

Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2

CO-T3812-002

Análisis de Riesgo de Línea Base
(Entregable 2)

Anexo 5: Evaluación del Riesgo por Incendios Forestales

Preparado para:



COLOMBIA
POTENCIA DE LA
VIDA



Ambiente



BID

Banco Interamericano
de Desarrollo

Enero de 2024

Consultor

INGENIAR CAD/CAE Ltda.
Carrera 19A # 84-14 OF 504
Edificio Torrenova
Tel. 57-1-691-6113
Fax 57-1-691-6102
Bogotá, D.C., Colombia
www.ingeniar-risk.com



Cardona, Omar-Darío; Bernal, Gabriel A.; Villegas, Claudia P.; González, Diana M.; Rincón, David F.; Molina, John F.; Grajales, Sthefania; Herrera, Sergio A.; Acosta, Mariana; Suárez, Dora C.; Pérez, Maria del Pilar; Marulanda, Paula M.; Marulanda, Mabel C. (2024). Estudio de Riesgo Climático para la Implementación de la E2050 de Colombia - Fase 2, Análisis de Riesgo de Línea Base – A.5 Evaluación del Riesgo por Incendios Forestales. Banco Interamericano de Desarrollo, Minambiente de Colombia.

TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	3
1 INTRODUCCIÓN	5
1.1 MODELO DE CÁLCULO	7
2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR INCENDIOS FORESTALES	8
2.1 CONDICIONES DE FAVORECEN EL DESARROLLO DE LOS INCENDIOS.....	9
2.1.1 VELOCIDAD Y DIRECCIÓN DEL VIENTO.....	9
2.1.2 HUMEDAD DE COMBUSTIBLE FINO	14
2.1.3 CONDICIONES TOPOGRÁFICAS	14
2.2 IGNICIÓN.....	16
2.3 PROPAGACIÓN	18
2.3.1 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS DE SUPERFICIE.....	20
2.3.2 VELOCIDAD DE PROPAGACIÓN DE INCENDIOS DE COPAS	22
2.3.3 DETERMINACIÓN DEL TIPO DE INCENDIO FORESTAL	23
2.3.4 VELOCIDAD GENERAL DE PROPAGACIÓN.....	25
2.3.5 DIRECCIONES DE PROPAGACIÓN DEL FUEGO.....	25
2.3.6 COMPORTAMIENTO DEL INCENDIO EN DIRECCIÓN DIFERENTE A LA MÁXIMA PROPAGACIÓN.....	26
2.3.7 PROPAGACIÓN DEL FUEGO DESDE UN SOLO PUNTO DE IGNICIÓN	27
2.3.8 SIMULACIÓN DE LA PROPAGACIÓN DEL INCENDIO	28
2.4 EXTINCIÓN	30
3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y LA VULNERABILIDAD	31
3.1 PORTAFOLIO DE ECOSISTEMAS	31
3.2 VALORACIÓN DE LOS SERVICIOS ECOSISTÉMICOS.....	33
3.3 MODELO DE COMBUSTIBLE.....	38
4 EVALUACIÓN DEL RIESGO	43
4.1 CURVA DE EXCEDENCIA DE PÉRDIDAS	44
4.2 MÉTRICAS DEL RIESGO.....	45
4.2.1 LA PÉRDIDA ANUAL ESPERADA (PAE)	46
4.2.2 LA PÉRDIDA MÁXIMA PROBABLE (PML)	46
4.2.3 LA PROBABILIDAD DE QUIEBRA (PQ)	46
4.2.4 OTRAS MÉTRICAS DEL RIESGO.....	46

4.3	RESULTADOS DE LA EVALUACIÓN	47
<u>5</u>	<u>REFERENCIAS.....</u>	<u>55</u>

1 INTRODUCCIÓN

Si bien los incendios de cobertura vegetal ocurren en todas partes del territorio colombiano, estos se concentran en la frontera agrícola, como una presión que el ser humano ejerce sobre el bosque. Lo anterior tiene que ver con el hecho que la ocurrencia natural de incendios en Colombia, es decir, incendios forestales de ignición espontánea, es prácticamente imposible por las condiciones generalmente de muy alta humedad de la vegetación. Esto significa que la absoluta mayoría de incendios en el país son detonados por la mano del hombre, como parte de quemas agrícolas, o para ganar terreno al bosque natural con el fin de extender la tierra productiva. Esta evaluación se centra en los municipios de Palermo (Huila), Orocué (Casanare), San Vicente del Caguán (Caquetá) y Cumaribo (Vichada).

Tabla 1. Municipios incluidos en la evaluación.

Departamento	Municipios
Huila	• Palermo
Casanare	• Orocué
Caquetá	• San Vicente del Caguán
Vichada	• Cumaribo

Dada la importancia que en este tema en particular tienen las áreas protegidas del territorio colombiano, las cuales no son necesariamente responsabilidad de los municipios, se incluyen en esta evaluación 86 áreas protegidas aledañas a los 4 municipios evaluados, con el fin de permitir una aplicación más amplia y una mayor participación de las entidades competentes en la protección del medio ambiente. La Figura 1 muestra un mapa de los municipios y las áreas protegidas que hacen parte de esta evaluación por incendios forestales. La Tabla 2 presenta el listado de áreas protegidas incluidas.

Tabla 2. Listado de áreas protegidas incluidas en la evaluación.

Nombre área protegida	ID PNN ¹	Nombre área protegida	ID PNN
Tinigua	45	El Triunfo	1496
La Serranía de Chiribiquete	57	El Tautaco	1527
Cordillera de los Picachos	73	Tomo Futuro	1535
El Tuparro	83	Maturín	1540
Sierra de la Macarena	129	La Chivera	1584
Nevado del Huila	137	Rancho Nuevo	1596
Villa Margarita	207	El Paraíso	1608
Finca Matesanto	240	Viflor	1609
De Cuatro Microcuencas del Municipio de Inirida	539	La Floresta	1624
Siberia Ceibas	563	Cerro Banderas Ojo Blanco	1627
Cerro Páramo de Miraflores Rigoberto Urriago	614	Villarosa	1669
Hato Venecia De Guanapalo	694	La Trigueña y Las Delicias	1670
La Bramadora	714	Pozo Azul	1752
La Travesada	715	Miralejos	1753
Matabrava	761	La Pareja 1	1770
Caño Viejo	788	La Pareja 2	1771
Santana	861	La Albania	1782
El Cachicamo	862	San Francisco	1820
El Gavilán	874	Birmania	1841
Tomovida - Trikuti	985	La Palmita	1879
Tomovida - Shambala	986	Lote Cinco	1887

