

**Descripción del régimen de incendios del Bosque seco tropical de la cuenca alta del Río Magdalena
y su relación con la variación climática.**

Maestría en manejo, uso y conservación del bosque

Presentado por

**Ingeniero Forestal
Jhonatan Julián Díaz Timoté**

Dirigido por

**Doctora:
Ángela Parrado Rosselli**

Universidad Distrital Francisco José de Caldas



Esta tesis ha sido aprobada por el consejo curricular de la MAESTRIA EN MANEJO USO Y CONSERVACION DEL BOSQUE como requisito para optar por el grado de MAGISTER EN MANEJO, USO Y CONSERVACIÓN DEL BOSQUE

Ph. D. Ángela Parrado Rosselli
Facultad del Medio Ambiente y Recursos Naturales
Universidad Distrital Francisco José de Caldas
Directora

Ph. D. Nelly Rodríguez
Universidad Autónoma de Barcelona
Jurado

Ph. D. Juan Carlos Alarcón
Universidad Nacional De Colombia
Jurado

Tabla de contenido

| | |
|--|----|
| 1. Resumen | 1 |
| 2. Introducción..... | 2 |
| 3. Materiales y métodos..... | 5 |
| 3.1 Área de estudio | 5 |
| 3.2 Mapa de bosque | 6 |
| 3.3 Datos de incendios..... | 6 |
| 3.4 Datos climáticos..... | 7 |
| 3.5 Relación de ocurrencia de incendios y variables climáticas..... | 8 |
| 4. Resultados..... | 10 |
| 4.1 Patrones espaciales y temporales de los incendios..... | 10 |
| 4.2 Variación climática multianual en los bosques secos de la cuenca alta del Magdalena..... | 11 |
| 4.3 Relación incendios y variables climáticas | 13 |
| 5. DISCUSIÓN | 17 |
| 5.1 Frecuencia, densidad y patrón espacial de los incendios..... | 17 |
| 5.2 Relación clima y ocurrencia de incendios. | 18 |
| 5.3 Consideraciones para la gestión del bosque seco tropical. | 19 |
| 6. Bibliografía | 21 |
| 7. Anexos | 25 |

INDICE DE TABLAS

| | |
|--|----|
| Tabla 1. Frecuencias de incendios agrupados por categoría de intervalo de retorno de incendios para el período 2000 a 2017 con base en Wittkuhn & Hamilton (2010) calculado para incendios con frecuencia > 1. | 11 |
| Tabla 2. Rangos para las variables optimizadas en modelo de regresión logística. Los rangos corresponden a los valores de cada variable que predicen más del 80% de incendios según el modelo de regresión logística. | 15 |
| Tabla 3. Probabilidad de ocurrencia de incendios a nivel mensual a partir del modelo de regresión logística y los valores de cada variable., en el cual se presenta la probabilidad más baja de ocurrencia de incendios. | 15 |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Ubicación Zona de estudio. Área potencial de bs-T dentro de la cuenca alta del rio Magdalena..5 | |
| Figura 2. Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en la zona de estudio.8 | 8 |
| Figura 3. a) Mapa de frecuencia de ocurrencia de incendios en la cobertura de bs-T en un periodo de 18 años. Los sitios de bosque sin puntos no presentaron incendios. b) Densidad de incendios por km ² . I) Hotspot de incendios municipio de Ortega-Tolima. II) Hotspot incendios Municipio de Coello-Tolima..10 | 10 |
| Figura 4. Diagramas de valores medios anuales de las variables a) Temperatura máxima (°C), Precipitación total anual (mm). b) Humedad relativa (%) y Brillo solar (Horas) del bosque seco tropical de la cuenca alta del rio Magdalena durante el período 2000 a 2017. En rojo se presentan los años correspondientes al fenómeno de El Niño (NOAA, 2019) y en azul los correspondientes al fenómeno de La Niña (NOAA, 2019).12 | 12 |
| Figura 5. a) Diagrama de cajas y bigotes correspondiente a la ocurrencia de incendios a nivel mensual multianual (2000 – 2017). El tamaño de la caja refleja el 80% de los datos, la línea interna representa la mediana y la línea inferior la media de los datos, las líneas extremas representan los valores máximos y mínimos respectivamente. b) Distribución de los valores medios mensuales multianuales (2000 – 2017) de la temperatura máxima y la precipitación.14 | 14 |

1. Resumen

El fuego es un disturbio que ha modelado la dinámica y la diversidad de muchos ecosistemas a lo largo del tiempo. En ecosistemas como el Bosque seco tropical (bs-T) del Alto Magdalena se han reportado un gran número de incendios forestales, pero se desconoce en el tiempo su ocurrencia y dinámica. El objetivo de este trabajo fue describir el régimen de incendios del bs-T, en función de la variación climática anual y multianual de la precipitación, temperatura, humedad relativa y eventos extremos como el fenómeno de El Niño. En primer lugar, se obtuvo la ocurrencia de incendios en la cobertura bosque seco entre el año 2000 hasta el 2017. Esto se hizo a través de la clasificación de mapas anuales de bosque con el uso de imágenes satelitales Landsat 7 y 8 y la superposición con las anomalías térmicas del sensor MODIS para el mismo periodo. En segundo lugar, se espacializaron las variables climáticas precipitación, humedad relativa y temperatura máxima obtenidas de las estaciones locales. Estas variables climáticas se correlacionaron con el número de incendios y su distribución temporal. Se encontraron 424 incendios, así como dos hotspots de incendios en municipios de Ortega y Coello, en el departamento del Tolima, con una frecuencia de hasta 5 incendios en 18 años. En términos de la relación de incendios y las variables climáticas, la severidad de la estación seca medida como la precipitación acumulada se correlacionó con una alta probabilidad de ocurrencia de incendios. Asimismo, se encontró una relación entre la ocurrencia de los incendios y el fenómeno de El Niño. A partir de estos resultados, se reconoce, durante los últimos años, la presencia de incendios en el bs-T y su fuerte relación con la severidad de la estación seca y su distribución en la Cuenca alta, lo que permite dar una información detallada sobre la amenaza y zonas a priorizar en planes de gestión del riesgo departamentales y municipales, así como alertas tempranas e gestión de riesgo de incendios.

Abstract

Fire is a disturbance that has modeled the dynamics and diversity of many ecosystems over time. In ecosystems such as the Tropical Dry Forest (BS-T) of Alto Magdalena, a large number of forest fires have been reported, but their occurrence and dynamics are unknown over time. The objective of this work was to describe the fire regime of the BS-T, based on the annual and multiannual climatic variation of precipitation, temperature, relative humidity and extreme events such as the El Niño phenomenon. First, the occurrence of fires in the dry forest cover was obtained between 2000 and 2017. This was done through the classification of annual forest maps with the use of Landsat 7 and 8 satellite images and overlapping with the thermal anomalies of the MODIS sensor for the same period. Second, the climatic

variables precipitation, relative humidity and maximum temperature obtained from local stations were spatialized. These climatic variables were correlated with the number of fires and their temporal distribution. 424 fires were found, as well as two fire hotspots in the municipalities of Ortega and Coello, in the department of Tolima, with a frequency of up to 5 fires in 18 years. In terms of the relation of fires and climatic variables, the severity of the dry season measured as the accumulated rainfall was correlated with a high probability of occurrence of fires. Likewise, a relationship was found between the occurrence of fires and the El Niño phenomenon. From these results, the presence of fires in the BS-T and its strong relationship with the severity of the dry season and its distribution in the upper Basin are recognized in recent years, allowing detailed information on the threat and areas to prioritize in departmental and municipal risk management plans, as well as early warnings and fire risk management.

2. Introducción

El fuego es un disturbio que ha modelado la dinámica y la diversidad de muchos ecosistemas a lo largo del tiempo (Flannigan et al. 2009; Pausas & Ribeiro, 2017). Este modifica profunda y rápidamente los componentes estructurales de los ecosistemas ya que los claros generados por las quemaduras proporcionan el potencial para el cambio de vegetación (Bond & Wilgen, 1996; Nasi et al, 2002; Rodríguez et al., 2008; Armenteras et al., 2009). También tiene importantes efectos en la flora y fauna, ya sea porque sus poblaciones se ven directamente afectadas, o porque deben ajustarse a un nuevo escenario de disponibilidad de recursos (Loret, 2004).

