

UNIVERSIDAD
NACIONAL
DE COLOMBIA

**Desarrollo de un modelo para la dispersión del fuego
en la Orinoquía Colombiana usando autómatas
celulares**

Xavier Corredor Llano

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia

2017

Desarrollo de un modelo para la dispersión del fuego en la Orinoquía Colombiana usando autómatas celulares

Xavier Corredor Llano

Tesis de investigación presentado como requisito parcial para optar
al título de:

Magister en ingeniería de sistemas y computación

Directora: Ph.D. Dolors Armenteras Pascual

Codirector: Ph.D. Luis Fernando Niño Vásquez

Línea de Investigación:

Ecología del paisaje (dinámica de fuegos espacial y temporal) y Sistemas
inteligentes

Grupos de Investigación:

Ecología del Paisaje y Modelación de Ecosistemas (ECOLMOD)

Laboratorio de Investigación en Sistemas Inteligentes (LISI)

Universidad Nacional de Colombia
Facultad de Ingeniería
Bogotá, Colombia

2017

Agradecimientos

Quiero agradecer al alma mater por tener y darme esta oportunidad de enseñanza y crecimiento tanto personal como académico, como también a los profesores que dirigieron y acompañaron este trabajo.

También agradecer mis familiares y personas cercanas pero sobre todo a mi compañera por impulsarme y ayudarme en los momentos claves, sin olvidar a mi gata por acompañarme en todas las traspachadas que fueran necesarias.

Resumen

El objetivo principal de este estudio fue desarrollar un modelo de autómata celular para la simulación del comportamiento de la dispersión de grandes incendios sobre zonas heterogénea en el área de estudio, integrando en el modelo las características de la vegetación, el índice EVI y el número de días sin lluvia, estudiadas históricamente con los grandes incendios ocurridos durante el 2000 y el 2014 en la Orinoquía Colombiana. En la parte I, se determinó el umbral a partir del cual considerar una huella quemada como un «gran incendio» ($\geq 214ha$) adaptando la metodología de Pareto 80-20 aplicada a la serie de tiempo y a las condiciones particulares de la región de análisis, usando información de imágenes satelitales derivadas de MODIS. En la parte II, se analizó las variables que generan y predisponen el medio para la dispersión y desarrollo de los grandes incendios en la Orinoquía bajo análisis de variables tales como: tipo de cobertura, el índice de vegetación, vientos y el número de días sin lluvia. En la parte III, se planteó una metodología en la que se desarrolla un modelo de dispersión de incendios usando un autómata celular con estados iniciales y con funciones de transición para los cambios de estado de cada una de las celdas, usando los resultados de los análisis de las variables estudiadas en la parte II, cada variable representaba un riesgo a que la celda se incendiara aplicando un índice de resistencia con el fin modular su cambio de estado. El modelo se contrastó contra dos incendios reales y los resultados del comportamiento y simulación de la dispersión del autómata desarrollado presentó muy buenas características como modelo de aproximación de la simulación de grandes incendios en la Orinoquía Colombiana.

Palabras claves: Autómata celular, dispersión de grandes incendios, sensores remotos, sabanas, Orinoquía Colombiana

Abstract

With the objective to obtain simulations of dispersion behavior from big fires in the Colombian Orinoquian region, a model of cellular automata was proposed. The characteristics of the vegetation, the EVI index and the number of days without rain were integrated, due a detailed historical study of the great fires that occurred during the period between 2000 and 2014 in the study area. The first part of this work, involves the selection of a threshold from which the burned footprint was considered, as a «great fire» ($\geq 214ha$); This threshold is the product of an adaptation of the Pareto 80-20 methodology applied to the time series and the particular conditions of the analysis region, using information from satellite image-ries. In the second part II, was analyzed the variables that generate and predispose the medium for the dispersion and development of big fires in the study area under the analysis of variables such as: type of cover, the vegetation index, winds and the number of days without rain. In the final part a methodology is proposed in which a fire dispersion model is developed using a cellular automata with initial states and with transition functions for the changes of state of each of the cells, using the results of the analyzes of the variables studied in part II; in this case, each variable represented the risk that the cell would catch fire by applying a resistance index in order to modulate its change of state. The cellular automata model is put under test, with two big real fires, showing approximate results according to the characteristics that define the dispersion in the Colombian Orinoquian region.

Keywords: Cellular automata, dispersion of big fires , remote sensing, savannah, Colombian Orinoquian region

Índice

Introducción	1
I Caracterización de los grandes incendios en la Orinoquía Colombiana	5
1. Marco teórico y antecedentes	6
1.1. Área de estudio	6
1.2. Grandes incendios	8
1.3. Información satelital	9
2. Metodología	11
2.1. Identificación de las huellas quemadas	11
2.2. Identificación y selección de las grandes huellas quemadas	12
2.3. Ocurrencia de las grandes huellas quemadas sobre la Orinoquía	15
2.4. Detección de incendios sobre la huella quemada	16
3. Resultados	19
3.1. Identificación de huellas quemadas	19
3.2. Identificación y selección de las grandes huellas quemadas	21
3.3. Ocurrencia de las grandes huellas quemadas sobre la Orinoquía	23
3.4. Detección de incendios sobre la huella quemada	25
II Variables que modelan los grandes incendios en la Orinoquía Colombiana	27
4. Marco teórico y antecedentes	28
4.1. El comportamiento y dispersión de los incendios	28
4.1.1. Fuego	28
4.1.2. Combustible	28
4.1.3. Transferencia de calor	30
4.2. Factores y variables asociados a la dispersión de los incendios	31
4.2.1. Numero de días sin lluvia	31
4.2.2. Índice de vegetación	31

4.2.3.	Vientos	32
4.2.4.	Tipo de cobertura	33
4.3.	Origen de los datos	33
4.3.1.	Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)	33
4.3.2.	Índices de Vegetación	34
4.3.3.	Viento	35
5.	Metodología	36
5.1.	Numero de días sin lluvia	36
5.2.	Índice de vegetación	38
5.3.	Viento	39
5.4.	Coberturas	41
6.	Resultados	42
6.1.	Numero de días sin lluvia	42
6.2.	Índice de vegetación	44
6.3.	Vientos	47
6.4.	Cobertura	48
III	Modelo de dispersión de grandes incendios en la Orino- quía Colombiana	53
7.	Marco teórico y antecedentes	54
7.1.	Autómatas celulares y dispersión de fuegos	55
7.1.1.	Características de los autómatas celulares	56
7.1.2.	Modelos de autómatas celulares aplicados a dispersión de fuegos	58
8.	Metodología	60
8.1.	Modelo de dispersión	60
8.1.1.	Condiciones iniciales	61
8.1.2.	Scripts de ingesta de datos	62
8.1.3.	Actualización y configuración de las variables externas	63
8.1.4.	Reglas de transición	64
8.1.5.	Paso de tiempo	67
8.2.	Simulación y pruebas del modelo	67

8.2.1. Selección de los incendios de pruebas	67
8.2.2. Simulación	68
9. Resultados	69
9.1. Modelo	69
9.2. Simulación y pruebas del modelo	70
9.2.1. Simulación y prueba No. 1	70
9.2.2. Simulación y prueba No. 2	73
Conclusiones y recomendaciones	79
Bibliografía	83

Índice de figuras

1.	Ubicación de los Llano Orientales (Orinoquía) de Colombia. Fuente: Wikimedia	7
2.	Área quemada (A) vs. puntos de incendios (B) por regiones naturales de Colombia durante el periodo 2001-2009. Tomada de Armenteras-Pascual et al. (2011)	8
3.	(a) histograma de frecuencia de una distribución normal y una de ley de potencia (en negrilla) (b) las mismas distribuciones aplicando logaritmos en ambos ejes. Adaptada de Newman (2005).	14
4.	Histograma de frecuencia entre la cantidad total del área quemada vs tamaño de la huella quemada, con su respectiva cantidad de eventos	19
5.	Comportamiento mensual multianual del numero de huellas quemadas detectadas y el área total	20
6.	Comportamiento del numero de huellas detectadas y el área total por año	20
7.	Histograma de frecuencia log-log de las huellas quemadas	21
8.	Total de área quemada y las grandes huellas quemadas	22
9.	Área quemada mensual multianual debido a las grandes huellas quemadas	23
10.	Ocurrencia de eventos pixel a pixel de las grandes huellas quemadas, periodo 2000-2014	24
11.	Localización de las grandes huellas quemadas agrupadas por tamaño, periodo 2000-2014	25
12.	Número de incendios que generan una huella quemada y el área promedio de las huellas quemadas.	26
13.	Relación de la cantidad y tamaño de la huella quemada de los grandes incendios únicos respecto a los días de duración	26
14.	Curvas de biomasa total, combustible total y frecuencia de incendio, tomado de Cochrane and Ryan (2009)	29
15.	Componentes de la transferencia de calor, sacado de Cochrane and Ryan (2009)	30

16.	En a) las estaciones actualmente activas y disponibles para la Orinoquía del catalogo del IDEAM con datos de precipitación, en b) las mismas estaciones pero filtradas: con datos 2000-2014, menos del 12% de datos perdidos y que pasan el test de homogeneidad.	37
17.	Ajuste y selección de los eventos de pixeles quemados mejor agrupados	40
18.	Dos ejemplos de comparación de las series de tiempo de la estación vs. datos del TRMM. (a) Estación del Apto. Puerto Carreño con el menor valor de RMSE y (b) estación de El Paraíso ubicada en el norte del Vichada frontera con Arauca.	42
19.	Precipitación acumulada total para el periodo 2000-2014, Orinoquía Colombiana, TRMM	43
20.	Distribución de la serie de numero de días continuos sin lluvia previos al incendio, a) diagrama de cajas agrupado por tamaño y b) la función de densidad de probabilidad.	44
21.	Ejemplo de los valores EVI de una huella quemada	45
22.	Variación del valor EVI mensual-multianual de las grandes huellas quemadas	45
23.	Promedio histórico EVI por huella quemada (Lineas verdes) y valor EVI días antes del incendio de la huella quemada (puntos azules)	46
24.	Histograma de frecuencia de las anomalías del índice de vegetación días previos al incendio respecto al promedio histórico 2000-2014	47
25.	Correlación del sentido del viento de la dispersión y de los datos de la fuente secundaria	48
26.	Las 10 coberturas más frecuentemente quemadas	49
27.	Mapa de las 10 coberturas más frecuentemente quemadas	50
28.	Comportamiento de los herbazales y bosques de galerías en las áreas más frecuentemente quemadas, área cerca al PNN Tuparro, Vichada, donde las zonas frecuentemente quemadas se muestran en color vivo.	51
29.	Identificación de la ubicación de la celda y sus respectivos vecinos	57
30.	Dos clases de vecinos respecto al pixel central: a) vecinos adyacentes y b) vecinos en la diagonal	57
31.	Diagrama de flujo del autómata celular implementado	61
32.	Flujos de la evolución y paso de tiempo del autómata celular, fragmento del diagrama 31.	63

33.	Influencia de la propagación de un vecino en la diagonal	64
34.	Diagrama de clases del autómata celular desarrollado	69
35.	Incendio real de prueba No. 1 (en pixeles rojos) sobre las coberturas	70
36.	Inicialización del autómata con las celdas con su respectiva cobertura	71
37.	Simulación del autómata para la prueba No. 1	72
38.	Incendio real de prueba No. 2 (en pixeles rojos) sobre las coberturas	74
39.	Inicialización del autómata con las celdas con su respectiva cobertura	75
40.	Simulación del autómata para la prueba No. 2	76

Índice de cuadros

1.	Tres casos de ejemplo de la detección de incendios únicos sobre distintas huellas quemadas. En (a) está el segundo producto de MCD45 (burndate) con la fecha en la cual el pixel se detectó como quemado, en (b) los grupos luego de aplicarle el algoritmo.	18
2.	Métodos de transferencia de calor con el fuego	30
3.	Productos de índice de vegetación de MODIS, sacado de http://modis.gsfc.nasa.gov	34
4.	Descripción de la banda 12 del MOD13A1 de los rangos de la confiabilidad del pixel, basado en Solano et al. (2010)	39
5.	Estadísticos del número de días sin lluvia	44
6.	Índice de vulnerabilidad según el tipo de cobertura	65

Introducción

Los incendios hacen parte de la dinámica natural de variados ecosistemas, afectan procesos ecológicos tales como el ciclo de carbono, la regeneración y la descomposición biológica y están dentro de los ciclos naturales de la tierra, como procesos perturbadores que no solo afecta la estructura, la composición sino el funcionamiento de la vegetación y el suelo (Cochrane, 2009). Sin embargo, existen evidencias que indican que desde 20.000 años atrás y hasta la actualidad (Brown and Smith, 2000), los mayores causantes de los incendios de la vegetación han sido los factores antrópicos, convirtiéndose estos en un problema ambiental cuando su recurrencia supera el límite de la capacidad de resistencia de los ecosistemas y altera de manera irreversible muchos de los procesos naturales y su medio (del. Campo Parra Lara, 2011).

El aumento general de la frecuencia y ocurrencia de incendios junto con actividades y fenómenos tales como: el cambio de la cobertura vegetal, la deforestación, variabilidad climática, el cambio climático (Liu et al. (2009) y Aldersley et al. (2011)), crea un ambiente propicio para que se generen -con mayor frecuencia y mayor magnitud- incendios grandes (Riaño et al., 2007). Según Malamud (1998) la ocurrencia de los incendios forestales respecto a su área quemada presentan un comportamiento de ley de potencias, es decir, una distribución de cola gruesa en la que pocos eventos (grandes incendios) son los que generan la gran mayoría de las consecuencias (áreas quemadas). Los incendios grandes tienen características particulares de espacio, tiempo e intensidad que generan un fuerte impacto al ecosistema y al medio ambiente, lo que lo hace eventos más llamativos para su modelación y estudio; es así, como conocer el comportamiento de los incendios de mayor extensión puede aportar un primer paso para minimizar el riesgo de ocurrencia de grandes incendios en la región, además de proporcionar mejores metodologías para contrarrestarlos, combatirlos y planificar su control.

En Colombia, la región de la Orinoquía es donde se presentan recurrentemente los incendios más grandes y con mayor área quemada afectada (Armenteras-Pascual et al., 2011); esta región, presenta coberturas de vegetación herbácea tipo sabana más propensas a la quema, con topografía principalmente plana, suelos poco fértiles y altas temperaturas. A pesar de que ya se conoce la extensión promedio que es afectada por quemadas en la región (Armenteras et al., 2005), la variabilidad en los tamaños de los fragmentos afectados es muy grande. Este trabajo surge como parte a dar respuesta a la necesidad de avanzar en estudios de investigación y modelación

de este tipo de fenómenos en la región de la Orinoquía. En este documento que está dividido en tres partes, en lector encontrará los resultados del desarrollo de un modelo de dispersión del fuego con base en autómatas celulares adaptado a las condiciones ambientales y características de la vegetación estudiadas históricamente con los grandes incendios ocurridos durante el 2000 y el 2014 en la Orinoquía Colombiana.

En la primera sección (parte I), se presentan los resultados del diseño e implementación de una metodología propia, que usando información de imágenes satelitales derivadas de MODIS (Roy and Boschetti, 2008), permitió identificar las huellas quemadas. En esta metodología, se contempló la identificación del umbral a partir del cual considerara una huella quemada como un “gran incendio”. Este elemento, crucial para esta investigación se determinó adaptando la metodología de Pareto 80-20 (Newman, 2005) aplicada a la serie de tiempo y a las condiciones particulares de la región de la Orinoquía. Se obtuvieron 4134 eventos durante el periodo 2000-2014, los cuales fueron caracterizados en función de su ocurrencia y duración.

La dinámica de dispersión de los incendios, está íntimamente relacionada con múltiples variables y condiciones (Cochrane and Ryan, 2009), esta se define como un sistema complejo (Malamud, 1998), porque relaciona múltiples variables como son las condiciones climáticas o el tipo y estado de la vegetación, (Cochrane and Ryan, 2009). Por consiguiente, en la parte II se presenta el procesamiento de estas variables que generan y predisponen el medio para el desarrollo de los grandes incendios detectados. El marco metodológico para este análisis, involucró análisis separados para cada variable que van desde la influencia del tipo de cobertura con su probabilidad de quema, hasta incluir el Índice de cobertura vegetal para correlacionarlo con grandes incendios.

En la tercera y última parte, se plantea una metodología en la que se desarrolla un modelo de dispersión de incendios usando un autómata celular con estados iniciales y con funciones de transición para los cambios de estado de cada una de las celdas, usando los resultados de los análisis de las variables del tipo de cobertura, el índice de vegetación y el número de días sin lluvia, estudiadas en la parte II. Cada variable representaba un riesgo a que la celda se incendie y se aplicó un índice de resistencia para cada celda a fin modular su cambio de estado. Aunque no se presentan métricas de validación con respecto a los grandes incendios, Los resultados del modelo son adecuados a lo esperado con base al tipo de cobertura y a las variaciones repentinas de las propiedades de las celdas compuestos por los índices de vegetación y número de días sin lluvia. La conclusión general, es que el modelo aquí presentado, arroja

resultados del comportamiento y simulación de la dispersión acordes por el área quemada resultante respecto al área quemada observada (de grandes incendios históricos), y aunque faltan variables y condiciones propias de un incendio y del área de estudio para volver más robusto la simulación del autómata celular, el sistema al que se llegó presenta muy buenas características como modelo de aproximación de la simulación de la dispersión de grandes incendios.

Finalmente, la investigación indica que el tipo de cobertura, el índice EVI y el número de días sin lluvia, son variables que modulan muy bien los grandes incendios y, por tanto, de especial interés para el autómata celular; trabajos futuros deben conducir a la toma de decisiones basadas en el estado de estas y el riesgo a la generación de incendios grandes sobre la Orinoquía Colombiana, y la de implementar y estudiar más variables y características de los mismos

Parte I

**Caracterización de los grandes
incendios en la Orinoquía
Colombiana**

1. Marco teórico y antecedentes

1.1. Área de estudio

Los incendios están presentes y afectan la gran mayoría de la superficie terrestre. Las zonas tropicales corresponden al 33.7 % de la superficie de la tierra y contiene el 40 % de los bosques del mundo y vive el 37 % de la población humana, y es ahí en el trópico donde actualmente se presenta la mayor cantidad de incendios que cualquier otra parte de la tierra (Cochrane, 2011).

El área de estudio son los Llanos Orientales de Colombia, también llamada Orinoquía Colombiana, ya que hace parte de la cuenca del Orinoco, una cuenca binacional compartida por Venezuela (65 %) y Colombia (35 %), con un área de 981.446 km² (Lasso et al. (2010)). La Orinoquía Colombiana está conformada por los departamentos de Arauca, Casanare, Meta, Vichada, Guaviare y Guanía, cuenta con 64 municipios y tiene un área aproximada de 380.000 km² la cual representa el 33 % del territorio nacional (PND and Compes (2014)). Limita al norte con el Estado Apure en la frontera con Venezuela; al sur, con el río Guaviare; al oeste, con la Cordillera Oriental; y al este, con el río Orinoco, como se observa en el mapa de la figura 1

La Orinoquía alberga al 3,7 % de la población nacional (1,7 millones de personas), de las cuales el 71 % se localiza en cabeceras donde el 40 % se ubican en Villavicencio, Yopal y Arauca, 49 de los 64 municipios tiene densidades con menos de 10 hab/km². Tiene alta riquezas en recursos no renovables, y una alta actividad de exploración y explotación de hidrocarburos (PND and Compes (2014)).

La Orinoquía Colombiana contiene tres sistemas de tierras o paisajes: el piedemonte, las llanuras aluviales y las altillanuras. Sus suelos, por lo general, son ácidos y poco fértiles, sometidos a altas temperaturas durante el año y a excesos de humedad (Correa, H. D, Ruiz, S. L. y Arévalo (2006)).

Se encuentra en una baja latitud (de 2° a 5° lat N) como también su altitud que ronda los 100 a 300 msnm. Su cielo se encuentra abierto a todas las direcciones (exceptuando en parte al oeste por la Cordillera de los Andes), esto hace que la Orinoquía Colombiana presente un clima definido por los vientos, las lluvias y el régimen térmico elevado.

Las lluvias presentan un comportamiento mono-modal, la época lluviosa dura 8 meses (de abril a noviembre) y la época seca dura de 2 a 4 meses (de diciembre a marzo), y ésta estacionalidad se encuentra fuertemente influenciada por el mo-



Figura 1: Ubicación de los Llanos Orientales (Orinoquía) de Colombia. Fuente: Wikimedia

vimiento latitudinal del sistema de convergencia intertropical (ZCIT). La temperatura promedio anual es relativamente elevada y estable. Las temperaturas son un poco más altas en el interior de los Llanos Orientales que en el Piedemonte andino. La amplitud de la temperatura (diferencia diurna/nocturna) puede ser alta (5 a 6 °C) en la época seca, pero es muy atenuada en la época lluviosa (Rippstein et al. (2001)). Los incendios suelen ocurrir de forma intra-anual en la temporada seca, fenómeno que es fuertemente marcado en esta región, comprendido entre diciembre y marzo.

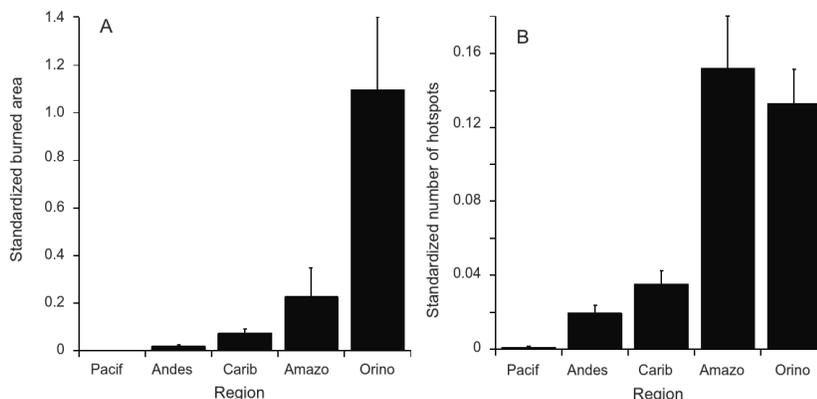


Figura 2: Área quemada (A) vs. puntos de incendios (B) por regiones naturales de Colombia durante el periodo 2001-2009. Tomada de Armenteras-Pascual et al. (2011)

La Orinoquía no tiene la mayor cantidad de focos de incendios, pero si representa la región con mayor cantidad de áreas quemadas, donde se presentan los mayores y más grandes incendios en Colombia (Figura 2). Esta particularidad es debido al tipo de coberturas de vegetación propensas a la quema, con topografía principalmente plana, y en términos generales presenta dinámicas de los fuegos muy interesantes para su estudio. Es por estas razones que se ha escogido la región de la Orinoquía Colombiana como área de estudio.

1.2. Grandes incendios

Un incendio forestal es la quema de la cobertura vegetal a través de un fuego sin control, sus dinámicas de dispersión afectada por diversos factores, generan a su paso una huella quemada que es la cobertura vegetal convertida en carbón y cenizas. Esta huella quemada producto del incendio presenta diferentes características de dimensiones en su huella quemada, que dependen del comportamiento que tuvo la dispersión misma del incendio. Al presentarse ciertas características y condiciones, estos incendios pueden convertirse en «grandes incendios» generando tras su paso grandes huellas quemadas de cobertura vegetal.

La definición de que un incendio sea catalogado como un «incendio grande», no es ni sencillo ni su procedimiento es claro, además de ser relativa y depender de factores locales. Un ejemplo claro de ello es que, según Gill and Allan (2008) para Australia, los incendios grandes están por encima de 10^6 hectáreas, por otro lado, según Ganteaume and Jappiot (2013) para el sur de Francia comienzan a catalogar

a los grandes incendios los que son mayores a 100 hectáreas. Ambos casos respecto a Colombia presentan condiciones topográficas, climáticas y de vegetación muy variada, lo que hace que esta frontera de clasificación sea muy particular para cada región, específica para el tipo de cobertura, tamaño del país y hasta posibles razones políticas y gubernamentales. Es por ello que esta definición de que es un «gran incendio» debe ser identificada y analizada dependiendo del lugar de análisis y de los patrones y comportamientos mismos de los incendios ocurridos ahí.

1.3. Información satelital

Las imágenes satelitales son información capturada por sensores montados sobre satélites artificiales que rodean la tierra, generan una gran cantidad de productos de variada características de captura, resolución espacio/temporales, en diferentes bandas de información y propósitos distintos.

En las últimas décadas, las técnicas de la teledetección han tomado mucha importancia principalmente en el análisis y estudios de las coberturas vegetales y del uso de suelo. Son muy útiles en el monitorio de los eventos y fenómenos, ya sean producidos por el hombre o de manera natural, que producen modificaciones de las coberturas de la tierra durante un periodo de tiempo. La información satelital es una excelente fuente que provee datos en periodos frecuentes y buenas resoluciones, en distintos espectros de frecuencia de luz, y muchos subproductos preprocesados. Existen diversos proyectos, satélites y sensores en la actualidad, cada uno con configuraciones y características particulares para distintos usos.

Uno de muchos sensores disponibles, que es gratuito y por sus características y subproductos van a ser de mucha utilidad en esta investigación, es el sensor MODIS.

MODIS

La NASA con el propósito de coleccionar mediciones de las nubes, aerosoles, color del océano, temperatura de la superficie, albedo, entre otros, puso a finales del 1999 dos satélites con metas científicas, llamados Terra y Aqua. El satélite Terra¹ esta en una orbita polar circular sincronizada con el sol y pasa siempre a las 10:30am sobre el ecuador de manera descendente (norte-sur) y tiene cinco sensores. El satélite Aqua² también tiene una orbita polar circular sincronizada con el sol pero pasa a

¹<http://terra.nasa.gov/about>

²<http://aqua.nasa.gov/content/about-aqua>

la 1:30pm por el ecuador de manera ascendente (sur-norte) y tiene ocho sensores. Ambos proveen valiosa información para estudios multi-disciplinarios de la tierra y los procesos relacionados con ella, involucrando la atmósfera, los océanos, el hielo y la superficie terrestre.

