

Aplicación de índices espectrales para determinar la transformación del bosque seco en Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia)

Application of spectral indices to determine the transformation of the dry forest in Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia)

Angie Daniela Alarcón Montaña¹, Miguel Ángel Rozo Arango²

¹0000-0001-6911-5779. Universidad de La Salle, Bogotá D.C, Colombia, aalarcon⁴⁸@unisalle.edu.co

²0000-0002-2570-9433. Universidad de La Salle, Bogotá D.C, Colombia, mrozo⁰⁹@unisalle.edu.co

Fecha de recepción: 22/12/2020 - Fecha de aceptación: 29/03/2021



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.17070>

Cómo citar: Alarcón Montaña, A. D., & Rozo Arango, M. A. (2021). Aplicación de índices espectrales para determinar la transformación del bosque seco en Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia). *Avances: Investigación En Ingeniería*, 18(1). <https://doi.org/10.18041/1794-4953/avances.17070>

Resumen

El bosque seco tropical (Bs-T), que se caracteriza por estabilizar los suelos y regular el ciclo hidrológico, se ha visto afectado por la pérdida de vigor vegetal y humedad en el sustrato, particularmente en el municipio de Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia), que presenta uno de los últimos relictos de este bioma. El estudio analizó la transformación del Bs-T en este municipio para los años 1991, 2015 y 2020, a través del cálculo de los NDWI y NDVI de imágenes satelitales Landsat, con el fin de determinar la evolución del vigor vegetal y la humedad del Bs-T. Los principales resultados muestran un aumento de las categorías de los índices bajo (entre -0,6 y -0,1) y muy bajo (desde -1 y -0,61) por lo que se concluye que existe una disminución y una correlación entre estos para ambas épocas (seca y lluviosa).

Palabras clave: bosque seco tropical, transformación, NDWI, NDVI, dinámicas fisiológicas.

Abstract

The tropical dry forest (TDF), recognized for stabilizing soils and regulating the hydrological cycle, has been affected by the loss of plant vigour and substrate moisture, particularly in the municipality of Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia) that presents one of the last relics of this biome. The study analyzed the transformation of TDF in this municipality for 1991, 2015 and 2020, through the calculation of the NDWI and NDVI of Landsat satellite images to establish the evolution of vegetable vigour and humidity of TDF. The main results show an increase in the low (between -0.6 and -0.1) and very low (from -1 to -0.61) categories of the indices, which leads to the conclusion that there is a decrease and correlation between them for both seasons (dry and rainy).

Keywords: tropical dry forest, transformation, NDWI, NDVI, physiological dynamics.

Introducción

Las razones principales para la conservación del bosque seco tropical (Bs-T) se deben a la alta diversidad biológica y los altos índices de endemismo que varían en cada una de las regiones biogeográficas de Colombia [1], [2], al igual que los servicios ecosistémicos que presta: regulación hídrica y estabilidad de suelos. Dichos factores están relacionados con la vegetación y el suelo propios de este bioma, los cuales son capaces de absorber el exceso de agua, reducir la escorrentía superficial y prevenir procesos erosivos e inundaciones [3]. Sin embargo, según el libro *El bosque seco tropical en Colombia*, editado por el Instituto Alexander von Humboldt, de la totalidad del bioma de Bs-T que existe en Colombia solo el 4% conserva su cobertura original, el 5% es considerado un remanente con algún grado de intervención y el 91% del bosque ha sido deforestado, principalmente a causa de la agricultura y la ganadería, con un 61% [2].

Esta pérdida de cobertura vegetal debido a factores antrópicos reduce el número de especies de fauna y flora endémicas del bioma [4], porque las poblaciones dependen de un área mínima del Bs-T para sobrevivir y que se ve en riesgo por la fragmentación de su ecosistema, sumado al efecto de borde, donde son más agudos los problemas de degradación [4], [5]. En periodos secos también disminuye la vegetación del Bs-T a causa del déficit de humedad que produce la pérdida del turgor y el aumento de abscisión foliar [3], [6]. Lo anterior se explica porque los procesos vitales de la planta son afectados por el bajo potencial hídrico disponible en sus hojas, y ello ocasiona estrés hídrico que implica se afecte su supervivencia [7].

De la misma manera, el decrecimiento de los remanentes de Bs-T ha ocasionado la pérdida de otros servicios ecosistémicos que brinda este bioma, como banco de semillas, fuente de alimento, insumos para medicinas, entre otros [2]. Particularmente, en el municipio de Agua de Dios (Cundinamarca, Colombia), la actividad socioeconómica, junto con la expansión urbana [8], generó que en la actualidad solo se encuentren algunas zonas con los últimos relictos de este bioma [9]. Por las razones anteriores, la conservación y el estudio de la transformación del Bs-T del municipio es un aporte importante para el ordenamiento territorial de Agua de Dios.

A fin de determinar la transformación del Bs-T, se analiza la variación multitemporal del Índice Diferencial de la Vegetación Normalizado (NDVI) y del Índice Diferencial del Agua Normalizado (NDWI), que cuantifican indicadores como el estado de la vegetación y el estrés hídrico, respectivamente, puesto que el primero mide la reflectancia del infrarrojo cercano (NIR), relacionado con el contenido de clorofila que identifica el vigor vegetal; en cambio, el segundo registra la variación del infrarrojo de onda cercana (SWIR), que está vinculado con la disponibilidad de agua de la vegetación [10]-[12]. Varios investigadores han implementado estos dos índices espectrales para registrar cambios físicos en las coberturas vegetales y así han analizado la transformación de los bosques durante el tiempo [13]-[15].

Según lo anterior, fue importante realizar un estudio multitemporal con el que se identificó cuál ha sido la evolución del vigor y la humedad de la vegetación del Bs-T en el municipio de Agua de Dios en los años de 1991, 2015 y 2020. Por ello, se planteó como objetivo analizar la transformación en la cobertura a través de la variación de la humedad de la vegetación y el vigor del Bs-T.

Este estudio se llevó a cabo por medio de información geográfica e imágenes satelitales Landsat, que permitieron el cálculo del NDWI y del NDVI. Dichos resultados se evaluaron tanto para la época seca como para la época de lluvia, teniendo en cuenta las dinámicas fisiológicas del Bs-T.