La frecuencia y la intensidad de los fuegos en los ecosistemas se conoce como el régimen. Este se define con base en una serie de parámetros que describen cuándo y cómo ocurren los incendios según la frecuencia, el tamaño, la estacionalidad, la intensidad y el tipo (Krebs 2010; Conedera et al., 2009). El régimen de incendios combina dimensiones temporales y espaciales, y puede describirse a partir de la frecuencia, la intensidad, la extensión y la estacionalidad; a su vez permite conocer la dinámica del fuego en un territorio (Medina, 2007), y así entender mejor esta amenaza y dar herramientas para la gestión del riesgo. Con base en su relación con el fuego, los ecosistemas se han clasificado en independientes, dependientes, sensibles e influenciados por el fuego (Myers, 2006). En los tres últimos, aunque el fuego ha hecho parte de su dinámica natural, las actividades humanas también han modificado el régimen aumentando o disminuyendo la intensidad, extensión, frecuencia y estacionalidad de los incendios (Leiva, Mata, Rocha, & Soto, 2009; Lloret, 2004)

Las formaciones propensas a incendios cubren alrededor del 40% de la superficie terrestre del mundo (Chapin et al., 2011). En estas zonas los incendios tienen una relación positiva con la disponibilidad de combustible (biomasa) y la frecuencia de sequías. Por ejemplo, en las regiones húmedas y productivas en donde el combustible es altamente disponible, la actividad del fuego dependerá de la frecuencia de las sequías. En cambio, en los sistemas áridos improductivos, en donde las sequías son la regla, los regímenes de incendios estarán limitados por la baja disponibilidad de combustible (Pausas & Ribeiro, 2013).

Un ejemplo de este tipo de ecosistemas es el bosque seco tropical que se encuentra en áreas donde la temperatura es de 17° C a 35 °C, se presentan más de tres meses en donde las lluvias son inferiores a los 100 mm y en los que la evapotranspiración supera la precipitación (Pizano, 2014; Linares & Fandiño 2009). Los bosques secos tropicales a nivel mundial (Africa, Puerto Rico, Costa Rica) presentan episodios de incendios asociados principalmente a actividades humanas y su estacionalidad, asimismo es posible que presenten incendios naturalmente, pero estos son menos frecuentes (Murphy, 2009; D. Vargas, 2016). Estas condiciones, sumadas a su alta biomasa son propicias para la incidencia estacional del fuego (Linares & Fandiño 2009; Leiva, 2009; Vargas et al., 2012; Pausas & Ribeiro, 2017). Más aún de forma reciente, Pausas & Ribeiro (2013) han reportado que los bosques tropicales secos uno de los biomas con mayor actividad de incendios durante la última década.

En Colombia, se ha reportado una gran ocurrencia de incendios en los bosques secos tropicales, principalmente en las regiones del Caribe, Andina y Orinoco (Armenteras-Pascual et al., 2011; Armenteras, Gonzalez, & Franco, 2009; Romero-Ruiz, Etter, Sarmiento, & Tansey, 2010). Sin embargo, la mayoría de la información está enfocada en la ocurrencia más no en el régimen y su distribución espacio-temporal, la información relacionada con el régimen de ocurrencia es aún muy escasa. Por ejemplo, Armenteras et al., (2009) , Armenteras-Pascual et al., (2011) y Romero-Ruiz et al., (2010).

Por su parte Amaya & Armenteras, (2012); Armenteras et al., (2009); Romero-Ruiz et al., (2010). y Pausas & Ribeiro, (2013) mencionan que, en los bosques secos, la estación seca ha sido un factor importante para la ocurrencia de incendios recientes. Sumado a esto, Kitzberger & Veblen (2003), mencionan que anomalías climáticas como el fenómeno de El Niño, es un principal impulsor de la variación de alta frecuencia del fuego en regiones como Colombia, donde este tipo de anomalías son cada vez más frecuentes. A pesar de esto, no es claro que puede propiciar la ocurrencia de incendios, o que combinación de las condiciones climáticas pueden generar mayor o menor ocurrencia, tener conocimiento

de esta información podría ser muy útil para generar sistemas de alertas tempranas y apoyar la gestión del riesgo.

Por lo tanto, el régimen de fuego y su dinámica permite un acercamiento espacio-temporal a este fenómeno en una región determinada. Así, es posible priorizar áreas de ocurrencia y dar herramientas de gestión (Alertas tempranas), así como conocer si existe o no alteración en la frecuencia y generar lineamientos que orienten a la conservación, uso y manejo del bosque. El objetivo de este trabajo fue describir el régimen de incendios del Bosque seco tropical de la cuenca alta del Río Magdalena y su relación con la variación climática, con el fin de entender y dar herramientas para la gestión del riesgo. Para tal fin se identificó la frecuencia, área y patrón espacial de aparición de fuego. En segundo lugar, se espacializó y analizó la variación climática anual y supra anual de la precipitación, temperatura, evapotranspiración real, brillo solar y el fenómeno de El Niño y su relación con la ocurrencia de incendios.

3. Materiales y métodos

3.1 Área de estudio

La zona de estudio corresponde al área de bs-T presente en la cuenca alta del río Magdalena (43 479 ha), (Pizano et al., 2014), en los departamentos del Cauca (11.7%), Cundinamarca (22.3%, Huila (18.5%) y Tolima (47.5%) (Figura 1). El límite potencial del bs-T de esta región, se determinó a partir de lo propuesto por M. Chávez & N. Arango, (1998) e IDEAM, (2005) con base en criterios de altitud (< 800 msnm), temperatura (>24°C), precipitación (1000-2000 mm) y con uno o dos períodos marcados de sequía al año (Linares & Fandiño, 2009; Pizano et al., 2014).

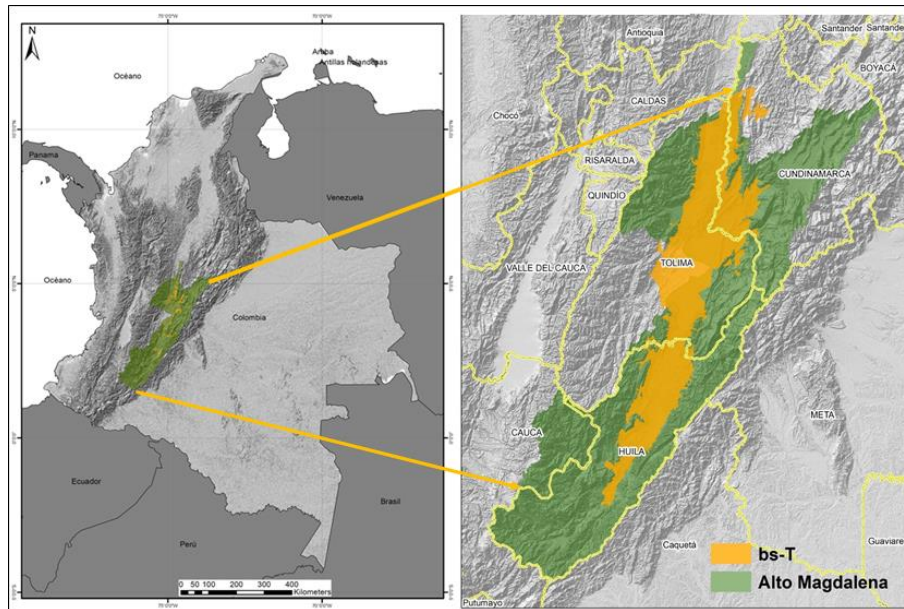


Figura 1. Ubicación Zona de estudio. Área potencial de bs-T dentro de la cuenca alta del río Magdalena.

Para la región del valle del Magdalena, la precipitación media anual oscila entre 831 y 2268 mm, la temperatura media anual es de 26.8°C (para los años 1975–2001), con los meses de julio, agosto y septiembre con las temperaturas más altas (29.8°C, 29.8°C y 29.1°C), respectivamente; (Sánchez-Azofeifa, Calvo-Alvarado, Espírito-Santo, Fernandes, & Powers, 2014). Presenta un periodo seco en promedio de tres meses con precipitaciones inferiores a 100 mm mensuales durante los meses de junio, julio y agosto. La región tiene una evapotranspiración potencial anual promedio de 1738 mm / año, sufriendo un déficit de agua de abril a septiembre. Según (Batista-Morales & Romero-Duque, 2018), la zona de la cuenca alta del río Magdalena el bs-T y arbustales corresponden a un 13.7%, mientras que las actividades de cultivos presentan un 19% y la ganadería un 60.7%.