Los sensores de estos satélites tiene buena sensibilidad radiométrica, buena calidad geométrica y una alta resolución temporal, ésta ultima característica lo hacen muy útil ya que se pueden general series de tiempo con resolución diaria, y aunque no cuente con una excelente resolución espacial, pero su alta resolución temporal lo hacen muy interesantes para procesos muy variables o sensibles en el tiempo.

MODIS (Moderate-resolution Imaging Spectroradiometer) es un sensor presente en ambos satélites (Terra y Aqua) genera productos de las observaciones de la reflectividad de la superficie terrestre, y suministran datos en 36 bandas espectrales discretas, lo que provee una medida a gran escala de la dinámica global.

De los productos del MODIS, son generados otros tipos de sub-productos de 2da, 3ra y 4ta generación con objetivo mas específico, entre ellos esta el MCD45 que es el que hemos usado. El proyecto MODIS Burned Area Product (MCD45) (Roy and Boschetti (2008)), usa las imágenes en bruto del sensor MODIS de ambos satelites a los cuales les realiza procesamiento a través de unos algoritmos; que principalmente eliminan, corrigen, ajustan y registra píxeles «quemados» con un respectivo índice de confianza. Los algoritmos están ajustados para la detección de áreas quemadas usando la dinámica de la reflectividad de la superficie terrestre de imágenes diarias y detectando rápidos cambios del píxel, y registrando cuando éste ha pasado a tener una cobertura normal a una quemada, basándose en varios criterios, que es el que genera el índice de confianza. El MCD45 tiene dos tipos de productos: el área quemada detectada y las fechas en la cual se detecto el área quemada correspondiente.

2. Metodología

Para la realización de la caracterización de los incendios y huellas quemadas, se hizo uso de los productos del sensor satelital MODIS, ya que provee de subproductos específicos de huellas quemadas y las características de éste, las hacen más que suficientes para este objetivo. Estos son: el «MCD45 Burned Area» que muestra el área quemada, para la identificación de incendios ocurridos mes a mes en el periodo de análisis, y el «MCD45 Burn Date» de las fechas detectadas para identificar incendios producidos en un mismo periodo con un valor de días de latencia del fuego. El «MCD45 Burned Area», el cual registra los píxeles detectados como quemados para el mes detectado con un valor de confianza que varía de 1 a 5. Este producto no registra áreas directamente como tal, únicamente identifica el pixel individual sin importar su temporalidad de dispersión ni su origen, es decir, sin importar como se produjo y como fué que se propagó.

2.1. Identificación de las huellas quemadas

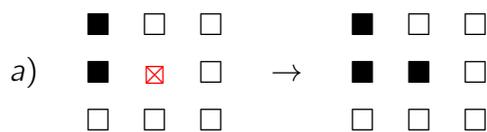
Para la caracterización de los grandes incendios en la Orinoquía Colombiana, lo que primero que se realizó fue la detección de las grandes huellas quemadas históricas ocurridas en la Orinoquía durante el 2000 al 2014 usando información satelital.

Se usó el producto mensual MCD45 Burned Area durante el periodo 2000 al 2014 con una resolución del pixel de 500m por 500m. El MCD45 usa los datos diarios de MODIS, esto hace que cada archivo tenga el acumulado diario de los eventos de los píxeles quemados acumulados durante todo el mes correspondiente. Los valores numérico que contienen las imágenes MCD45 Burned Area van del 1 al 5, donde 1 es mayor confianza y 4 la menor confianza de ser un área quemada, y el valor del píxel 5 corresponde a áreas quemadas de zonas agrícolas. Los algoritmos que calculan los respectivos índices de confianza están explicados en Justice et al. (2011).

Se seleccionaron los primeros 4 valores de píxeles (del 1 al 4) dejando por fuera el 5 por corresponder a áreas quemadas de zonas agrícolas ya que estas se realizan a propósito y de manera controlada y no presenta información para Colombia. Los siguientes son los procedimiento para identificación de las huellas quemadas históricas en el periodo 2000-2014 ocurridos unicamente en la Orinoquía Colombiana:

1. Se descargó y preparó los datos MCD45 para Colombia

2. Se transformo la información en datos binarios, de valores de los píxeles (1, 2, 3 y 4) a 1, y (5) a 0, en donde los valores 1 van a ser los de interés y 0 los valores nulos.
3. Para efectos prácticos de la investigación, hemos acotado la definición del «incendio», como un incendio ocurrido o generado por un solo punto de ignición, y una «huella quemada» como un área unida devastada por el fuego en la cual ha sido el producto de uno o más incendios ocurridos al mismo tiempo o con una diferencia de tiempo relativamente corto, haciendo que al final, se identifique espacialmente como un parche de vegetación incinerada que visiblemente está conectada.
4. Se identificaron las huellas quemadas agrupando los píxeles de valor 1 a través de la reglas de agrupamiento usando el software Fragstats McGarical and Marks (1994). Cada imagen fue procesada con Fragstats usando las métricas de parches para la detección de la huella quemada por agrupamiento de píxeles usando la regla del ocho de celdas vecinas, esto es en términos generales que una celda quemada pertenece al mismo grupo (huella quemada) de una o mas de las ocho celdas vecinas de su alrededor. A continuación un ejemplo de la regla del ocho utilizado en Fragstats para la identificación de las huellas quemadas:



5. Del anterior producto se extrajo la información de las huellas quemadas con la fecha y su área correspondiente. Se combinaron todos los resultados de cada mes para analizar todas las huellas quemadas en el periodo procesado ocurridas en la Orinoquía Colombiana.

2.2. Identificación y selección de las grandes huellas quemadas

Nuestro propósito en este análisis de características de los incendios en la Orinoquía va dirigido a incendios grandes con el objetivo de identificar los patrones de dispersión y variables que lo modelan, con la intención de detectar las condiciones para modelar la dispersión de incendios. Hemos escogido estudiar (y modelar) los grandes incendios principalmente por dos razones:

- Los incendios grandes tienen características particulares de espacio, tiempo e intensidad que generan un fuerte impacto al ecosistema y al medio ambiente, los que lo hacen eventos mas llamativos para su modelación y estudio.
- Los medianos y pequeños incendios tienen una limitante respecto a sus dimensiones, debido a que no son suficientemente grandes para poder definir con claridad su dispersión, debido a que como tal, no hay un registro de la huella quemada generada por parte de los agentes locales ni un sistema para su registro y control detallado, y si lo hay es muy poca, haciendo que no exista información suficiente. Una fuente muy útil para esto es el uso de datos satelitales, entre esas esta el MCD45 de MODIS que hemos escogido con resolución espacial de 500m, esto hace limitarnos espacialmente a esa resolución, haciendo que incendios pequeños y medianos sean de un o unos pocos pixeles y donde su huella quemada no se puede definir claramente.

Ahora bien, esto hizo que se tuviera que analizar la serie y el comportamiento para extraer el umbral donde se pudiera definir que es una «gran huella quemada» (), que sea independiente a razones secundarias o locales, y a su vez que fuera un valor representativo para la serie misma. Este umbral limite de que es una «gran huella quemada» (similar pero no necesariamente igual a un «gran incendio») se analizará a continuación.

Detección del umbral para las grandes huellas quemadas

Según Malamud (1998) los incendios forestales presentan un comportamiento frecuencial-espacial según la ley de potencia. Las distribuciones de ley de potencia que a diferencia de la distribuciones normales, las cuales están centradas en un valor central, presentan una distribución sesgada hacia valores extremos, lo que se llama como de cola gruesa, en la que la probabilidad de ocurrencia de eventos pequeños es alta mientras que la probabilidad de ocurrencia de eventos grandes es baja, y fuertes valores marcados hacia un extremo.

Para poder observar la diferencia entre estas dos distribuciones, se puede ver en la figura 3 el histograma de frecuencias donde podemos ver que en la gráfica log-log la distribución de ley de potencia se convierte en una linea recta con pendiente negativa, una de las propiedades mas características de ésta distribución.

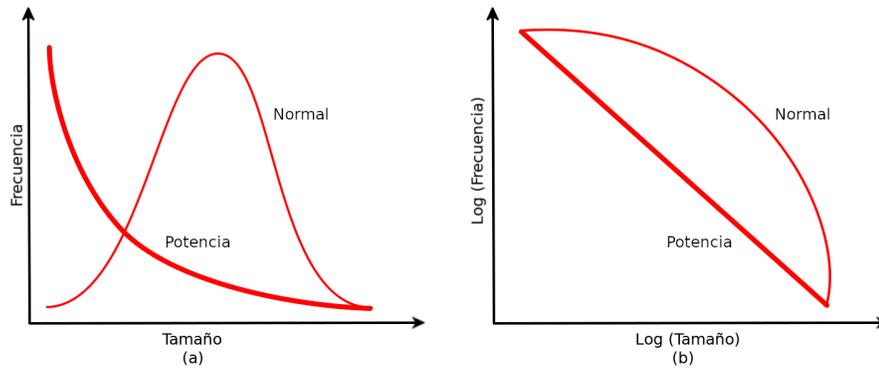


Figura 3: (a) histograma de frecuencia de una distribución normal y una de ley de potencia (en negrilla) (b) los mismos distribuciones aplicando logaritmos en ambos ejes. Adaptada de Newman (2005).

La ley de potencia es el resultado de lo que se denomina, la auto-organización o patrones emergentes que se dan en procesos complejos en los que los agentes interactúan en un entorno de incertidumbres. Aunque sea particular y rara hay muchos fenómenos o eventos que siguen la ley de potencia, tales como; la escala de los terremotos, citas de textos científicos, la ganancia de ricos y pobres, frecuencia de las palabras en los textos, entre otros. Aquí, los incendios es un caso típico ya que en el fenómeno de la combustión y dispersión, actúan muchos agentes y variables que afectan su comportamiento y estado.

Las distribuciones de ley de potencia siguen la siguiente función de probabilidad acumulada 1:

$$P(x) = Cx^{-\alpha} \quad (1)$$

Donde $P(x)$ es la probabilidad de presentarse un evento de tamaño x o mayor, C es una constante de normalización y α es el exponente de escalamiento como también es la pendiente de la recta de la gráfica log-log que representa a la distribución, con base en Newman (2005) el cálculo de α es el siguiente:

$$\alpha = 1 + n \left[\sum_{i=1}^n \ln \frac{x_i}{x_{min}} \right]^{-1} \quad (2)$$

La constante α muestra las características propias de la ley de potencias de la serie, un valor adecuado describe, entre otras cosas, si la serie se comporta como ley de potencias o no. Que la gráfica en log-log muestre una tendencia de línea recta no es criterio suficiente para asegurar que una serie se comporte como una ley de

potencia, deben de tener un valor de alpha adecuado y correspondiente a la serie. Otras propiedades del valor alpha es la propiedad de la dimensionalidad fractal de autosimilaridad, de capacidad o de hausdorff, que hace referencia a como el objeto geométrico llena el espacio en el que está inmerso.

La regla de pareto es una propiedad interesante para las distribuciones de ley de potencias (Newman, 2005), la cual describe que solo el 20 % de los eventos genera el 80 % de los efectos productos de los eventos. Llamada también regla 80/20 la cual solo unos eventos fuertemente marcados en la cola genera la gran mayoría de los sucesos que todos los eventos generan.

Aplicamos la ley de potencia a la serie de las huellas quemadas únicas detectadas en la metodología anterior durante todo el periodo, y luego se uso la ley de pareto con el fin de encontrar el umbral particular de la serie para hallar el limite del tamaño de la huella quemada en el cual podemos clasificar que son y que no son grandes huellas quemadas. Nos guiaremos con la siguiente hipótesis con base en la regla 80/20:

«El 80 % del área quemada fue generada por el 20 % de los incendios»

Es decir, los incendios (ordenados de mayor a menor según sus dimensiones) que generan el 80 % del área quemada (valor cercano al 20 %) son los grandes incendios particulares para esa región.

2.3. Ocurrencia de las grandes huellas quemadas sobre la Orinoquía

Una medida de interés para detectar las características geo-espaciales del comportamiento de los grandes incendios sobre una región, es la frecuencia/repetición con que estos ocurren sobre un área específica a lo largo de los años. Así podemos identificar las regiones o sectores que tienen pixeles más frecuentemente quemados producido por las grandes huellas identificadas a lo largo de los años, y con ello podemos obtener geo-espacialmente los eventos mas fuertemente marcados. Con ello y sobreponiéndolo con información geo-espacializada relevante, podemos extraer las características sobre las condiciones topográficas, climáticas, de cobertura vegetal, entre otras, que mas tienen relevancia y están presentes en estos eventos fuertemente marcados, y así identificando estas variables o factores que propician y modulan los grandes incendios en la Orinoquía.

Para ello se calculo la ocurrencia de las huellas quemadas mas representativas pixel por pixel, es decir, se cogieron las «grandes huellas quemadas» (4134 de eventos mas grandes) y se realizo un conteo pixel a pixel cuando los eventos se solapaban entre si, por ejemplo si un pixel tiene un valor de 2 quiere decir que ese pixel «participo» en dos huellas quemadas durante el periodo.

Con el interés de buscar no solo zonas donde mas se presentan gran cantidad de eventos sino también saber donde se localizan los gigantes y grandes huellas quemadas en la Orinoquía, se realizo un agrupamiento de las 100 huellas mas grandes; el top 100, el top 500 y el top 1000, ocurridas en el periodo 2000-2014.

2.4. Detección de incendios sobre la huella quemada

Lo ideal o el evento mas esperado es que las huellas detectadas sean representación único de un incendio, es decir, que una huella quemada haya sido el producto de la dispersión de un único punto de ignición y por lo tanto de un incendio. Sin embargo eso no pasa en la realidad y las huellas aquí detectadas con los procedimientos previos y provenientes de los productos de MCD45 de MODIS, respecto a los incendios, pueden presentar diferentes forma de haberse formado en el transcurso de un mes, se consideran tres posibles casos de lo que podría ser las huellas quemadas:

- El producto de un único punto de ignición y a la vez de la dispersión de un mismo incendio
- El producto de dos o mas puntos de ignición ocurridos en distintos lugares que por las condiciones y los fenómenos naturales hacen que en algún frente del incendio se junten estando activos
- El producto de dos o mas incendios ocurridos en tiempos distintos pero dentro del mismo mes, haciendo que un incendio se junte con un área quemada de un incendio apagado ocurrido en días pasados, produciendo al final del mes una misma área quemada pero internamente fragmentada con áreas quemadas producidas en distintas fechas

El producto MCD45 registra la fecha en la cual el pixel se detecto como quemado, y con ello tenemos la trazabilidad de la huella quemada a través del tiempo.

Para identificar los tipos de huellas quemadas con base en las definiciones anteriores y haciendo uso del producto que registra la fecha del pixel detectado como

quemado, se realizó un algoritmo para realizar, imagen por imagen, del listado de los grandes incendios, el análisis y el procedimiento para su clasificación y con ello detectar algunas características de estos incendios en la Orinoquía Colombiana. Los pasos del algoritmo que se describe a continuación procesa una huella quemada a la vez e identifica los incendios que conforman la huella quemada, el proceso general es el siguiente:

1. Procesar pixel a pixel, etiquetar los pixeles con valores como «sin procesar», los pixeles sin valores son ignorados en todo el proceso. Iniciar con el grupo de incendio numero 1.
2. Etiquetar el primer pixel encontrado «sin procesar» con el numero del grupo actual de incendio.
3. Pasar por todos los pixeles «sin procesar», revisar si alguno de los 8 vecinos pertenecen a algún grupo, si es así, comparar las fechas si están dentro del rango de latencia de no mas de 3 días de diferencia, si es así, etiquetarlo con el mismo grupo que éste.
4. Repetir (3) hasta que se etiqueten todos los pixeles (terminar si esto ocurre) o hayan pixeles sin poderse etiquetar, esto es, que en una pasada completa de todos los pixeles realizando el paso (3), permanecen pixeles «sin procesar» y no se pudo etiquetar ninguno
5. Aumentar el identificador del grupo de incendio y repetir (2)

Este algoritmo se aplico para todos las grandes huellas quemadas (4134 eventos) detectadas con los procedimientos anteriores. Este permitió detectar incendios únicos con una latencia de tres días como máximo, es decir, que un pixel pertenece al mismo incendio que un pixel vecino si y solo si la diferencia de días entre ellos no es mas de tres días. El algoritmo permite detectar todo tipo de formas diversas de los incendios únicos. En el cuadro 1 se muestra tres tipos de casos de la detección de incendios únicos sobre la huella quemada, en (a) la entrada del algoritmo el cual es la huella detectada con los procedimientos anteriores (pero usando el producto de la fecha de detección - burndate) y en (b) la salida del algoritmo el cual son los incendios únicos detectados por el algoritmo agrupados usando valores para identificar cada grupo de incendio.

(a)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td>-</td><td>3</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td><td>3</td><td>4</td></tr> <tr><td>-</td><td>6</td><td>4</td><td>5</td></tr> <tr><td>13</td><td>11</td><td>6</td><td>-</td></tr> </table>	-	3	3	4	-	-	3	4	-	6	4	5	13	11	6	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td>-</td><td>2</td><td>2</td><td>13</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td><td>2</td><td>2</td></tr> <tr><td>4</td><td>-</td><td>-</td><td>3</td></tr> <tr><td>5</td><td>5</td><td>-</td><td>-</td></tr> </table>	-	2	2	13	-	-	2	2	4	-	-	3	5	5	-	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td>4</td><td>3</td><td>3</td><td>2</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td><td>2</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>-</td><td>-</td><td>1</td></tr> <tr><td>5</td><td>3</td><td>2</td><td>-</td></tr> </table>	4	3	3	2	-	-	2	1	5	-	-	1	5	3	2	-
-	3	3	4																																																
-	-	3	4																																																
-	6	4	5																																																
13	11	6	-																																																
-	2	2	13																																																
-	-	2	2																																																
4	-	-	3																																																
5	5	-	-																																																
4	3	3	2																																																
-	-	2	1																																																
5	-	-	1																																																
5	3	2	-																																																
	↓	↓	↓																																																
(b)	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td>-</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>2</td><td>2</td><td>1</td><td>-</td></tr> </table>	-	1	1	1	-	-	1	1	-	1	1	1	2	2	1	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td>-</td><td>1</td><td>1</td><td>2</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>-</td><td>-</td><td>1</td></tr> <tr><td>3</td><td>3</td><td>-</td><td>-</td></tr> </table>	-	1	1	2	-	-	1	1	3	-	-	1	3	3	-	-	<table border="1" style="border-collapse: collapse; width: 40px; height: 40px;"> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>-</td><td>-</td><td>1</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>-</td><td>-</td><td>1</td></tr> <tr><td>1</td><td>1</td><td>1</td><td>-</td></tr> </table>	1	1	1	1	-	-	1	1	1	-	-	1	1	1	1	-
-	1	1	1																																																
-	-	1	1																																																
-	1	1	1																																																
2	2	1	-																																																
-	1	1	2																																																
-	-	1	1																																																
3	-	-	1																																																
3	3	-	-																																																
1	1	1	1																																																
-	-	1	1																																																
1	-	-	1																																																
1	1	1	-																																																

Cuadro 1: Tres casos de ejemplo de la detección de incendios únicos sobre distintas huellas quemadas. En (a) está el segundo producto de MCD45 (burndate) con la fecha en la cual el pixel se detectó como quemado, en (b) los grupos luego de aplicarle el algoritmo.

Una vez aplicado el algoritmo para las huellas quemadas, se detectaron los grandes incendios únicos dentro de las huellas quemadas. Esto permitió, entre otras cosas, relacionar la cantidad de incendios detectados sobre las huellas quemadas.

Usando de fuente los incendios únicos detectados con el algoritmo anterior, se analizó, un elemento muy importante para la dispersión, que es la duración que han tenido los largos incendios en la Orinoquía Colombiana.

3. Resultados

Usando los productos de Modis de áreas quemadas se identificaron y se analizaron las huellas quemadas en la Orinoquía Colombia durante un periodo de 15 años, caracterizando su comportamiento espacio-temporal y estudiando y detectando el umbral de los grandes incendios específico para esta región.

3.1. Identificación de huellas quemadas

Se identificaron más de 19 mil huellas quemadas en el periodo 2000-2014, la gran mayoría (98 %) son huellas quemadas del tamaño de un píxel equivalente a un área de 23.74 hectáreas, hasta grandes huellas quemadas de algunos cientos de píxeles (con la mayor área quemada de 88048 ha). Las huellas quemadas menores a un tamaño de 2000 hectáreas representan el 98.4 % del total y a su vez generan solo el 67.42 % un área quemada, por otro lado, los incendios «grandes» (mayores a 2000 hectáreas) solo representan el 1.6 % pero generan el 32.57 % del área quemada (figura 4).

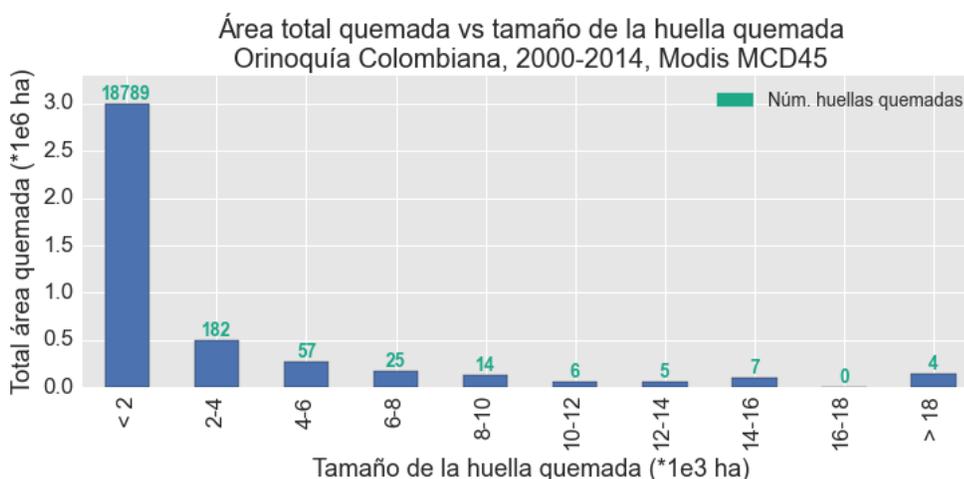


Figura 4: Histograma de frecuencia entre la cantidad total del área quemada vs tamaño de la huella quemada, con su respectiva cantidad de eventos

La forma del histogramas de frecuencias (figura 4) presenta una distribución sesgada hacia valores extremos, o también conocida como de cola gruesa, típica de una distribución de ley de potencia en la que la probabilidad de ocurrencia de pequeños eventos es alta mientras que la probabilidad de ocurrencia de grandes eventos es baja, y fuertes valores marcados hacia un extremo.

Las huellas quemadas en la Orinoquía mostraron una fuerte tendencia mono-modal en el año, donde sus máximos valores están en los meses de Enero y Febrero y mínimos en los meses de Junio, Julio y Agosto (figura 5). Ese comportamiento es inversamente proporcional con el comportamiento mono-modal de las lluvias en esta región de Colombia, que tiene su máximo en los meses de Junio y Julio.

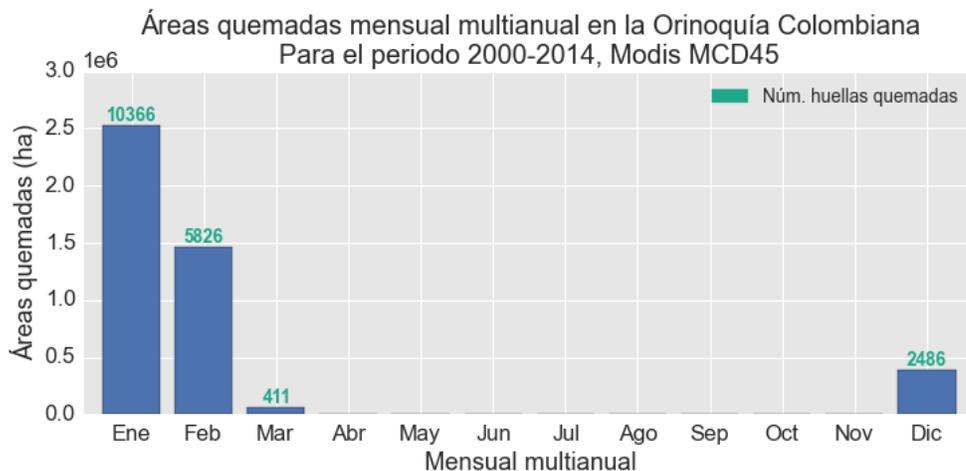


Figura 5: Comportamiento mensual multianual del número de huellas quemadas detectadas y el área total

El comportamiento multianual de las huellas quemadas presenta una gran variación a través del tiempo, con años fuertemente marcados (figura 6).