Por otra parte, este artículo está compuesto de la metodología de investigación, que describe el área de estudio, el procesamiento digital de las imágenes de satélite, el cálculo de los índices espectrales utilizados y la interpretación de la distribución espacial y porcentual de estos. Después se analizan los resultados obtenidos y, finalmente, se concluye respecto al estudio.

1. Metodología

1.1 Descripción del área de estudio

El municipio de Agua de Dios pertenece al departamento de Cundinamarca, en Colombia. Está ubicado en la provincia del Alto Magdalena, entre los municipios de Girardot y Melgar, a 114 km de Bogotá [16]. El municipio presenta condiciones climáticas (tabla 1) que están asociadas con este bioma; sin embargo, actualmente, debido a la transformación, solo se encuentran los últimos relictos del Bs-T, que en el presente estudio se denominan área de interés.

Tabla 1. Condiciones climáticas del bosque seco tropical y el municipio de Agua de Dios

Condiciones climáticas	Bosque seco tropical	Agua de Dios
Temperatura anual (°C)	>24	27
Precipitación media anual (mm)	1000-2000	1212
Evapotranspiración media anual (mm)	1 a 2 veces la precipitación media anual	2000

Fuente: elaboración propia, a partir de [2] y [8].

Principalmente, las formaciones boscosas que podrían pertenecer a este bioma se identifican como el bosque Los Chorros (conformado, a su vez, por el cerro de La Cruz y la cuchilla del cerro Negro) y el bosque de Aguas Frías, que se localizan en las “terminaciones de la Serranía de Agua de Dios, en las primeras estribaciones de la cordillera oriental”, además de la reserva ecológica Maná Dulce (figura 1) [9]. Igualmente, los polígonos de Bs-T se confirmaron con los realizados por el Instituto de Investigación Alexander von Humboldt en el mapa de delimitación del Bs-T del 2014.

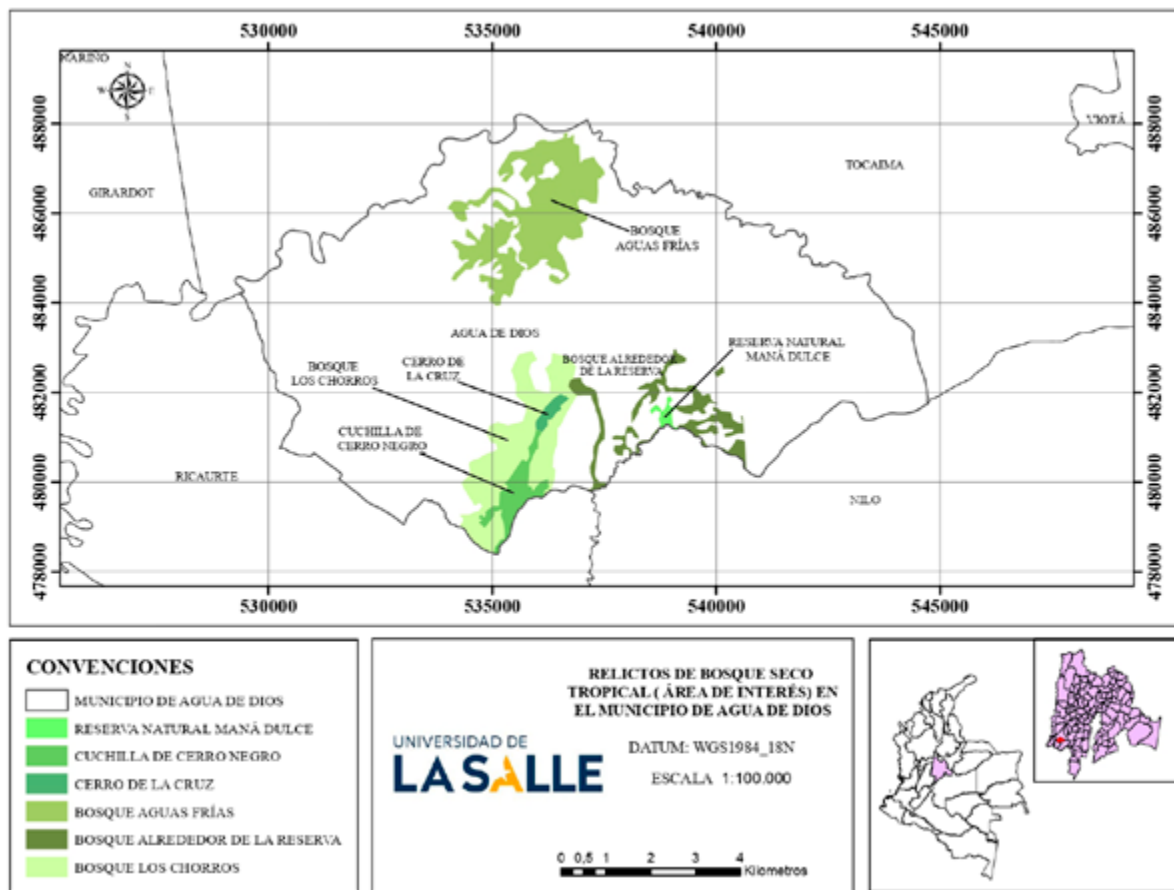


Figura 1. Relictos de bosque seco tropical en el municipio de Agua de Dios. Fuente: elaboración propia, adaptado del mapa del bosque seco tropical del Instituto de Investigación Alexander von Humboldt (2014)

1.2. Procedimiento digital de las imágenes satelitales (correcciones)

Para el presente estudio se seleccionaron tres imágenes satelitales de época seca y lluviosa, de acuerdo con los criterios de (1) la disponibilidad de imágenes satelitales, según los periodos seleccionados, y (2) el porcentaje de cobertura de nubes en el municipio de Agua de Dios. Después de revisar las imágenes de satélite disponibles en línea para cada uno de los sensores TM+ (Landsat 5), ETM+ (Landsat 7) y OLI-TIRS (Landsat 8) se definieron los años de estudio, que corresponden a 1991, 2015 y 2020.

Una vez se seleccionaron y descargaron las imágenes satelitales, se procesaron definiendo el sistema de referencia geográfica WGS 84 UTM 18N. Cabe mencionar que las imágenes captadas por el sensor Landsat 7 se corrigieron por medio de un procedimiento de triangulación en ENVI5.3. Posteriormente, se llevaron a cabo las correcciones radiométricas, a fin de convertir los números digitales a radiancia espectral para las imágenes de Landsat. Por último, para disminuir las interferencias de la columna atmosférica, se empleó el método Flaash.