¹ Identificador único del área dado por Parques Nacionales Naturales de Colombia

Nombre área protegida	ID PNN ¹	Nombre área protegida	ID PNN
Tomo Vida - El Dera	989	La Estrella	1898
Carimagua	1012	Lote #4	1901
Carimagua	1012	Tupuragua	1919
Jardín Botánico de la Macarena I	1094	Núcleo De Reservas Akae - Tucunare	1926
Jardín Botánico de la Macarena II	1095	Núcleo De Reservas Akae - Mata Tigre	1927
Amanecer en el Palmar 1	1230	Núcleo De Reservas Akae - La Holanda	1928
Amanecer en el Palmar 2	1249	Núcleo De Reservas Akae - El Hormiguero	1929
El Madroño	1263	Núcleo De Reservas Akae - La Pintada	1930
Serranía La Lindosa - Angosturas II	1386	Núcleo De Reservas Akae - Pescadero	1931
Corozito	1440	Núcleo De Reservas Akae - La Esmeralda	1932
Miraflores Picachos	1458	Núcleo De Reservas Akae - Akae	1933
Palomas	1464	Núcleo De Reservas Akae - Mataguarito	1934
Altamira	1472	Núcleo de Reservas Akae- Arecua	1937
Montana	1473	Núcleo de Reservas Akae- El Cocuy	1938
Gaviota-Caracolí	1476	Núcleo de Reservas Akae- La Habana	1939
La Palma	1478	Núcleo de Reservas Akae- Araguato	1940
Mata de Palma	1479	Núcleo de Reservas Akae- Santa Rosita	1941
La Fortuna	1480	Núcleo de Reservas Akae- Hato Grande	1942
El Boral	1481	Núcleo de Reservas Akae- El Perú	1943
El Jardín	1493	Alta Gracia	1953
La Constancia	1494	San Antonio	2013
La Virginia	1495	La Esperanza	2038

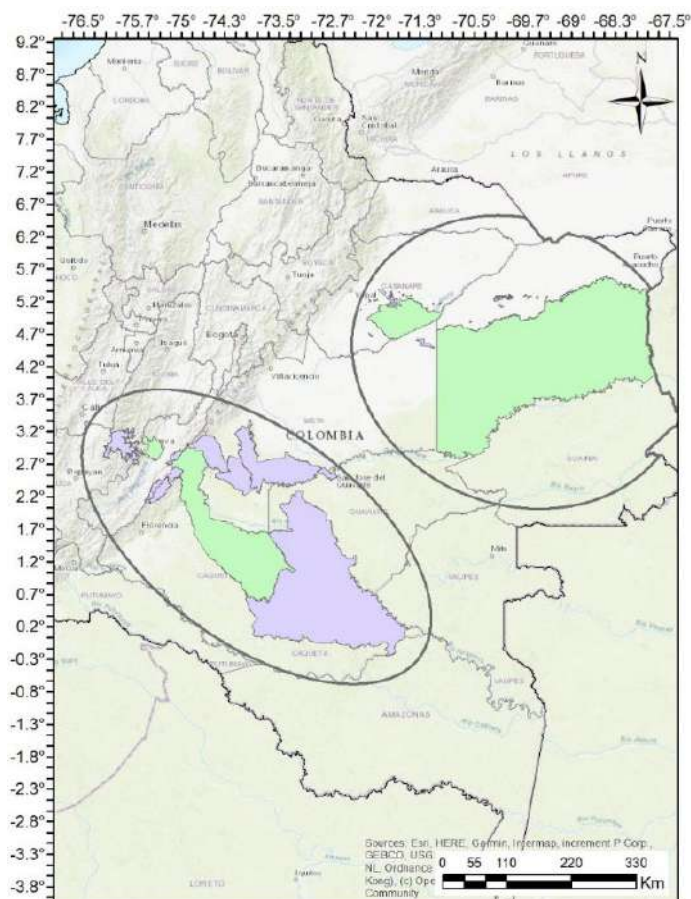


Figura 1. Mapa con los municipios (en verde) y áreas protegidas (en morado) incluidos.

1.1 Modelo de cálculo

Todo incendio forestal tiene un inicio, un desarrollo y un final. Las condiciones de inicio se describen en el modelo de ignición, en el cual se simula la ocurrencia de focos de fuego dentro del territorio de estudio. El desarrollo del incendio se simula por medio de un modelo de propagación, en el cual se determina la manera como la vegetación se consume a medida que pasa el tiempo, bajo la influencia de condiciones climáticas de humedad, temperatura y viento. Por último, la finalización del incendio se establece por medio de un modelo de extinción, que puede ser de extinción natural o inducida, y con el cual se busca representar las condiciones bajo las cuales la reacción en cadena asociada a la combustión no puede continuar más.

La vegetación quemada es susceptible a acarrear el fuego en función de su contenido de combustible. El modelo de combustible da cuenta de una serie de características, como: i) la carga combustible, que mide la cantidad de combustible por unidad de área; ii) la relación entre área superficial y volumen, que es una relación de forma y que modifica el tiempo que le toma al fuego secar y consumir los elementos del estrato por el cual se propaga; iii) la profundidad del lecho, que está asociada a la cantidad de combustible y a la altura que pueden alcanzar las llamas; iv) la humedad de extinción de la vegetación, muy importante a la hora de modelar el proceso de extinción, natural o inducida; y v) el contenido de calor, que determina en parte la facilidad con la cual la reacción puede propagarse a la vegetación circundante. La pérdida se determina a partir del flujo anual de servicios ecosistémicos prestado por la vegetación quemada, que deja entonces de percibirse por parte de la sociedad.

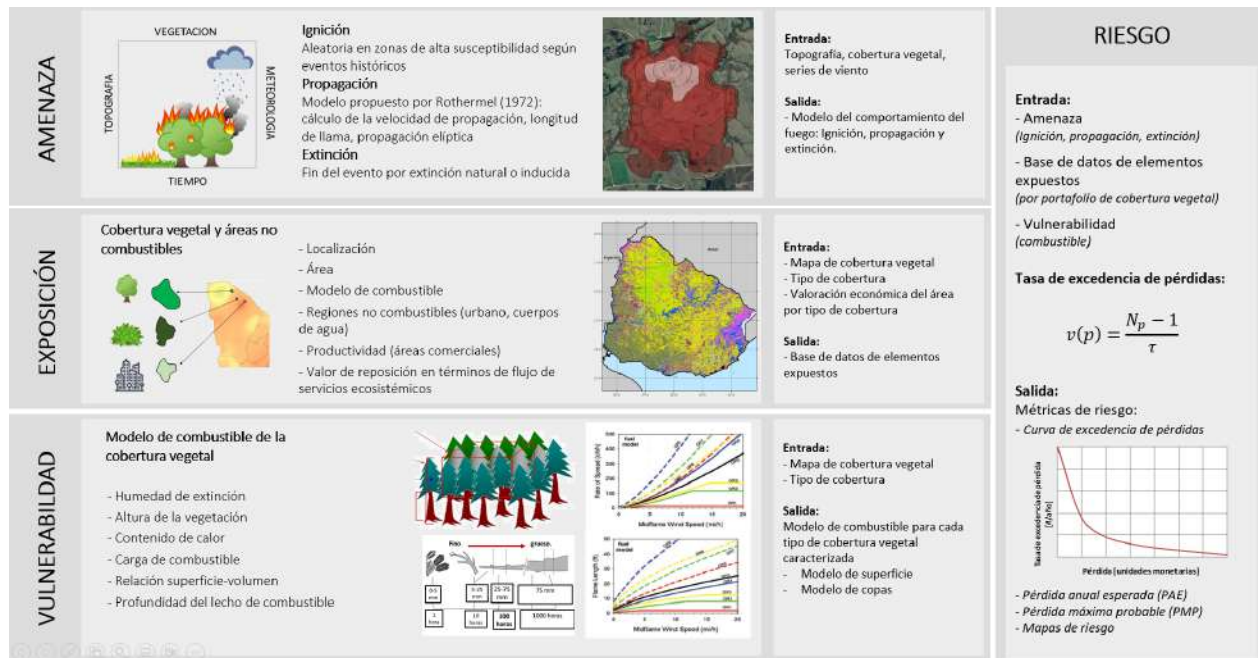


Figura 2. Esquema de componentes del modelo de riesgo por incendios forestales implementado.