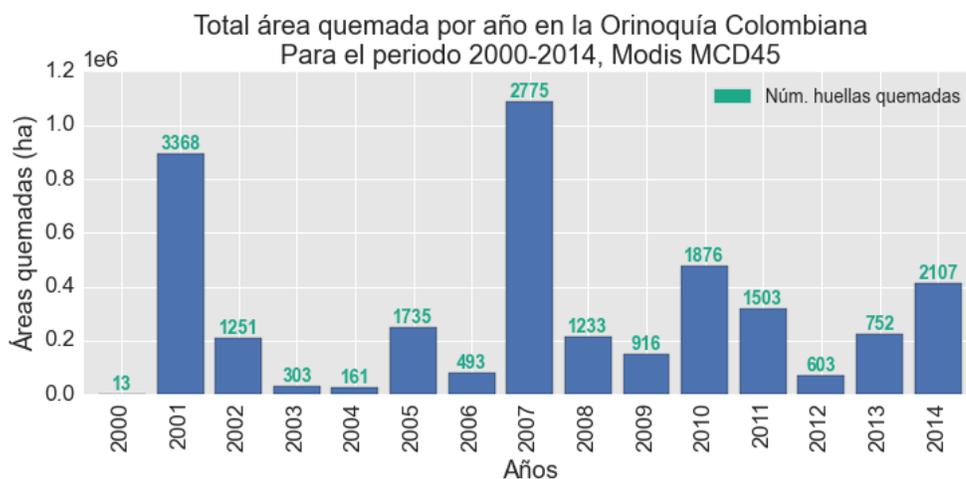


Figura 6: Comportamiento del número de huellas detectadas y el área total por año

3.2. Identificación y selección de las grandes huellas quemadas

Detección del umbral para las grandes huellas quemadas

Con base en el histograma de frecuencia entre la cantidad total del área quemada vs tamaño de la huella quemada (figura 4) se realizó la gráfica log-log (figura 7), donde en esta ultima presenta la tendencia a formar una línea recta que es una propiedad de las distribuciones de ley de potencia, el ruido que se observa a la derecha de la gráfica es normal y es debido a una fluctuación estadística que se presenta en el numero de muestras en la cola y el tamaños de los bins.

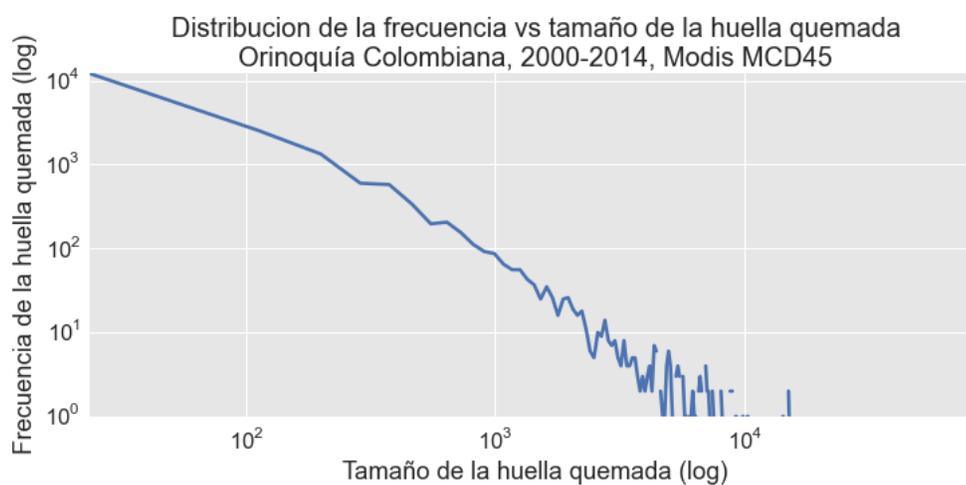


Figura 7: Histograma de frecuencia log-log de las huellas quemadas

El exponente de escalamiento o la pendiente de la recta (la constante alpha) dio $\alpha = 1,87$. Para este caso, la serie corresponde a huellas quemadas, provenientes de un espacio dimensional de 2, el valor de alpha no debe de ser superior a 2 ni inferior a 1, el valor calculado 1.87 es un valor muy valido para una ley de potencia de este tipo.

Se uso una de las propiedades de las distribuciones de ley de potencias, llamada la ley de pareto, con el objetivo de establecer un umbral para clasificar y seleccionar a los «grandes incendios» de toda la serie de las huellas detectadas, la cual enuncia que solo el 20 % de los eventos genera el 80 % de los efectos productos de los evento. Para ello se tomó las huellas más grandes que generaron el 80 % del área quemada, y observó que porcentaje representa. El área total de las huellas quemadas es de 4'446.424 ha, el 80 % es 3'557.303 ha; luego se calculó, de la huella quemada mas grande a la mas pequeña, cuantos de estos sumaban el 80 % de la huella

quemada total, dio como resultado 4134 de huellas quemadas, de un total de 19089, generaban el 80 % de área quemada. El porcentaje de estos eventos (4134 de 19089) es de 21.6 % de las huellas quemadas, y con base en ésto podemos enunciar que en la Orinoquía Colombiana:

«El 80 % del área quemada fue generada por el 21.6 % de los incendios»

Este 21.6 % que son los eventos más representativos respecto al área quemada total, a la vez son los eventos más grandes, el área mas pequeña de éstos es de 214 ha con un numero de 9 pixeles, y la mas grande de 88048 ha con 3708 pixeles. **Llamaremos entonces, a las «grandes huellas quemadas» producto de grandes incendios, particulares a la región de estudio, como aquellos que tienen un área mayor a 214 ha o 2.14 km².**

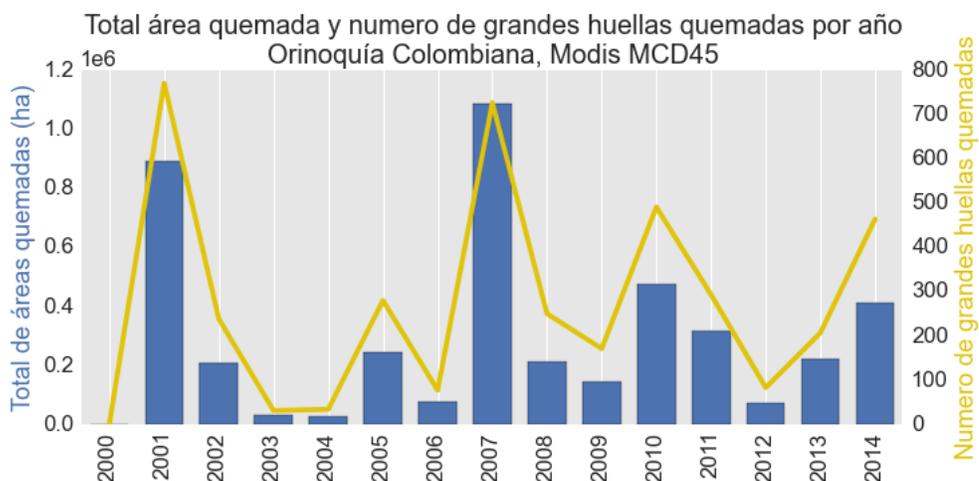


Figura 8: Total de área quemada y las grandes huellas quemadas

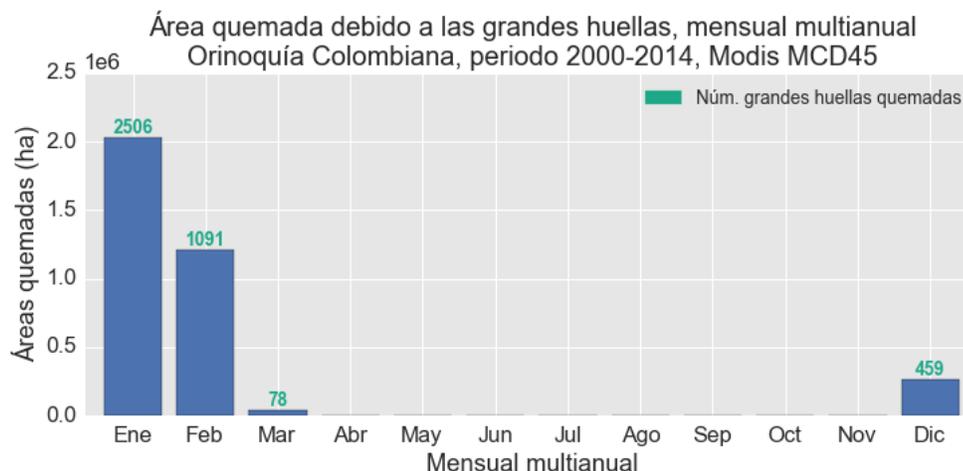


Figura 9: Área quemada mensual multianual debido a las grandes huellas quemadas

En la figura 8 vemos la relación del número de grandes huellas quemadas y el total de área quemada por año, y como es de esperar tiene una relación muy estrecha ya que las grandes huellas quemadas son una representación del 80% del área quemada, y aunque ese cálculo de la regla de Pareto 80/20 usada para detectar las grandes huellas quemadas fue usada de manera global (todos los eventos de todos los años) esa tendencia se sigue presentando año a año. La tendencia persiste en la gráfica mensual multianual 9 donde Enero y Febrero son los meses donde se producen las grandes huellas quemadas.

3.3. Ocurrencia de las grandes huellas quemadas sobre la Orinoquía

Las regiones o sectores que tienen píxeles más frecuentemente quemados producido por las grandes huellas identificadas a lo largo de los años, donde se pueden identificar los eventos más fuertemente marcados, el resultado se observa en la figura 10, las áreas que presenta más frecuentemente eventos de grandes huellas quemadas y por lo tanto grandes incendios es la parte norte del departamento del Vichada y la parte oriental del departamento de Arauca con límites al Vichada. Por otro lado se observa que existe casi ningún evento de grandes huellas quemadas para áreas cercanas a la región natural del Amazonas y también cercanas a la región del pie de monte, límites con la región Andina.

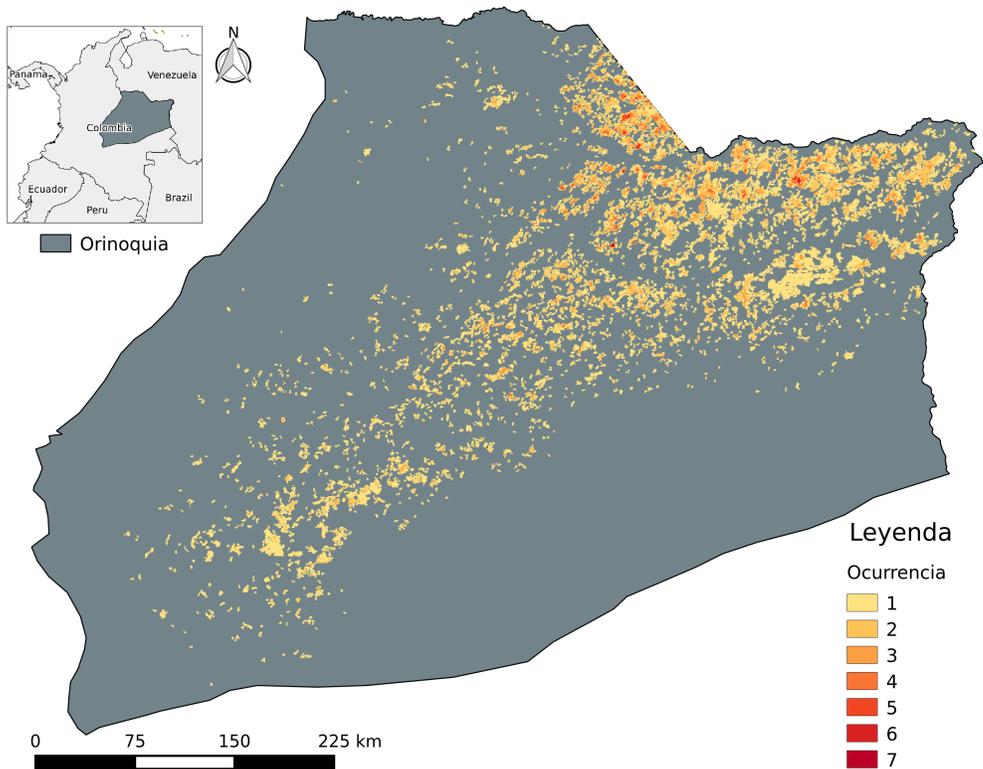


Figura 10: Ocurrencia de eventos pixel a pixel de las grandes huellas quemadas, periodo 2000-2014

El agrupamiento de las huellas mas grandes se realizo de la siguiente manera; el top 0-100, el top 100-500, el top 500-1000, y menores ocurridas en el periodo 2000-2014 con el objetivo de identificar donde se localizan no solo los grandes sino las más grandes huellas quemadas en la Orinoquía. El resultado se muestra en el mapa de la figura 11, donde se observan patrones muy similares al mapa anterior donde las grandes huellas quemadas y por lo tanto los grandes incendios se presentan en la parte norte del departamento del Vichada y, en menos medida, en la parte oriental del departamento de Arauca con limites al Vichada.

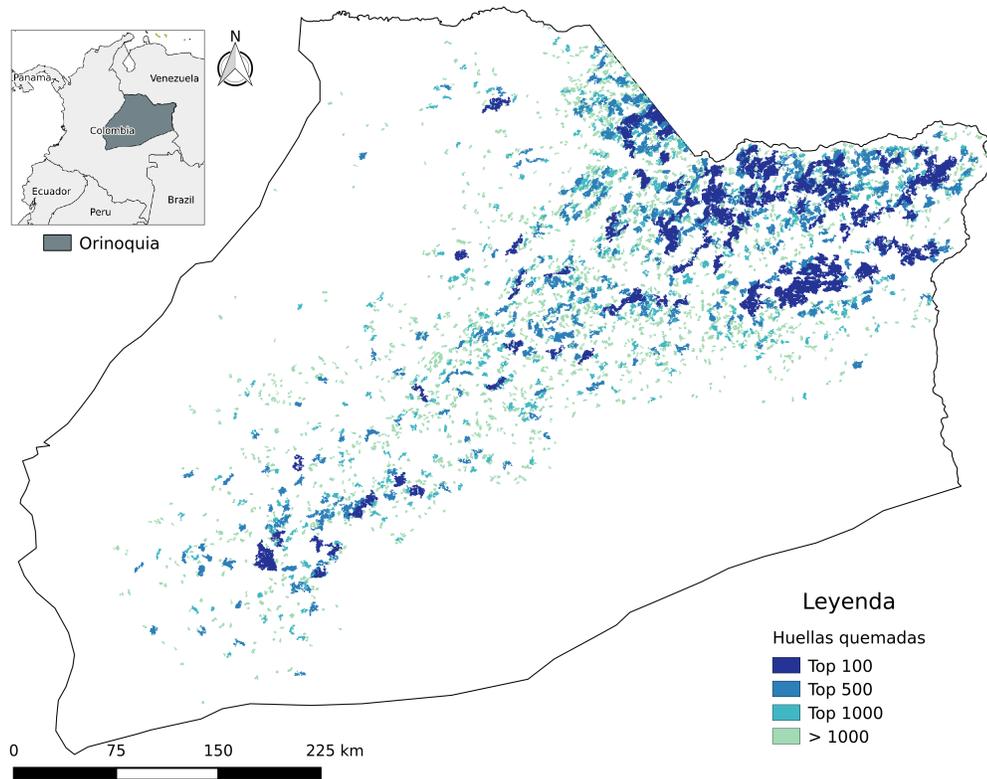


Figura 11: Localización de las grandes huellas quemadas agrupadas por tamaño, periodo 2000-2014

Tanto el mapa de ocurrencia de eventos y el de localización de las grandes huellas quemadas muestran que la zona más predominante en la cual presenta los mayores y más recurrentes huellas quemadas en la Orinoquía Colombiana, la zona norte del departamento del Vichada. Por esta razón, y para estudios posteriores, esta zona va a ser la región específica del área de estudio de esta tesis.

3.4. Detección de incendios sobre la huella quemada

Una vez aplicado el algoritmo (explicado en 2.4) para detectar incendios sobre la huella quemada para cada una y únicamente a las grandes huellas quemadas detectadas (4134 de 19089) muestran que en su gran mayoría, las huellas quemadas se detectaron un incendio grande representativo, mostrando que las huellas quemadas (en su mayoría) son el producto de un solo incendio (figura 12). Con más de 6 incendios para una misma huella quemada lo podemos considerar como casos especiales o atípicos. Por otro lado, y como era de esperar, entre más cantidad de incendio se le detectaba a la huella quemada, mayor era su área.

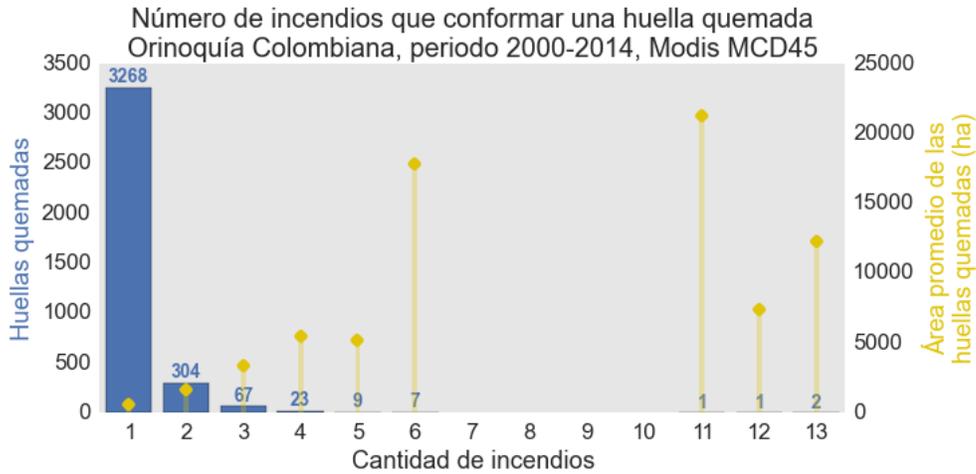


Figura 12: Número de incendios que generan una huella quemada y el área promedio de las huellas quemadas.

Respecto a la duración que han tenido los grandes incendios en la Orinoquía Colombiana, en términos generales, son directamente proporcional al área quemada pero inverso a su frecuencia, y se puede observar que el 91.8% de los grandes incendios duran entre 1 a 5 días con un área de 625 hectáreas en promedio, y 33.7% del total tiene una duración de 3 días (figura 8.2.1). Los incendios mayores a 1000 hectáreas en promedio duran entre 6 a 11 días, pero solo representan el 8.2% del total de los grandes incendios, podríamos llamar estos como los incendios gigantes que ocurren muy ocasionalmente pero que generan un área quemada muy grande.

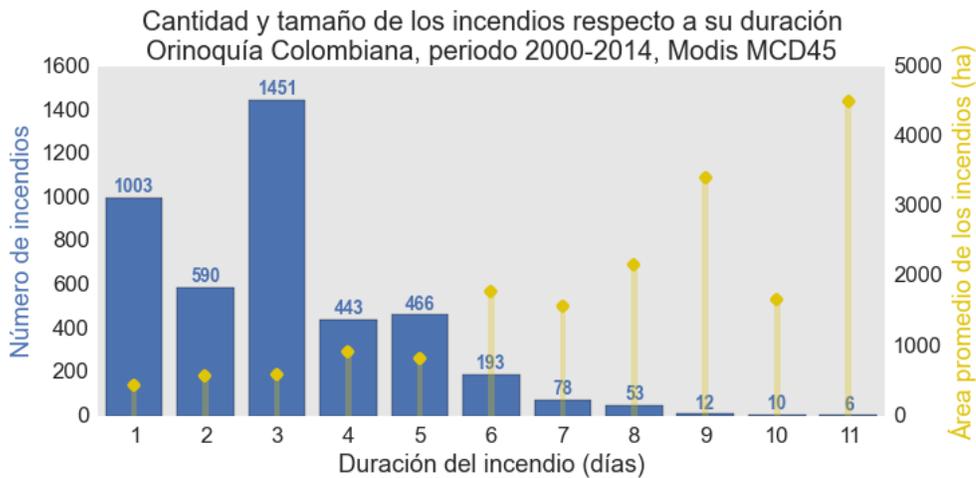


Figura 13: Relación de la cantidad y tamaño de la huella quemada de los grandes incendios únicos respecto a los días de duración

Parte II

**Variables que modelan los grandes
incendios en la Orinoquía
Colombiana**

4. Marco teórico y antecedentes

4.1. El comportamiento y dispersión de los incendios

La dinámica de la dispersión de un incendio, comprendida desde las características mismas del fuego hasta su comportamiento en la velocidad y desarrollo en su dispersión, esta íntimamente relacionada con múltiples variables y condiciones, todas confluyendo en el mismo periodo de tiempo y espacio (Cochrane and Ryan, 2009). La dispersión de un incendio se define como un sistema complejo (Malamud, 1998), elementos y factores como el tipo de terreno, pendiente, humedad, tipo de vegetación, así como fenómenos climáticos y condiciones de tiempo como lluvia, temperatura, velocidad y dirección del viento, son en muchos casos variables en el régimen caótico y por tanto con difícil predictibilidad.

4.1.1. Fuego

El fuego (una forma particular de llamar a la combustión), es un proceso de oxidación, en la cual a través del oxígeno se libera de manera rápida la energía almacenada en el carburante o combustible en una reacción química violenta (Cochrane and Ryan, 2009), esto genera como producto CO_2 , agua y energía en forma de calor y luz principalmente. En el caso de incendios forestales el combustible son principalmente carbohidratos derivados de la biomasa vegetal tal como madera, follaje, biomasa muerta y materia orgánica, entre otros. La reacción se resume en la ecuación 3.



Para iniciarse el fuego se necesita de una ignición o chispa con las condiciones de oxígeno y combustibles adecuadas. Una vez iniciado el fuego las propiedades del mismo dependerán de muchos factores que harán que el fuego crezca o no y/o se disperse o se extinga.

4.1.2. Combustible

En el proceso de la fotosíntesis, se convierte la energía solar en biomasa usando agua y CO_2 , exactamente el proceso inverso a la ecuación 3, y esta biomasa es la fuente principal en los incendios forestales, liberando toda esta energía solar

almacenada (durante un largo tiempo) de manera rápida en forma de calor y luz (Cochrane and Ryan, 2009).

La composición del combustible vegetal depende mucho de la vegetación, pero principalmente esta constituido por madera. La madera es la mayor fuente de biomasa comprimida compuesta de: la celulosa (41-53%), hemicelulosa (15-25%), lignina (16-33%), entre otros compuestos como aceites y resinas (Cochrane and Ryan, 2009). La lignina como las resinas y aceites son los que más tienen energía pero están presentes en pequeñas proporciones, y aun así hacen la diferencia gracias a su poder de combustibilidad. Por el contrario existen plantas que tienen una serie de minerales que retardan y dificultan el fuego.

Muchos factores tales como el tipo de vegetación, la humedad, temperatura, la disposición física, entre otros, hacen que el combustible sea potencial o no de quemarse, llamado «combustible disponible» (Cochrane and Ryan, 2009). El «combustible total» según Cochrane and Ryan (2009) es toda la biomasa que puede quemarse en el peor de los escenarios posibles, que puede ser igual o menor de la biomasa total, y el combustible disponible puede ser igual (en el peor de los casos) o menor del combustible total. Lo anterior se puede expresarse de la siguiente manera:

$$total\ de\ biomasa \geq\ combustible\ total \geq\ combustible\ disponible \quad (4)$$

En la siguiente figura 14 se presenta la relación entre la biomasa total, combustible total y su relación con el potencial de los incendios en diferentes tipos de cobertura.

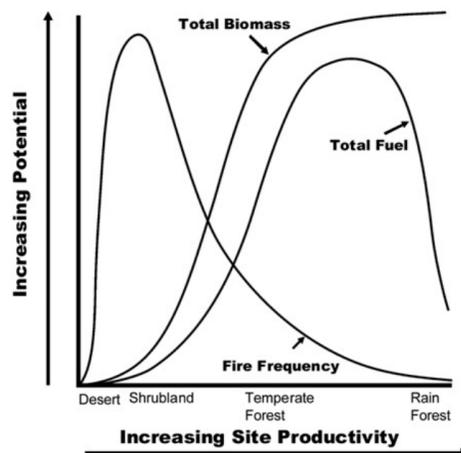


Figura 14: Curvas de biomasa total, combustible total y frecuencia de incendio, tomado de Cochrane and Ryan (2009)

4.1.3. Transferencia de calor

En el proceso de la dispersión del fuego, la transferencia de calor es el elemento más importante para que el fuego avance y se disperse. La transferencia de calor ocurre por tres vías: conducción, convección y radiación. Existe (en los incendios forestales principalmente) un cuarto elemento de transferencia de calor, que es el transporte de calor por vía aérea a través de pequeñas masas ardiendo llamado ascuas (Cochrane and Ryan, 2009).

Conducción	Es la transferencia directa de energía de una molécula a otra, y dependiendo del tipo y de la densidad de la biomasa va a ser más o menos rápido
Convección	Es la transferencia de energía a través de un fluido, para este caso es la atmósfera que se calienta y asciende, es el método primario de la transferencia de calor vertical, calentando y propiciando la quema de la biomasa alta como las copas de los arboles. La convección puede generar vientos convectivos que dan fuerza al fuego y ayudar a la dispersión de las ascuas.
Radiación	Es la transferencia de energía a través de ondas electromagnéticas (como el sol) el cual, en un incendio, es la principal forma de transferencia de calor y responsable de pre-calentar el combustible cercano. La fuerza de la radiación es inversa a la distancia y perpendicular a la llama.