1.3. Cálculo del Índice Diferencial del Agua Normalizado y del Índice Diferencial de la Vegetación normalizado en el municipio de Agua de Dios

Después de que se corrigieron las imágenes fueron, se calcularon los índices espectrales NDWI y NDVI, que muestran valores dentro de un rango de -1 a 1 para cada uno de los índices. Específicamente, el NDWI se usa para estimar la humedad de la cobertura de estudio y para cuantificar la cantidad de agua que posee la vegetación [17] y se calcula a través de la ecuación 1.

$$NDWI = (NIR - SWIR) / (NIR + SWIR) \quad (1)$$

Donde: NIR: valores de píxel de la banda de infrarrojo cercano.

SWIR: valores de píxel de la banda de infrarrojo de onda corta.

Asimismo, el índice NDVI se usa para estimar la densidad de la vegetación en una determinada área [18] y se calcula por medio de la ecuación 2.

$$NDVI = (NIR - RED) / (NIR + RED) \quad (2)$$

Donde:

NIR: valores de píxel de la banda de infrarrojo cercano.

RED: valores de píxel de la banda rojo visible.

1.4. Interpretación de la distribución espacial y porcentual de los índices NDWI y NDVI en el municipio de Agua de Dios (Cundinamarca)

Finalmente, por medio de los resultados de los índices NDWI y NDVI, los rangos se clasificaron en proporción a la escena por medio del algoritmo de Jenks Natural Breaks, que es uno de los métodos de agrupación del software ArcGIS. Con estas categorías se ilustró la evolución de la distribución espacial y porcentual de la humedad de la vegetación (tabla 2), así como la calidad y vigor de la cobertura vegetal del bioma Bs-T (tabla 3) en el municipio de Agua de Dios, con el fin de analizar esta transformación multitemporal durante los periodos secos y lluviosos.

Tabla 2. Valores de clasificación del NDWI

Valores	Rangos	Interpretación	Convención
Muy altos	Entre 0,61 y 1	Identifican la presencia de captación de humedad por parte de la vegetación y el suelo.	
Altos	Entre 0,31 y 0,6		
Medios	Entre 0 y 0,3	Representan la vegetación y el suelo que contiene poca cantidad de humedad.	
Bajos	Entre -0,6 y -0,1		
Muy bajos	Entre -1 y -0,61		

Fuente: elaboración propia a partir de los valores agrupados por el software ArcGIS y el método Jenks, e interpretación tomada de [17].

Tabla 3. Valores de clasificación del NDVI

Valores	Rangos	Interpretación	Convención
Muy altos	Entre 0,61 y 1	Reflejan mayor vigor vegetal y coberturas sanas.	
Altos	Entre 0,31 y 0,6		
Medios	Entre 0 y 0,3	Coberturas en menor vigor vegetal o suelos desnudos	
Bajos	Entre -0,6 y -0,1		
Muy bajos	Entre -1 y -0,61		

Fuente: elaboración propia, adaptado de los valores agrupados por el software ArcGIS y el método Jenks, e interpretación tomada de [17].

2. Resultados y discusión

Durante la temporalidad del bioma Bs-T (periodo seco y periodo de lluvia) ocurren las dinámicas fisiológicas del Bs-T [2]. Por tal motivo, al realizar el análisis para cada época, se identificaron las variaciones en la humedad y vigor de la vegetación en el municipio. Incluso, cabe mencionar que en la época bimodal de lluvia la vegetación no presentó defoliación de sus hojas y registró un mayor potencial hídrico [3]. Por el contrario, en la época seca la disponibilidad de agua en el suelo es menor y se produjeron los cambios caducifolios característicos de la vegetación del Bs-T [2].

Estas variaciones en la vegetación se muestran en las figuras 2 y 3, que ilustran las distribuciones espaciales del NDWI y del NDVI para los años de estudio: 1991, 2015 y 2020. Con el propósito de interpretar los índices espectrales, los valores de clasificación, los rangos y su convención se organizaron en las tablas 2 y 3. No obstante, cabe aclarar que en la figura 2 los recuadros de color negro y rojo observados en las escenas de los índices presentan valores que no corresponden a la realidad. Esto se debe a la presencia de neblina en la imagen satelital, que el software no eliminó en su totalidad.

2.1. Resultados del índice NDVI en la época bimodal de lluvia

En la figura 4, en el cuadro correspondiente a 1991, se evidencia que la cobertura vegetal en el área de interés tuvo un valor del 31,12% de sus píxeles en la categoría de muy alto (tabla 3). Este porcentaje fue mayor en comparación con el obtenido en los años 2015 y 2020 para toda la escena. Con relación a los polígonos de Bs-T, en la figura 2, los valores se encuentran en rangos positivos: 0,61-1 y 0,31-0,6. Sin embargo, en la misma figura se ilustra que los valores están entre los rangos de 0 y 0,3 y entre -0,6 y -0,1 en el cerro Negro y el cerro de La Cruz. Lo anterior se debe a procesos naturales que lo condiciona a la ausencia de vegetación, por encontrarse en zonas de ladera que son propensas a las erosiones [16].