3.2 Mapa de bosque

Se realizó la reconstrucción de la cobertura de bs-T, a una escala 1:100.000, para cada año durante el periodo 2000 a 2017, a partir de imágenes Landsat 7 (ETM+) y Landsat 8 (OLI), obtenidas del Earth Explorer database del United States Geological Survey (USGS, earthexplorer.org). Todas las imágenes se descargaron como productos de Registro de Datos Climáticos Landsat (Alvarado, Fornazari, Cóstola, Morellato, & Silva, 2017; Zhu, Wang, & Woodcock, 2015) y se proyectaron al sistema de coordenadas geográficas Magna Colombia Bogotá. A partir de dichas imágenes satelitales, se generó una clasificación automatizada utilizando la herramienta iso cluster del Software ArcGis 10.3 (Arango, Branch, & Bedoya, 2005). Esta generó seis categorías de clasificación a saber 1) bosque, 2) cultivos; 3) pastos, 4) cuerpos de agua; 5) tejido urbano y 6) tierra desnuda y degradada de las que se seleccionó únicamente la correspondientes a las zonas de bosque Posteriormente, con base en (Batista-Morales & Romero-Duque, 2018), quienes realizaron la clasificación de coberturas para la zona de bs-T del Alto Magdalena a una escala 1:25.000 para los años 1987, 2000 y 2018, con base en esta información se realizó la validación de las coberturas del presente estudio teniendo en cuenta el año más cercano.

Adicionalmente, se utilizaron las coberturas transformadas para cada año de estos mismos autores, como una máscara para disminuir la sobrestimación de áreas de bosque en dichas zonas transformadas. Estas áreas transformadas se actualizaron para cada año, a partir de las imágenes seleccionadas en el presente estudio y con las categorías agrupadas como bosque/No bosque.

3.3 Datos de incendios

La ocurrencia de incendios se obtuvo partir de los datos de Anomalías térmicas capturados por el sensor MODIS en su colección 6-MCD14DL, de los satélites Aqua y Terra disponibles en la plataforma FIRMS (<https://firms.modaps.eosdis.nasa.gov/>), proporcionados por la NASA (Hoyos et al., 2017; Pausas & Ribeiro, 2013; Amaya & Armenteras, 2012; Rodríguez, 2012; Armenteras-Pascual et al., 2011). Los datos descargados se encuentran en formato vector en extensión .shp, cada punto representa el centro de un píxel MODIS de 1 km² (Giglio, Schroeder, Hall, & Justice, 2018). Con base en Hantson, Padilla, & Chuvieco, (2012) que realizaron un análisis comparativo entre las áreas quemadas y las proporcionadas por MODIS, se seleccionaron los puntos de anomalías con una confiabilidad mayor o igual al 30%, a partir de este valor de confiabilidad, esta información representan apropiadamente la ocurrencia de incendios y tienen bajos errores de omisión y comisión.

Para obtener los puntos de incendio dentro del bosque, se interceptaron las capas de bosque obtenidas para cada año, con las anomalías térmicas del año correspondiente. Posteriormente, a través de estadística descriptiva se realizó el análisis multitemporal para conocer la dinámica y frecuencia de los incendios a nivel anual y mensual (Amaya & Armenteras, 2012; Armenteras-Pascual et al., 2011; Romero-Ruiz, Etter, Sarmiento, & Tansey, 2010; Armenteras, Gonzalez, & Franco, 2009). También se analizó el patrón espacial de los incendios a partir del índice del vecino más cercano, esto con el fin de conocer si existían o no puntos calientes o hotspots de ocurrencia de incendios.

Para obtener la frecuencia de los incendios, con base en los puntos de anomalías térmicas obtenidos anteriormente, se generó un polígono de 1 km² cuyo centro corresponde al dato de anomalía térmica (Giglio et al., 2018), de esta manera, la frecuencia de incendios está dada por el número de veces que un polígono se superpone con otro, indicando que esa área se ha incendiado más de una vez en diferentes años (a mayor número de superposiciones, mayor frecuencia).

El análisis de tiempos de retorno se realizó a partir de un análisis espacio temporal en el que se verificó el tiempo que tardó un área específica en incendiarse nuevamente; este retorno se categorizó en tres clases; corto (1-5 años), moderado (6-9 años); largo (>10 años). Así cada intervalo está relacionado con la recuperación de vegetación (combustible) y su potencialidad energética (potencial de severidad de incendio), siendo los intervalos cortos los de menor potencialidad energética y los intervalos largos los de mayor potencialidad. (Wittkuhn & Hamilton, 2010)

3.4 Datos climáticos

Se obtuvieron los datos climáticos para el periodo de 2000 a 2017 de diez estaciones meteorológicas del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales –IDEAM– ubicadas en el bs-T de la cuenca alta del Magdalena (Figura 2). Dichas estaciones correspondieron a la categoría de climáticas principales, ordinarias y sinópticas, de las que se obtuvieron datos de temperatura máxima, temperatura mínima, temperatura media, humedad relativa, brillo solar y precipitación.

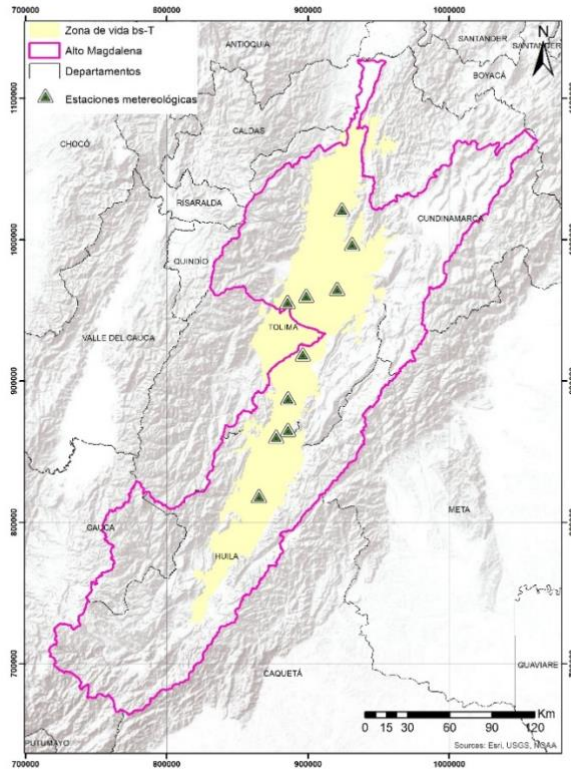


Figura 2. Ubicación de estaciones meteorológicas utilizadas en la zona de estudio.

Para los casos en los que se encontraron vacíos de información en las series de datos, con base en (Barrera, 2004), se asignó el valor promedio del mismo mes de los años con valores dentro de la misma estación. La información obtenida por estación, consistió en datos a nivel mensual para cada año y para cada variable climática utilizada (temperatura máxima, precipitación, humedad relativa, y brillo solar).

La distribución espacial de las variables climáticas se hizo a través de modelos de interpolación espacial (IDW) generados a partir de los datos mensuales de cada variable climática y la ubicación espacial de cada estación (A. Vargas, Santos, Cárdenas, & Obregón, 2011). Esto se hizo para toda el área de estudio y para cada año y cada mes evaluado.

3.5 Relación de ocurrencia de incendios y variables climáticas

Para relacionar la ocurrencia de incendios y cada una de las variables climáticas seleccionadas, se utilizó el índice de correlación por rangos de Spearman (Alvarado et al., 2017; Landi et al., 2017; Armenteras-Pascual et al., 2011; Heyerdahl, Brubaker, & Agee, 2001). Las variables climáticas seleccionadas fueron la precipitación del mes de ocurrencia del incendio (P0), la precipitación del mes anterior (P1), la

precipitación acumulada de dos meses anteriores (P2), la precipitación acumulada de tres meses anteriores (P3), la temperatura máxima (Tmax), la humedad relativa (Hr) y la isothermalidad (Diferencia entre la temperatura máxima media multianual y la temperatura máxima mensual). Cada relación se evaluó a escala mensual y anual. Del mismo modo, se relacionó la ocurrencia de incendios con la presencia de Fenómeno de El Niño, a partir de las variables climáticas de los meses en cada año que presento dicho fenómeno.

En segundo lugar, con el fin de combinar todas las variables y evaluar la influencia de cada una de ellas en la probabilidad de ocurrencia de incendios se utilizó un modelo lineal generalizado de tipo logístico (Eq. 1 y 2). (Hoyos et al., 2017; Hudak & Brockett, 2004; Rollins, Keane, & Parsons, 2009). Como variable dependiente se consideraron la ocurrencia y no ocurrencia de incendios y como variables independientes las variables climáticas. Los eventos de ocurrencia correspondieron a los incendios obtenidos por año, mientras que la no ocurrencia se obtuvo a partir de el mismo número de incendios seleccionados al azar dentro de la cobertura de bosque en sitios donde nunca se presentaron incendios.

$$y = \beta_0 + \beta_1\beta X_{1i} + \beta_2\beta X_{2i} \dots \dots + \beta_k\beta X_{ki} \quad \text{Eq.1}$$

$$p(\text{incendio}) = \frac{1}{1+e^{-y}} \quad \text{Eq.2}$$

Se seleccionaron los umbrales de alerta de incendio, a partir de los resultados del modelo obtenido y los valores de cada variable que proporcionaban mayor probabilidad de ocurrencia de incendios, de este modo los umbrales estan dados por los valores de las variables que presentan frecuencias mayores al 80% en donde la probabilidad de incendio fue > 0.9.