Cuadro 2: Métodos de transferencia de calor con el fuego

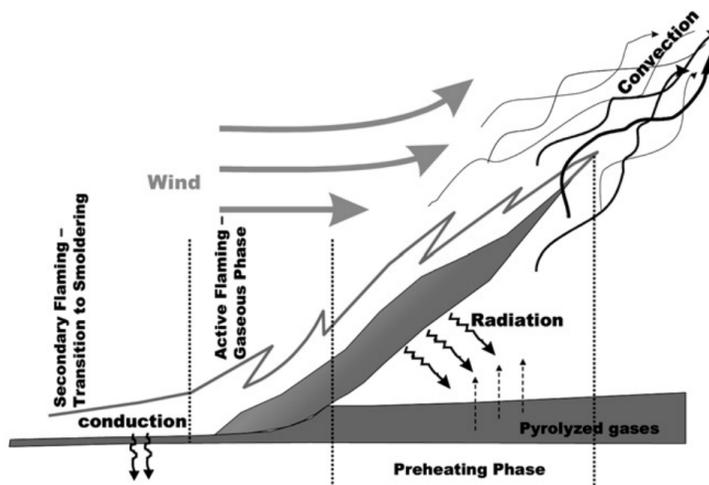


Figura 15: Componentes de la transferencia de calor, sacado de Cochrane and Ryan (2009)

4.2. Factores y variables asociados a la dispersión de los incendios

Los incendios como sistema complejo, presentan gran cantidad de variables con las que se ven directa e indirectamente relacionados con su comportamiento de intensidad, forma y dispersión (Cochrane and Ryan, 2009). Entre las variables consideradas factores significativos en la incidencia de grandes incendios están: el tipo de cobertura, el relieve del terreno, el viento, las condiciones climáticas y del estado del tiempo (Clark et al. (2008), Ganteaume and Jappiot (2013)).

4.2.1. Numero de días sin lluvia

Unos de los posibles factores que pueden influir en el incendio y su dispersión son las condiciones y las características de como se encuentra el combustible al momento del evento. Una de estas condiciones es la humedad del combustible, que depende principalmente de la precipitación, no solo se da por las condiciones en el momento justo del evento del incendio, sino a una continua y persistente condición de días sin lluvias previo al evento. Esto, tiene una consecuencia directa con el incendio debido a que la vegetación se vuelve más vulnerable y con mayor poder de combustibilidad cuando presenta muy poca humedad (Cochrane and Ryan, 2009).

La humedad de la vegetación requiere de cierto tiempo para que su cantidad se vea drásticamente disminuida, y dependiendo del tipo de vegetación, esta requiere de varios días continuos sin lluvia para que su humedad disminuya en condiciones suficientes.

4.2.2. Índice de vegetación

Los índices de la vegetación no son como tal factores directos asociados a la dispersión de los incendios, son una medida proxy del estado de la vegetación, y por consiguiente, una variable indirecta asociados a estos.

Los índices de vegetación estiman, a través de imágenes satelitales, la cantidad, calidad y desarrollo de la vegetación, son medidas ópticas del «verdor» del dosel arbóreo; que a su vez son una propiedad compuesta de clorofila en las hojas, área foliar, la cobertura del dosel, y su estructura. Los índices de vegetación no son "cantidades físicas intrínsecas" (Huete et al., 2011), pero son ampliamente utilizados como indicadores en la evaluación de variables en los procesos biofísicos y bioquímicos del dosel de la vegetación, tales como: índice de área foliar, fracción

absorbida de radiación fotosintética, contenido de clorofila, fracción de vegetación verde, entre otros (Huete et al., 2011).

Existen varios índices de vegetación y cada uno de estos están empíricamente relacionados con varias propiedades del dosel arbóreo. Entre los dos más conocidos y usados está el índice de vegetación normalizada NDVI (Normalized Difference Vegetation Index) sensible a la clorofila, y el índice de vegetación mejorado EVI (Enhanced Vegetation Index), orientado en las variaciones estructurales de las plantas, como su fisonomía, su tipo o su área foliar (Huete and Justice, 1999).

El índice EVI respecto al NDVI tiene una mayor profundidad óptica de penetración, fue diseñado para reducir el ruido tanto atmosférico como del suelo, provee una mejor cuantificación de la abundancia de la vegetación y su actividad fisiológica³. El EVI usa diferentes valores de la reflectancia a distintas longitudes de onda que son sensibles a la cobertura vegetal. Este índice mide la actividad fotosintética de las plantas directamente relacionado con la absorción de energía por la cobertura arbórea, no mide directamente la productividad ni la disponibilidad de la cobertura vegetal pero si están estrechamente ligados.

4.2.3. Vientos

Dentro del comportamiento de la dispersión del fuego, el viento es uno de los componentes importantes que modula, en gran medida, la dirección y la velocidad de la dispersión (Ganteaume and Jappiot, 2013). El viento cumple varias funciones dentro de la dispersión, primero la de acelerar el proceso de combustión de la biomasa suministrando más oxígeno a la llama, y segundo la de aumentar la transferencia de calor debido a la curvatura de la llama en dirección del viento acercándose a la biomasa sin quemar y aumentando la radiación y la conducción, haciendo que este se incendie más rápido (Figura 15) (Cochrane and Ryan, 2009).

Por ejemplo, tanto en el sur de Francia (Ganteaume and Jappiot, 2013) como en las sabanas de California en USA (Clark et al., 2008) los vientos junto con otras condiciones meteorológicas como el aire seco y altas temperaturas, son los precursores de grandes incendios. Estos y otros estudios (Linn et al., 2007) destacan la importancia de la topografía para que el viento tenga un protagonismo mayor, siendo muy importante en terrenos con pendientes en donde la dirección del viento va hacia la cima.

³<http://earthobservatory.nasa.gov/Features/MeasuringVegetation/>

4.2.4. Tipo de cobertura

El tipo de cobertura vegetal tiene una gran influencia no solo en la potencia y características del fuego, ya que es el combustible de los incendios forestales, sino también en la dispersión del mismo. La cobertura puede ser promotora de la dispersión del incendio o puede actuar como barrera, por ejemplo en las sabanas de la Orinoquía Colombia (Armenteras et al., 2005) o del Mediterráneo (Thonicke et al., 2010) los pastos en general son combustible de quema rápida que impulsan la dispersión, mientras los bosques de galerías son una frontera natural en estos mismos escenarios.

4.3. Origen de los datos

Para generar un modelo que represente la dispersión del fuego en el área de estudio, se recolectó información de distintos tipos de fuentes ⁴ y se realizó un pre-procesamiento, que permitió reconocer las posibilidades de uso en función de la resolución de las observaciones (espaciales y temporal) para capturar las señales del fenómeno deseado; a continuación se reporta la selección y obtención de los datos.

4.3.1. Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM)

Es una conjunción de exploración espacial entre la NASA y la Agencia de Exploración Aeroespacial Japonesa (JAXA) diseñada para monitorear y estudiar precipitaciones tropicales y subtropicales (Kummerow et al., 1998). Compartido con la comunidad mundial a finales del 1997, provee información desde 1998 y varios de los productos continúan actualizándose hasta la fecha. Tiene diversos subproductos como el algoritmo 3B43 provee de información mensual de variación de las precipitaciones y el algoritmo 3B42 de precipitaciones cada 3 horas. Para este estudio se seleccionó un subproducto del conjunto de datos 3B42 v7 llamado *TRMM 3B42 v7 daily* (derivado)⁵ que es un producto de la precipitación acumulada diaria con resolución horizontal de 0.25 grados.

⁴Satelitales, datos de estaciones meteorológicas, modelos físico/estadísticos y combinados, entre otros.

⁵Daily TRMM and Others Rainfall Estimate (3B42 V7 derived) V7

4.3.2. Índices de Vegetación

El índice NDVI se basa en los datos del sensor AVHRR y cuenta con datos desde 1989 hasta el presente. Luego en 1999 el programa Earth Observing System (EOS) lanzó el satélite Terra (y más adelante Aqua) y junto con él el sensor MODIS que comenzó a producir el NDVI a mejor resolución espacial, y paralelo a este se comenzó a generar el EVI (enhanced vegetation index) como nuevo producto.

Tanto el índice de vegetación EVI como el NDVI se encuentran dentro de los subproductos que se tienen derivados de los sensores MODIS de los satélites Terra y Aqua, con el nombre de MOD13 y MYD13 respectivamente⁶. Estos productos son de 3er nivel de procesamiento que usa como base los productos diarios de MODIS combinando varias bandas espectrales, controles de calidad y cálculos respectivos de los índices. Los subproductos que podemos encontrar de índice de vegetación en MODIS se muestran en la tabla 3.

Nombre del producto	Terra ID	Aqua ID
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 250m	MOD13Q1	MYD13Q1
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 500m	MOD13A1	MYD13A1
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 1km	MOD13A2	MYD13A2
Vegetation Indices 16-Day L3 Global 0.05Deg CMG	MOD13C1	MYD13C1
Vegetation Indices Monthly L3 Global 1km	MOD13A3	MYD13A3
Vegetation Indices Monthly L3 Global 0.05Deg CMG	MOD13C2	MYD13C2

Cuadro 3: Productos de índice de vegetación de MODIS, sacado de <http://modis.gsfc.nasa.gov>

El índice NDVI tiene muy buena capacidad para normalizar y producir valores estables a través de grandes variaciones de las irradiancias que son captadas por el sensor. Aunque esto también da lugar a algunas desventajas que incluyen la naturaleza no lineal de los coeficientes, la sensibilidad del suelo y la saturación de las densidades de vegetación moderadas a altas.

El EVI es generado a partir del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI) y el índice de vegetación resistencia atmósfera (ARVI) y usa una combinación optimizada de bandas azules, rojos e infrarrojo cercano, diseñada para extraer el «verdor» del dosel arbóreo, independientemente del suelo que está por debajo y las variaciones atmosféricas (Huete et al., 2011).

El NDVI es sensible a la banda roja absorbida por el dosel arbóreo y tiene una

⁶<http://modis-land.gsfc.nasa.gov/vi.html>

profundidad óptica de penetración menor respecto al EVI dentro del dosel arbóreo y, por tanto, se saturará más rápidamente en las zonas con alta biomasa. El EVI se vuelve más sensible a la banda del infrarrojo y en doseles de vegetación moderada a alta, tiene una mayor profundidad óptica de penetración. Por lo tanto, el índice EVI representa mejor las variaciones estructurales biográficas del dosel y es menos propenso a saturarse en zonas de alta biomasa (Huete et al., 2011).

4.3.3. Viento

La variable de rapidez y dirección de los vientos, fue una de las más complejas de análisis; no necesariamente por su influencia en el proceso de dispersión de los incendios, sino por la escasa medición que existe de la variable. Después de una exhaustiva búsqueda y de reconocer la insuficiencia de datos de observaciones en la red de estaciones en superficie, se seleccionaron los datos del Era-Interim (Dee et al., 2011) y del CFS v2 (Climate Forecast System) (Saha et al., 2011).

El Era-Interim usa un sistema de predicción numérica del tiempo (NWP) donde el sistema asimila y combina las observaciones con un pronóstico previo para obtener un mejor ajuste, y este es el punto de partida para el próximo pronóstico (reanálisis). Tiene una resolución horizontal de $\sim 83\text{km}/0.75\text{ deg}$ y 60 niveles verticales y un periodo desde 1979 hasta la fecha. Según Lledó et al. (2013), quienes evaluaron estos datos de reanálisis, la velocidad del viento para el territorio nacional (acorde a varios puntos evaluados), exhibe una alta correlación respecto a los datos observados, así como coherencia interna de los datos a través del tiempo.

Por otra parte, los son datos del modelo CFSv2 provee información cada 6 horas, tiene datos de la dirección y velocidad del viento en superficie, presenta datos desde el 2011 al presente, con una resolución horizontal de 0.5 grados y datos cada 6 horas. Como los datos del CFSv2 tiene únicamente datos desde el año 2011, solo se analizaron los eventos ocurridos entre el 2011 al 2014.

5. Metodología

5.1. Numero de días sin lluvia

Para generar series de tiempo de la cantidad de numero de días sin lluvia, primero se proceso la información de las series observadas de estaciones meteorológicas del IDEAM, que en principio registran precipitación acumulada diaria. Mediante solicitud al IDEAM se obtuvo la información de estaciones ubicadas en los departamentos de Arauca, Vichada, Casanare y Meta,.

El procesamiento comenzó con filtros para la selección de las series, primero se priorizo la información de estaciones actualmente activas (130 estaciones), segundo, se busco que que tuvieran registros en el periodo 2000-2014 que es el periodo de estudio, y que tuvieran menos del 12 % de datos perdidos, dando como resultado 87 estaciones; finalmente con el objetivo de garantizar consistencia de la información se realizaron pruebas de homogeneidad, mediante el test de Mann, Witney y Wilconxon (MWW), facilitado por el Software Jaziku (Corredor Llano and Sánchez Rodríguez, 2013). Este test comprueba la estabilidad de la serie en mediana y que presente propiedades estadísticas deseables, como por ejemplo que sea basada en un estadístico de prueba de distribución libre y asintóticamente normal. Según Castro and Escobar (2011), es una de las pruebas no paramétricas más poderosas y constituye la alternativa más útil ante el Test T, en particular en este trabajo el estadístico de prueba p-value del MWW paso la prueba si su valor es superior a 0.05, lo que demostraba que la serie era homogénea. Al final resultaron 54 estaciones disponibles (figura 16).

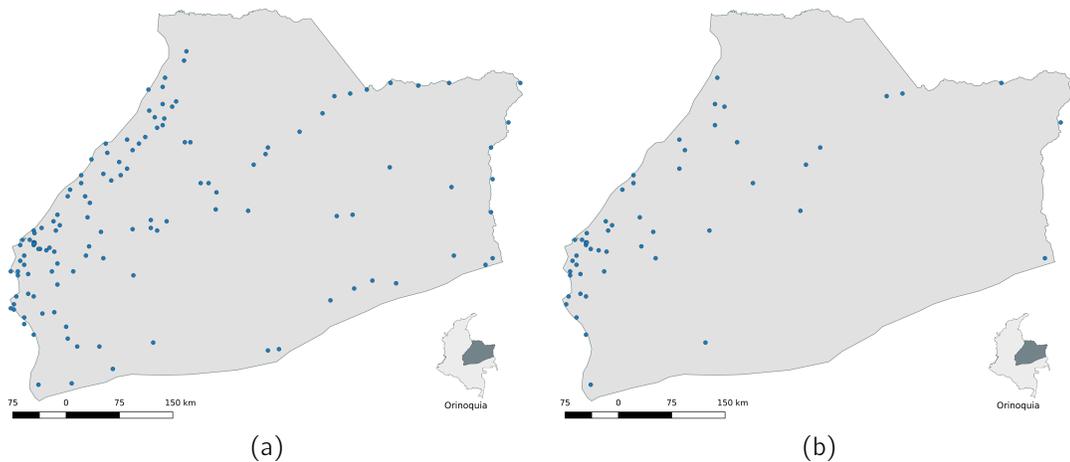


Figura 16: En a) las estaciones actualmente activas y disponibles para la Orinoquia del catalogo del IDEAM con datos de precipitación, en b) las mismas estaciones pero filtradas: con datos 2000-2014, menos del 12 % de datos perdidos y que pasan el test de homogeneidad.

El riguroso análisis mostrado antes, develó la insuficiente densidad de observaciones para el área de estudio (Figura 16b), lo que motivo el uso de fuentes teledetectadas de la variable . Después de la revisión mostrada en el marco teórico, se seleccionó el subproducto del TRMM el 3B42 v7 daily (derivado)⁷ que es un producto de la precipitación acumulada diaria con rejilla de 0.25 grados y que según algunos estudios ha mostrado ser una buena fuente de información para Colombia. Con el objetivo de comprobar la calidad de los datos secundarios dentro del área de estudio, se realizó una verificación con los datos de las series observadas procesadas de las estaciones meteorológicas (descrito antes). El proceso seguido es resumido a continuación :

1. Descarga de los datos TRMM 3B42 v7 daily (derivado) durante el periodo 2000-2014
2. Identificación de la caja (pixel) para cada estación a verificar dentro de los datos secundarios TRMM usando la latitud y la longitud
3. Generación de las series de tiempo de la fuente secundaria TRMM para la caja (pixel) para el periodo 2000-2014 por cada estación.
4. Por cada par de series (real o estación y predictora o fuente secundaria) se realizaba el Calculo de la raíz del error cuadrático medio (Root Mean Squared

⁷Daily TRMM and Others Rainfall Estimate (3B42 V7 derived) V7

Error, RMSE), cuya formula es $RMSE = \sqrt{\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}$ donde «n» es la longitud de la serie y las «y» son las series real y predictora.

El RMSE da como resultado errores absolutos con las mismas unidades de las variables evaluadas y entre menos es el valor RMSE, la serie predictora es mucho mejor y se aproxima tanto en valores como en comportamiento a la serie real.

Posterior, se realizo el calculo de la precipitación acumulada usando los datos del TRMM durante el periodo 2000-2014 para ver el comportamiento multi-anual de la precipitación en toda el área de la Orinoquía Colombiana.

Derivado de lo anterior, se realizó el calculo de las series de numero de días consecutivos sin lluvia con los resultados de la precipitación del TRMM, mediante un muestreo pixel a pixel de los 4305 grandes incendios únicos identificados con anterioridad. Se proceso cada uno de los incendios y en ellos pixel a pixel, se extrajo la ubicación del pixel y junto con la serie de fechas quemadas, se genero unos datos emparejando la ubicación y la fecha para la cual ese pixel se detectó por primera vez como quemado. Esta información de ubicación espacial del pixel y temporal de cambio a la categoría «quemado», se contrasto con la información de precipitación secundaria, mediante un calculo del numero de días precedentes sin lluvia considerable (esto es: <1mm/día).

Después de completar el proceso de cada uno de los grandes incendios, a fin de tener estadísticos de referencia se calculó la media y la desviación estándar de los valores de numero de días sin lluvia de todos los pixeles de la huella quemada del incendio.

5.2. Índice de vegetación

Se selecciono el indice EVI para analizar el comportamiento de la vegetación del área de estudio, porque en general el EVI se comporta mucho mejor que el NDVI en muchas aplicaciones (Bunkei Matsushita, 2007). Primero se escogió el EVI de los productos de MODIS, del subproducto MOD13A1 con frecuencia temporal diaria y resolución de 500m. Se descargaron todos las imágenes en las escenas que cubrían el área de estudio (h10v08 y h11v08 en la nomenclatura de MODIS), durante el periodo 2000 a 2014, dando un total de 648 imágenes. Después se convirtieron las imágenes a OpenTiff y se combinaron ambas escenas en mosaico para facilitar el procesamiento.

El siguiente paso fue aplicarles el control de calidad, para ello se hizo uso de las capas de control de calidad que traen los índices de vegetación de MODIS. Dentro de la capas presentes en el producto MOD13 se encuentra la capa que describe la calidad y confiabilidad del pixel llamado «pixel reliability summary» que es la banda numero 12, éste resume varios elementos de calidad tales como las nubes, el ángulo, calidad del pixel, entre otros. Esta capa de control de calidad maneja un rango de valores que van de 0 a 3 donde 0 es muy bueno y 3 es muy malo, la tabla 4 describe el rango de valores respectivos. Solano et al. (2010)

Rango	Calidad	Descripción
0	Muy Buenos	Alta confianza
1	Regular	Útiles pero mirar otros QA
2	Nieve/hielo	Tapados con nieve o hielo
3	Nubes	Tapados con nubes

Cuadro 4: Descripción de la banda 12 del MOD13A1 de los rangos de la confiabilidad del pixel, basado en Solano et al. (2010)

Para nuestro propósitos y según recomendación de la guía Solano et al. (2010), usaremos los pixeles EVI con datos de control de calidad con el rango con valores 0 y 1. Se realizó el control de calidad generando mascarar que combinaban los valores 0 y 1 del control de calidad que posteriormente fueron aplicados a las imágenes EVI, y solo dejando los pixeles EVI que cumplían el rango de confianza.

Ya teniendo las imágenes EVI filtradas y seleccionadas que cubrían el área de estudio, se proceso cada uno de los grandes huellas quemadas calculando el valor promedio EVI de todos los pixeles de la huella quemada para todo el periodo y generando una serie de tiempo EVI por huella que se analizó posteriormente. También se calculo el valor EVI de las huellas quemadas para el valor anterior justo al inicio de la fecha del incendio (el dato anterior de detectarse como quemado, esto es entre 1 o máximo 8 días de antelación que es la frecuencia de los datos EVI)

5.3. Viento

Se analizó la información de Era-Interim y de CFSv2 conjuntamente a nivel de vientos, en las componentes de rapidez meridional y longitudinal del viento (U y V) a 10 metros sobre la superficie y disponible cada 6 horas. Con el objetivo de encontrar la correlación de la dirección de los vientos respecto a la dirección de la dispersión, se realizaron dos análisis correspondientes; uno para identificar la dirección del viento

de los datos secundarios sobre el incendio y la fecha del mismo, y el segundo para identificar el rumbo de la dispersión del incendios.

Después de obtener la información de Era-Interim y de CFSv2, se procesaron cada uno de los 4305 grandes incendios únicos identificados, de estos se identificaron y agruparon todos los pixeles de la misma fecha registrada como quemada. Para ello, se tomaba la ubicación del pixel a procesar y junto con el producto de fechas quemadas, se extrajo la fecha del pixel cuando se detecto como quemado para ese incendio. Para cada pixel y su correspondiente fecha quemada, se extraía del archivo netcdf de vientos de la información secundaria: cual era el viento para esa ubicación y para esa fecha especifica (promedio de los cuatro valores del día).

Por su parte, para detectar la dirección y distancia de la dispersión de los incendios se realizo de la siguiente manera; con base en la información procesada para cada incendio único se identificaron los pixeles de una misma fecha dentro del mismo incendio, primero se realizo un filtro para saber que tan agrupados estaban los pixeles para ese evento de esa fecha especifica; primero se calcularon las desviaciones estándar de los valores de latitud y longitud, luego, y dado que las desviaciones aumentan de manera natural al aumentar el numero de pixeles, se ajustaron a una función exponencial ajustada, permitiendo únicamente pasar los valores (en naranja) que representaban los eventos con pixeles mejor agrupados (ver figura 17).

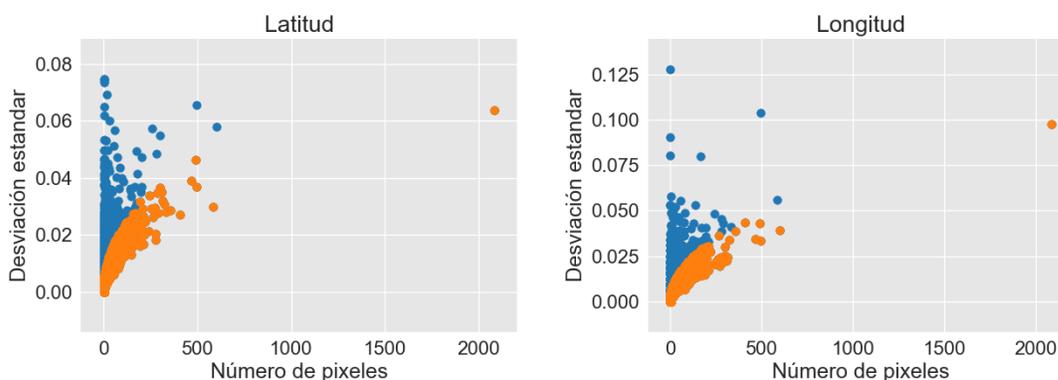


Figura 17: Ajuste y selección de los eventos de pixeles quemados mejor agrupados

Luego se calculaban los centroides (promedio de las latitudes y longitudes) de cada grupo de pixeles de un mismo día tal que unicamente dentro de un mismo incendio se contrastaban dos grupos de fechas continuas, conociendo los centroides de cada grupo se podía saber la dirección de dispersión y su distancia.

Finalmente se calcularon las diferencias absolutas de la dirección de dispersión de los eventos de un mismo incendio en fechas continuas, se compararon con los respectivos valores registrados de la dirección de los vientos de la fuente secundaria con respecto a la detectada por la diferencia de los centroides.

5.4. Coberturas

El uso del suelo del área de estudio, fue obtenido mediante el mapa de coberturas de Colombia Corine Land Cover del año 2009 (IDEAM et al., 2012), su procesamiento y análisis para este proyecto se realizó mediante un cruce de la información del mapa de frecuencia de la ocurrencia de eventos pixel a pixel (ver sección 3.3) de las grandes huellas quemadas; con el objetivo de conocer e incluir en la modelación la frecuencia de número de incendios en función del tipo de cobertura.

6. Resultados

6.1. Numero de días sin lluvia

Los datos del TRMM se verificaron con datos observados de las 54 estaciones del IDEAM, mediante el calculo de la raíz del error cuadrático medio (RMSE), utilizando el acumulado mensual. La evaluación punto-estación de lo 54 puntos indican que en general tiene un RMSE de 121mm/mes y que los datos de TRMM subestiman la precipitación, siendo más importante para los valores registrados en algunas estaciones del departamento del Meta. En la figura 18 se muestran como ejemplo dos de las 54 evaluaciones, ubicadas en la parte norte del Vichada una hacia el oriente y la otra hacia el occidente.

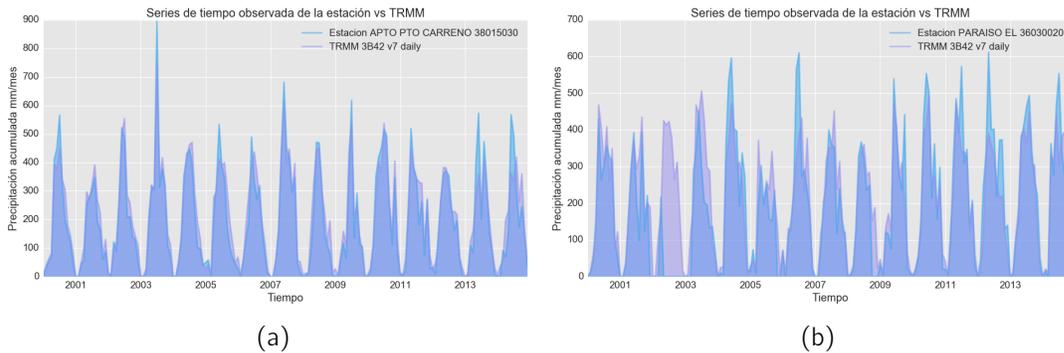


Figura 18: Dos ejemplos de comparación de las series de tiempo de la estación vs. datos del TRMM. (a) Estación del Apto. Puerto Carreño con el menor valor de RMSE y (b) estación de El Paraíso ubicada en el norte del Vichada frontera con Arauca.