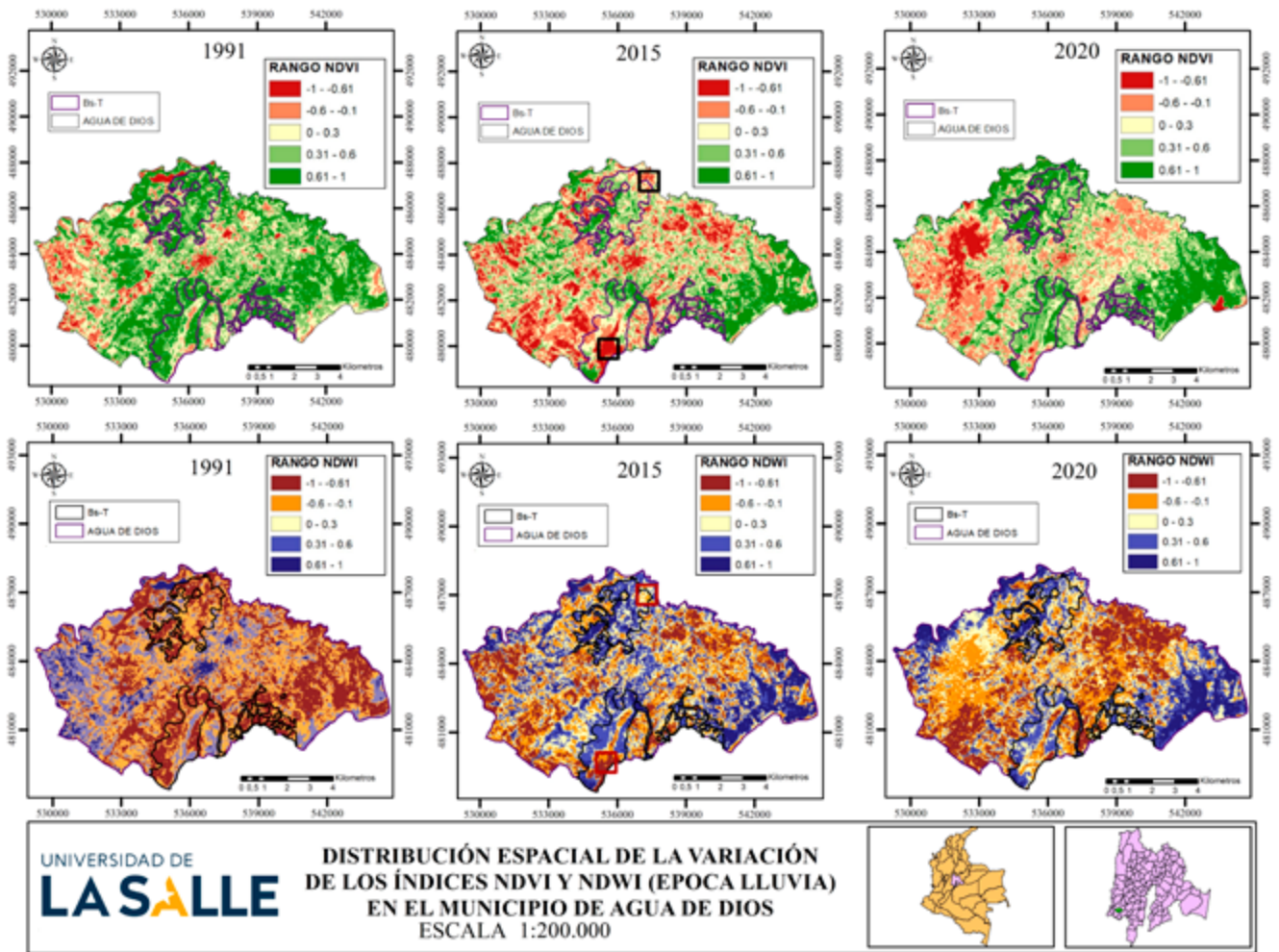


Figura 2. Distribución espacial de la variación de los índices NDVI y NDWI (época lluvia) en el municipio de Agua de Dios, escala 1:200.000. Fuente: elaboración propia.

Con relación al 2015, para las zonas de Bs-T que corresponden al bosque Aguas Frías y a la cuchilla del cerro Negro, estas reportan en parte del área valores entre los rangos de 0 a 0,3, de $-0,6$ a $-0,1$ y de -1 a $-0,61$. Dichos rangos están representados en la figura 2 con colores beige claro, rosado y rojo que indican una disminución de cobertura vegetal. De igual manera, la reducción del vigor vegetativo en el municipio se observa en la figura 4, valores en el 2015 eran del 13,03% y del 8,1% para el porcentaje de píxeles clasificados en la categoría de muy alto y muy bajo, respectivamente. Este porcentaje para la categoría de muy alto disminuyó para el año 2020 con una cifra del 11,22% y aumentaron las categorías de medios y bajos.