La sensibilidad y especificidad del modelo se obtiene a partir de los aciertos y no aciertos del modelo como sigue:

$$\text{Sensibilidad} = \frac{n_{VP}}{n_1} \quad \text{Especificidad} = \frac{n_{VN}}{n_0}$$

Donde n_{VP} corresponde a las ocurrencias calculadas por el modelo, que realmente se presentan como ocurrencias, n_1 es el total de ocurrencias de incendios real, mientras que n_{VN} corresponde a la no ocurrencia de incendios que realmente no fueron incendios y n_0 es el total de no ocurrencia de incendios real.

4. Resultados

4.1 Patrones espaciales y temporales de los incendios.

Durante el período de estudio (2000 – 2017) se registró en promedio un área de 101.371,3 ha de bs-T, con una pérdida aproximada de 15%, lo que equivale 15.205,7 ha. Se registraron un total de 416 incendios (anomalías térmicas) en la cobertura bosque seco tropical (bs-T) de la cuenca alta del río Magdalena entre el año 2000 hasta el año 2017.

Durante este período se encontró una importante variación en la frecuencia de incendios, desde sitios en donde nunca ocurrieron incendios (88% del bosque), hasta sitios que han presentado hasta cinco incendios (Figura 3a). El 9,4% de la cobertura de bosque se ha quemado al menos una vez en 18 años. En contraste, los sitios que se quemaron entre 3 a 5 veces fueron muy pocos.

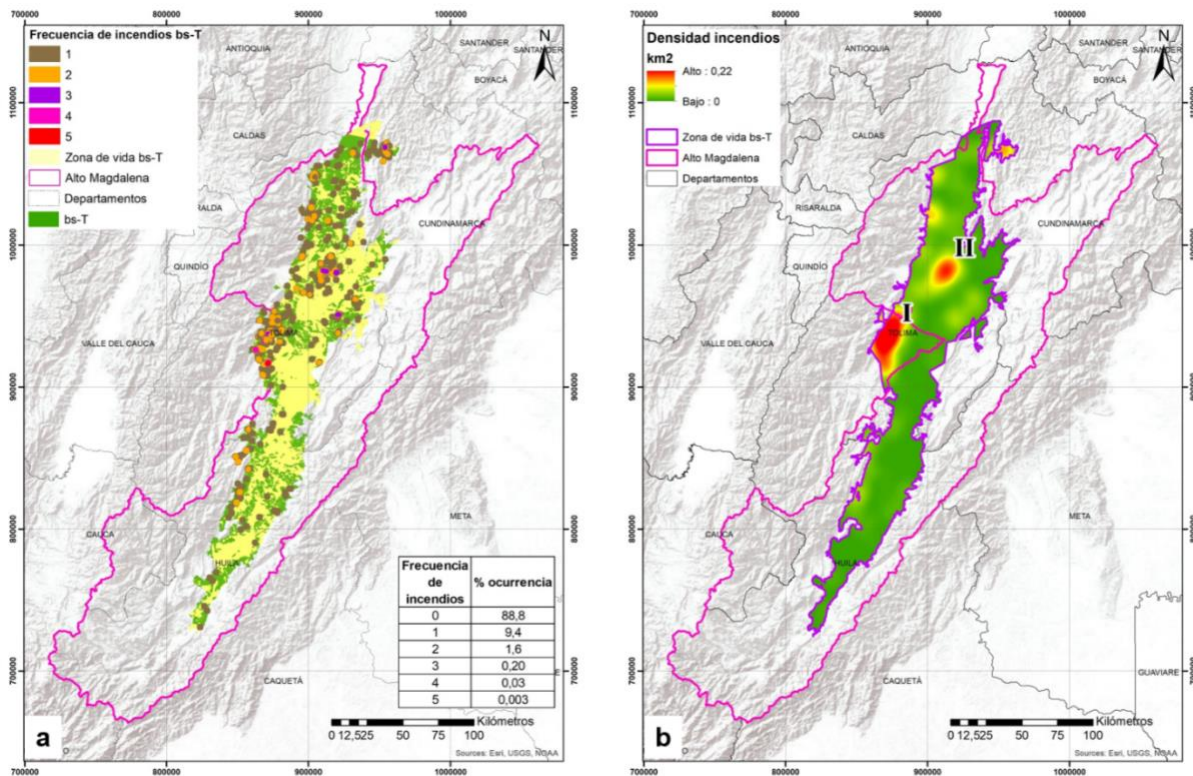


Figura 3. a) Mapa de frecuencia de ocurrencia de incendios en la cobertura de bs-T en un periodo de 18 años. Los sitios de bosque sin puntos no presentaron incendios. b) Densidad de incendios por km2. I) Hotspot de incendios municipio de Ortega-Tolima. II) Hotspot incendios Municipio de Coello-Tolima.

Espacialmente, se presentó un patrón agregado en la distribución de los incendios (índice de vecino más cercano con $z = -19.88$; $p=0$). Así se encuentran dos grandes hotspots (Figura 3b). El primero en la región occidental del valle, específicamente en el municipio de Ortega-Tolima (Figura 3b-I), caracterizado por presentar frecuencias entre 1 y 5 incendios, donde el 62% de los sitios quemados se quemaron sólo una vez, el 30% de los sitios se quemaron dos veces y el 8% se quemaron más de tres veces. El segundo hotspot, se encontró en el municipio de Coello-Tolima y en la parte del Norte del municipio de Nariño-Cundinamarca, con frecuencias entre 1 y 3 incendios. De nuevo, las frecuencias de uno y dos incendios se presentaron en el 68% y 30 % del municipio, respectivamente (Figura 3b-II).

Con base en los incendios que tuvieron frecuencias superiores a uno, se encontraron tiempos de retorno desde uno hasta catorce años para los 18 años evaluados. Las áreas con intervalos de retorno cortos (1 a 5 años), son las que presentan las mayores frecuencias (69.2%) y los intervalos más largos (> 10) son los que presentan las frecuencias más bajas (12%). La Tabla 1 muestra la distribución de frecuencias para cada una de las categorías de tiempo de retornos encontradas.

Tabla 1. Frecuencias de incendios agrupados por categoría de intervalo de retorno de incendios para el período 2000 a 2017 con base en Wittkuhn & Hamilton (2010) calculado para incendios con frecuencia > 1 .

| Categoría | Intervalo (años) | Frecuencia | Porcentaje |
|--------------|------------------|------------|-------------|
| Corto | 1-5 | 162 | 69,2% |
| Moderado | 6-9 | 44 | 18,8% |
| Largo | >10 | 28 | 12,0% |
| Total | | 234 | 100% |

4.2 Variación climática multianual en los bosques secos de la cuenca alta del Magdalena

A pesar de ser una zona de bs-T, esta presenta una gran variación climática, con zonas muy secas que presentan precipitaciones de menos de 500 mm y zonas con mas de 1600 mm. Durante el periodo 2000 a 2017 la temperatura máxima anual promedio del bs-T estuvo alrededor de los 37 °C, con un valle en 2008 (35 °C) y un pico en 2015 (39 °C), que coincide con la ocurrencia del fenómeno de El Niño.

Adicionalmente, en dicho periodo se presenta una variación de hasta 3 °C (Figura 4a). Los mayores valores de temperatura se presentaron en los municipios de Apulo, Tocaima, Nariño y Jerusalén, en el departamento de Cundinamarca, municipios como Armero, Ambalema y Lerida en el Tolima y en el Huila en municipios como Aipe, Villavieja y Coyaima e. En términos de la precipitación, se encontró una gran variabilidad temporal y espaciación con diferencias hasta de 400 mm entre un año y otro (Figura 4a).

Las mayores precipitaciones totales se registraron en el 2008 (1660 mm.) que coincide con fenómeno de La Niña. mientras que el 2015 fue el año más seco con 866 mm. (Figura 4a) que coincide con fenómeno de El Niño. Las mayores precipitaciones se presentan en la región del Tolima en los municipios de Ortega, Coyaima, Saldaña y Guamo principalmente con valores entre 1200 y 1500 mm, mientras que los mas secos son Ricaurte, Jerusalem y Tocaima con calores menorea a 1000 mm. El comportamiento del brillo solar, muestra una tendencia al descenso, con un promedio multianual de 5,44 horas de incidencia de luz solar directa en un día (Figura 4b). Los valores más altos se registraron en los años 2002 y 2004 (hasta 5,91horas) que coinciden con presencia del fenómeno de El Niño y se ubican principalmente en la región del Tolima, en los municipios de Coyaima y Natagaima. Los promedios más bajos se presentan en 2010 (5,02 horas) que coincide con la presencia de fenómeno de La Niña. Respecto a la Humedad Relativa, esta se mantuvo relativamente constante alrededor del 72% hasta el 2013. Entre el 2014 a 2016, muestra un descenso que llega hasta 63% en el 2015 (presencia de El Niño). Los valores más altos se registraron en año 2008 (74%). (Figura 4b). Los mayores valores de humedad se ubican en El municipio de San Luis y Valle de San Juan en el Tolima.