El resultado de la precipitación acumulada en el periodo 2000-2014 para la Orinoquía Colombiana (ver figura 19), se muestra que Arauca presenta la menor cantidad de precipitación respecto a las otras regiones como la parte centro y sur del Vichada y el pie de monte presenta las mayores precipitaciones .⁸

⁸Con el apoyo de la herramienta web Giovanni

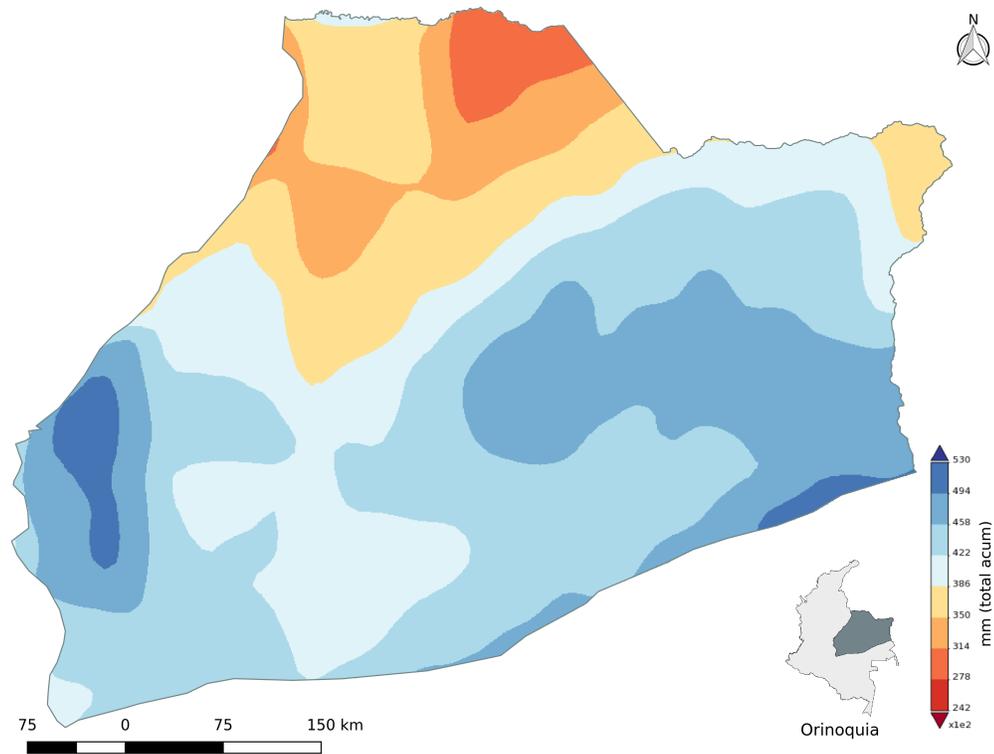


Figura 19: Precipitación acumulada total para el periodo 2000-2014, Orinoquía Colombiana, TRMM

Como resultado del proceso del número de días sin lluvia pixel a pixel para todos y cada uno de los grandes incendios, se analizaron por grupos según el tamaño del incendio (del menor al mayor), en general presentan una tendencia pareja con una mediana rondando los 15 y 20 días sin lluvia (ver Figura 20a).

Procesando todo los eventos del número de días sin lluvia de todos los grandes incendios, muestran un pico de densidad de probabilidad fuertemente marcado de aproximadamente 9 días (Figura 20b), es decir, que para la gran mayoría de los incendios grandes, fueron generados en áreas donde no había llovido en 9 días continuos, valor con la cual la cobertura de la vegetación en el área de estudio es vulnerable a quemarse y por lo tanto a presentar una alta disponibilidad como combustible vegetal a partir de ese valor.

El estadístico de la media de los datos es de 20.5 días, la mediana o percentil 50 es de 15.5 días (cuadro 5) mostrando que la serie está más densamente agrupada por debajo de la media pero con más datos atípicos por encima (Figura 20a), y el percentil 25 muy cercano al valor pico de densidad de probabilidad.

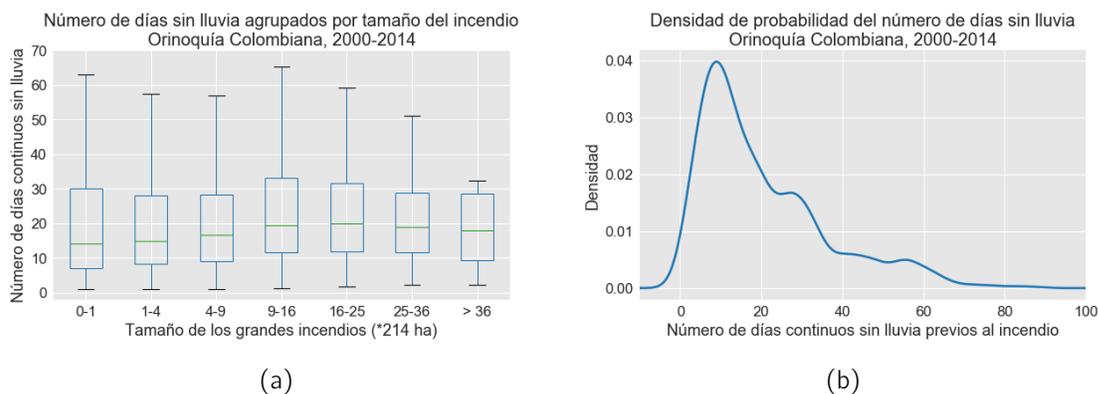


Figura 20: Distribución de la serie de numero de días continuos sin lluvia previos al incendio, a) diagrama de cajas agrupado por tamaño y b) la función de densidad de probabilidad.

	Días continuos sin lluvia
Media	20.5
Percentil 25	8.5
Percentil 50	15.5
Percentil 75	28.3

Cuadro 5: Estadísticos del número de días sin lluvia

6.2. Índice de vegetación

La figura 21 presenta el valor histórico multianual típico del índice EVI para la huella quemada No. 0 en el periodo de análisis; a manera de ejemplo esta gráfica presenta las mayores variaciones del índice en los meses de enero, febrero, marzo y abril, presentando valores mínimos y máximos de los diagramas de cajas desde ~ 0.12 a ~ 0.35 respectivamente. No obstante los mayores valores del índice EVI se registran en el trimestre de mayo a julio. Este patrón es ratificado por el valor promedio histórico mensual del índice EVI para el total de las 4305 huellas quemadas de análisis (Figura 23).

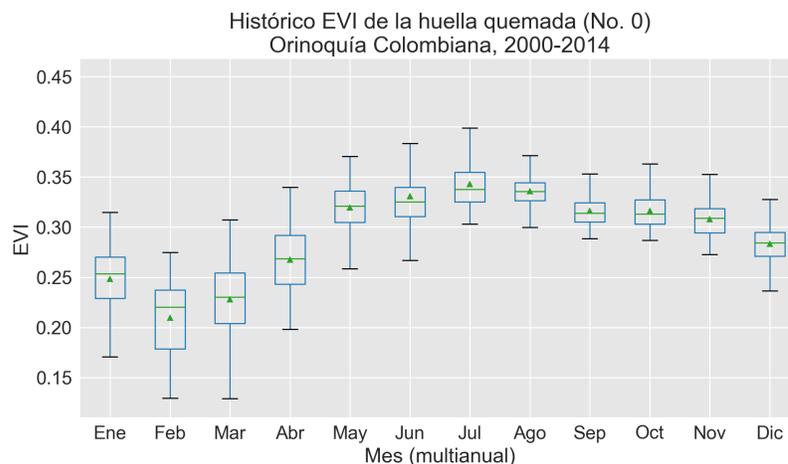


Figura 21: Ejemplo de los valores EVI de una huella quemada

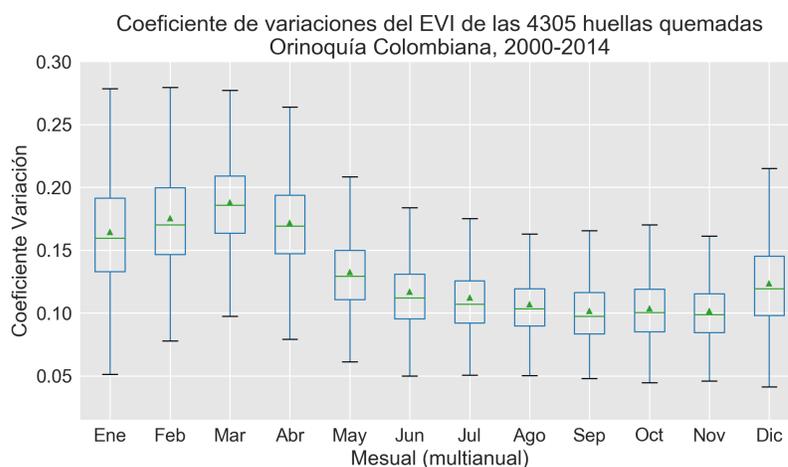


Figura 22: Variación del valor EVI mensual-multianual de las grandes huellas quemadas

Se observa que en los primeros meses del año los valores EVI histórico multianual para la región de cada huella quemada, presenta los mayores coeficientes de variación (figura 22) esto es, las variaciones de los valores EVI de los píxeles para una misma huella quemada, y así sucesivamente para las 4305. Estas mayores diferencias del coeficiente de variación están ubicados en las fechas correspondiente a la temporada seca en el área de estudio, esto muestra que en estas fechas del año las huellas quemadas a nivel histórico, presentan mayor heterogeneidad en la vegetación dando lugar a que parte de la cobertura de la huella es más vulnerable a la temporada seca, como pueden ser algunos tipos de pastos donde los valores EVI se pueden ver afectados por fenómenos locales o regionales de variabilidad climática.

Por otro lado, el comportamiento mensual-multianual de los valores medios del EVI para cada uno de las 4305 huellas quemadas de análisis se presentan como finas líneas en la figura 23. Se observa que las mayores variaciones y mayores valores del EVI se presentan en los meses de mayo a noviembre, mostrando los diversos comportamientos de la cobertura del área de estudio en la temporada lluviosa.

El comportamiento histórico del EVI va muy correlacionado con el comportamiento monomodal de la precipitación, y donde los menores valores EVI, que se presenta a inicios de marzo, esta muy cercano al inicio del periodo de lluvias que es a mediados de marzo.

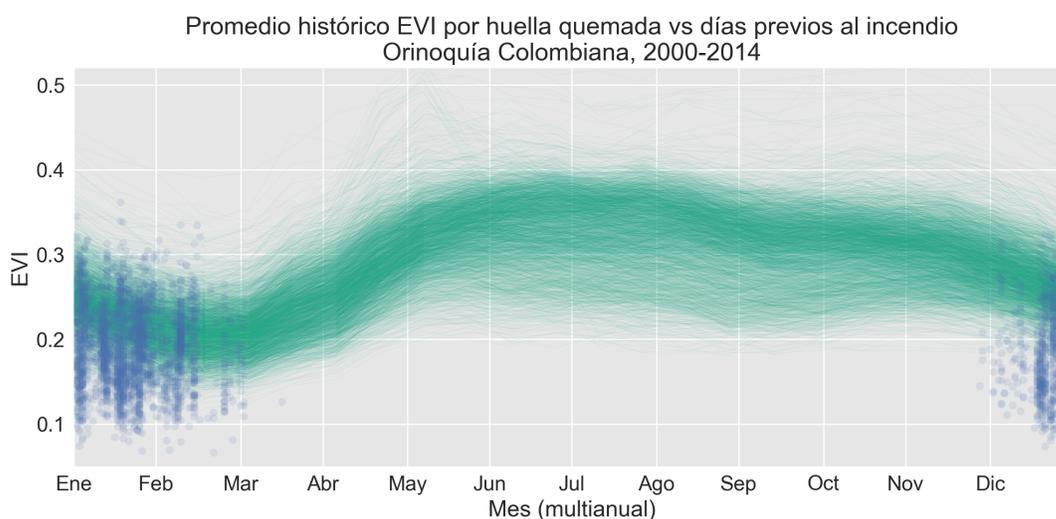


Figura 23: Promedio histórico EVI por huella quemada (Lineas verdes) y valor EVI días antes del incendio de la huella quemada (puntos azules)

Los valores medios del EVI de las huellas previo a ser detectados como quemados se muestra como puntos dentro de la gráfica 23. Se observa que estos valores tienden a ser inferiores al promedio histórico mensual-multianual de las series EVI, además se agrupan en fechas que anticipan a los valores mínimos de las series. Por el contrario, en la temporada lluviosa del área de estudio que va de mediados de marzo a noviembre no se presenta ningún gran incendio, por lo que refleja que la vulnerabilidad a que la cobertura presenta disponibilidad a ser combustible disponible es casi nula, por lo que es una cobertura altamente modulada por la lluvia.

Más precisamente 3065 de las 4305 huellas analizadas tiene un valor de EVI menor a su promedio histórico multianual. Es decir, que el 71.2% de las grandes huellas quemadas analizadas tuvieron un índice de vegetación EVI inferior a lo

normal, días previos al incendio, ese comportamiento se observa en la gráfica 24 donde se muestran las variaciones de los índices EVI de las huellas quemadas respecto a su correspondiente promedio histórico para la fecha, donde predomina las diferencias o anomalías negativas, con un pico alrededor de 5 % menos al promedio histórico.

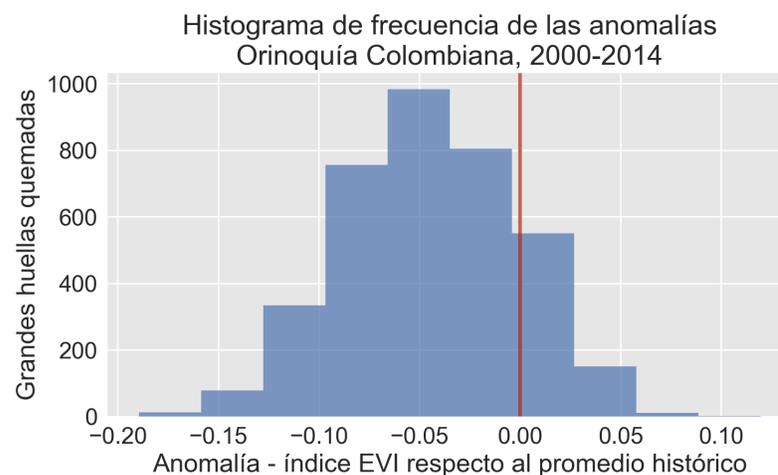


Figura 24: Histograma de frecuencia de las anomalías del índice de vegetación días previos al incendio respecto al promedio histórico 2000-2014

Dado que el índice de vegetación resume varias de las características de la cobertura presente en una región, puede ayudar a resumir un conjunto de condiciones de alto interés para que la biomasa sea potencial a quemarse. Esto hace que el EVI sea una variable que muestra un muy buen indicador de «combustible disponible», esto es, biomasa con el potencial a quemarse, y como un buen presagio y una variable importante para la presencia de grandes incendios.

6.3. Vientos

Los resultados de la correlación entre la velocidad y dirección del viento y la dispersión del fuego, son mostrados en la Figura 25, si la dirección del viento va en el mismo sentido que la dispersión del incendio la diferencia absoluta del ángulo debería ser cercana a cero y por lo tanto ambos tendrían una muy buena correlación (algo deseable con fines a la modelación); sin embargo, usando los datos Era-Interim y los del CFSv2 no se evidencia que exista una tendencia clara que esta correlación positiva sea representativa o tenga relativamente y significativamente

mayor frecuencia que los otros eventos como se muestra en ambos histogramas (Figura 25).

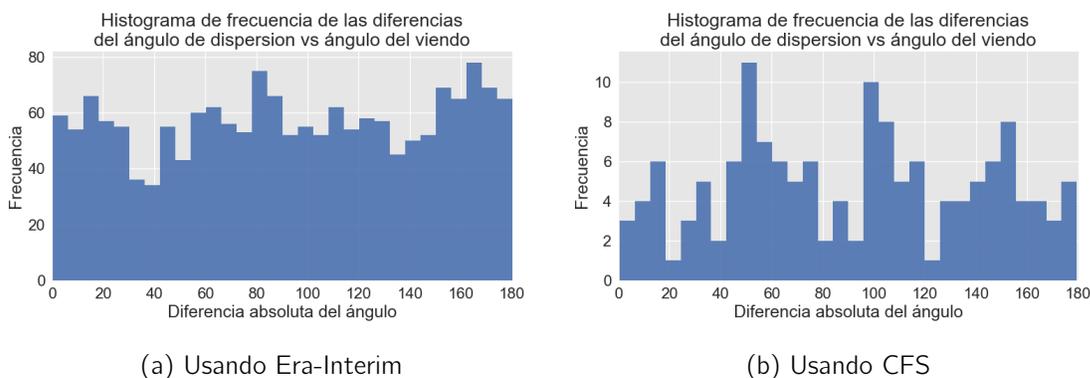


Figura 25: Correlación del sentido del viento de la dispersión y de los datos de la fuente secundaria

Una vez analizados estos resultados, se revisó las posibles razones por las que no se encontró una correlación deseable entre la dispersión y la dirección del viento; uno de ellos es la necesidad de realizar análisis no del incendio mismo sino por fragmento o frente del incendio y su evolución a través del tiempo, el problema para el seguimiento de los frentes es que para un mismo incendio pueden presentarse muchos frentes y más aun en grandes incendios como los estudiados. Para ello, y debido a que los frentes son más finos, los datos para analizarlos tienen que tener una alta resolución espacial mejor que los productos de MODIS.

Otro de las posibles razones, es la resolución temporal de los datos, y que aunque los datos de vientos eran cada 6 horas, se tenían que llevar a calcular la media y tener valores diarios perdiendo resolución, debido a que los datos de MODIS son diarios y para su comparación tenían que presentar la misma frecuencia. Y tener valores promedio de vientos diarios no es muy significativo debido al comportamiento mismo de los vientos durante el día.

Estos resultados muestran que la búsqueda de la correlación de los vientos y la dispersión de los incendios es un problema más complejo y que se van fuera del alcance de los datos disponibles y usados en este estudio.

6.4. Cobertura

Una vez cruzada la información de coberturas Corine Land Cover de Colombia con el de frecuencias pixel a pixel de grandes huellas quemadas analizadas, muestran

que las coberturas con mayor recurrencia a ser quemadas por grandes incendios en la Orinoquia Colombiana, son los herbazales densos en tierra firme y los herbazales densos inundables (Figura 26) seguido de zonas quemadas y bosques de galerías.

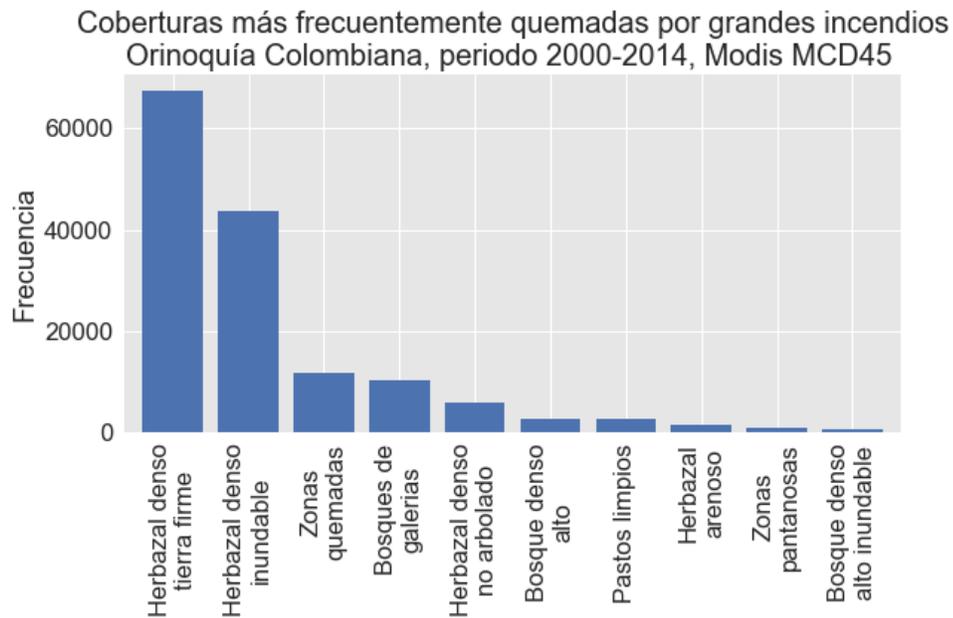


Figura 26: Las 10 coberturas más frecuentemente quemadas

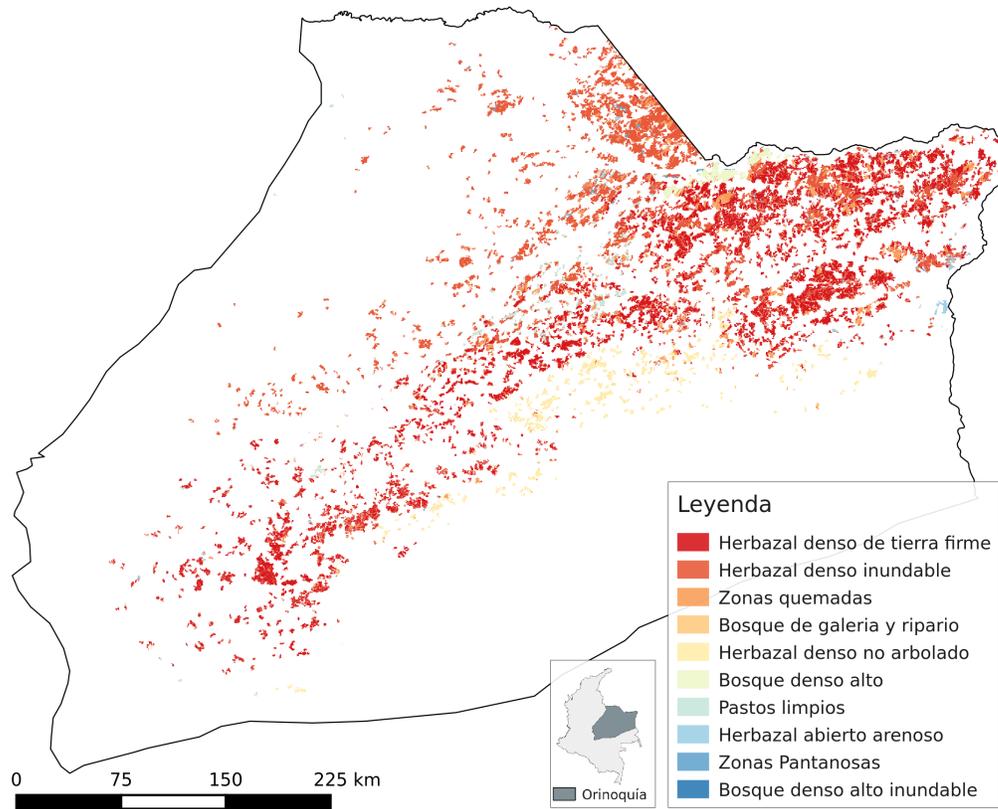


Figura 27: Mapa de las 10 coberturas más frecuentemente quemadas

La distribución de las coberturas más frecuentemente quemadas por grandes incendios se observa en el mapa de la Figura 27 donde mayoritariamente se ve áreas de herbazales densos de tierra firme e inundables y en la parte sur de la zona central de la Orinoquía, límite con los bosques del Amazonas, predominan las áreas quemadas de herbazales densos no arbolados.

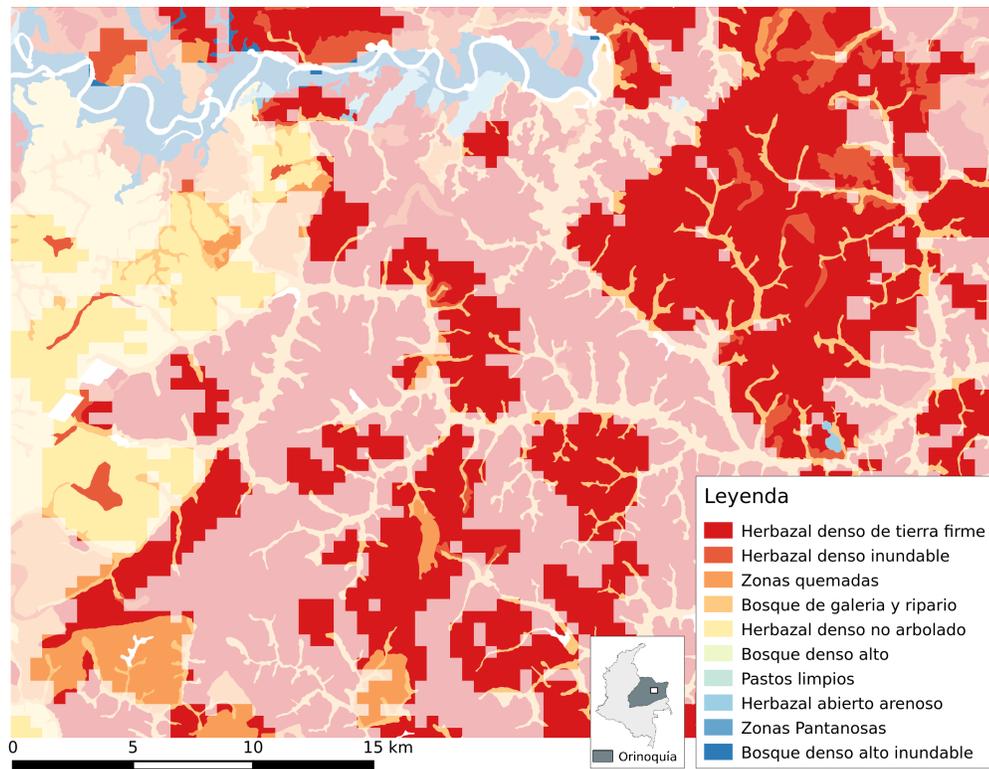


Figura 28: Comportamiento de los herbazales y bosques de galerías en las áreas más frecuentemente quemadas, área cerca al PNN Tuparro, Vichada, donde las zonas frecuentemente quemadas se muestran en color vivo.