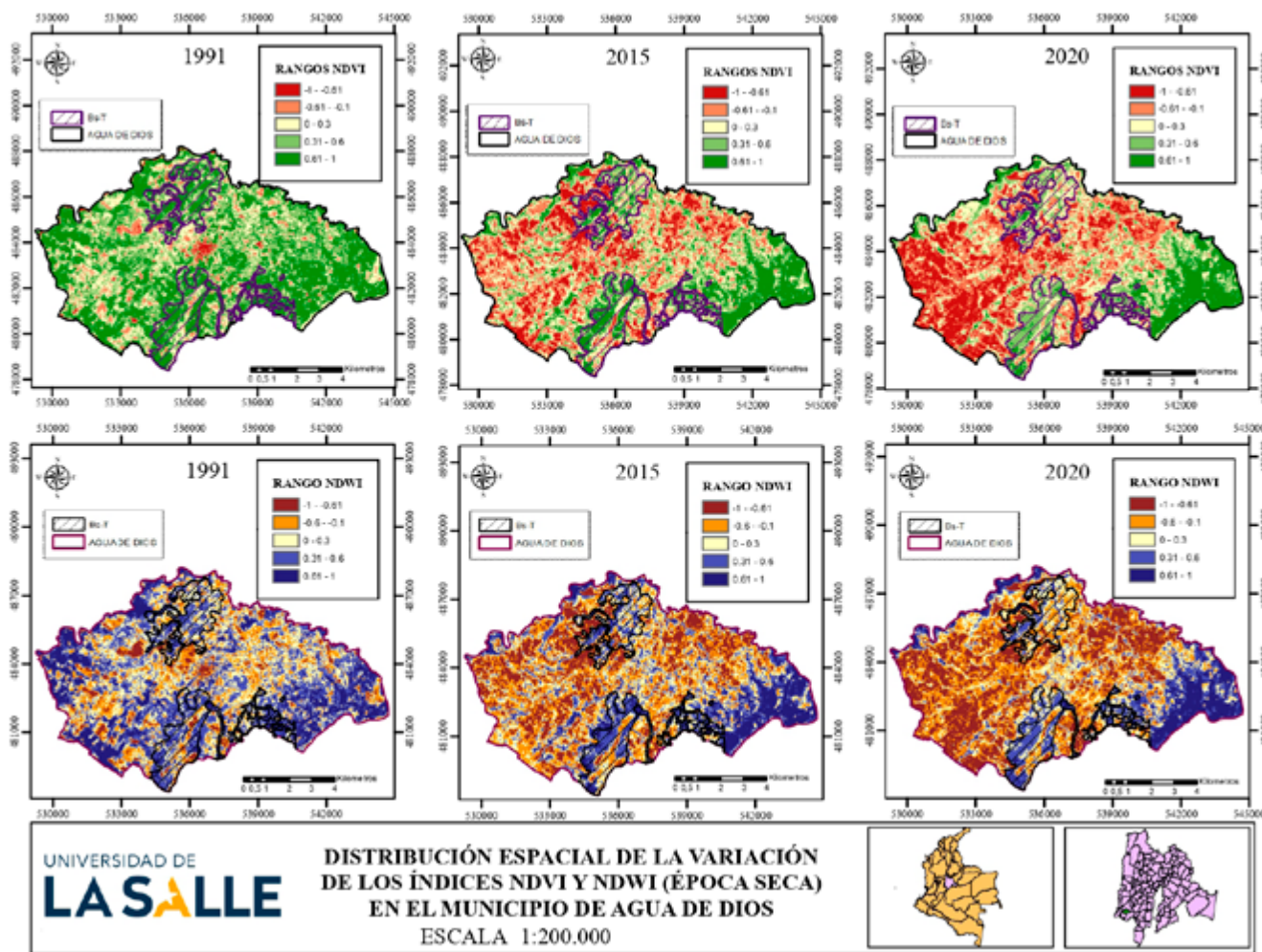


Figura 3. Distribución espacial de la variación de los índices NDVI y NDWI (época seca) en el municipio de Agua de Dios, escala 1:200.000. Fuente: elaboración propia.

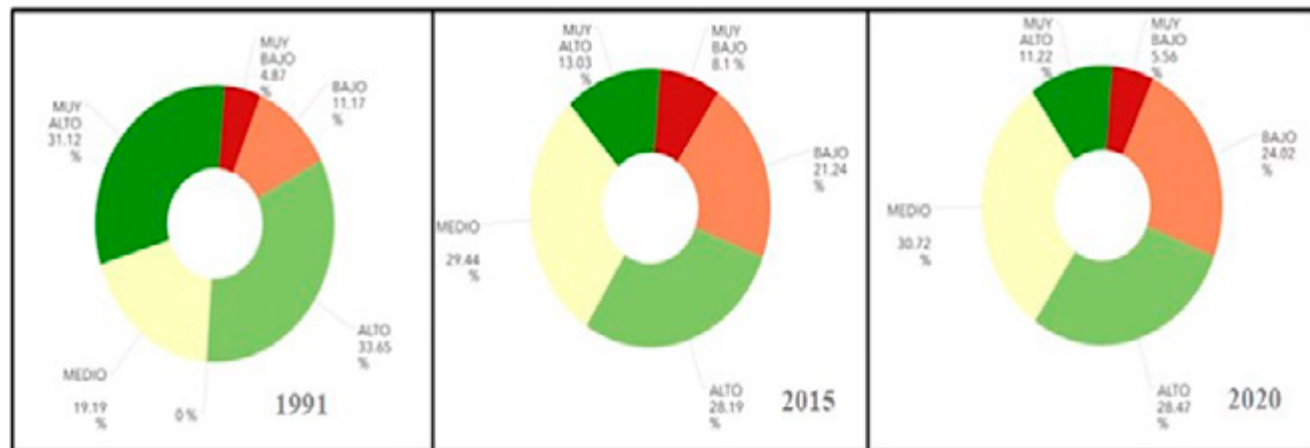


Figura 4. Distribución porcentual de las categorías del índice NDVI (época lluvia) en el municipio de Agua de Dios. Fuente: elaboración propia.

2.2. Resultados del índice NDWI en la época bimodal de lluvia

Asimismo, en el cálculo del índice NDWI (figura 2) para 1991, el bosque Aguas Frías muestra algunas secciones de color naranja entre los rangos $-0,6$ y $-0,1$ y se interpretan como disminución de la humedad (tabla 2), y algunos sectores de color beige claro que se encuentran entre los rangos de 0 a 0,3. Dichos valores fueron aumentando para el mismo bosque en el 2015, cuando fue evidente el crecimiento de las secciones con igual categoría. En la actualidad, el bosque Aguas Frías presenta colores naranjas ($-0,6$ a $-0,1$) con partes que varían en colores vinotinto (-1 a $-0,61$).

No obstante, en el bosque Los Chorros se presentaba una mayor humedad en suelo y vegetación para 1991, en comparación con los otros años de estudio. Ello se demuestra con valores del índice NDWI, que varían entre el rango de 0,31 y 1. Además, lo anterior se evidencia con una disminución de la humedad en el transcurso de los años 2015 a 2020, cuando varían de valores positivos a datos que oscilan entre 0 y $-0,1$, representados con colores beige claro y naranja. Entre tanto, en el cerro de La Cruz y en el cerro Negro se observan colores entre naranja ($-0,6$ a $-0,1$) y vinotinto (-1 a $-0,61$) que se interpretan como áreas de baja humedad a causa de las zonas de ladera.

Por otro lado, en los relictos de Bs-T de la reserva natural Maná Dulce, desde 1991 hasta el 2020 no han presentado cambios en cuanto a la humedad del suelo y vegetación, por lo cual no se identificó una transformación en esta área. Por el contrario, los remanentes que se encuentran a su alrededor han perdido humedad; en consecuencia, a partir del 2015 se muestran colores beige claro y naranja del índice NDWI que han cambiado a colores vinotinto. De igual modo, en el municipio, el porcentaje de pixeles que pertenece a la categoría muy alto disminuyó desde el 20,54 % en 1991 hasta un 9,22 % en el 2020; en contraste, aumentó la categoría de muy bajo comenzando con un 5,98 % en 1991 hasta alcanzar un 16,77 % en el 2020 (figura 5).