2 MODELACIÓN DE LA AMENAZA POR INCENDIOS FORESTALES

La amenaza por incendio forestal se puede definir como una situación física (combustibles, clima, topografía) con potencial de generar daños a la propiedad o el medio ambiente asociados a la quema de vegetación (Scott & Reinhardt, 2001). La naturaleza de los incendios forestales, que pueden ser intensos, rápidos y destructivos, sugieren un potencial de daño cada vez que ocurren. Por tanto, evaluar la amenaza por incendio forestal es cuestión de evaluar el potencial de su ocurrencia, propagación y extinción.

Estos procesos no dependen de una sola característica del combustible o del ambiente, sino que resultan de ciertas combinaciones de combustible, clima y topografía que conducen al desarrollo y propagación continua del fuego. La metodología adoptada para la evaluación de la amenaza por incendios forestales está orientada a determinar estas combinaciones a través de la modelación sistemática y prospectiva de los procesos involucrados en un incendio forestal. La metodología se resume en los pasos descritos a continuación, ilustrados en la Figura 3:

- Establecer las condiciones iniciales que favorecen la ocurrencia de los incendios.
- Generar de forma aleatoria puntos de ignición en zonas de alta susceptibilidad.
- Propagar el incendio dependiendo del estrato de combustible que este consumiendo el fuego. Esto incluye estimar la tasa máxima de propagación potencial de incendio de superficie y copas para cada punto que conforma el perímetro de avance del incendio, así como calcular los cambios en la forma y tamaño del incendio respecto al tiempo.
- Simular la extinción del incendio cuando las condiciones propicias para la propagación no puedan mantenerse en el tiempo o se establezca la finalización predeterminada del evento según su duración.

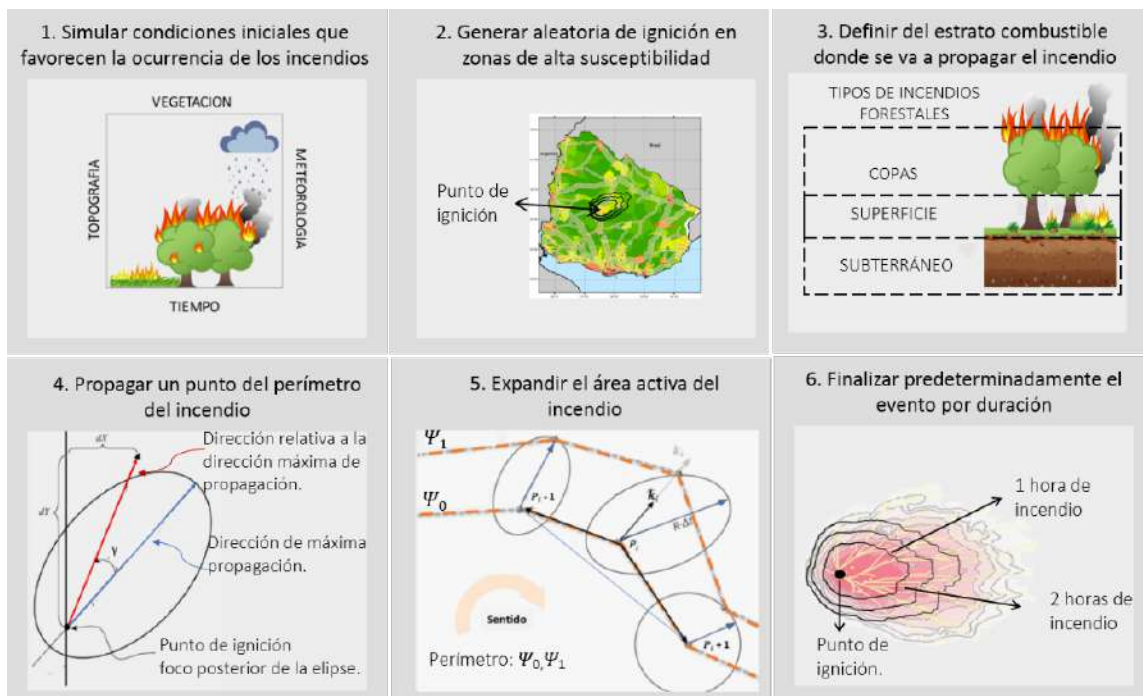


Figura 3. Metodología utilizada para la evaluación de la amenaza por incendios forestales.

2.1 Condiciones de favorecen el desarrollo de los incendios

Las condiciones iniciales consideradas en el modelo propuesto son: temperatura y humedad del aire, dirección y velocidad del viento, humedad de la vegetación y la topografía. Las dos primeras condiciones se determinan de la simulación climática inicial que determina el forzamiento meteorológico para la simulación. Las demás condiciones se resumen en esta sección.

2.1.1 Velocidad y dirección del viento

Para la evaluación de la amenaza se aplicará una metodología basada en eventos para crear un conjunto de condiciones de vientos fuertes en el país. El peligro asociado a los eventos de viento fuerte se define con el uso de un valor de frecuencia anual de ocurrencia y su severidad, caracterizada por un parámetro de intensidad calculado en cada localización geográfica específica. Por ejemplo, la intensidad para vientos fuertes puede ser la velocidad instantánea del viento o la velocidad de las ráfagas de 3 segundos, a 10 metros sobre la superficie (v_{10}). La evaluación del riesgo se basa en la frecuencia histórica de ocurrencia de eventos de viento fuerte y sus diversos grados de intensidad. Una vez definidos los parámetros que caracterizan la ocurrencia de dichos eventos, desde un punto de vista físico, es necesario generar un conjunto de eventos estocásticos a través de la simulación de una serie de eventos aleatorios. El conjunto de eventos aleatorios contiene todas las formas posibles en que el peligro relacionado con viento fuerte puede manifestarse en el territorio de análisis. Para cada evento, la amenaza se caracteriza, en cualquier punto del territorio, a través de la distribución de probabilidad de la intensidad, definida en términos de su valor esperado y su varianza.