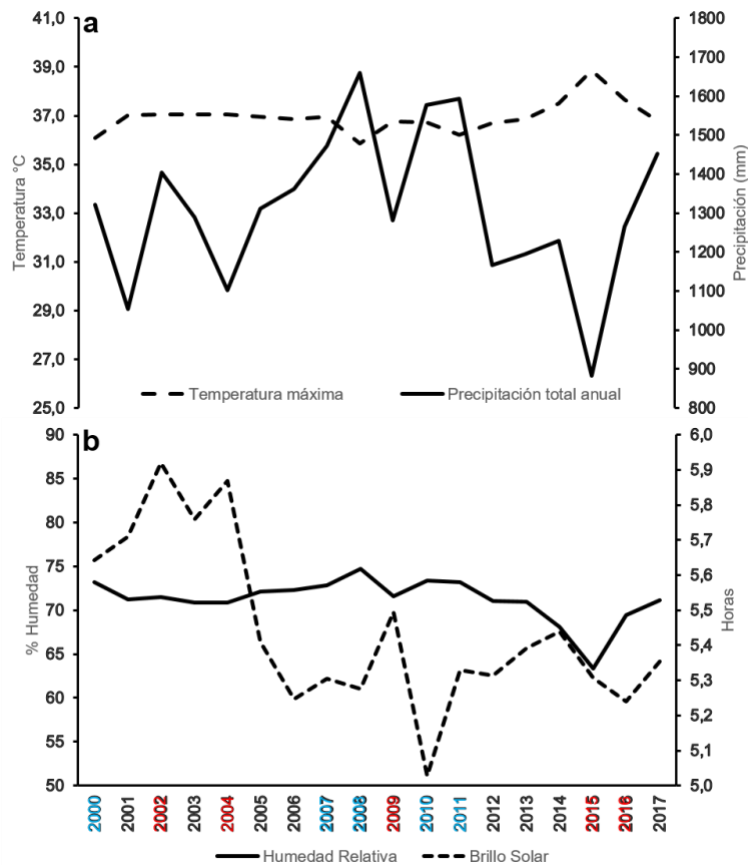


Figura 4. Diagramas de valores medios anuales de las variables a) Temperatura máxima (°C), Precipitación total anual (mm). b) Humedad relativa (%) y Brillo solar (Horas) del bosque seco tropical de la cuenca alta del río Magdalena durante el período 2000

a 2017. En rojo se presentan los años correspondientes al fenómeno de El Niño (NOAA, 2019) y en azul los correspondientes al fenómeno de La Niña (NOAA, 2019).

4.3 Relación incendios y variables climáticas

Los años 2009 y 2015 presentaron la mayor cantidad de incendios (41 para cada año) que coinciden con los años en los cuales se reportó fenómeno de El Niño (Figura 4). Al relacionar los valores climáticos mensuales de los años con presencia de El Niño y ocurrencia de incendios, se encontró una relación negativa significativa con la humedad relativa ($r_s = -0,58$; $p = 0,003$), positiva significativa con temperatura máxima ($r_s = 0,42$; $p = 0,04$). En contraste, relación incendios y la precipitación mensual durante el fenómeno del niño no fue significativa.

Al analizar la ocurrencia de los incendios a una escala mensual multianual (Figura 5), se observa que la mayoría de los incendios ocurrió en los meses de agosto y septiembre (67.5%), que corresponden a los meses más secos del año, mientras que en los meses más lluviosos (abril y noviembre) se evidenció una disminución en la ocurrencia de incendios. En ese sentido, se encontraron relaciones negativas entre el número de incendios y la precipitación de uno, dos y tres meses anteriores acumulados ($r_s = -0,87$; $p < 0,001$, $r_s = -0,84$; $p < 0,001$; $r_s = -0,61$; $p = 0,03$). También, se encontró una relación negativa entre el número de incendios y la humedad relativa ($r_s = -0,79$; $p = 0,002$) y relaciones positivas entre el número de incendios por mes y la temperatura máxima ($r_s = 0,93$; $p < < 0,001$), así como, relaciones positivas entre el número de incendios con la diferencia entre la temperatura máxima media mensual multianual y máxima media multianual ($r_s = 0,93$; $p < < 0,001$), (Figura 5a y b).

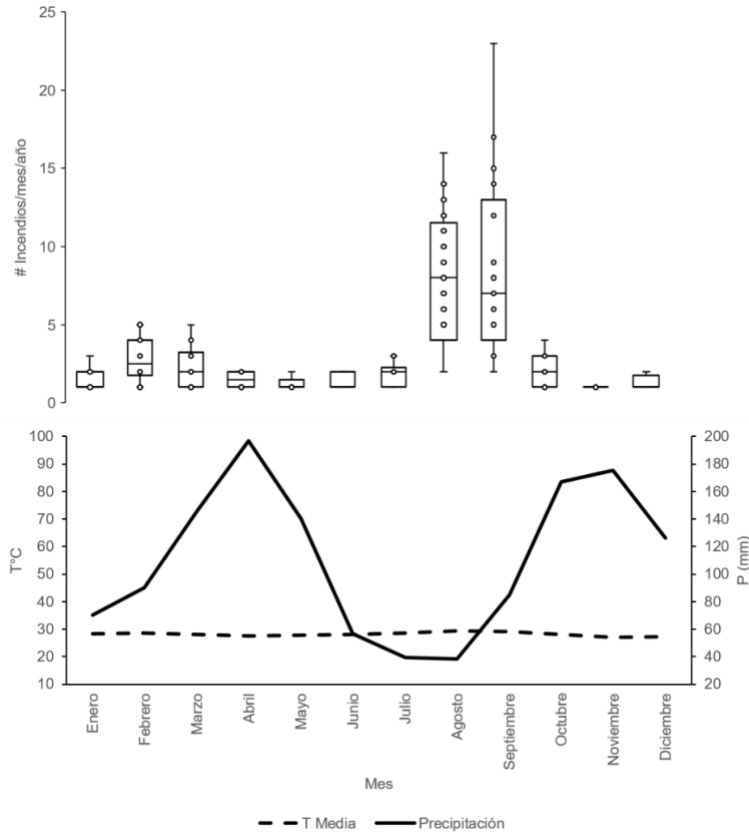


Figura 5. a) Diagrama de cajas y bigotes correspondiente a la ocurrencia de incendios a nivel mensual multianual (2000 – 2017). El tamaño de la caja refleja el 80% de los datos, la línea interna representa la mediana y la línea inferior la media de los datos, las líneas extremas representan los valores máximos y mínimos respectivamente. b) Distribución de los valores medios mensuales multianuales (2000 – 2017) de la temperatura máxima y la precipitación.

Se obtuvieron 473 modelos espaciales de precipitación, temperatura y humedad relativa que se combinaron en un modelo de regresión logística (Anexo 1. Modelos de interpolación climática). El modelo obtenido mostró que combinación entre la temperatura máxima, la humedad relativa y la precipitación de los meses previos fueron las variables que generan una mayor probabilidad de incendios. Este modelo arrojó especificidad y una sensibilidad significativa, superiores al 75% (99,5% y 98,3%, respectivamente). Así mismo, el área bajo la curva (ROC) mostró un valor de 0.97 a 1, lo que indica que las variables seleccionadas resultan adecuadas para predecir la ocurrencia de incendios y obedece a la fórmula:

$$y = -5,01 + Tmax * 0,90 - Hr * 0,42 + P_1 * 0.06 - P_2 * 0.27 + P_3 * 0.22$$

en donde Tmax: temperatura máxima, Hr: corresponde a la humedad relativa, P₁: Precipitación mes anterior, P₂: Precipitación dos meses anteriores y P₃: Precipitación tres meses anteriores.

Se encontró que la temperatura máxima ($p= 0,02$), la humedad relativa ($p= 0,01$), y la precipitación acumulada de uno hasta tres meses anteriores ($p= 0,002$; $p= 5,17e-07$; $p= 7,08e-07$, respectivamente), fueron las variables que mejor explicaron la ocurrencia de los incendios, siendo la precipitación acumulada de tres meses, la que mayor peso representa. En contraste, la precipitación ($p= 0,60$) y la diferencia entre la temperatura máxima del mes del incendio con la temperatura máxima media multianual ($p= 0,30$), no fueron significativas para este modelo.