Un cierto porcentaje de los bosques de galerías se encuentran marcadas como cobertura quemada (cuarta posición), sin embargo esto puede deberse a la pérdida de resolución espacial de los datos al llevar la frecuencia de áreas quemadas al mapas de coberturas (de mejor resolución), esto también muestra que los bosques de galerías están muy anexos a los pixeles detectados como quemados en las huellas, siendo así participes en la dispersión del incendio actuando como fronteras naturales tal como lo describen varios estudios. Un ejemplo de este comportamiento se observa en la Figura 28 a un acercamiento a un área específica con alto porcentaje de frecuencia de incendios cercano al PNN Tuparro donde se ve que los bosques de galerías (de color anaranjado cálido) limitando las fronteras y dispersión de las huellas quemadas.

Parte III

**Modelo de dispersión de grandes
incendios en la Orinoquía
Colombiana**

7. Marco teórico y antecedentes

Una de las áreas de estudio fuertemente estudiada sobre los incendios, es la dinámica de fuegos, mas específicamente sobre la dispersión y como se comporta el fuego una vez producido, éste ha sido un campo de acción para la aplicación de diversos sistemas inteligentes, patrones y simulaciones durante varios años. Existen varias investigaciones y desarrollos para entender, simular y conocer el comportamiento del fuego y como este se dispersa según las condiciones del entorno. Estos modelos se pueden dividir en tres grandes grupos (Sullivan (2009a), Sullivan (2009b), Sullivan (2009c)):

Físicos y cuasi-físicos: En estos se encuentran los modelos con fundamentos químico-físico, solo físicos, o de la combustión del fuego. Se basan en los análisis físicos de los fenómenos, la transferencia de energía, reacciones termofísicas del medio, condiciones de frontera, utilizando ecuaciones diferenciales, métodos numéricos, entre otros.

Empíricos y cuasi-empíricos: Estos modelos están basados en análisis estadístico de datos obtenidos de manera experimental con o sin fundamentos físicos para relacionarlos. La principal relación que trata e investiga estos modelos empíricos es la del viento y la combustión del medio para conocer el factor o tasa de dispersión.

Técnicas de simulación y análogos matemáticos: Este grupo es donde caen la gran mayoría de investigaciones y desarrollos, y existen varios modelos de los cuales los mas importantes son: ondas de vectores elípticos o de propagación de ondas elípticas, autómatas celulares, percolación y fractales.

La predicción de la dispersión de fuegos es un problema altamente no lineal, principalmente por sus diversas condiciones de frontera y variables del entorno que modulan su comportamiento, tales como; las condiciones climáticas, dirección y velocidad del viento, topografía y cobertura variada y terrenos de diverso comportamiento frente al fuego, estos hacen que los métodos físico-matemáticos sean de muy alta complejidad para describirlos (Karafyllidis and Thanailakis, 1997).

Por otro lado, un modelo es una abstracción y representación parcial de algunos aspectos del mundo "que pueden ser manipulados para analizar el pasado, definir el presente y predecir el futuro del fenómeno natural" (Smyth, 1998). La modelación de sistemas naturales puede ayudar, en gran medida, a entender su dinámica, sus

relaciones e interacciones con su medio. La modelación puede convertir un sistema complejo, en un sistema de variables y funciones definidas, finitas y "trabajables" para recrear o representar el comportamiento y estados, a través del tiempo, del sistema complejo. Esto hace que la modelación sea una muy efectiva herramienta donde las interacciones y variables son tantas que la representación completa del sistema a través de la física, matemática y/o química del fenómeno natural, se vuelven muy difíciles (Coculelis, 2002).

Los autómatas celulares han sido ampliamente usados para modelar sistemas complejos (Wolfram, 1994) y exitosamente aplicados para resolver problemas en sistemas físicos con alta interacción local (Karafyllidis and Thanailakis, 1997), por su naturaleza discreta y por su facilidad de modelar y extraer condiciones del entorno a nivel computacional, pueden modelar mas fácilmente este tipo de problemas.

7.1. Autómatas celulares y dispersión de fuegos

Los autómatas celulares fueron introducidos por Von Neumann en 1966 como representación matemática de sistemas complejos en la cual consistían de una rejilla o cuadrícula uniforme de n-dimensiones donde cada una de las celda está en un numero de estados finitos. El estado de cada celda depende de un conjunto de reglas y de los estados de las celdas vecinas que la rodean. El cambio de estado es el resultado de un proceso determinístico, probabilístico o estocástico de las reglas de transición. El tiempo transcurre de forma discreta paso a paso y cada celda se actualiza en cada uno de estos pasos y después de haber aplicado las reglas de transición (Yassemi et al., 2008).

Los autómatas celulares tienen muchas características que lo hacen atractivos para modelamientos espacio-temporales. Los modelos de autómatas celulares han sido usados para entender gran variedad de fenómenos espaciales, como: competición de plantas, propagación de epidemias, fragmentación de habitats, flujo de personas, invasión de plantas, dinámica urbana, propagación de insectos y dispersión de fuegos. Tiene unas características muy apropiadas y atractivos para modelamientos espacio-temporales; es sencillo abstraer la realidad en forma de rejillas y celdas con distintas propiedades para cada una de ellas, la características de los autómatas celulares y su comportamiento vecinal se asemeja mucho a como se comporta un fuego en el caso de la propagación y como una celda puede incendiar a sus vecinas bajo ciertas características y propiedades. Hay principalmente dos características para simular la dinámica del fuego (Sullivan, 2009c): la primera es como se

representa el fuego, para el caso de los autómatas celulares es a través de la rejilla y las propiedades de las celdas, y la segunda es el método de propagación, que para el caso de los autómatas celulares es a través de reglas por contacto directo o de vecinos cercanos.

Las técnicas de percolación y de autómatas celulares presentan una muy buena plataforma para representar coberturas biológicas heterogéneas, como también diversos aspectos físicos del terreno (Sullivan, 2009c). Los autómatas celulares tienen la capacidad de sintetizar muy bien el ambiente y sus condiciones, tales como las condiciones de tiempo, la topografía y el tipo de vegetación, que son esenciales como entrada para la simulación del fuego. Una de las ventajas del desarrollo de un simulador con autómatas celulares es que son prácticos, fáciles de implementar y proveen información casi instantánea para la toma de decisiones (Sullivan, 2009c).

Los modelos de simulación de la dinámica de fuegos usando autómatas celulares han sido probados en varios lugares con muy buenos resultados: en la reserva de Mkuze Game Reserve del Sudafrica (Berjak, Stephen G and Hearne, 2002), cerca a Nordegg Alberta Canada (Yassemi et al., 2008), en la isla Spetses de Grecia (Alexandridis et al., 2008), Texas y Houston (EU) (Achteimeier, 2013). Dentro de los estudios de los antecedentes, se encontró que no existe investigación, artículo o proceso en donde se aplicara y se probara algún modelo de dispersión de fuegos para Colombia, ya sea con base a autómatas celulares o no. Únicamente se tiene un monitoreo regional y nacional, con base a imágenes satelitales, de puntos de activos de incendios por el IDEAM (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales).

7.1.1. Características de los autómatas celulares

Los autómatas celulares (AC) de dos dimensiones es un sistema dinámico discreto formado por un conjunto idéntico de objetos llamados celdas, organizadas en una rejilla bidimensional. Estas celdas tienen un estado finito, el cual cambia en pasos discretos de tiempos de acuerdo a determinadas reglas llamadas reglas de transición o evolución. Los autómatas celulares presentan las siguientes características básicas descritas por Wolfram (1994):

- Tienen un número finito de dimensión espacial (n)
- Todas las celdas tienen un tamaño fijo que a su vez no cambia en el tiempo
- El vecindario de una celda son todas las celdas contiguas alrededor de ella

- Cada celda tiene una propiedad definido como un «estado» que es finito
- Todas las celdas evolucionan, en un paso de tiempo discreto, usando una función de transición definida

Unas de las características propias de los autómatas celulares es que son flexibles respecto a sus propiedades y adaptables a las características del problema o requerimientos del sistema que éste vaya a representar (Wolfram, 1994), por lo que las características descritas arriba no son estrictas, sino que a partir de estas se define el autómata básico que se parte para el desarrollo del autómata a implementar.

El autómata celular esta definido por un espacio de tamaño $s \times r$ de celdas. La ubicación de cada celda la podemos definir como (i, j) y la definido de la ubicación de los vecinos respectivos de esta celda se identifican en la figura 29.

$(i-1, j-1)$	$(i-1, j)$	$(i-1, j+1)$
$(i, j-1)$	(i, j)	$(i, j+1)$
$(i+1, j-1)$	$(i+1, j)$	$(i+1, j+1)$

Figura 29: Identificación de la ubicación de la celda y sus respectivos vecinos

Se pueden identificar dos conjuntos de vecinos, el conjunto de vecinos adyacentes $\{(i-1, j), (i, j+1), (i+1, j), (i, j-1)\}$ y el conjunto de vecinos en la diagonal $\{(i-1, j-1), (i-1, j+1), (i+1, j+1), (i+1, j-1)\}$ (figura 30)

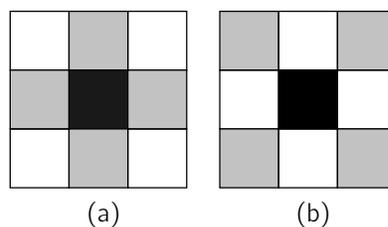


Figura 30: Dos clases de vecinos respecto al pixel central: a) vecinos adyacentes y b) vecinos en la diagonal

Una de las características fundamentales de los autómatas celulares es la función de transición, la cual tiene un conjunto de reglas para que una celda (a) en (i, j) pase

de un estado S_1 a un estado S_2 , esta función de transición se define de manera muy general como $f : S_1^{\alpha,\beta} \rightarrow S_2$. Sin embargo, el cambio de estado de una celda (a) en (i, j) no depende exclusivamente de su propio estado en el tiempo t sino que también depende de la configuración de las reglas locales de transición aplicadas en el conjunto definido de vecinos (α, β) , el nuevo estado de esa celda en el tiempo $t + 1$ es definida como (Wolfram, 1994):

$$a_{i,j}^{t+1} = f(a_{i,j}^t, \dots, a_{i+\alpha, j+\beta}^t) \quad (5)$$

El conjunto de los estados de las celdas del autómatas celular de tamaño $s \times r$ en cualquier tiempo t esta definido como (Hernández Encinas et al., 2007):

$$C^t = \begin{pmatrix} a_{0,0}^t & \cdots & a_{0,s-1}^t \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{r-1,0}^t & \cdots & a_{r-1,s-1}^t \end{pmatrix} \quad (6)$$

donde C es llamado el conjunto de configuración del AC en el tiempo t , y C^0 es el conjunto inicial. La secuencia de evolución del AC hasta un tiempo k se define como el conjunto de los diferentes estados $\{C^t\}_{0 \leq t \leq k}$

7.1.2. Modelos de autómatas celulares aplicados a dispersión de fuegos

El objetivo principal de un modelo para la predicción de la dispersión del fuego es la de determinar el tiempo y la forma del frente del incendio en una cobertura vegetal homogénea o heterogénea, bajo ciertas condiciones de tiempo y clima (Karafyllidis and Thanailakis, 1997), donde el frente del incendio es la línea divisora entre la parte quemada y la no quemada. Hay varios tipos de AC para la modelación de la dispersión, incluyendo modelos fractales de crecimiento (Clarke et al., 1994), transferencia del área quemada (Karafyllidis and Thanailakis, 1997), modelación estadística (Hargrove et al., 2000), simulación con datos de sistemas de información geográfica (Yassemi et al., 2008), entre otros.

Karafyllidis and Thanailakis (1997) desarrollo un modelo de autómatas celular para predecir el frente del incendio simulándolo sobre varios tipos de cobertura con distintas condiciones de tiempo y topografía. Utiliza, de manera simple, tasas de propagación respecto a los vecinos y aunque utiliza cobertura heterogénea, la velocidad de dispersión no dependían de estos, era un modelo sencillo que no tenia en cuenta las condiciones de tiempo y clima. Yassemi et al. (2008) alimento el

autómata celular usando información geográfica a través de un software; usando diferentes tipos de cobertura, elevación y condiciones de tiempo, mostrando buenos resultados. Berjak, Stephen G and Hearne (2002) mejoro el modelo realizado por Karafyllidis and Thanailakis (1997) incluyendo cálculos más ajustados a las tasas de dispersión en diferentes condiciones de elevación, viento y topografía. Hernández Encinas et al. (2007) también mejoro el modelo haciendo cálculos mas reales de la dispersión para las celdas en la diagonal, generando una dispersión mas natural, esto es una dispersión circular en cobertura y condiciones homogéneas.

8. Metodología

8.1. Modelo de dispersión

Se desarrollo un autómata celular para modelar la dispersión del fuego usando como base el modelo de autómatas celulares desarrollado por Karafyllidis and Thanailakis (1997) con los ajustes realizados de Hernández Encinas et al. (2007) incluyendo varios cambios de acuerdo a nuestros datos y área de estudio, teniendo como variables modeladoras los análisis realizados de los grandes incendios.

Para el modelo, se implementó un autómata celular de celdas cuadradas e iguales, sus estados iniciales fueron asignados desde las variables externas analizadas en los primeros capítulos y explicados mas adelante, los cambios de estado o reglas de transición de las celdas se diseñaron teniendo en cuenta las propiedades del autómata en cada celda dadas sus propiedades de la cobertura vegetal, el indice de vegetación y el numero continuo de días sin lluvia.

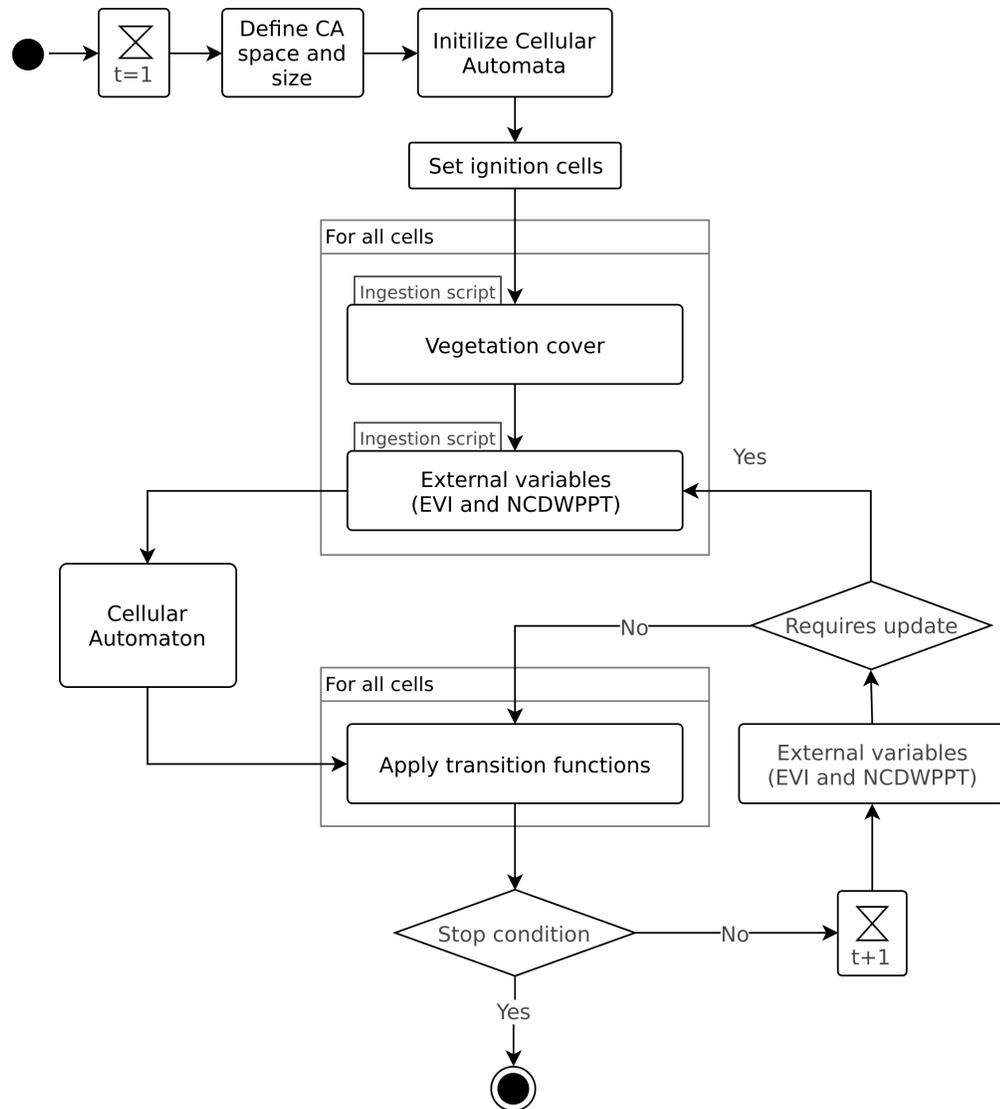


Figura 31: Diagrama de flujo del autómata celular implementado

8.1.1. Condiciones iniciales

Los estados iniciales de cada celda y en general del autómata se establece al inicio de la configuración de la simulación, definiendo cada una de las propiedades de las celdas y el inicio de los puntos de ignición (Figura 31).

La primera etapa de las condiciones iniciales es la definición del área a simular, para ello se tomaron dos incendios reales de pruebas (explicados en la sección 8.2 en la página 67) y se creó, para cada uno, bordes de forma rectangular que cubrían al incendio con un espaciado suficiente en cada lado para observar las coberturas de la vegetación al rededor y darle espacio para realizar la simulación. Este borde

rectangular definían el espacio o universo del autómata como límite de la simulación.

Una vez definido el espacio de la simulación del autómata, se definió el tamaño del pixel. Para ello primero se estableció, como unidades del espacio de coordenadas del autómata, usar grados decimales provenientes del sistema de coordenadas geográficas WGS 84 con el objetivo de correlacionar fácilmente los datos secundarios (provenientes de satelitales y de modelos) con el espacio y dimensiones del autómata.

El tamaño del pixel de los datos EVI y de las huellas quemadas tienen un ancho de 0,0044 grados decimales (487m), el número continuo de días sin lluvia que usa TRMM es de resolución gruesa de 0,25 grados decimales y el índice de cobertura vegetal Corine Land Cover del año 2009 que es un producto vectorial que proviene de los productos de Landsat (IDEAM et al., 2012) que tiene un ancho del pixel aproximado de 0,00027 grados decimales (30m). Se tomó una resolución intermedia ni muy fina ni muy gruesa pero que capturaba bien la cobertura vegetal, esta es de ancho del pixel de 0,001 grados decimales (aproximadamente 110m), la cual cada pixel representaba alrededor de $121000m^2$ (12,1ha).

8.1.2. Scripts de ingesta de datos

Los scripts de ingesta de datos se dividen en tres, cada uno para actualizar variables de fuentes de datos específicos de la variable, realizando cálculos y procedimientos particulares para cada una. Para los tres scripts se procesaban todas las celdas dentro del espacio del autómata, de cada celda se extraía la longitud y latitud central y junto con su fecha del paso de tiempo de la simulación se ejecutaba (cuando era necesario) cada script que retornaban la información correspondiente de la respectiva celda. Estos scripts son (Figura 31):

Cobertura _vegetal: Script para traer la información del tipo de la cobertura vegetal en la fecha y ubicación correspondiente, usando los datos de Corine Land Cover del año 2009 (IDEAM et al., 2012), con la misma metodología y datos procesados realizado en el capítulo 2.

Indice _EVI: Script para asignar/actualizar la información del valor EVI en la fecha y ubicación correspondiente, usando MOD13A1 de MODIS, con la misma metodología y datos procesados realizado en el capítulo 2.

NDCSL: Script para asignar/actualizar el número de días continuos sin lluvia (NDCSL)

en la fecha y ubicación correspondiente, usando los datos del TRMM, con la misma metodología y datos procesados realizado en el capítulo 2.

8.1.3. Actualización y configuración de las variables externas

Los estados iniciales de cada celda y en general del autómata se establece al inicio del ciclo de vida, definiendo cada una de las propiedades de las celdas y el inicio de punto de ignición. Luego en cada iteración ejecuta las funciones de transición a toda el autómata, se revisa la condición de parada y se actualizan las variables externas.

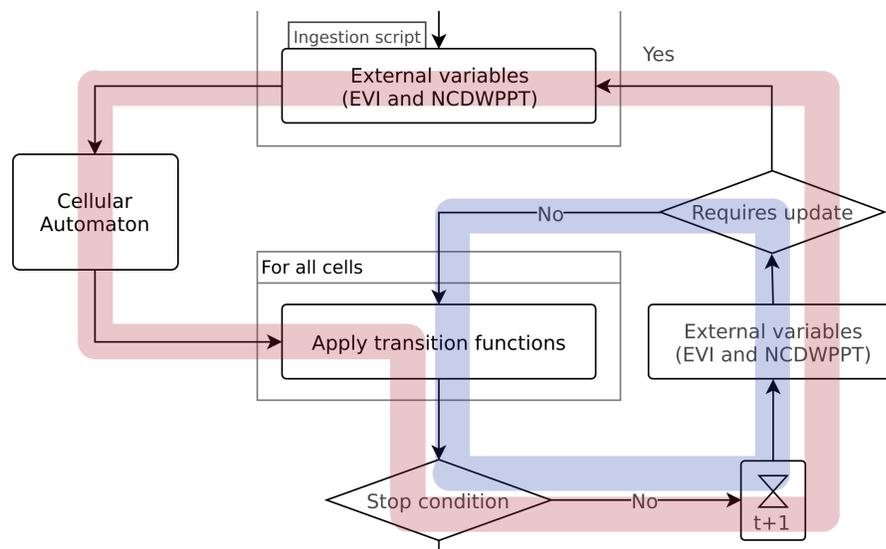


Figura 32: Flujos de la evolución y paso de tiempo del autómata celular, fragmento del diagrama 31.

El modelo debe tener todas las condiciones iniciales en el t_1 y los estados del sistema posterior al t_1 están plenamente determinadas (flujo azul, figura 32) hasta, si existe, una actualización o cambio de los estados de las variables externas al sistema (flujo rojo, figura 32). Esto último se da solo en el caso de que el incendio dure lo suficiente hasta que haya la disponibilidad de la actualización de la variable o variables externas. La frecuencia de actualización de las variables externas para el sistema usado que corresponden al índice EVI y al número de días continuos sin lluvia (NDCSL) que dependen de la resolución temporal de los datos, que son diaria. Es decir, que pasado un dado número de pasos de tiempo que correspondan a un día, todas las celdas del autómata se le actualizarán sus valores de índice EVI y al número de días continuos sin lluvia, y con ello sus propiedades y riesgo a quemarse.

8.1.4. Reglas de transición

Los cambios de estado, funciones o reglas de transición de las celdas se usaron teniendo en cuenta los 8 vecinos, tanto los adyacentes como las celdas diagonales. El modelo realizado se basó principalmente por el desarrollado por Karafyllidis and Thanailakis (1997) pero con los ajustes hechos por Hernández Encinas et al. (2007) la cual modificó los cálculos de dispersión principalmente para las celdas en la diagonal, estos ajustes consistían en que la influencia de un vecino en la diagonal es la porción del área circular quemada respecto a su área total, generando una dispersión más real y natural (ver Figura 33).

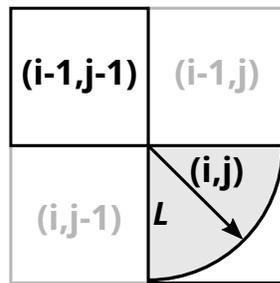


Figura 33: Influencia de la propagación de un vecino en la diagonal

Es decir, que mientras el índice de influencia de la propagación de un vecino adyacente es igual a 1 el de un vecino en la diagonal va a ser un cuarto del área de la circunferencia respecto a su área total L^2 (Figura 33):

$$\frac{\pi L^2}{4L^2} = \frac{\pi}{4} \approx 0,785 \quad (7)$$

Por lo tanto, los índices de influencia según el tipo de vecino (N) se definieron como:

$$\begin{cases} N = 1 & \text{celdas adyacentes} \\ N \approx 0,785 & \text{celdas en la diagonal} \end{cases} \quad (8)$$

Ahora bien, las reglas de transición se diseñaron con el objetivo de simular el comportamiento de la dispersión del incendio sobre zonas de vegetación heterogénea en el área de estudio dadas el comportamiento de las variables estudiadas históricamente con los grandes incendios ocurridos durante el 2000 y el 2014 en la Orinoquía Colombiana. Es decir, el comportamiento de la dispersión (reglas de transición) iban a estar moduladas con base (y únicamente) las variables analiza-

das, su influencia y características se describen a continuación:

Tipo de cobertura: El tipo de cobertura vegetal y su análisis de frecuencia de quema se realizó en el capítulo 2 mostrando los resultados de la vulnerabilidad por tipo de cobertura (ver Figura 26), con base en estos resultados se construyó un índice de vulnerabilidad normalizado según el tipo de cobertura:

Cobertura	Índice de vulnerabilidad
Herbazales densos	0.85
Pastos limpios y zonas quemadas	0.85
Arbustos o zonas de transición	0.6
Bosques de galerías y otros	0.3
Zonas pantanosas y áreas húmedas	0.4
Otras coberturas	0.05

Cuadro 6: Índice de vulnerabilidad según el tipo de cobertura

Índice EVI: índice de vegetación mejorado EVI (Enhanced Vegetation Index), orientado en las variaciones estructurales de las plantas, como su fisonomía, su tipo o su área foliar, es un índice normalizado analizada en el capítulo 2 muestra buena correlación con la vulnerabilidad y riesgo a que la vegetación se quemara con mayor o menor facilidad.