La metodología propuesta utiliza un generador de eventos sintéticos de viento fuerte a partir de distribuciones paramétricas de probabilidad para definir conjuntos de datos históricos y estimar la probabilidad de ocurrencia de un determinado valor de velocidad y dirección del viento, incluso fuera del rango de observaciones históricas. La metodología toma cada mes del año hidrológico en un análisis separado, y encuentra la distribución de probabilidad que se ajusta mejor a los registros históricos haciendo uso de la estimación de densidad de kernel. Posteriormente, se generan números aleatorios para un determinado número de simulaciones, usando los parámetros de la distribución de probabilidad ajustada. Las series sintéticas de viento son luego utilizadas para generar mapas de amenaza integrada para diferentes periodos de retorno para toda el área de análisis. El esquema que describe el generador sintético de viento se presenta en la Figura 4. A continuación, se hace una descripción detallada de la metodología.

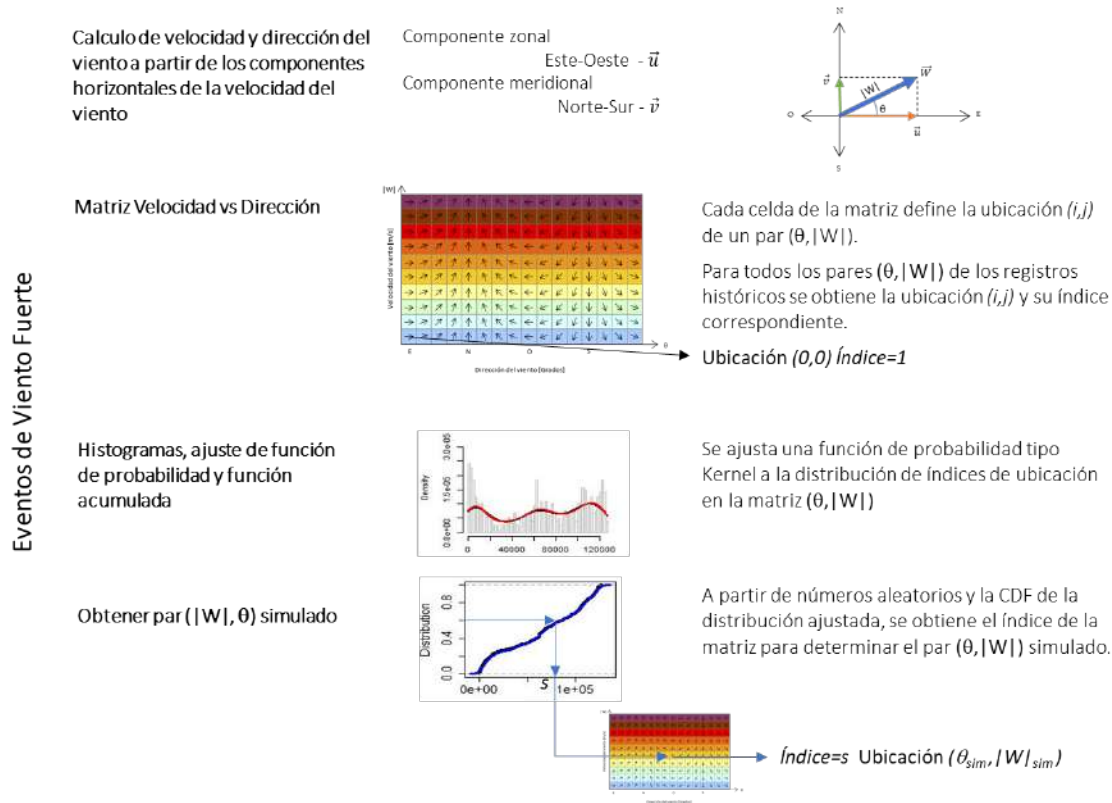
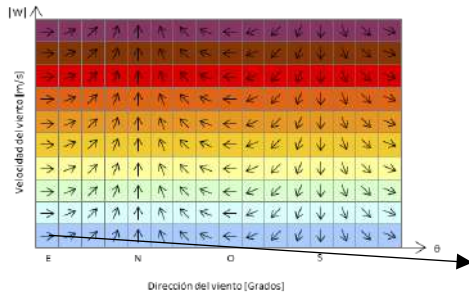


Figura 4. Metodología de simulación estocástica de variables de viento

La información requerida para el modelo de viento fuerte consiste en registros históricos de la componente horizontal del viento, esto es su dirección y velocidad. Esta información se puede obtener de fuentes oficiales que administran estaciones en tierra, que deben estar debidamente georeferenciadas. En caso de no contar con información medida en estaciones en superficie, la información de entrada para el modelo de amenaza de viento fuerte puede obtenerse de bases de datos con información resultado de reanálisis del clima global. La base de datos propuesta para este estudio es ERA5 del Copernicus Climate Change Service (2017). ERA5 es la 5ta generación del modelo generado por el centro de pronóstico europeo ECMWF (European Centre for Medium-Range Weather Forecasts). La información del modelo es libre para descarga y es publicada con resolución horizontal de $0.1^\circ \times 0.1^\circ$ en tierra y registros a escala horaria disponibles desde 1979 hasta el presente (con pocos meses de retraso antes de su publicación). Entre las variables disponibles están las componentes horizontales de la velocidad del viento medido a 10 m de la superficie y la velocidad de ráfaga. A partir de estas componentes, zonal y meridional, se puede estimar la magnitud y dirección del vector resultante del viento.

El primer paso es entonces obtener los componentes u y v del viento, si la información se obtiene de una base de datos tipo ERA5, o la magnitud y dirección del viento, si la información proviene de fuentes locales. Los vectores u y v del viento pueden transformarse en la magnitud y dirección del viento haciendo uso de funciones sencillas (la magnitud es la raíz cuadrada de la suma de los cuadrados de u y v , y la dirección del viento se calcula a partir de trigonometría). Es importante notar que la dirección del viento en meteorología indica desde donde viene el viento y se mide con respecto al eje Norte ($N=0^\circ$) e incrementa

en el sentido horario (E=90°, S=180° y O=270°). Una vez se tiene la información del par velocidad y dirección para cada registro histórico, se procede a obtener un índice de localización único para cada par, según su ubicación en una matriz que relaciona magnitudes de velocidad (eje vertical) con direcciones del viento (eje horizontal). Esta matriz se muestra en la Figura 5. La Figura 6 muestra el ejemplo del cálculo de frecuencia de pares dirección, velocidad del viento sobre la matriz de índices. Se pueden ver las zonas donde hay una mayor concentración de valores (barras más altas) que indican que para esa zona de dirección y viento se presentan valores más frecuentes que cuando hay menos concentración de valores (barras más bajas).



Cada celda de la matriz define la ubicación (i,j) de un par $(\theta, |W|)$.

Para todos los pares $(\theta, |W|)$ de los registros históricos se obtiene la ubicación (i,j) y su índice correspondiente.

