [En línea]. Disponible: [http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/POT/4-DOCUMENTO\\_TECNICO\\_DE\\_SOPORTE\\_14-06-19/DT04\\_Anejo14\\_MapadeAmenaza\\_porIncendiosForestales.pdf](http://www.sdp.gov.co/sites/default/files/POT/4-DOCUMENTO_TECNICO_DE_SOPORTE_14-06-19/DT04_Anejo14_MapadeAmenaza_porIncendiosForestales.pdf)
- [34] C. Guijarro, P. Hernando, P. Pérez-Gorostiaga, J. A. Vega, T. Fonturbel, C. Díez, E. Martínez y J. Madrigal, "Inflamabilidad de la hojarasca de diferentes especies forestales: influencia de la humedad y de la densidad aparente del combustible", 2001. [En línea]. Disponible: [http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos\\_forestales/article/view/15882/15725](http://secforestales.org/publicaciones/index.php/congresos_forestales/article/view/15882/15725)
- [35] G. L. Spadoni, A. Cavalli, L. Congedo y M. Munafò, "Analysis of Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) multi-temporal series for production of forest cartography", *Remote Sens. App. Soc. Environ.*, vol. 20, pp. 1-12, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.rsase.2020.100419>
- [36] R. Montorio, P. Rosero y L. Vlassova, "Variabilidad espacio-temporal de la temperatura de superficie en ecosistemas de Dehesa estimada mediante imágenes satelitales Landsat TM: el papel del arbolado", *Geographocalia*, pp. 69-86, 2016. [https://doi.org/10.26754/ojs\\_geoph/geoph.2016681582](https://doi.org/10.26754/ojs_geoph/geoph.2016681582)
- [37] H. Añamuro, "Detección de áreas afectadas por incendios forestales en la Reserva Nacional del Titicaca en el año 2016, utilizando geotecnologías. Juliaca: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, 2019.
- [38] C. P. Suquilanda Criollo, "Estimación del grado de severidad causada por un incendio sobre una cobertura forestal en el sector de Iruquis (Azuay) utilizando técnicas de teledetección", tesis de grado, Univ. Cuenca, Ecuador, 2020. [En línea]. Disponible: <http://dspace.ucuenca.edu.ec/handle/123456789/34445>
- [39] W. De Simone, M. Di Musciano, V. Di Cecco, A. Frattaroli y G. Ferella, "The potentiality of Sentinel-2 to assess the effect of fire events on Mediterranean mountain vegetation", *Plant Sociol.*, pp. 11-22, 2020. <https://doi.org/10.3897/pls2020571/02>
- [40] B. O. Olivares, A. Cortez, M. F. Rodríguez, R. M. Parra, D. Lobo, J. C. Rey, "Análisis temporal de la sequía meteorológica en localidades semiráridas de Venezuela", *UG Ciencia*, vol. 22, n.º 1, pp. 11-24, 2016. <https://doi.org/10.18634/ugcj.22v.1i.481>
- [41] B. O. Olivares, A. Cortez, D. Lobo, R. M. Parra, J. C. Rey y M. F. Rodríguez, "Estudio de la sequía meteorológica en localidades de los llanos de Venezuela mediante el índice de precipitación estandarizado", *Acta Nova*, vol. 7, n.º 3, pp. 266-283, 2016. [En línea]. Disponible: [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_arttext&id=S1683-07892016000100004](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&id=S1683-07892016000100004)
- [42] B. O. Olivares y L. Zingaretti, "Aplicación de métodos multivariados para la caracterización de períodos de sequía meteorológica en Venezuela", *Luna Azul*, vol. 48, pp. 172-192, 2019. <https://doi.org/10.17151/luaz.2019.48.10>
- [43] B. O. Olivares y M. L. Zingaretti, "Análisis de la sequía meteorológica en cuatro localidades agrícolas de Venezuela mediante la combinación de métodos multivariados", *UNED Res. J.*, vol. 10, n.º 1, pp. 181-192, 2018. <https://doi.org/10.22458/urj.v10i1.2026>
- [44] F. Paredes y B. O. Olivares, "El desafío de la sequía en América Latina y el Caribe: Venezuela", UNESCO, 2018.