Numero de días sin lluvia: El NDCSL, es un análisis que utiliza los productos del Tropical Rainfall Measuring Mission (TRMM) analizado en el capítulo 2, donde se calcula el número de días consecutivos sin lluvia hacia atrás de la fecha actual de la celda del autómata, valor que representa la vulnerabilidad a la quema por vegetación seca. Para ello se calculó el índice del riesgo por esta variable, normalizando los valores de NDCSL entre el mínimo valor y su mediana (0 a 15.5) debido a que hasta el percentil 50 se agrupan la gran mayoría de eventos con ese valor de NDCSL con base en la gráfica de la distribución de la serie (ver sección 6.1 del capítulo 2).

Cada una de estas variables representan un riesgo a que una celda cambie de estado con base en las celdas vecinas estén o no en incendiadas. Para ello se desarrolló un índice de resistencia (R) en la que se agrupan los riesgos de cada variable analizada:

$$R_{i,j}^t = \frac{(\text{indice EVI})^t}{(\text{tipo de cobertura}) * (\text{numero de dias sin lluvia})^t} \quad (9)$$

El índice de resistencia (R) muestra el riesgo que tiene una celda i, j en el tiempo t a ser quemada, entre mayor es este índice para una celda, mas difícil va a quemarse y viceversa.

En la configuración inicial del autómata, cada celda se inicializa con un índice de resistencia R dado los valores del tipo de cobertura, índice EVI y el numero de días sin lluvia para la posición (longitud, latitud) específica de esta, en el tiempo t definido en las condiciones iniciales, aplicando los scripts de ingesta. Posteriormente y cuando haya lugar una actualización de las variables externas, el índice de resistencia se recalcula con los nuevos valores, asegurando que las celdas del autómata representen el estado y las condiciones externas representadas por las tres variables usadas. El único valor que una vez inicializado se va a permanecer estable en todo el ciclo de vida del autómata, es el tipo de vegetación la cual la celda representa, aparte de ser etiquetado como «en llamas» o «quemado».

La celda va a definirse como quemada (o no) en un tiempo t definidos en pasos de tiempo de transición, luego de si y solo si al menos una de la celdas vecinas esta quemándose, y esta definida como:

$$R_{i,j}^{t+1} = R_{i,j}^t - \sum_1^8 S_{\alpha,\beta}^t * N_{\alpha,\beta}^t \quad (10)$$

Donde R es el índice de resistencia (ecuación 9), N es el índice de influencia según el tipo de vecino (ecuación 8) y S es el estado del vecino (α, β) en el tiempo t definido como:

$$\begin{cases} S = 1 & \text{celda quemandose} \\ S = 0 & \text{cualquier otro estado} \end{cases} \quad (11)$$

La celda i, j se cataloga como «en llamas» en el tiempo $t + 1$ si y solo si:

$$R_{i,j}^{t+1} \leq 0 \quad (12)$$

Luego de algunos pasos de tiempo t del autómata, la celda en i, j «en llamas» pasa a ser una celda «quemada».

8.1.5. Paso de tiempo

Cada paso de tiempo del modelo en la simulación (t) no va directamente relacionado con un tiempo específico real, sin embargo para las pruebas del modelo se requería conocer la equivalencia del tiempo real con el paso del tiempo del modelo (t), y saber si las variables externas necesitaban actualizarse o no, ya que las variables externas tenían tiempos reales de actualización. Para ello se realizó lo siguiente:

Debido a que el tiempo de dispersión de todos los grandes incendios estudiados son muy particulares para cada evento, dado que la rapidez de la dispersión depende de diversos factores en el momento en que ocurre, se tomó el tiempo de cada paso del modelo que sea particular a cada simulación, la cual depende de las condiciones del área del evento y la fecha en la que se produjo. Para ello se realizó el cálculo de la velocidad de dispersión de área quemada por día de cada evento a simular, con base en los análisis realizados en los dos capítulos anteriores. Se sacaba el área quemada total y el tiempo de duración, con ello y con el tamaño del pixel se calculaba la velocidad de dispersión $\frac{\text{area}}{\text{tiempo}}$, luego y teniendo el tamaño y su área del pixel de la simulación, se podía saber el tiempo (t) correspondiente a cada paso del modelo.

Teniendo el tiempo de los pasos del modelo se sabía cuánto tiempo pasaba para saber si las variables, según sus características, se necesitaban actualizarse o no.

8.2. Simulación y pruebas del modelo

Con el objetivo de comparar el comportamiento del modelo desarrollado, se aplicó el modelo de dispersión y se contrastó con uno de los incendios estudiado en el análisis realizado en los primeros capítulos. Para ello, se realizaron los pasos descritos a continuación, donde se explica la selección del incendio y la aplicación de las variables y condiciones para su modelación.

8.2.1. Selección de los incendios de pruebas

Como se vio en el capítulo 1 las grandes huellas quemadas pueden ser el producto de uno o más incendios (Figura), la verificación y prueba del modelo se realizó con un incendio dentro de una huella quemada, para su selección se tuvieron en cuenta los siguientes parámetros: grandes huellas quemadas con poca cantidad de incendios, por lo menos un incendio con una gran cantidad de píxeles quemados

(incendio grande), uno o pocos puntos de ignición y que este mismo no presente mucha fragmentación.

Para ello primero se seleccionaron las primeras condiciones de huellas quemadas con pocos incendios e incendios con gran cobertura quemada, aplicando varios filtros a los datos. Luego, para garantizar la poca fragmentación y pocos puntos de ignición se visualizaba los productos de píxeles con fechas quemadas para observar la espacialidad y distribución de los píxeles respecto a sus fechas quemadas.

8.2.2. Simulación

Una vez seleccionados los dos incendios de pruebas, se configuró y aplicó, para cada uno, el autómata desarrollado asignando las condiciones y características de cada uno. Inicializado y configurado el autómata, se dejaba correr hasta la fecha equivalente en pasos de tiempo del incendio real. Una vez obtenidos las simulaciones, se comparaban con el incendio real usando una métrica del porcentaje de las coincidencias de ambas áreas.

9. Resultados

9.1. Modelo

El modelo de autómatas celulares se desarrolló usando como lenguaje principal Python 3 (Rossum et al., 2011) en conjunto con algunas librerías tales como: Python Imaging Library (PIL)⁹, Numpy¹⁰, Dask¹¹, entre otras. El autómata celular desarrollado arranca con un archivo principal (Main) que ejecuta el modelo con todos los parámetros necesarios para inicializar y ejecutar el autómata, donde se crea una instancia del autómata celular con el espacio asignado en el tablero o espacio dimensional, una vez definido el tablero se instancias y crean todas las células dentro del espacio del autómata cada una con su ubicación dentro del autómata y geoespacialmente, cada célula o celda tiene su respectiva clase de cobertura vegetal con la que se inicializa con los scripts de ingesta (Figura 34).

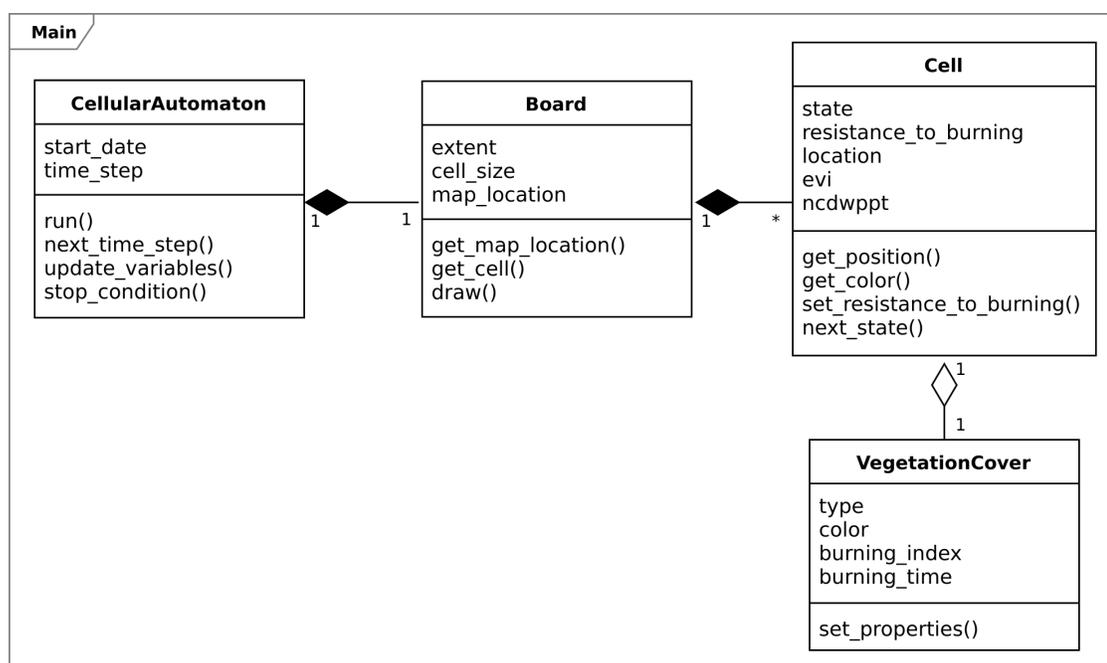


Figura 34: Diagrama de clases del autómata celular desarrollado

Los otros scripts de ingesta inicializan el estado de las celdas con sus propiedades antes de ejecutarse cada uno de los estados de tiempo y evolución del autómata (ver su flujo de funcionamiento en el diagrama 31). Los scripts de ingesta están también

⁹<https://pillow.readthedocs.io>

¹⁰<http://www.numpy.org/>

¹¹<https://dask.pydata.org>

desarrollados con Python 3 usando librerías como Gdal¹², Rasterio¹³ y Fiona¹⁴ para la lectura de archivos rasters, vectoriales y netcdf.

9.2. Simulación y pruebas del modelo

Se escogieron dos incendios grandes reales analizados con anterioridad, para simular la dispersión del fuego cargando la cobertura y el estado de la vegetación con las variables incluidas en el modelo, en el momento de cada evento.

9.2.1. Simulación y prueba No. 1

El primer incendio seleccionado es el numero 12, dentro de la lista de los más grandes incendios detectados en el capítulo 1. Este se encuentra en la parte oriental del Vichada cerca a la frontera con Venezuela, se caracteriza por presentar 494 pixeles de Modis quemados (esto es aproximadamente $117,57\text{km}^2$ o 117570ha) y una duración de 5 días (Figura 35).

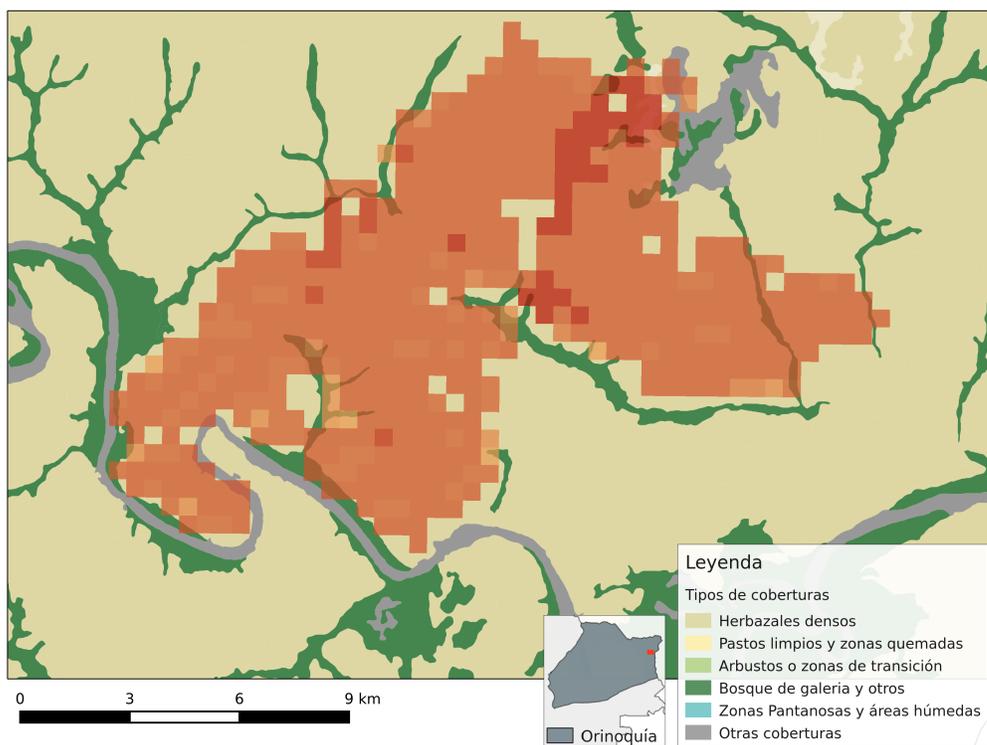


Figura 35: Incendio real de prueba No. 1 (en pixeles rojos) sobre las coberturas

¹²<http://www.gdal.org>

¹³<https://github.com/mapbox/rasterio>

¹⁴<http://toblerity.org/fiona/>

La primera etapa de la simulación, como lo describe el diagrama de flujo 31, es la inicialización de cada célula o celda en el tiempo $t = 1$ se asigna su respectiva cobertura vegetal según su ubicación geo-espacial y con ello un color y características de la misma. En la figura 36 se ve el autómata inicializado con la cobertura correspondiente y puntos de ignición en el tiempo $t = 1$ y antes de aplicar las funciones de transición. Se aplicaron los mismos colores y leyendas configurados en el mapa real de coberturas de la Figura 35.

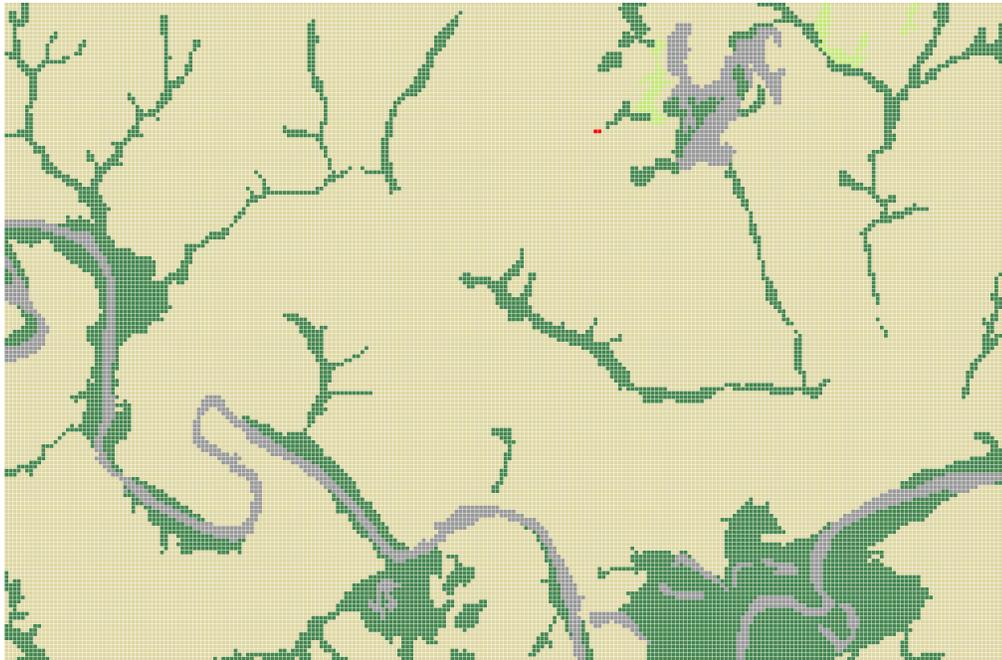


Figura 36: Inicialización del autómata con las celdas con su respectiva cobertura

Para los pasos de tiempo del autómata y su equivalencia al tiempo real en días, se calculó la velocidad de la dispersión del incendio real con base en el área quemada total y su tiempo de duración, este dio que en términos generales se dispersaba a una tasa aproximada de $23,43\text{km}^2/\text{día}$, es decir, que cada vez que el autómata quemaba el equivalente a $23,43\text{km}^2$ pasaba un día y se actualizaban las variables externas.

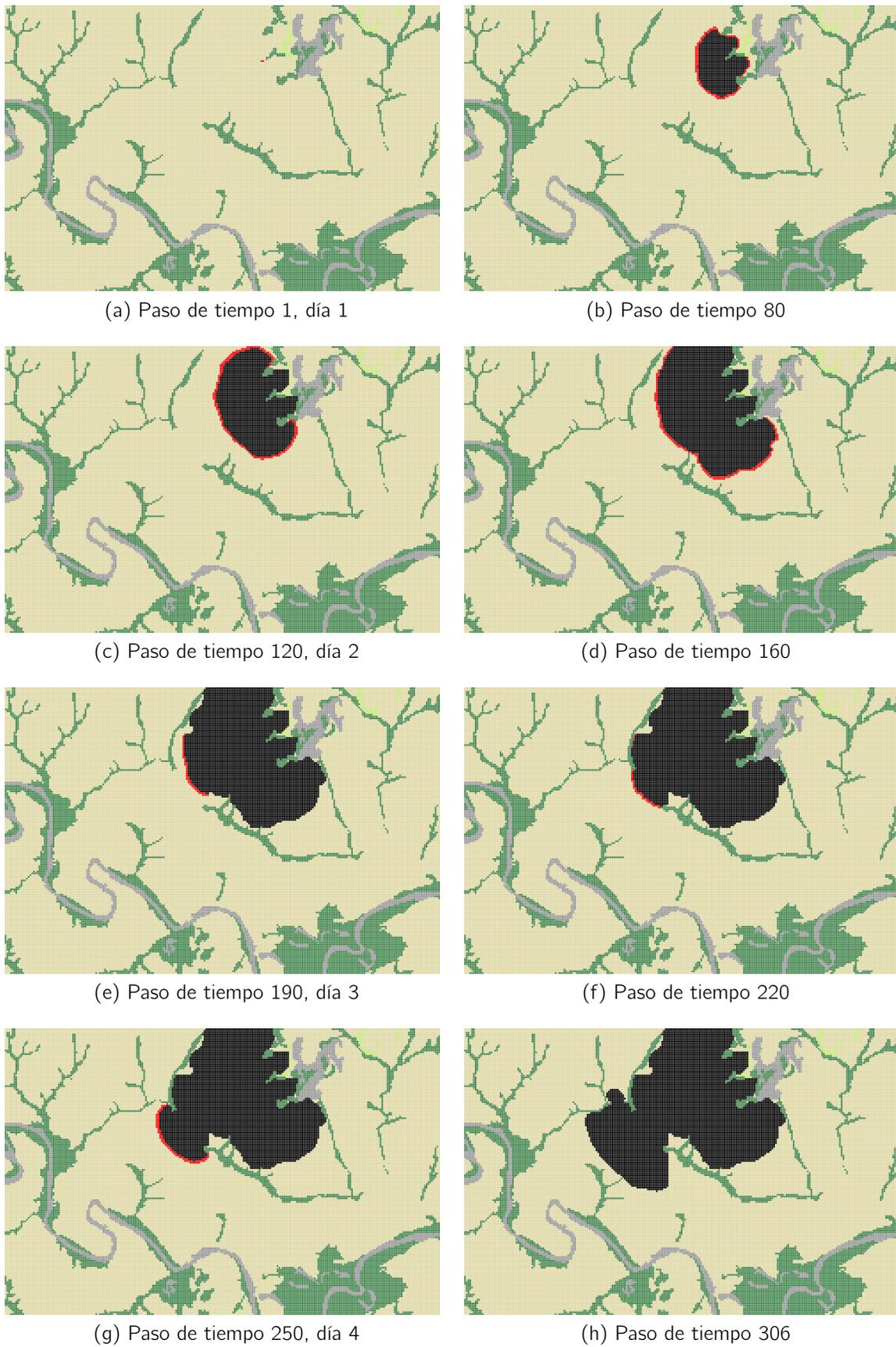


Figura 37: Simulación del autómata para la prueba No. 1

Para esta simulación se generaron en total 306 pasos de tiempo, se pueden observar algunos de estos fragmentos de pasos de tiempo en la Figura 37, en ella se ve que la dispersión se realiza al principio cuasi circular debido a algunos valores altos del índice EVI en el costado lateral izquierdo (Figura 37b) luego en el paso de tiempo 190 el flanco de dispersión derecha se apaga debido a que el TRMM reporta lluvia para unicamente ese costado en esa fecha, por lo que el NCDSL baja drásticamente (Figura 37e) y en el ultimo paso de tiempo para casi el día 5 el TRMM reporta lluvia y el flanco izquierdo se apaga (Figura 37h).

El área quemada final modelada por el autómata (Figura 37h) respecto al área real (Figura 35) presenta una métrica de coincidencia del 48 %, sub-estimando el área quemada real, posiblemente debido a la sensibilidad del autómata a la variable de días continuos sin lluvia entre otros factores.

9.2.2. Simulación y prueba No. 2

El segundo incendio seleccionado es el numero 21, dentro de la lista de los más grandes incendios detectados en el capitulo 1. Este se encuentra entre los limites de Casanare y Arauca, se caracteriza por presentar 380 pixeles de Modis quemados (esto es aproximadamente $90,44km^2$ o $90440ha$) y una duración de 7 días (Figura 38).

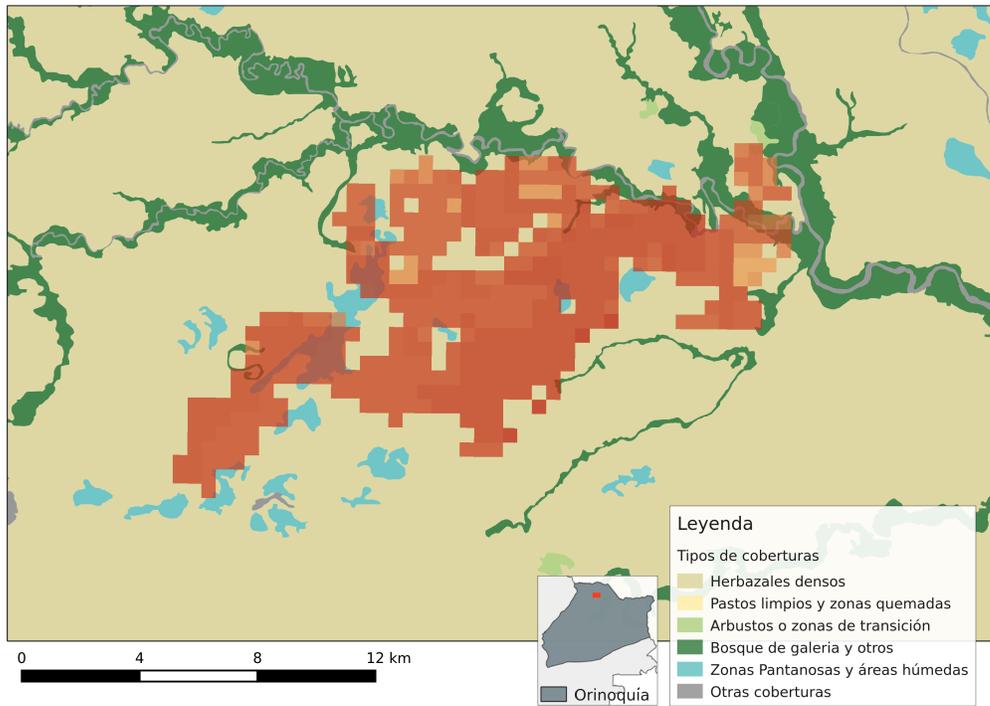


Figura 38: Incendio real de prueba No. 2 (en pixeles rojos) sobre las coberturas

En la figura 39 se ve el autómata inicializado con la cobertura correspondiente y puntos de ignición en el tiempo $t = 1$ y antes de aplicar las funciones de transición. Se aplicaron los mismos colores y leyendas configurados en el mapa real de coberturas de la Figura 38.