Ubicación $(0,0)$ Índice=1

Ubicación (i,j) Índice= $i*j$

Figura 5. Matriz de índices i,j para pares $(\theta, |W|)$

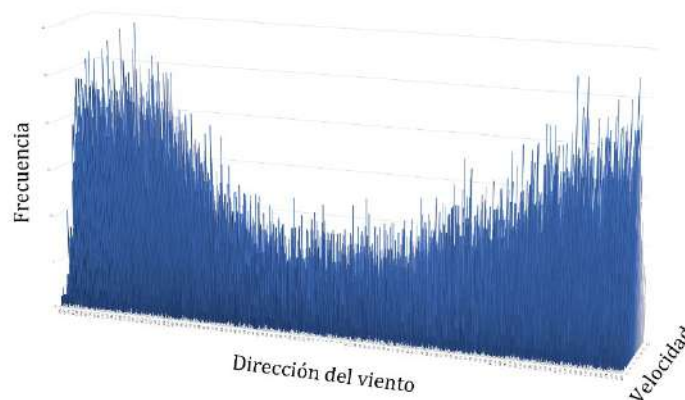


Figura 6. Matriz de frecuencia para registros de viento del dataset ERA5 para una ubicación ejemplo.

Como cada celda del par dirección y velocidad tienen un índice asociado a la ubicación dentro de la matriz, se puede obtener un histograma de valores que relacione la frecuencia de ocurrencia de ese índice de ubicación. Sobre este histograma se estima la distribución kernel, que es lo mismo que su media móvil. La función acumulada de la función kernel ajustada se utiliza para generar simulaciones aleatorias del índice de localización dentro de la matriz. Este procedimiento se puede hacer a escala anual (ubicando en la matriz todos los registros históricos) o filtrando la información por mes o grupo de días. La Figura 7 muestra el ejemplo de este procedimiento para dos meses (febrero a la izquierda y julio a la derecha) del histograma de registros históricos (izquierda), la distribución kernel ajustada a este histograma (curva negra), el histograma de registros simulados (derecha) y la curva kernel ajustada a los valores simulados.

(curva roja). También se muestra el ajuste de la función acumulada de distribución (gráfica abajo) que compara la muestra de registros históricos (curva negra) y de registros simulados (curva azul). Este ejemplo muestra el buen ajuste que se logra con las distribuciones kernel de los registros históricos y las simulaciones.

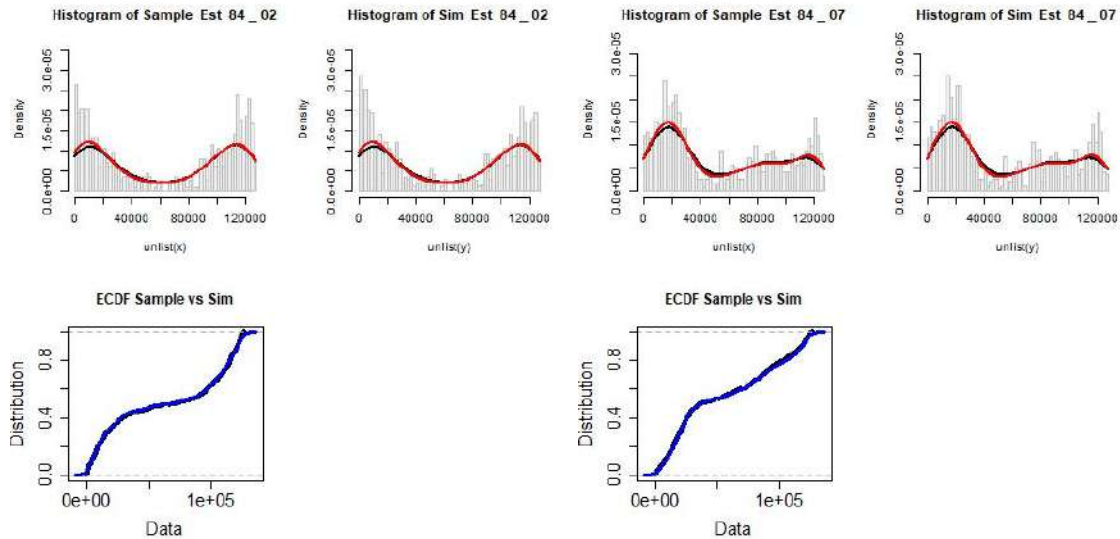
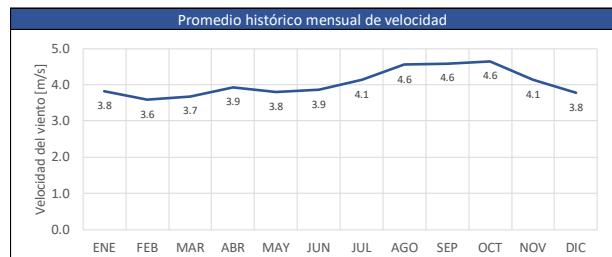
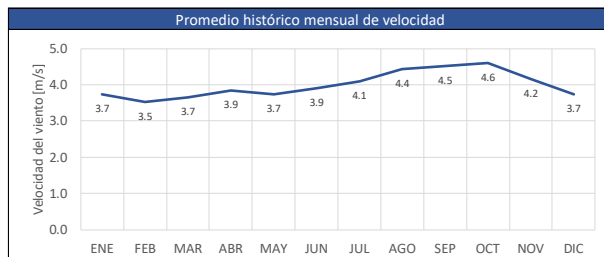
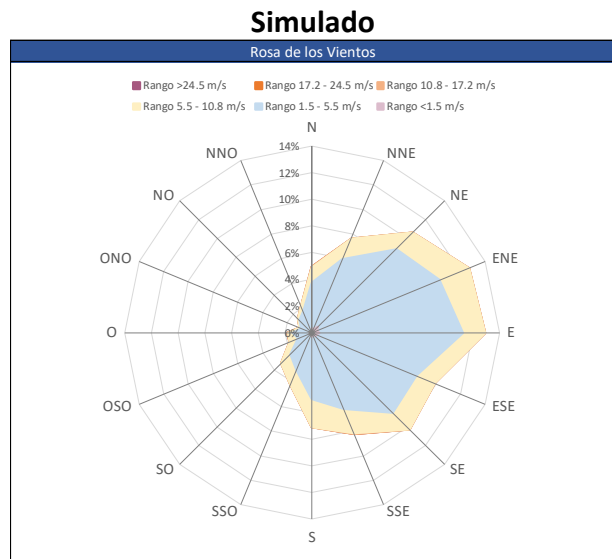
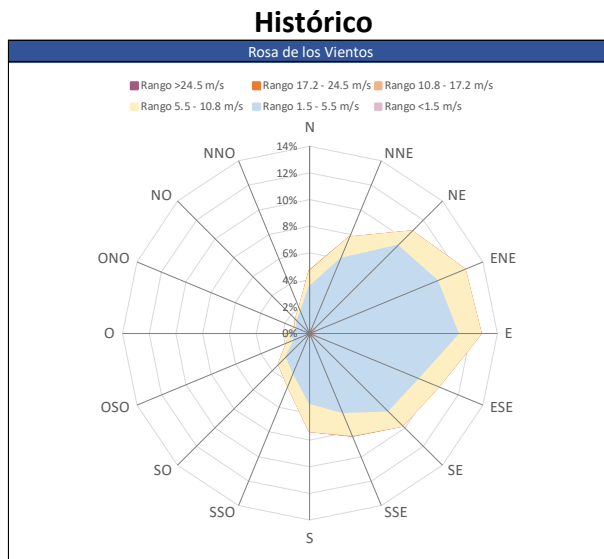


Figura 7. Ejemplo de histogramas de índice de localización, ajuste de función kernel y función acumulada de la distribución para dos meses diferentes en una estación virtual.