Con base en el modelo obtenido fue posible determinar los niveles máximos o mínimos de las diferentes variables climáticas que pueden dar lugar a un incendio (Tabla 2). De esta manera una precipitación mensual menor a 88,5 mm con temperaturas máximas superiores a 37 grados coincide con una alta probabilidad de ocurrencia de incendios. En ese sentido, al utilizar el modelo con los valores multianuales mensuales de las variables climáticas, se encuentra que la probabilidad de incendios para la región de estudio es muy alta durante todos los meses del año excepto para el mes de noviembre que corresponde al pico de la temporada de lluvias (Tabla 3).

Tabla 2. Rangos para las variables optimizadas en modelo de regresión logística. Los rangos corresponden a los valores de cada variable que predicen más del 80% de incendios según el modelo de regresión logística.

| <i>Variable</i> | <i>Rango</i> |
|---|--------------|
| Temperatura máxima (°C) | 36,4 - 40,9 |
| Humedad relativa (%) | 55,4 - 71,4 |
| Precipitación del mes anterior (mm) | 1,5 - 88,5 |
| Precipitación de los dos meses anteriores (mm) | 12,2 - 192,2 |
| Precipitación de los tres meses anteriores (mm) | 32,2 - 432,2 |

Tabla 3. Probabilidad de ocurrencia de incendios a nivel mensual a partir del modelo de regresión logística y los valores de cada variable., en el cual se presenta la probabilidad más baja de ocurrencia de incendios.

| <i>MES</i> | <i>TMAX (°C)</i> | <i>HR</i> | <i>PI (MM)</i> | <i>P2 (MM)</i> | <i>P3 (MM)</i> | <i>Y</i> | <i>PROBABILIDAD</i> |
|------------|------------------|-----------|----------------|----------------|----------------|----------|---------------------|
| | | % | | | | | |
| ENERO | 36,7 | 71,3 | 126,1 | 301,8 | 468,8 | 28,3 | > 0.9 |
| FEBRERO | 37,4 | 70,5 | 70,3 | 196,4 | 372,1 | 32,8 | > 0.9 |
| MARZO | 37,1 | 73,6 | 90,3 | 160,6 | 286,7 | 23,1 | > 0.9 |
| ABRIL | 36,5 | 76,2 | 145,4 | 235,7 | 306,0 | 8,9 | > 0.9 |

| | | | | | | | |
|------------|------|------|-------|-------|-------|------|-------|
| MAYO | 36,3 | 75,7 | 196,9 | 342,3 | 432,6 | 11,4 | > 0.9 |
| JUNIO | 36,5 | 71,8 | 140,3 | 337,2 | 482,6 | 22,3 | > 0.9 |
| JULIO | 37,3 | 66,4 | 56,7 | 197,0 | 393,9 | 38,2 | > 0.9 |
| AGOSTO | 38,4 | 62,3 | 39,5 | 96,2 | 236,5 | 32,2 | > 0.9 |
| SEPTIEMBRE | 38,3 | 65,8 | 38,4 | 77,9 | 134,6 | 13,0 | > 0.9 |
| OCTUBRE | 37,5 | 72,6 | 85,1 | 123,4 | 163,0 | 6,2 | > 0.9 |
| NOVIEMBRE | 34,9 | 77,9 | 167,0 | 252,0 | 290,4 | 0,2 | 0,55 |
| DICIEMBRE | 35,2 | 76,5 | 175,7 | 342,6 | 427,7 | 7,6 | > 0.9 |

5. DISCUSIÓN

5.1 Frecuencia, densidad y patrón espacial de los incendios.

Los resultados encontrados en esta investigación muestran que, durante los últimos 18 años, aproximadamente un 12% del área del bs-T de la cuenca alta del río Magdalena se han incendiado con una frecuencia de entre uno hasta de cinco incendios. Este rango de frecuencia puede considerarse bajo en comparación con otros estudios realizados para bosques secos tropicales. Por ejemplo, en los bosques secos tropicales en la región de Minas Gerais en Brasil, Alvarado et al. (2017) y Batista et al. (2018), encontraron frecuencias de hasta 25 incendios en 35 años y 17 incendios en 16 años, respectivamente. Así mismo, Vargas (2016), desarrolló un análisis de ocurrencia de incendios a partir de la clasificación supervisada de imágenes Landsat y encontró que para los bosque secos del área de conservación de Guanacaste, Costa Rica, la frecuencia de incendios fue mayor a seis durante los 18 años evaluados.

En todos los casos es posible observar que cada región evaluada presenta actividades humanas dentro y fuera del bosque, al igual que en nuestra zona de estudio, por tanto, las bajas frecuencias en la ocurrencia de incendios pueden ser el reflejo del manejo que las comunidades pueden estar dando a las actividades que desarrolla en la zona de estudio buscando disminuir el riesgo a incendios mayores. Esto también puede evidenciarse teniendo en cuenta los intervalos de retorno encontrados, donde los intervalos cortos (1 a 5 años) son los más frecuentes y que también pueden estar asociados a la gestión de los incendios en épocas secas es decir a menor intervalo de retorno, menor potencialidad energética (Wittkuhn & Hamilton, 2010) y por tanto se reduce el riesgo a ocurrencia de incendios más fuertes.

Adicionalmente, se encontraron dos hotspots de incendios, el primero ubicado en la región centro-nororiente del departamento del Tolima, en los Municipios de Ortega y Coello y, el segundo, en la región suroccidental del departamento de Cundinamarca en el municipio de Nariño. En estos dos sitios se presentaron 124 incendios (30% del total) con frecuencias hasta de tres y cinco incendios en 18 años. Según el análisis de las variables climáticas, estos sitios corresponden a las zonas mas húmedas del bosque seco pero al mismo tiempo las que mayor temperatura máxima presentan, de modo que al presentar mayores precipitaciones en cierta época del año pueden generar mayor productividad de biomasa, que para la estacionalidad seca puedes ser un factor que aumenta la vulnerabilidad a ocurrencia de incendios (Argañaraz, Pizarro, Zak, & Bellis, 2015). Adicionalmente, al comparar estos resultados con los presentados por Amaya & Armenteras, (2012), para el departamento de Cundinamarca, los principales hotspots corresponden a los municipios de Guaduas y Caparrapi. Estas diferencias posiblemente se deben

a que Amaya y Armenteras, (2012), también incluyeron en su análisis coberturas de pastos y cultivos, que tienden a quemarse mucho más frecuente que los bosques, mientras que en este estudio sólo se analizó la cobertura boscosa.

5.2 Relación clima y ocurrencia de incendios.

Se encontró que la combinación entre el déficit de la precipitación acumulado (una estación seca marcada) sumado a una temperatura máxima superiores a 37°C y una humedad relativa inferior al 71% estuvieron altamente asociados a la ocurrencia de incendios, siendo la precipitación acumulada de tres meses la que mayor peso presentó y, por tanto, la que mayor condicionamiento puede dar a la hora de la ocurrencia de un incendio. Más aun, según el modelo de regresión logística estas condiciones y por ende una mayor cantidad de incendios tienden a ocurrir principalmente en los meses de julio, agosto y septiembre, mientras que en noviembre la probabilidad de ocurrencia de un incendio es muy baja.

Las condiciones de una estación seca marcada sumado a unas temperaturas máximas sobre los rangos de 36-40 °C y humedad relativa por debajo de 55%, son por lo general condiciones climáticas características de estaciones secas muy intensas y, por ende, coinciden en la mayoría de los casos con el fenómeno de El Niño que en Colombia ha generado efectos importantes en estos bosques; por ejemplo, para el año 2016 el mes de enero fue el más caluroso en cinco años (El tiempo, 2016a) y la fuerte sequía producto de esta anomalía climática, repercutió en una gran cantidad de incendios de los bosques secos de departamentos como Magdalena, La Guajira y Tolima (El tiempo, 2016b). Estudios en ecosistemas boscosos diferentes al bosque seco han relacionado el fenómeno del Niño con el aumento de la probabilidad de dispersión de incendios forestales (O'Loughlin 1998, Cossalter and Cauvin 1998, Byron and Shepherd 1999, citados por Villalobos, 2000), debido a que condiciones más secas de lo normal generan ambientes favorables para que se dispersen fuegos con mayor facilidad.

Mas aún, estas condiciones coinciden con otros bosques secos y demás “ecosistemas asociados a incendios” (Fire-Prone Ecosystems) como los bosques mediterráneos y las praderas tropicales y subtropicales en donde la alta estacionalidad climática y una marcada estación seca está altamente asociada a la ocurrencia de los incendios (Armenteras-Pascual et al., 2011; Armenteras et al., 2009; Bradshaw, Dixon, Hopper, Lambers, & Turner, 2011; Capitano & Carcaillet, 2008; Pausas & Ribeiro, 2013; Romero-Ruiz et al., 2010). Adicionalmente, la alta relación con las bajas precipitaciones coincide con lo presentando en Alvarado et al. (2017), Argañaraz et al. (2015) y Armenteras-Pascual et al. (2011), quienes, a pesar de que sólo estudiaron la relación precipitación - incendios, encontraron correlaciones

negativas y altamente significativas entre la ocurrencia de incendios y la precipitación de tres meses anteriores.