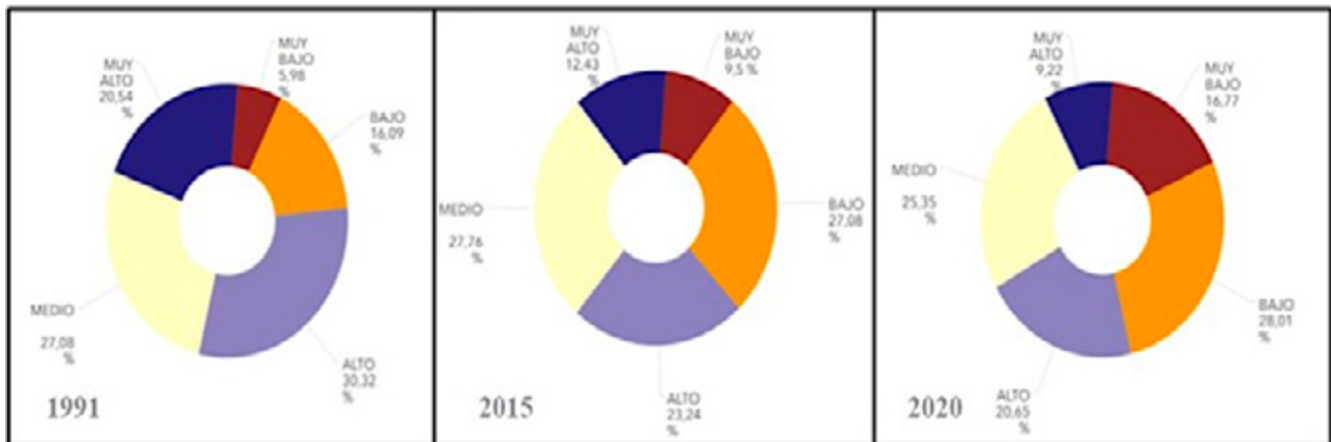


Figura 5. Distribución porcentual de las categorías del índice NDWI (época lluvia) en el municipio de Agua de Dios. Fuente: elaboración propia.

2.3. Resultados del índice NDVI en la época seca

En la parte superior de la figura 3 se ilustra el índice NDVI para la época seca. En esta se evidencia que para 1991 los remanentes que corresponden al bosque de Aguas Frías y el bosque Los Chorros muestran vegetación con menor vigor y rangos entre $-0,6$ y $0,3$. Estos se representan con colores beige claros y rosados. En cambio, para la reserva natural Maná Dulce y sus alrededores los relictos del bioma Bs-T conservan un mayor vigor de vegetación (valores positivos).

Por otra parte, en el 2015, el índice NDVI disminuye en las mismas áreas de remanentes de Bs-T mencionadas y las zonas de color beige claro, rosado e incluso rojas aumentan. Esto indica que el vigor de la vegetación se reduce (tabla 3). También, en el 2020 continúa la dinámica de pérdida de vegetación en el bosque Aguas Frías, lo que se representa con valores entre -1 y $-0,61$ de color rojo (tabla 3).

Además, en el municipio hubo una tendencia de disminución de píxeles de categoría muy alto y un aumento de la clasificación muy bajo con porcentajes del 1,51%, 13,8% y 19,03% para los años 1991, 2015 y 2020, respectivamente (figura 6).

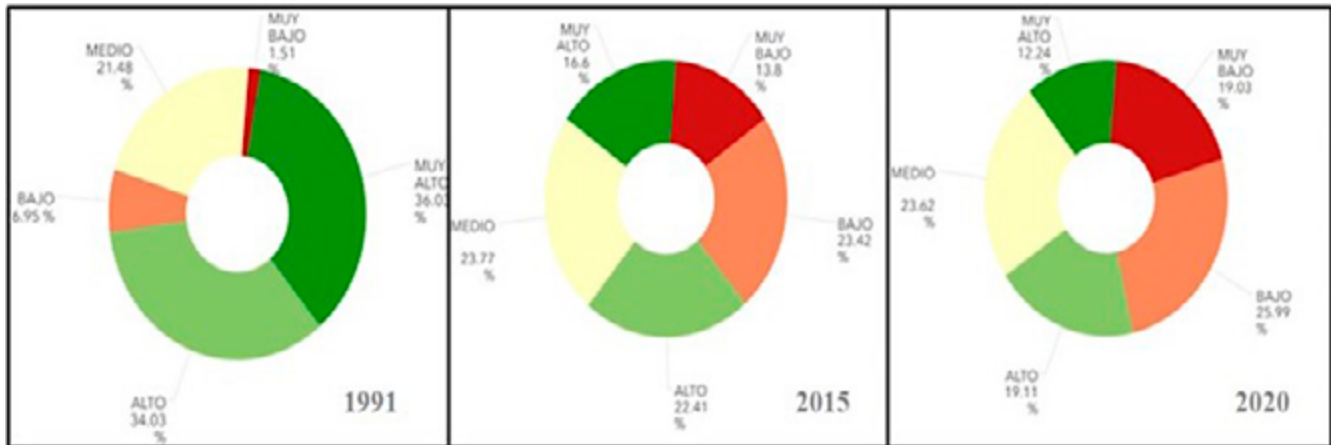


Figura 6. Distribución porcentual de las categorías del índice NDVI (época seca) en el municipio de Agua de Dios. Fuente: elaboración propia.

2.4. Resultados del índice NDWI en la época seca

Además, en el cálculo del índice NDWI, representado en la parte inferior de la escena de la figura 3, sobre el bosque Aguas Frías para 1991 se ilustran colores beige claros que van en el rango de 0 a $0,3$. Así, se evidencia una disminución de humedad con colores naranjas de rangos entre $-0,6$ y $-0,1$. También en el 2015 continúa la misma tendencia del relicto, que varía en colores entre naranjas a vinotinto, hasta alcanzar en el 2020 un déficit, representado en rangos de entre -1 y $-0,1$.

Asimismo, en el bosque Los Chorros se muestra una pérdida de humedad de los suelos y la vegetación representada principalmente por colores naranja y Vinotinto, que van entre $-0,6$ y $-0,1$ y de -1 y $-0,61$, respectivamente. En el 2015, para el mismo relicto, se distinguió un aumento de la humedad en la vegetación que va en los rangos entre $0,31$ y $0,6$, aunque en las zonas

cercanas a la ladera y pie de la cuchilla del cerro Negro aún se presentan sectores con valores negativos que se ilustran en colores beige claro y naranja (0 a -0,6) y en sus faldas denota valores negativos (colores rosados naranjas en la escena) que se mantenían en el 2020.