Luego de obtener los índices de localización dentro de la matriz, se puede volver a la matriz original y obtener los valores de dirección y velocidad para cada uno de los n valores simulados. Con esto, se obtienen n pares nuevos de parámetros que definen las condiciones de viento en la ubicación de interés. Una vez se obtiene los parámetros que definen el viento, se puede hacer un análisis estadístico para verificar, en la ubicación de interés, cómo se compara la media de viento en los registros históricos y la media de viento en los registros simulados. Un ejemplo de este análisis estadístico se muestra en la Figura 8, que incluye la rosa de los vientos, que indica para diferentes rangos de velocidad, la dirección predominante de donde sopla el viento. También se incluye la variación mensual de la velocidad del viento, un análisis estadístico diario, que incluye el porcentaje de tiempo en calma (velocidad menor a 1.5 m/s) y porcentaje de tiempo más que fuerte (velocidad mayor a 17 m/s). La gráfica de caja y bigotes muestra la dispersión del valor de velocidad medida, que para el caso del dataset ERA5 es un dato cada hora.



Análisis Estadístico Diario			
Métrica	Velocidad [m/s]	Dirección [°]	Fecha
Máximo	10.99	259	26/07/2016 00:00
Moda	3	75	
Promedio	4.0		

Análisis Estadístico Diario			
Métrica	Velocidad [m/s]	Dirección [°]	Fecha
Máximo	11.00	259	00/01/1900 00:00
Moda	3	75	
Promedio	4.0		

% tiempo en calma	4.30%	Velocidad menor a 1.5 m/s, todas las direcciones
% tiempo viento más que fuerte	0.00%	Velocidad mayor a 17.1 m/s, todas las direcciones

% tiempo en calma	4.45%	Velocidad menor a 1.5 m/s, todas las direcciones
% tiempo viento más que fuerte	0.00%	Velocidad mayor a 17.1 m/s, todas las direcciones

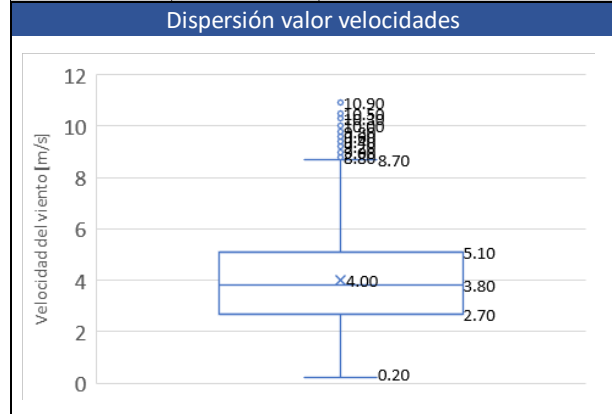
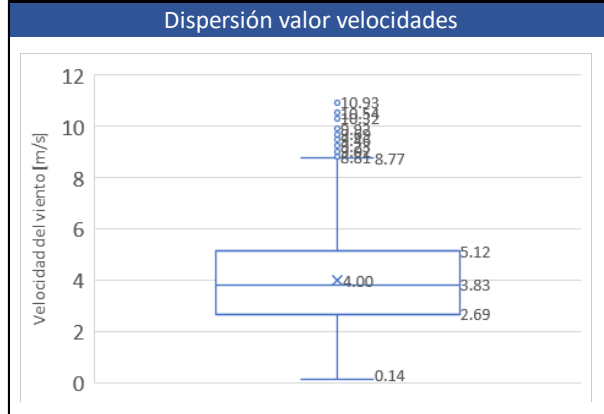


Figura 8. Comparación entre la media de viento de los registros históricos (izquierda) vs. Los parámetros de viento simulado estocásticamente (derecha).

2.1.2 Humedad de combustible fino

Esta variable representa el contenido de humedad de combustibles finos, madera muerta y hojarasca sobre el suelo del bosque (Dowdy, 2009). La cantidad de humedad que se encuentra en el combustible es un factor clave para determinar el potencial de propagación de un incendio, por esta razón, es muy importante poder estimarla apropiadamente (Sharples et al., 2009). Diferentes ecuaciones han sido creadas mediante observaciones en campo y en condiciones de laboratorio por diferentes autores, que se aplican en este trabajo, de acuerdo con las limitaciones propias que cada autor indica de su correspondiente ecuación (ver Tabla 3).

Tabla 3. Ecuaciones para el cálculo de la humedad de combustible fino.

Referencia	Ecuación	
Pech (1968)	si $Rh \leq 40$, $m = 0.136Rh^{1.07} + 0.00059 * \exp^{0.3Rh}$	1
	si $40 < Rh < 75$, $m = 0.2772Rh - 4.013 + 0.18 * (21.1 - T) * (1 - 54.6 * \exp^{-0.1Rh})$	
	si $Rh \geq 75$, $m = 0.618Rh^{0.753} + 0.18 * (21.1 - T) * \text{abs}(1 - 54.6^{-0.1Rh}) + 0.000454 * \exp^{0.1Rh}$	
Simard (1968)	si $Rh \geq 50$, $m = 21.06 - 0.4944Rh + 0.005565Rh^2 - 0.00063RhT$	2
	si $50 > Rh \geq 10$ $m = 1.76 + 0.1601Rh - 0.0266T$	
	si $Rh < 10$ $m = 0.03 + 0.2626Rh - 0.00104RhT$	
Van Wagner (1972)	$m = 0.942Rh^{0.679} + 0.000499 * \exp^{0.1Rh} + 0.18 * (21.1 - T) * (1 - \exp^{-0.115Rh})$	3
Anderson (1964)	$m = 1.651Rh^{0.493} + 0.001972 * \exp^{0.092Rh} + 0.101 * (23.9 - T)$	4
Pook (1993)	$m = 5.658 + 0.04651Rh + \frac{0.0003151Rh^3}{T} - 0.1854T^{0.77}$	5

2.1.3 Condiciones topográficas

La topografía de los municipios seleccionados (Orocué, Palermo, San Vicente del Caguán y Cumaribo) es representada a través de la inclinación y aspecto de la pendiente. En la Figura 9 se muestra la inclinación del terreno respecto a la horizontal (eje z) y en la Figura 10 se muestra la dirección de máxima pendiente del terreno sobre el plano horizontal (plano xy) conocida como aspecto.