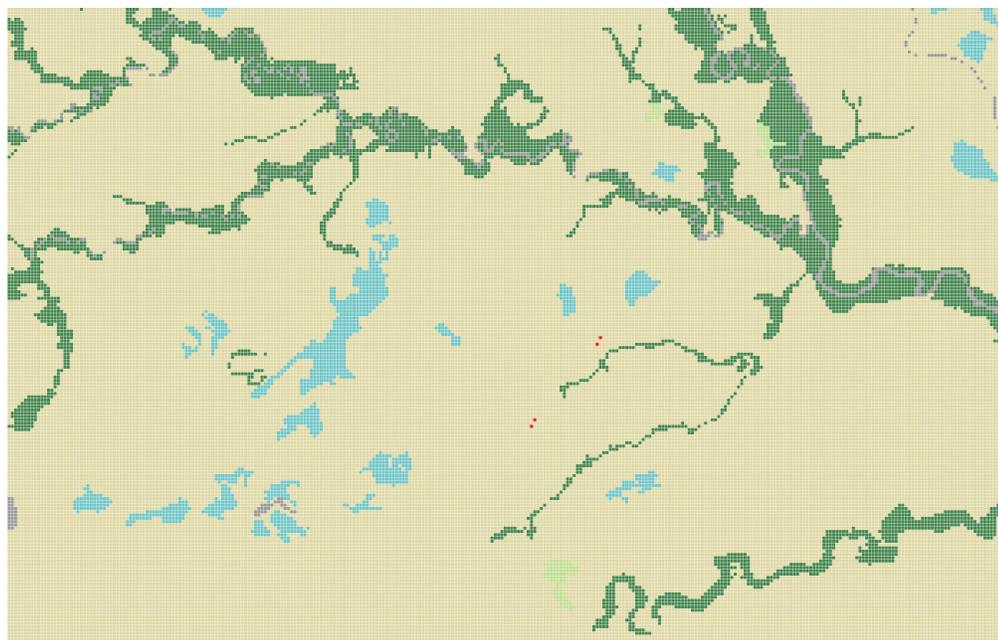
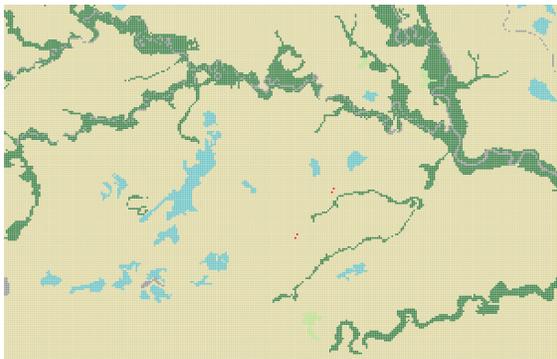
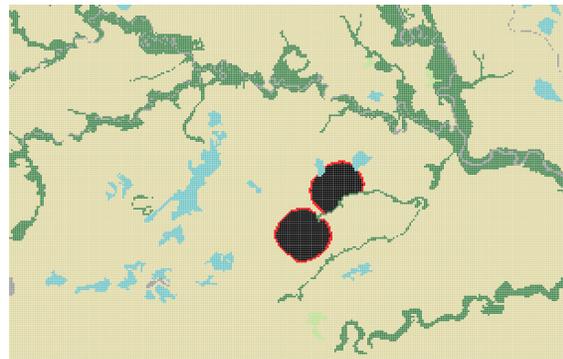


Figura 39: Inicialización del autómata con las celdas con su respectiva cobertura

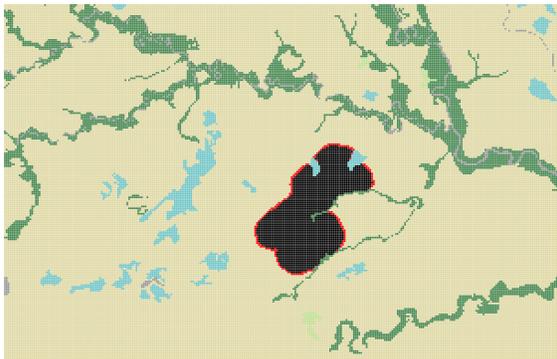
Para los pasos de tiempo del autómata y su equivalencia al tiempo real en días, se calculó la velocidad de la dispersión del incendio real con base en el área quemada total y su tiempo de duración, este dio que en términos generales se dispersaba a una tasa aproximada de $12,88\text{km}^2/\text{día}$, es decir, que cada vez que el autómata quemaba el equivalente a $12,88\text{km}^2$ pasaba un día y se actualizaban las variables externas.



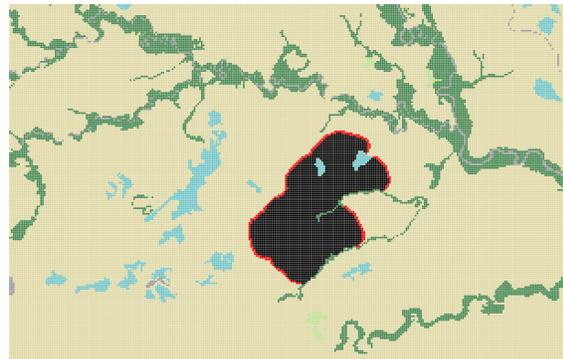
(a) Paso de tiempo 1, día 1



(b) Paso de tiempo 43, día 2



(c) Paso de tiempo 64, día 3



(d) Paso de tiempo 80, día 4



(e) Paso de tiempo 94, día 5



(f) Paso de tiempo 107, día 6



(g) Paso de tiempo 121, día 7



(h) Paso de tiempo 136, día 8

Figura 40: Simulación del autómata para la prueba No. 2

Para esta simulación se generaron en total 136 pasos de tiempo, se pueden observar algunos de estos fragmentos de pasos de tiempo en la Figura 40, en ella se ve que la dispersión se realiza por dos puntos de ignición que se unen alrededor del paso de tiempo numero 50. Luego la dispersión continua bordeando bosques y galerías y siendo limitados por estos, luego de 8 días, días de duración del incendio real, presenta un área quemada semi ovalada (Figura 40h) pero que sin embargo no finaliza ahí, sino que continua su dispersión principalmente porque tanto el indice EVI como el numero de días sin lluvia (NCDSL) no presentan variación considerable a través del paso de tiempo para esas fechas.

El área quemada final modelada por el autómata para esta simulación No. 2 (Figura 40h) respecto al área real (Figura 38) presenta una métrica de coincidencia del 51 %, sub-estimando el área quemada real en el costado izquierdo donde el incendio real presentó mayor dispersión hacia esa región.

Conclusiones y recomendaciones

- Los resultados de este trabajo son acordes a lo descrito por Malamud (1998); se comprobó que la región de la Orinoquía Colombiana presenta una distribución de ley de potencia de la frecuencia respecto al área de la huella quemada, de tal manera que la probabilidad de ocurrencia de pequeños incendios es muy alta, mientras que la probabilidad de ocurrencia de grandes incendios es baja. Un elemento no definido completamente en el estado del arte, es el umbral límite del tamaño de la huella quemada para un gran incendio. En este trabajo, se usó la regla de Pareto 80/20, que mostró ser útil y que arrojó resultados acordes con el área de estudio. Se reconoce que esta oportunidad de implementación, se relaciona con lo que es una metodología sensible a las características propias de la serie de tiempo, lo que lleva a que se adapte muy bien a las condiciones particulares de la Orinoquía Colombiana.
- Las grandes huellas quemadas detectadas en el área de estudio, en su gran mayoría son el producto de un solo incendio y cerca del 92 % de los grandes incendios tienen una duración entre 1 y 5 días con un área en promedio de 500 a 1000 hectáreas. Además, las huellas quemadas gigantes, suceden en regiones con mayor número de ocurrencia de incendios a lo largo de los años -al menos para el periodo de análisis-, zonas que se caracterizan por ser principalmente planas tipo sabana, en las que los herbazales son la cobertura predominante y hay una baja densidad poblacional. Los resultados que relacionaron los tipos de cobertura con la frecuencia de los grandes incendios, presentan una tendencia fuertemente sesgada, con coberturas muy vulnerables y otras no tanto; las coberturas con mayor frecuencia a ser quemadas por grandes incendios son los herbazales densos, mientras que los bosques de galería, por ejemplo, muestran una fuerte resistencia al tipo de incendios producidos en la Orinoquía Colombiana.
Así mismo, se corroboró lo mostrado por algunos estudios generales sobre los incendios (Lasso et al. (2010), Pabón-Caicedo (2011)): los grandes incendios en la Orinoquía Colombiana también exhiben una fuerte tendencia monomodal en el año, están muy fuertemente influenciados por las temporadas de lluvias y épocas de sequía.
- Los datos de MODIS de áreas quemadas (MCD45) son de mucha utilidad y presentan muy buena información histórica y adecuada resolución temporal.

Sin embargo, tienen una limitante en su resolución espacial debido al tamaño del pixel, que restringe estudios de eventos y fenómenos espacialmente pequeños. Lo mostrado en este trabajo, permite recomendar su uso para eventos relativamente grandes. En este sentido, en el análisis del número de días consecutivos con lluvia se utilizaron los datos provenientes del TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission), por tratarse de una muy buena alternativa en condiciones donde los datos de estaciones meteorológicas en superficie son escasos, son de poca resolución espacial, por lo que no son recomendados para estudio a mayor detalle

- Los análisis realizados sobre la variable número de días consecutivos sin lluvia, muestran que frecuentemente los incendios grandes fueron generados en áreas donde no había precipitado en al menos 9 días continuos; se estima que para este umbral, la vegetación en el área de estudio se vuelve más vulnerable a quemarse y, por lo tanto, a presentar una alta disponibilidad como combustible vegetal. Los herbazales y pastos -la principal cobertura quemada en los grandes incendios- muestran un comportamiento altamente variado del índice EVI en temporada de bajas precipitaciones (diciembre a febrero), haciendo que este tipo de coberturas sean muy vulnerables a los cambios de estacionalidad y sean consecuentemente afectados por fenómenos locales e incluso fenómenos regionales de variabilidad climática. La correlación con los grandes incendios, indica que en el 71.2% de las grandes huellas quemadas analizadas, se observó un índice de vegetación EVI inferior a lo normal, durante días previos al incendio (alrededor de un 5% menos que el promedio histórico); por tratarse de una variable que indica el «combustible disponible», es decir biomasa, y su potencial a quemarse, puede convertirse en un elemento que anticipe la tendencia de desarrollo de grandes incendios.
- La dirección de los vientos no fue incluida en el modelo desarrollado en este trabajo, a razón de que los análisis indicaron que esta variable no tiene una buena relación de concordancia respecto a la dirección de la dispersión detectada por cada evento, en lapsos de tiempo de día a día. Las razones que pueden justificar esta bajo nivel de concordancia, pueden estar fundamentadas en la necesidad de hacer un análisis no del incendio mismo, como se realizó en este trabajo, sino por fragmento o frente del incendio y su evolución a través del tiempo (caso horario). Este reto no fue abordado, debido a que en un mismo

incendio pueden presentarse muchos frentes y más aún en grandes incendios como los estudiados. Mientras que el análisis de una huella quemada, por tratarse de una extensión de área más grande puede hacerse con resoluciones de datos gruesas, el frente de un incendio exige una resolución más detallada; si sumado a esto, se tiene en cuenta que para estudios como el aquí presentado, son requeridos datos históricos y que la investigación de las fuentes de datos disponibles, indico que, en general, no existe un producto satelital que ofrezca esa dos características, se recomienda usar la combinación de varios productos satelitales para llegar a ese nivel de detalle o realizar seguimiento de puntos calientes de incendios (ver VIIRS (Welsch et al., 2001)).

- Se generó un modelo de dispersión usando un autómata celular con estados iniciales y funciones de transición de cada una de las celdas y variables: como el tipo de cobertura, el índice de vegetación y el número de días sin lluvia; este modelo, realiza cambios de estado a través de un índice de resistencia, con el fin de modular su comportamiento respecto a esas variables. La dinámica de dispersión simulada, es sensible respecto a los índices implementados, mostrando resultados adecuados a lo esperado con base en el tipo de cobertura y las variaciones repentinas de las propiedades de las celdas. Entonces el modelo aquí desarrollado e implementado, arroja resultados del comportamiento y simulación de la dispersión, ajustados al área quemada observada de grandes incendios históricos, el sistema al que se llegó presenta muy buenas confluencias y lo posicionan como un modelo de aproximación a la simulación de la dispersión de grandes incendios.
- Los autómatas celulares, como modelo son recomendados, porque mostraron ser una excelente herramienta para la simulación de sistemas complejos, con un rápido desarrollo y adaptabilidad a las condiciones particulares de la problemática aquí presentada.
- Finalmente, la investigación indica que el tipo de cobertura, el índice EVI y el número de días sin lluvia, son variables que modulan muy bien los grandes incendios y por tanto de especial interés para el autómata celular, además pueden ser tenidos en cuenta para próximos estudios que ayuden en la toma de decisiones basadas en su monitoreo sobre la Orinoquía Colombiana. Trabajos futuros deben conducir a: incluir más variables tales como el viento y la elevación, a afinar las funciones de transición y a realizar análisis con

información y datos con mejor resolución.

Bibliografía

- Gary L. Achtemeier. Field validation of a free-agent cellular automata model of fire spread with fire - atmosphere coupling. *International Journal of Wildland Fire*, 22(2):148, sep 2013. ISSN 1049-8001. doi: 10.1071/WF11055. URL <http://www.publish.csiro.au/view/journals/dsp{ }journal{ }fulltext.cfm?nid=114{&}f=WF11055>.
- Andrew Aldersley, Steven J. Murray, and Sarah E. Cornell. Global and regional analysis of climate and human drivers of wildfire. *Science of the Total Environment*, 409(18):3472–3481, 2011. ISSN 00489697. doi: 10.1016/j.scitotenv.2011.05.032. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0048969711005353>.
- A. Alexandridis, D. Vakalis, C. I. Siettos, and G. V. Bafas. A cellular automata model for forest fire spread prediction: The case of the wildfire that swept through Spetses Island in 1990. *Applied Mathematics and Computation*, 204(1):191–201, 2008.
- D Armenteras, M Romero, and G Galindo. Vegetation fire in the savannas of the Llanos Orientales of Colombia. *World Resource Review*, 2005. URL <http://danbif.dk/konferencer/danbif-conference-2006/posters/Armenteras{ }poster{ }NY{ }fireveg{ }mod.pdf>.
- Dolors Armenteras-Pascual, Javier Retana-Alumbreros, Roberto Molowny-Horas, Rosa María Roman-Cuesta, Federico Gonzalez-Alonso, and Mónica Morales-Rivas. Characterising fire spatial pattern interactions with climate and vegetation in Colombia. *Agricultural and Forest Meteorology*, 151(3):279–289, 2011.
- John W Berjak, Stephen G and Hearne. An improved cellular automaton model for simulating fire in a spatially heterogeneous Savanna system. *Ecological Modelling*, 148:133–151, 2002.
- James K. Brown and Jane Kapler Smith. *Wildland fire in ecosystems: effects of fire on flora*, volume 042. 2000. URL <http://www.treesearch.fs.fed.us/pubs/4554/>.
- Wei Yang Jin Chen Yuyichi Onda Guoyu Qiu Bunkei Matsushita. Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index

- (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-Density Cypress Forest. *Sensors (Basel, Switzerland)*, 7(11):2636, 2007.
- LM Castro and Y Carvajal Escobar. Análisis de tendencia y homogeneidad de series climatológicas. *Ingeniería de Recursos ...*, 2011. URL <http://dintev.univalle.edu.co/revistasunivalle/index.php/eidenarevista/article/view/68>.
- RE Clark, AS Hope, S Tarantola, D Gatelli, PE Dennison, and MA Moritz. Sensitivity analysis of a fire spread model in a chaparral landscape. *Fire Ecology*, 2008. ISSN 19339747. doi: 10.4996/fireecology.0401001. URL https://nature.berkeley.edu/moritzlab/wp-content/uploads/2016/01/Clark_{ }etal_{ }FE_{ }2008.pdf.
- K C Clarke, J a Brass, and P J Riggan. A Cellular-Automaton Model of Wildfire Propagation and Extinction. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 60(11):1355–1367, 1994. ISSN 00991112.
- M. A. Cochrane. The past, present, and future importance of fire in tropical rainforests. In *Tropical Rainforest Responses to Climatic Change*. 2011.
- MA Cochrane. Fire in the tropics. *Tropical Fire Ecology*, 2009. URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-77381-8_{ }1.
- Mark a Cochrane and Kevin C Ryan. Fire and fire ecology: Concepts and principles. *Tropical fire ecology: Climate change, land use, and ecosystem dynamics*, pages 25–62, 2009. doi: 10.1007/978-3-540-77381-8_2. URL http://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-77381-8_{ }2.
- L. M. (eds) Correa, H. D, Ruiz, S. L. y Arévalo. *Plan de acción en biodiversidad de la cuenca del Orinoco-Colombia 2005-2015: propuesta técnica*. Bogotá D.C, 2006. ISBN 958-8151-66-X.
- Xavier Corredor Llano and Inés Sánchez Rodríguez. Jaziku - Statistical Inference Software for the Teleconnections Analysis. *nws.noaa.gov*, (38): 113–116, 2013. URL <http://www.nws.noaa.gov/ost/climate/STIP/38CDPW/38cdpw-XCorredor.pdf>.

- Helen Couclelis. Chapter 2: Modeling frameworks, paradigms, and approaches. *Geographic Information Systems and Environmental Modeling*, 2002. URL <http://citeseerx.ist.psu.edu/viewdoc/summary?doi=10.1.1.189.4133>.
- D. P. Dee, S. M. Uppala, A. J. Simmons, P. Berrisford, P. Poli, S. Kobayashi, U. Andrae, M. A. Balmaseda, G. Balsamo, P. Bauer, P. Bechtold, A. C. M. Beljaars, L. van de Berg, J. Bidlot, N. Bormann, C. Delsol, R. Dragani, M. Fuentes, A. J. Geer, L. Haimberger, S. B. Healy, H. Hersbach, E. V. Hólm, L. Isaksen, P. Kållberg, M. Köhler, M. Matricardi, A. P. McNally, B. M. Monge-Sanz, J.-J. Morcrette, B.-K. Park, C. Peubey, P. de Rosnay, C. Tavolato, J.-N. Thépaut, and F. Vitart. The ERA-Interim reanalysis: configuration and performance of the data assimilation system. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 137(656):553–597, apr 2011. ISSN 00359009. doi: 10.1002/qj.828. URL <http://doi.wiley.com/10.1002/qj.828>.
- A. del. Campo Parra Lara. Incendios de la cobertura vegetal en Colombia. *Recursos Naturales y Ambiente (CATIE)*, 2011. URL <http://www.sidalc.net/cgi-bin/wxis.exe/?IsisScript=orton.xis{&}B1=Buscar{&}formato=1{&}cantidad=50{&}expresion=VEGETAL>.
- Anne Ganteaume and Marielle Jappiot. What causes large fires in Southern France. *Forest Ecology and Management*, 294:76–85, apr 2013. ISSN 03781127. doi: 10.1016/j.foreco.2012.06.055. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112712003945>.
- A. Malcolm Gill and Grant Allan. Large fires, fire effects and the fire-regime concept. *International Journal of Wildland Fire*, 17(6):688–695, 2008.
- W. W. Hargrove, R. H. Gardner, M. G. Turner, W. H. Romme, and D. G. Despain. Simulating fire patterns in heterogeneous landscapes. *Ecological Modelling*, 135(2-3):243–263, 2000. ISSN 03043800. doi: 10.1016/S0304-3800(00)00368-9.
- A. Hernández Encinas, L. Hernández Encinas, S. Hoya White, A. Martín del Rey, and G. Rodríguez Sánchez. Simulation of forest fire fronts using cellular automata. *Advances in Engineering Software*, 38(6):372–378, 2007.
- Alfredo Huete and Chris Justice. Modis Vegetation Index Algorithm Theoretical Basis. *Environmental Sciences*, (Mod 13):129, 1999.

Alfredo Huete, Kamel Didan, Willem van Leeuwen, Tomoaki Miura, and Ed Glenn. MODIS Vegetation Indices. In *Land Remote Sensing and Global Environmental Change*, volume 11, page 873. 2011. URL https://www.researchgate.net/profile/AlfredoHuete/publication/226279239_MODIS_vegetation_indices/links/0c960536216d3e38e9000000.pdf.

M IDEAM, I IGAC, and P SINCHI. Capa Nacional de Cobertura de la Tierra (periodo 2005-2009): Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia escala 1: 100.000. *V1. 0*, 2012.

Christopher O. Justice, Louis Giglio, David Roy, Luigi Boschetti, Ivan Csiszar, Diane Davies, Stefania Korontzi, W Schroeder, Kelley O'Neal, and Jeff Morisette. MODIS-Derived Global Fire Products. In Bhaskar Ramachandran, Christopher O Justice, and Michael J Abrams, editors, *Land Remote Sensing and Global Environmental Change SE - 29*, volume 11 of *Remote Sensing and Digital Image Processing*, pages 661–679. Springer New York, 2011. ISBN 978-1-4419-6748-0. doi: 10.1007/978-1-4419-6749-7_29. URL http://dx.doi.org/10.1007/978-1-4419-6749-7_29.

Ioannis Karafyllidis and Adonios Thanailakis. A model for predicting forest fire spreading using cellular automata. *Ecological Modelling*, 99(1):87–97, 1997.

C Kummerow, W Barnes, and T Kozu. The tropical rainfall measuring mission (TRMM) sensor package. *of atmospheric and ...*, 1998. URL [http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426\(1998\)015%3C0809%3ATTRMM%3E2.0.CO%3B2](http://journals.ametsoc.org/doi/abs/10.1175/1520-0426(1998)015%3C0809%3ATTRMM%3E2.0.CO%3B2).

CA Lasso, JS Usma, F Trujillo, and B Rial. *Biodiversidad de la cuenca del Orinoco: bases científicas para la identificación de áreas prioritarias para la conservación y uso sostenible de la biodiversidad*. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt, WWF Colombia, Fundación Omacha, Fundación La Salle e Instituto de Estudios de la Orinoquia (Universidad Nacional de Colombia), Bogotá, D. C, 2010. ISBN 978-958-8554-13-6.

Rodman Linn, Judith Winterkamp, Carleton Edminster, Jonah J. Colman, and William S. Smith. Coupled influences of topography and wind on wildland fire behaviour. In *International Journal of Wildland Fire*, volume 16, pages 183–195, 2007.

- Y Liu, J Stanturf, and S Goodrick. Trends in global wildlifre potential in a changing climate. *Forest Ecology and Management*, 2009. URL <http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0378112709006148>.
- L Lledó, T Lead, and J Dubois. A study of wind speed variability using global reanalysis data. 2013. URL <http://www.awstruepower.com/assets/A-Study-of-Wind-Speed-Variability-Using-Global-Reanalysis-Data1.pdf>.
- B. D. Malamud. *Forest Fires: An Example of Self-Organized Critical Behavior*, 1998.
- Kevin McGarical and Barbara J. Marks. FRAGSTATS: Spatial Pattern Analysis Program for Quantifying Landscape Structure. *General Technical Report PNW-GTR-351. US . . .*, 97331(503):134, 1994.
- MEJ Newman. Power laws, Pareto distributions and Zipf's law. *Contemporary physics*, 2005. URL <http://www.tandfonline.com/doi/abs/10.1080/00107510500052444>.
- José Daniel Pabón-Caicedo. Los incendios de la cobertura vegetal en Colombia y su relación con la variabilidad climática y con el cambio climático. *Incendios de la cobertura vegetal en Colombia*, pages 145–165, 2011.
- PND and Compes. Política para el desarrollo integral de la Orinoquia: Altillanura - Fase I. Technical report, Consejo Nacional de Política Económica y Social, 2014.
- D. Riaño, J. A. Moreno Ruiz, D. Isidoro, and S. L. Ustin. Global spatial patterns and temporal trends of burned area between 1981 and 2000 using NOAA-NASA Pathfinder, jan 2007. ISSN 13541013. URL <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1365-2486.2006.01268.x>.
- Georges Rippstein, Germán Escobar, and Francisco Motta. *Agroecología y Biodiversidad de las Sabanas en los Llanos Orientales de Colombia*. 2001.
- Guido Van Rossum, Python Software Foundation, Unladen Swallow, Stackless Python, Python Software, and Foundation License. Python (programming language). *Flying*, pages 1–14, 2011.
- D. Roy and L. Boschetti. MODIS Collection 5 Burned Area Product MCD45. *User Guide*, Version 1.(September):1–12, 2008.

- Suranjana Saha, Shrinivas Moorthi, Xingren Wu, Jiande Wang, Sudhir Nadiga, Patrick Tripp, David Behringer, Yu-Tai Hou, Hui-Ya Chuang, Mark Iredell, Michael Ek, Jesse Meng, Rongqian Yang, Malaquias Pena Mendez, Huug Van Den Dool, Qin Zhang, Wanqiu Wang, Mingyue Chen, and Emily Becker. NCEP Climate Forecast System Version 2 (CFSv2) 6-hourly Products. jan 2011. doi: 10.5065/D61C1TXF.
- C Stephen Smyth. A representational framework for geographic modeling. *Spatial and temporal reasoning in geographic information systems*. Eds. Max J. Egenhofer, and Reginald G. Golledge, pages 191–213, 1998.
- Ramon Solano, Kamel Didan, Andree Jacobson, and Alfredo Huete. MODIS Vegetation Index User ' s Guide (MOD13 Series). *The University of Arizona*, 2010 (May):38, 2010.
- AL Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 1: Physical and quasi-physical models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009a. URL <http://www.publish.csiro.au/?paper=WF06143>.
- AL Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 2: Empirical and quasi-empirical models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009b. URL <http://www.publish.csiro.au/?paper=WF06142>.
- AL Sullivan. Wildland surface fire spread modelling, 1990–2007. 3: Simulation and mathematical analogue models. *International Journal of Wildland Fire*, 2009c. URL <http://www.publish.csiro.au/?paper=WF06144>.
- K. Thonicke, a. Spessa, I. C. Prentice, S. P. Harrison, L. Dong, and C. Carmona-Moreno. The influence of vegetation, fire spread and fire behaviour on biomass burning and trace gas emissions: results from a process-based model. *Biogeosciences*, 7(6):1991–2011, jun 2010. ISSN 1726-4189. doi: 10.5194/bg-7-1991-2010.
- Carol Welsch, Hilmer Swenson, Stephen A. Cota, Frank Deluccia, J. Mike Haas, Carl F. Schueler, Rodney M. Durham, John E. Clement, and Philip E. Ardanuy. VIIRS (Visible Infrared Imager Radiometer Suite): A Next-Generation Operational Environmental Sensor for NPOESS. *Geoscience and Remote Sensing Symposium, IGARSS'01(C):1020–1022*, 2001. ISSN 0780370317. doi: 10.1109/IGARSS.2001.976733.

- S Wolfram. *Cellular automata and complexity: collected papers*. 1994. URL <http://library.wolfram.com/infocenter/Books/3569/>.
- S. Yassemi, S. Dragičević, and M. Schmidt. Design and implementation of an integrated GIS-based cellular automata model to characterize forest fire behaviour. *Ecological Modelling*, 210(1-2):71–84, 2008.