5.3 Consideraciones para la gestión del bosque seco tropical.

Este es el primer análisis del régimen de incendios y su relación con el clima a escala de paisaje para un bosque seco tropical (bs-T) en Colombia. Debido a que el modelo aquí presentado es espacialmente explícito, es posible tener un acercamiento bien sea a nivel municipal o regional, que permita a partir del monitoreo del clima y con base en los rangos de valores obtenidos para las variables evaluadas, generar alertas tempranas de posibles ocurrencias de incendios. Asimismo, conocer cuales son las áreas con menor frecuencia de incendios y por tanto, mayor potencialidad energética (Con tiempos de retornos largos) puede ser un insumo importante a la hora de evaluar el riesgo de incendios con alta severidad. Sin embargo, es de tener en cuenta que este monitoreo deberá implementarse a una escala temporal, bien sea mensual o en tiempo real de ser posible. Todo esto conlleva a orientar la gestión, uso y manejo del bosque, así como priorizar zonas de control y manejo de incendios en caso de ser necesario.

Por otro lado, algo muy interesante de estos hallazgos, es que, a pesar de la fuerte relación con el clima, un gran porcentaje de área del bosque seco no fue objeto de incendios durante los años estudiados. Aunque se necesitan estudios posteriores para evaluar las causas de esta situación, una primera posible explicación puede ser por la escala utilizada en este estudio, no necesariamente se detectaron fuegos menores a 500 m² (Giglio et al., 2018; Huesca & Cuevas, 2009).. En ese mismo sentido, debido al nivel de fragmentación del bosque seco, (Pizano et al., 2014) incendios forestales pequeños tienden a no propagarse (Blondel & Fernandez, 2012) y por ende su escala de impacto es limitada y no son registrados por MODIS. Por lo tanto, estudios futuros deberían abordar escalas locales con imágenes de mayor detalle y su respectiva revisión de campo, para poder incluir incendios de tamaños menores.

En segundo lugar, y teniendo en cuenta lo mencionado por Amaya & Armenteras, (2012) que un gran porcentaje de incendios son de origen antrópico, puede ser que el abandono del campo y cambios en los patrones de uso y ocupación del territorio, así como, las fuentes de ignición de incendios tradicionales (quema para pasturas y cultivos) hayan cambiado su incidencia. Por lo tanto, estudios futuros podrían abordar y estudiar los cambios en la economía y modos de vida de los habitantes del bs-T, con el fin de conocer cómo las actividades productivas que pueden estar originando o no incendios forestales y cómo las comunidades que allí habitan desarrollan sus actividades en función de la variación climática de la región. Más aun, este tipo de estudios podría incluir variables espacialmente explícitas de actividades

humanas, tales como distancia a vías, distancia a asentamientos, infraestructura eléctrica entre otros, que también han sido reportadas como fuentes de ignición. (Alvarado et al., 2017; Hoyos et al., 2017; Rollins et al., 2009; Van der Werf, Randerson, Collatz, & Giglio, 2003).

6. Bibliografía

- Alvarado, S. T., Fornazari, T., Cóstola, A., Morellato, L. P. C., & Silva, T. S. F. (2017). Drivers of fire occurrence in a mountainous Brazilian cerrado savanna: Tracking long-term fire regimes using remote sensing. *Ecological Indicators*, 78, 270–281. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2017.02.037>
- Amaya, D., & Armenteras, D. (2012). Incidencia De Incendios Sobre La Vegetación De Cundinamarca Y Bogotá Dc (Colombia), Entre 2001 Y 2010. *Acta Biológica Colombiana*, 17, 143–158. Retrieved from [http://www.researchgate.net/publication/257364192_INCIDENCIA_DE_INCENDIOS_SOBRE_LA_VEGETACION_DE_CUNDINAMARCA_Y_BOGOT_D_C._._\(COLOMBIA\)_ENTRE_2001_Y_2010/file/60b7d52aa04e2833dd.pdf%5Cnfile:///C:/Users/Lenovo/AppData/Local/Mendeley Ltd./Mendeley Desktop](http://www.researchgate.net/publication/257364192_INCIDENCIA_DE_INCENDIOS_SOBRE_LA_VEGETACION_DE_CUNDINAMARCA_Y_BOGOT_D_C._._(COLOMBIA)_ENTRE_2001_Y_2010/file/60b7d52aa04e2833dd.pdf%5Cnfile:///C:/Users/Lenovo/AppData/Local/Mendeley Ltd./Mendeley Desktop)
- Arango, M., Branch, J. &, & Bedoya, V. (2005). Clasificación No Supervisada De Coberturas. *Facultad Nacional de Agronomía*, 58–1, 2611–2634. Retrieved from <https://search.proquest.com/openview/5b8da2cb68aac5c26a657dd4201dbb48/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2035754>
- Argañaraz, J. P., Pizarro, G. G., Zak, M., & Bellis, L. M. (2015). Fire regime, climate, and vegetation in the Sierras de Córdoba, Argentina. *Fire Ecology*, 11(1), 55–73. <https://doi.org/10.4996/fireecology.1101055>
- Armenteras-Pascual, D., Retana-Alumbreros, J., Molowny-Horas, R., Roman-Cuesta, R. M., Gonzalez-Alonso, F., & Morales-Rivas, M. (2011). Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3), 279–289. <https://doi.org/10.1016/j.agrformet.2010.11.002>
- Armenteras, D., Gonzalez, F., & Franco, C. (2009). Distribución Geográfica Y Temporal De Incendios En Colombia Utilizando Datos De Anomalías Térmicas. *Caldasia*, 31(2)(February), 303–318. Retrieved from <http://www.revistas.unal.edu.co/index.php/cal/article/view/36107/37525>
- Barrera, A. (2004). Técnicas de completado de series mensuales y aplicación al estudio de la influencia de la NAO en la distribución de la precipitación en España. Universidad de Barcelona Departamento de Astronomía y Meteorología.
- Batista-Morales, M. F., & Romero-Duque, L. P. (2018). *Landscape patterns changes and deforestation drivers of tropical dry forest in the upper Magdalena basin (Colombia)*.
- Batista, E. K. L., Russell-Smith, J., França, H., & Figueira, J. E. C. (2018). An evaluation of contemporary savanna fire regimes in the Canastra National Park, Brazil: Outcomes of fire suppression policies. *Journal of Environmental Management*, 205, 40–49.

<https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2017.09.053>

- Blondel, M., & Fernandez, I. (2012). Efectos de la fragmentación del paisaje en el tamaño y frecuencia de incendios forestales en la zona central de Chile. *Revista Conservación Ambiental*, (1), 7–16.
Retrieved from www.ecomabi.cl
- Bradshaw, S. D., Dixon, K. W., Hopper, S. D., Lambers, H., & Turner, S. R. (2011). Little evidence for fire-adapted plant traits in Mediterranean climate regions. *Trends in Plant Science*, 16(2), 69–76.
<https://doi.org/10.1016/j.tplants.2010.10.007>
- Capitaino, R., & Carcaillet, C. (2008). Post-fire Mediterranean vegetation dynamics and diversity: A discussion of succession models. *Forest Ecology and Management*, 255(3–4), 431–439.
<https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.09.010>
- El Tiempo 2016a. El Niño devastó por incendios área equivalente a tres veces Cali. El Tiempo, Edición Online. 2016. <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/efectos-del-fenomeno-de-el-nino-en-colombia-2015-2016/16610226>. Acceso: octubre 1 de 2016
- El Tiempo 2016b. ¿Por qué este es el enero más caluroso en cinco años? El Tiempo, Edición Online. 2016. Disponible en: <http://www.eltiempo.com/estilo-de-vida/ciencia/fenomeno-del-nino-enero-2016-el-mas-caluroso-en-5-anos/16485217>. Acceso: octubre 1 de 2016.
- Flannigan, M. D., Krawchuk, M. A., De Groot, W. J., Wotton, B. M., & Gowman, L. M. (2009). Implications of changing climate for global wildland fire. *International Journal of Wildland Fire*, 18(5), 483–507. <https://doi.org/10.1071/WF08187>
- Giglio, L., Schroeder, W., Hall, J. V., & Justice, C. O. (2018). *MODIS Collection 6 Active Fire Product User's Guide Revision B*. Retrieved from https://cdn.earthdata.nasa.gov/conduit/upload/10575/MODIS_C6_Fire_User_Guide_B.pdf
- Hantson, S., Padilla, M., & Chuvieco, D. C. E. (2012). *Un análisis de los errores de comisión y omisión de los Hotspots de MODIS a partir de datos de área quemada de alta resolución a escala global*. 19–21.
- Heyerdahl, E. K., Brubaker, L. B., & Agee, J. K. (2001). Spatial controls of historical fire regimes: A multiscale example from the interior west, USA. *Ecology*, 82(3), 660–678.
[https://doi.org/10.1890/0012-9658\(2001\)082\[0660:SCOHFR\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1890/0012-9658(2001)082[0660:SCOHFR]2.0.CO;2)
- Hoyos, N., Correa-Metrio, A., Sisa, A., Ramos-Fabiel, M. A., Espinosa, J. M., Restrepo, J. C., & Escobar, J. (2017). The environmental envelope of fires in the Colombian Caribbean. *Applied Geography*, 84, 42–54. <https://doi.org/10.1016/j.apgeog.2017.05.001>
- Hudak, A. T., & Brockett, B. H. (2004). Mapping fire scars in a southern African savannah using landsat imagery. *International Journal of Remote Sensing*, 25(16), 3231–3243.
<https://doi.org/10.1080/01431160310001632666>