- [45] B. O. Olivares, R. Hernández, R. Coelho, J. C. Molina y Y. Pereira, "Analysis of climate types: Main strategies for sustainable decisions in agricultural areas of Carabobo, Venezuela", *Scientia Agropecuaria*, vol. 9, n.º 3, pp. 359-369, 2018. DOI: <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2018.03.07>
- [46] B. O. Olivares, A. Cortez, D. Lobo, R. Parra, J. Rey y M. Rodríguez, "Evaluation of agricultural vulnerability to drought weather in different locations of Venezuela", *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, vol. 34, n.º 1, pp. 103-129, 2017.



- [47] A. Cortez, B. O. Olivares, R. M. Parra, D. Lobo, J. C. Rey y M. F. Rodríguez, "Descripción de los eventos de sequía meteorológica en localidades de la cordillera central, Venezuela", *Ciencia, Ingenierías y Aplicaciones*, vol. 1, n.º 1, pp. 22-44, 2018. <https://doi.org/10.22206/cyap.2018.viil.pp23-45>
- [48] R. M. Parra, B. O. Olivares, A. Cortez, D. Lobo, J. C. Rey y M. F. Rodríguez, "Características de la sequía meteorológica (1980-2014) en dos localidades agrícolas de los andes venezolanos", *Rev. Investig.*, vol. 42, n.º 95, pp. 38-55, 2018. [En línea]. Disponible: <https://www.redalyc.org/jatsRepo/3761/376160247003/html/index.html>
- [49] B. O. Olivares y R. A. Hernández Rondón, "Ecoterritorial sectorization for the sustainable agricultural production of potato (*Solanum tuberosum* L.) in Carabobo, Venezuela", *Cien. Technol. Agropecuaria*, vol. 20, n.º 2, pp. 339-354, 2019. <https://doi.org/10.21930/rcta.vol20num2art:1462>
- [50] B. O. Olivares, L. Caraballo y J. Torrealba, "Variabilidad del régimen de precipitación en el periodo 1990-2009 en la localidad de El Tigre estado de Anzoátegui, Venezuela", *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, vol. 30, n.º 1, pp. 19-32, 2013. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/mic0l>
- [51] B. O. Olivares, "Tropical conditions of seasonal rain in the dry-land agriculture of Carabobo, Venezuela", *La Granja: Journal of Life Sciences*, vol. 27, n.º 1, pp. 86-102, 2018. <http://doi.org/10.17163/lgr.n27.2018.07>
- [52] B. O. Olivares y M. A. López-Beltrán, "Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) applied to the agricultural indigenous territory of Kashaama, Venezuela", *UNED Res. J.*, vol. 11, n.º 2, pp. 112-121, 2019. <https://doi.org/10.22458/urj.v11i2.2299>
- [53] S. Casana Barrera y B. O. Olivares, "Evolución y tendencia de la temperatura y la velocidad del viento en superficies (1994-2014) en el Parque Nacional Doñana, España", *Rev. Fac. Agron. (LUZ)*, vol. 37, n.º 1, pp. 1-25, 2020. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/c815e>
- [54] B. Olivarez, K. Verbist, D. Lobo y O. Silva, "Evaluation of the USLE model to estimate water erosion in an Alfisol", *J. Soil Sci. Plant Nutr.*, vol. 11, n.º 2, pp. 71-84, 2011. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-95162011000200007>
- [55] B. Olivarez, D. Lobo y K. Verbist, "Aplicación del modelo USLE en parcelas de erosión bajo prácticas de conservación de suelos y aguas en San Pedro de Melipilla, Chile", *Cienc Ing.*, vol. 36, n.º 1, pp. 3-10, 2015. [En línea]. Disponible: <https://n9.cl/c1f7k>
- [56] M. Weisse y G. Liz, "Global Forest Watch", 25 abril 2019. [En línea]. Disponible: <https://blog.globalforestwatch.org/data-and-research/el-mundo-perdio-un-area-del-tamano-de-belgica-de-bosques-tropicales-primarios-el-ano-pasado>.
- B. O. Olivares-Campos, M. A. López-Beltrán y D. Lobo-Luján, "Cambios de uso de suelo y vegetación comunidad agraria Kashaama, Anzoátegui, Venezuela: 2001-2013", *Rev. Geog. Am. Cent.*, vol. 2, n.º 63, pp. 269-291, 2019. <https://doi.org/10.15359/rgac.63-2.10>