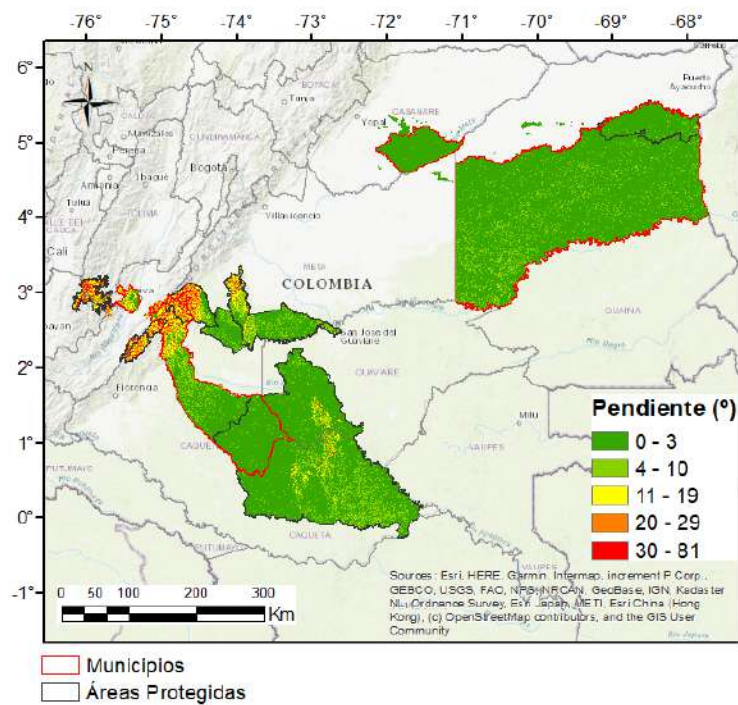


Figura 9. Inclínación de la pendiente en grados. Elaboración propia a partir de ASTER GDEM (2019).

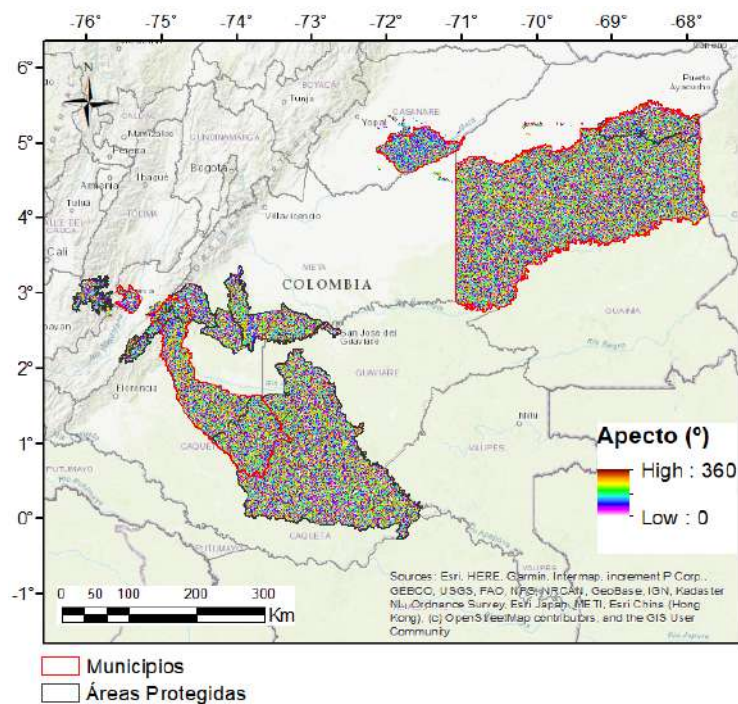


Figura 10. Aspecto en grados. Elaboración propia a partir de ASTER GDEM (2019).

2.2 Ignición

Para modelar riesgo por incendios forestales, primero deben establecerse las ubicaciones y tasas de ocurrencia de los focos de ignición. Un foco de ignición es un punto geográfico en el cual se inicia el fuego, y del cual puede, o no, según las condiciones meteorológicas y de combustible, propagarse un incendio. Las probabilidades de generación de focos de fuego fueron calculadas teniendo en cuenta la siguiente información:

- Estadísticas de incendios de cobertura vegetal e indicadores de área quemadas que reporta el IDEAM anualmente, mediante gráficas de los valores anuales nacionales y por departamento de la cobertura afectada y la variación desde el año 2002 a 2022. Se puede consultar en el siguiente link: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/bosques-y-recurso-forestal>
- El sistema de información sobre incendios para gestión de recursos (FIRMS) de la NASA, el cual publica datos de incendios activos dentro de las 3 horas posteriores a la observación satelital de MODIS. Se tomó la información histórica de puntos calientes desde el año 2016 hasta el año 2023. Disponible en el link: <https://earthdata.nasa.gov/earth-observation-data/near-real-time/firms>

La Figura 11 permite comprender la correlación entre los incendios ocurridos de 2020 a 2023 (según datos de MODIS) y la expansión de frontera agrícola. Esta conexión evidencia la fuerte relación entre los incendios de cobertura vegetal y la actividad agrícola, destacando la práctica común de quemar biomasa en parcelas o terrenos para limpiar y preparar el suelo para la siembra, lo cual en ocasiones puede derivar en un incendio forestal sin control. Se asume en este trabajo que las zonas de expansión de la frontera agrícola son más propensas a sufrir incendios, ya que existe presión para despejar el terreno natural mediante quemas controladas (como se puede evidenciar en la Figura 11). Estas zonas de expansión son consideradas las regiones *susceptibles* sobre las cuales se generan *puntos de ignición* aleatoriamente ubicados, buscando representar la naturaleza antrópica del origen del foco de fuego. La delimitación de estas regiones susceptibles para la zona de estudio se presenta también en la Figura 11.

La generación estocástica de los focos de fuego requiere la determinación de tasas de ocurrencia de incendios forestales por municipio y año. Sin embargo, la información obtenida de IDEAM (2023) está a nivel de departamento. Aunque brinda una visión general de cómo y cuándo ocurren los incendios, resulta limitada para los propósitos de este estudio. Por lo tanto, se optó por determinar las tasas promedio de ocurrencia de incendios basándose en los datos de puntos calientes de MODIS, con un intervalo de confianza del 95%². Estos cálculos se realizaron para el periodo comprendido entre 2016 y 2023, centrándose específicamente en las ocurrencias dentro de los municipios y áreas protegidas analizadas como se muestra en la Figura 12.

² La NASA califica los puntos calientes derivados de observación de MODIS con un nivel de confianza de la observación. Un nivel alto, del 95%, permite filtrar quemas menores, no asociadas a incendios forestales.

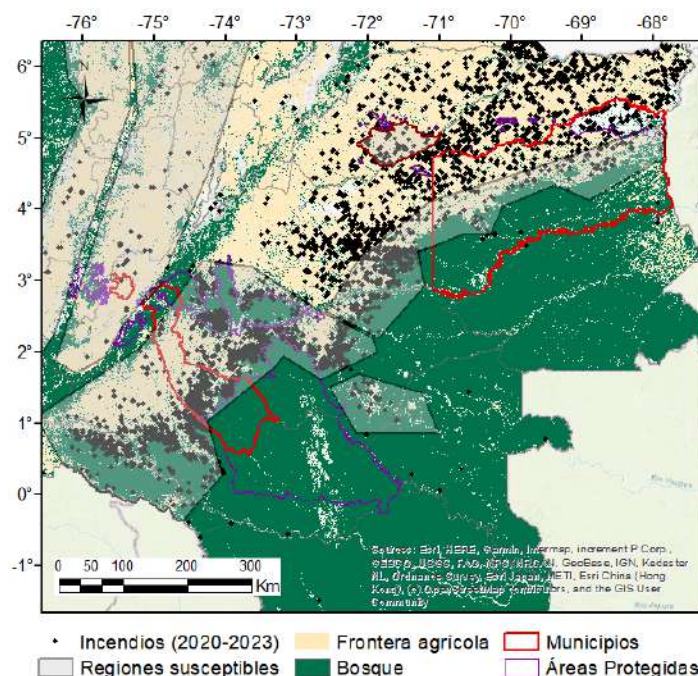


Figura 11. Regiones de susceptibilidad modeladas y ocurrencia de incendios desde el 2020 al 2023.