Finalmente, la reserva natural Maná Dulce mantiene condiciones de humedad en los años de estudio. No obstante, el Bs-T que se encuentra en sus alrededores tiene sectores con colores que varían de beige claro a naranja para el 2015 y que se mantenían en el 2020. Paralelamente, en la distribución porcentual del índice NDWI en el municipio los pixeles clasificados en la categoría bajos y muy bajos se incrementaron, este último con valores desde el 5,78%, el 17,57% y el 21,73%, en los años 1991, 2015 y 2020, respectivamente (figura 7).

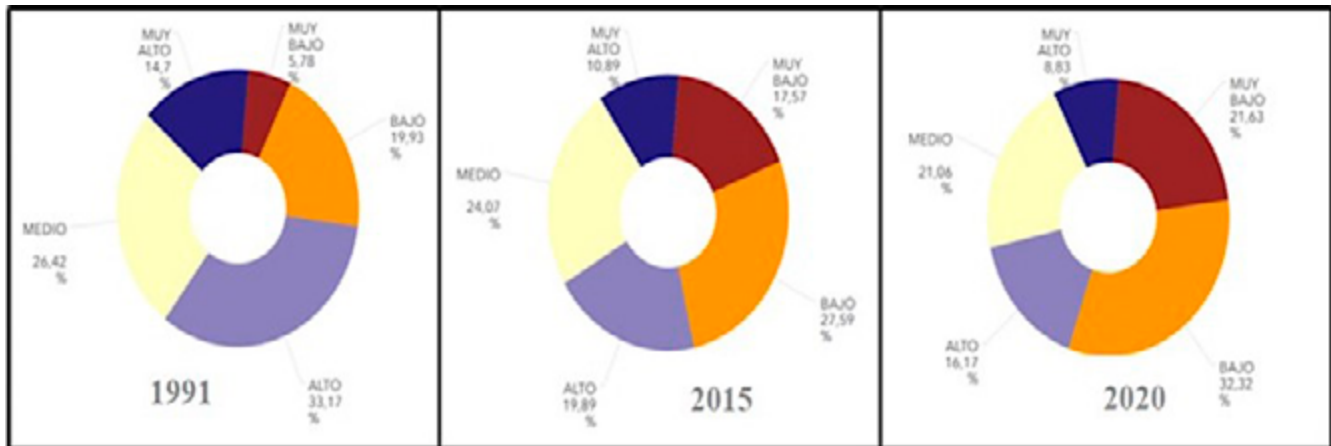


Figura 7. Distribución porcentual de las categorías del índice NDWI (época seca) en el municipio de Agua de Dios. Fuente: elaboración propia.

2.5. Transformación del bosque seco tropical (vigor vegetal y humedad)

En la época de lluvia, la vegetación del Bs-T mantiene unas dinámicas fisiológicas en las que sus estomas se abren para permitir la fotosíntesis [3]. Esto permite que la vegetación considerada sana tenga un mayor vigor y que se vea representada en el índice NDVI. Lo anterior se debe a que las plantas en condiciones sanas absorben la luz visible proveniente de la banda roja y reflejan la energía proveniente del infrarrojo cercano que es capturada por el sensor según el estudio de [19]. Este fenómeno es mostrado en la figura 2 con valores positivos (colores verdes y verdes claros).

Por el contrario, el Bs-T para el periodo seco se caracteriza por sus transformaciones naturales, debido a las dinámicas caducifolias que identifica el índice NDVI, con valores cercanos a cero y negativos (figura 3), ya que la vegetación considerada enferma refleja menos en la banda del infrarrojo cercano [20].

Por otro lado, la pérdida de vigor vegetal y humedad, junto con intervenciones antrópicas como la expansión agropecuaria del municipio, que se identifica en el mapa de áreas de actividad rural, aceleran los procesos de degradación edáfica y aumentan, de acuerdo con [3], la vulnerabilidad del Bs-T a la erosión de sus suelos y, en el peor de los casos, a no ser capaces de regenerarse

por sucesión secundaria. Incluso, autores como [21] y [22] argumentan que las intervenciones antropogénicas en el Bs-T ocasionan cambios en la composición y estructura del bioma, lo que origina su fragmentación y modifica el área del hábitat. Ello aumenta la extinción de las especies endémicas y, por lo tanto, la pérdida de biodiversidad.

Del mismo modo, las transformaciones en vigor y humedad vegetal se observan tanto para los remanentes de Bs-T como para el municipio de Agua de Dios, en valores de los índices cercanos a 0 y negativos para ambas épocas, es decir, los sectores con valores del NDWI negativos (colores naranja y vinotinto) coinciden con áreas cuyos valores del NDVI son bajos y muy bajos, ilustrada en colores rosados y rojos (figuras 2 y 3). Finalmente, en las distribuciones de los píxeles en la categoría de muy bajo en el 2020, en el área de estudio existe un mayor porcentaje de dicha categoría para la época seca, en comparación con la de lluvia, con valores del 5,56% y del 19,03%, respectivamente, para el índice NDVI, y con valores del 16,77% y del 21,63%, para el NDWI.

Conclusiones

Teniendo en cuenta la comparación de la distribución espacial y porcentual en el cálculo de los índices NDVI y NDWI a través de los años 1991, 2015 y 2020, se identificó una disminución progresiva de la cobertura vegetal y un alto déficit de humedad en los últimos relictos del Bs-T, que afecta principalmente al bosque Aguas Frías. Por el contrario, el remanente menos afectado es la reserva natural Maná Dulce. Estos resultados concuerdan con lo mencionado por [7] y [8], respecto a un decrecimiento de los últimos relictos en el municipio debido a la expansión de agropecuaria y urbana.

Así mismo, con respecto al municipio de Agua de Dios, se identificó una reducción de los píxeles del índice NDVI y NDWI, clasificados en la categoría de muy alto (rangos entre 0,61 y 1) y un aumento de la categoría muy bajo (entre -1 y -0,61) para ambas épocas, siendo dichos cambios más marcados en la época seca. De acuerdo con [6], en la época seca ocurre pérdida de hojas debido a la defoliación foliar y al estrés hídrico, lo que explicaría los bajos valores de NDVI y NDWI obtenidos para dicho período.