- Huesca, M., & Cuevas, J. M. (2009). *Comparación de dos algoritmos para la estimación de áreas quemadas a partir de imágenes MODIS . Aplicación a los incendios de Canarias de Julio 2007* . *Comparison of two burned area algorithms using MODIS data . Application to Canary islands forest fire*. 24–36.
- IDEAM. (2005). *Atlas climatológico nacional*.
- Landi, M. A., Dibella, C., Ojeda, S., Salvatierra, P., Argañaraz, J., & Bellis, L. M. (2017). Selecting control sites for post-fire ecological studies using biological criteria and modis time series data. *Fire Ecology*, 13(2). <https://doi.org/10.4996/fireecology.130274623>
- Leiva, J. A., Mata, R., Rocha, O. J., & Soto, M. V. G. (2009). Cronología de la regeneración del bosque tropical seco en Santa Rosa . *Revista de Biología Tropical*, 57(September), 801–815.
- Linares, J., & Fandiño, M. (2009). Estado Del Bosque Seco Tropical E Importancia Relativa De Su Flora Leñosa , Islas De La Vieja Providencia Y Santa Catalina , Colombia , Caribe Suroccidental. *Revista de La Academia Colombiana de Ciencias Exactas, Físicas y Naturales*, 33(126), 1–15. Retrieved from http://www.acefyn.org.co/revista/Vol_33/126/5-16.pdf
- Lloret, F. (2004). Régimen de incendios y regeneración. *Ecología Del Bosque Mediterráneo En Un Mundo Cambiante*, 101–126.
- M. Chávez & N. Arango. (1998). *Informe nacional sobre el estado de la biodiversidad de Colombia*.
- Medina, A. A. (2007). Fire regime reconstruction in a Prosopis caldenia woodland, La Pampa, Argentina [In Spanish]. *Bosque*, 28(3), 234–240. <https://doi.org/10.4067/S0717-92002007000300008>
- Murphy, P. G. (2009). Ecology of Tropical Dry Forest1. *Ecology*, 17(1986), 67–88.
- Myers, R. L. (2006). Living with Fire—Sustaining Ecosystems & Livelihoods through Integrated Fire Management. Global Fire Initiative. *The Nature Conservancy.*, (June), 28. Retrieved from <http://www.nature.org/initiatives/>
- Pausas, J. G., & Ribeiro, E. (2013). The global fire-productivity relationship. *Global Ecology and Biogeography*, 22(6), 728–736. <https://doi.org/10.1111/geb.12043>
- Pausas, J. G., & Ribeiro, E. (2017). Fire and plant diversity at the global scale. *Global Ecology and Biogeography*, 26(8), 889–897. <https://doi.org/10.1111/geb.12596>
- Pizano, C., García, H. (García M., Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, M., Calderón-Acevedo, C., Castaño-Naranjo, A., Castro-Lima, F., ... Vergara-Valera, H. (2014). *El bosque seco tropical en Colombia*. Retrieved from <http://repository.humboldt.org.co/handle/20.500.11761/9333>
- Rodriguez, A. (2012). Cartografía multitemporal de quemas e incendios forestales en Bolivia : Detección y validación post-incendio. *Ecología En Bolivia*, 47(1), 53–71.
- Rollins, M. G., Keane, R. E., & Parsons, R. a. (2009). Mapping Fuels and Fire Regimes Using Remote

Sensing , Ecosystem Simulation , and Gradient Modeling Published by : Ecological Society of America MAPPING FUELS AND FIRE REGIMES USING REMOTE SENSING , ECOSYSTEM SIMULATION , AND GRADIENT MODELING. *America*, 14(1), 75–95.

<https://doi.org/10.1890/02-5145>

Romero-Ruiz, M., Etter, A., Sarmiento, A., & Tansey, K. (2010). Spatial and temporal variability of fires in relation to ecosystems, land tenure and rainfall in savannas of northern South America. *Global Change Biology*, 16(7), 2013–2023. <https://doi.org/10.1111/j.1365-2486.2009.02081.x>

Sánchez-Azofeifa, A., Calvo-Alvarado, J., Espírito-Santo, M. M. Do, Fernandes, G. W., & Powers, J. (2014). Tropical Dry Forests in the Americas. In *Tropical Dry Forests in the Americas*. <https://doi.org/doi:10.1201/b15417-2>

Van der Werf, G. R., Randerson, J. T., Collatz, G. J., & Giglio, L. (2003). Carbon emissions from fires in tropical and subtropical ecosystems. *Global Change Biology*, 9(4), 547–562. <https://doi.org/10.1046/j.1365-2486.2003.00604.x>

Vargas, A., Santos, A., Cárdenas, E., & Obregón, N. (2011). *Analysis of Distribution and Spatial Interpolation of Rainfall in Bogota, Colombia*. 78, 151–159. Retrieved from <http://www.redalyc.org/pdf/496/49622358017.pdf>

Vargas, D. (2016). Dinámica del Paisaje en áreas afectadas por incendios forestales en el bosque tropical seco del Área de Conservación Guanacaste, Costa Rica. *Universidad Estatal a Distancia*, 95. Retrieved from [http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/bitstream/handle/11606/695/Dinámica del paisaje en áreas afectadas por incendios forestales en el bosque tropical seco del Área de Conservación Guanacaste%2C Costa Rica..pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://copa.acguanacaste.ac.cr:8080/bitstream/handle/11606/695/Dinámica%20del%20paisaje%20en%20áreas%20afectadas%20por%20incendios%20forestales%20en%20el%20bosque%20tropical%20seco%20del%20Área%20de%20Conservación%20Guanacaste%20Costa%20Rica..pdf?sequence=1&isAllowed=y)

Wittkuhn, R. S., & Hamilton, T. (2010). Using fire history data to map temporal sequences of fire return intervals and seasons. *Fire Ecology*, 6(2), 97–114. <https://doi.org/10.4996/fireecology.0602097>

Zhu, Z., Wang, S., & Woodcock, C. E. (2015). Improvement and expansion of the Fmask algorithm: Cloud, cloud shadow, and snow detection for Landsats 4-7, 8, and Sentinel 2 images. *Remote Sensing of Environment*, 159, 269–277. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.12.014>

7. Anexos

Información complementaria de los modelos de interpolación de variables climáticas en la zona de estudio. 14 Gb aproximadamente.

AGRADECIMIENTOS:

Esta investigación hace parte del proyecto “Influencia del fuego en la regeneración de la vegetación arbórea de un bosque seco en la cuenca alta del río Magdalena”, financiado por el Centro de Investigación de la Universidad Distrital y liderado por la profesora Ángela Parrado Rosselli y directora del presente trabajo de grado, a quien también agradezco por su acompañamiento y trabajo constante en la búsqueda del objetivo propuesto.

Agradezco a la Universidad Distrital Francisco José De Caldas, institución que ha sido formadora de toda mi carrera profesional y personal, a los profesores de la maestría que de algún modo aportaron a la construcción de este trabajo de grado, especialmente el profesor Juan Rosso, por sus aportes en la estructuración del mismo.

Agradezco especialmente a mi esposa, Andrea García, quien me apoyo constantemente y colaboró con el procesamiento de información para lograr parte de los resultados obtenidos, asimismo a mis compañeros de maestría Alejandro Hernández, Anghy Gutiérrez, Astrid Ramírez y Nathalia Garzón, quienes contribuyeron a través de sus críticas y observaciones al mejoramiento constante de este trabajo. Finalmente, agradezco a mis jurados Nelly Rodríguez y Juan Carlos Alarcón, cuyas observaciones contribuyeron al mejoramiento de la presente investigación.