De la misma manera, con base en el análisis de los resultados, existe una correlación entre las transformaciones del Bs-T y el deterioro ambiental de este bioma, originadas por causas naturales o antropogénicas. Teniendo en cuenta lo mencionado por [3], producto de estos cambios, el suelo queda expuesto, y si no se adoptan medidas de conservación, podría acelerar los procesos de degradación edáfica y pérdida de especies endémicas, como lo mencionan [4] y [5].

Finalmente, las transformaciones mencionadas se asocian con procesos de degradación de los suelos, por lo que son importantes nuevos estudios en campo que corroboren los índices llevados a cabo por la presente investigación y que se relacionen con la erosión en los sustratos. Además, desde el esquema de ordenamiento territorial de Agua de Dios, se deberían definir áreas de conservación y protección que permitan la recuperación de los últimos relictos de Bs-T y eviten la pérdida de especies endémicas en el municipio.

Referencias

- [1] E. Chuvieco, "Satellite observation of biomass", R. Camacho y C. Pizano, "Presentación", Colomb. For., vol. 18, n.º 1, p. 3, 2015.
- [2] C. Pizano y H. García, El bosque seco tropical en Colombia. Bogotá: Instituto de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, 2014.
- [3] J. M. Díaz, Bosque seco tropical en Colombia. Cali: Banco de Occidente, 2006.
- [4] Secretaría de Medio Ambiente y Recursos Naturales de México (Semarnat), Informe de la situación del medio ambiente en México. México, 2016. [En línea]. Disponible: https://apps1.semarnat.gob.mx:8443/dgeia/informe15/tema/pdf/Informe15_completo.pdf
- [5] G. Habib Kattan y L. G. (eds.), Regiones biodiversas: herramientas para la planificación de sistemas regionales de áreas protegidas. Cali: WCS Colombia, Fundación EcoAndina, WWF Colombia, 2008. [En línea]. Disponible: https://www.researchgate.net/publication/265245902_Regiones_Biodiversas_Herramientas_para_la_planificacion_de_sistemas_regionales_de_areas_protegidas
- [6] T. C. Hsiao, "Plant responses to water stress", Annu. Rev. Plant Physiol., vol. 24, n.º 1, pp. 519-570, 1973.
- [7] M. Govender, P. J. Dye, I. M. Weiersbye, E. T. F. Witkowski y F. Ahmed, "Review of commonly used remote sensing and ground-based technologies to measure plant water stress", Water SA, vol. 35, n.º 5, pp. 741-752, 2009. doi: 10.4314/wsa.v35i5.49201
- [8] Concejo municipal de Agua de Dios, "Acuerdo No 011. Esquema de Ordenamiento Territorial del municipio de Agua de Dios", n.º 8. p. 339, 2015.
- [9] Resolución 0391 de 2014, por medio de la cual se acepta el cambio de razón social del titular del Plan de Gestión de Devolución de Productos Posconsumo Plagicida. Autoridad Nacional de Licencias Ambientales (ANLA) Colombia. [En línea]. Disponible: http://portal.anla.gov.co/sites/default/files/13141_res_0697_270614.pdf
- [10] Y. Gu, J. F. Brown, J. P. Verdin y B. Wardlow, "A five-year analysis of MODIS NDVI and NDWI for grassland drought assessment over the central Great Plains of the United States", Geophys. Res. Lett., vol. 34, n.º 6, pp. 1-6, 2007. <https://doi.org/10.1029/2006GL029127>
- [11] S. K. McFeeters, "The use of the Normalized Difference Water Index (NDWI) in the delineation of open water features", Int. J. Remote Sens., vol. 17, n.º 7, pp. 1425-1432, 1996.
- [12] B. C. Gao, "NDWI - A normalized difference water index for remote sensing of vegetation liquid water from space", Remote Sens. Environ., vol. 58, n.º 3, pp. 257-266, 1996.
- [13] X.-C. Chen et al., "Characteristics and toxicological effects of commuter exposure to black carbon and metal components of fine particles (PM2.5) in Hong Kong", Sci. Total Environ., vol. 742, p. 140501, 2020. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2020.140501>
- [14] E. Oliveira, L. Tavares, F. Acerbi y J. Marcio de Mello, "The assessment of vegetation seasonal dynamics using multitemporal NDVI and EVI images derived from MODIS", 2007 International Workshop on the Analysis of Multi-temporal Remote Sensing Images, Leuven, Belgium, 2007, pp. 1-5, doi: 10.1109/MULTITEMP.2007.4293049
- [15] Q. Ma, Y. Su, L. Luo, L. Li, M. Kelly y Q. Guo, "Evaluating the uncertainty of Landsat-derived vegetation indices in quantifying forest fuel treatments using bi-temporal LiDAR data", Ecol. Indic., vol. 95, parte 1, pp. 298-310, 2018. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2018.07.050>
- [16] Concejo Municipal de Agua de Dios, "Plan municipal de Gestión de Riesgo de desastres en Agua de Dios, Cundinamarca", pp. 1-81, 2019.
- [17] V. Sornlertlamvanich, P. Chawakitchareon y A. Hansuebsai, Information Modelling and Knowledge Bases XXIX, vol. 301. Amsterdam: IOS Press, 2018.

- [18] J. Weier y D. Herring, "Measuring vegetation (NDVI & EVI)", 30 de agosto de 2000. [En línea]. Disponible: <https://earthobservatory.nasa.gov/features/MeasuringVegetation>
- [19] X. Yu, W. Hou, B. Niu y M. Zhao, "Measuring Greenery Supportiveness in Park for Physical Activity Using Smartphone Panoramic Image and a Green Vegetation Extraction Index", 2020. doi: 10.21203/rs.3.rs-45628/v1
- [20] E. Chuvieco Salinero, Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio. Barcelona: Ariel, 2007.
- [21] A. Etter, C. McAlpine y H. Possingham, "Historical patterns and drivers of landscape change in Colombia since 1500: a regionalized spatial approach", *Ann. Assoc. Am. Geogr.*, vol. 98, n.º 1, pp. 2-23, 2008.
- [22] C. I. Espinosa, M. F. Tapia-Armijos, J. Homeier, C. Leuschner y M. de la Cruz, "Deforestation and forest fragmentation in South Ecuador since the 1970s-losing a hotspot of biodiversity", *PLoS One*, vol. 10, n.º 11, p. e0133701, 2015. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0133701>