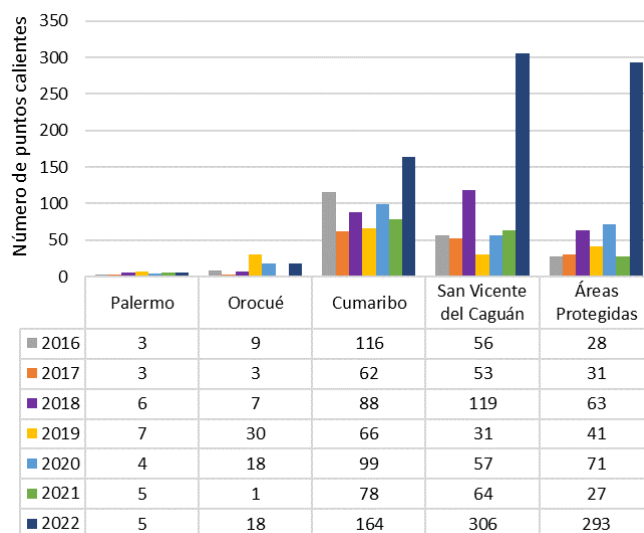


Figura 12. Número de puntos calientes (posibles incendios) por año desde el 2016 al 2023. Tomado de EARTHDATA NASA, 2023.

Como se observa en la Figura 13, el número total de incendios al año se ha incrementado en el 2022 de forma significativa en comparación con los años anteriores en San Vicente del Caguán y Cumaribo, mientras que, en Palermo y Orocué, el número anual de incendios es más o menos similar desde 2016. Buscando una condición más crítica, se asume en este trabajo la tasa anual de ocurrencia como igual al valor máximo de cada municipio, que no necesariamente se reporta para un mismo año.

2.3 Propagación

Una vez iniciado el incendio, este se propaga dependiendo del estrato (capa horizontal de materiales de características similares) de combustible que el fuego está consumiendo. La variabilidad espacial y temporal de las condiciones ambientales que favorecen la ocurrencia de un incendio forestal permite que se reconozcan 3 tipos: *subterráneo*, *superficie* y *copas* (Scott, 2007). Un incendio subterráneo consume cualquier tipo de material combustible (materia orgánica y raíces) que se encuentre situado inmediatamente debajo del suelo. Un incendio de superficie es aquel que arde en la capa de combustible de la superficie, que se encuentra por encima del suelo y por debajo la copa de los árboles. Un incendio de copas quema el combustible del dosel del bosque (Malen, 2009). En la Figura 13 se muestra los tipos de incendios dependiendo del combustible disponible por estrato.

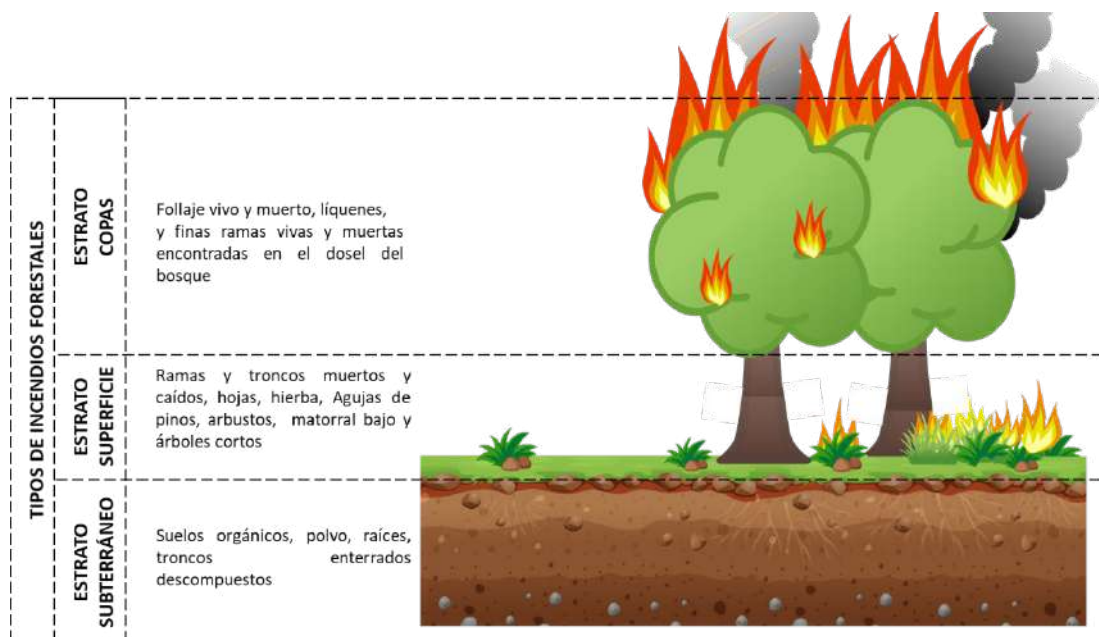


Figura 13. Tipo de incendios forestales según el estrato de combustible en el que se desarrolla.

El incendio subterráneo no será considerado dentro del análisis al ser poco frecuente y requerir condiciones muy específicas para su desarrollo.

La propagación inicia a partir de un punto de ignición, y a medida que avanza el tiempo, es convertido en un área de incendio activa contenida por un polígono cerrado. El perímetro de este polígono se llama camino y consiste en una lista de nodos o puntos unidos implícitamente como vértices (Tirailleur, 2012). Para modelar la expansión del área activa del incendio es necesario recorrer punto por punto del perímetro y determinar el comportamiento potencial del incendio de superficie y vincularlo con el de copas a través del cálculo de la velocidad en dirección de máxima propagación propuesto por Rothermel (1972).

La dirección de desplazamiento de un punto será perpendicular a una línea formada por sus vecinos más próximos, el anterior y el posterior. Esta dirección no necesariamente coincide con la dirección de máxima propagación, lo que hace necesario calcular la velocidad de propagación en dirección del desplazamiento del punto. Una vez calculada esta velocidad, es multiplicada por el paso de tiempo de la modelación para

establecer la distancia de desplazamiento del punto. En la simulación, el movimiento es aplicado a todos los nodos al mismo tiempo después de su cálculo y antes del siguiente paso de tiempo de simulación. Una descripción más detallada de cómo se simula la expansión del incendio se presenta en la Sección 2.3.8. A continuación, en la Figura 14 se presenta un esquema del procedimiento matemático que debe realizarse en cada uno de los puntos del perímetro.

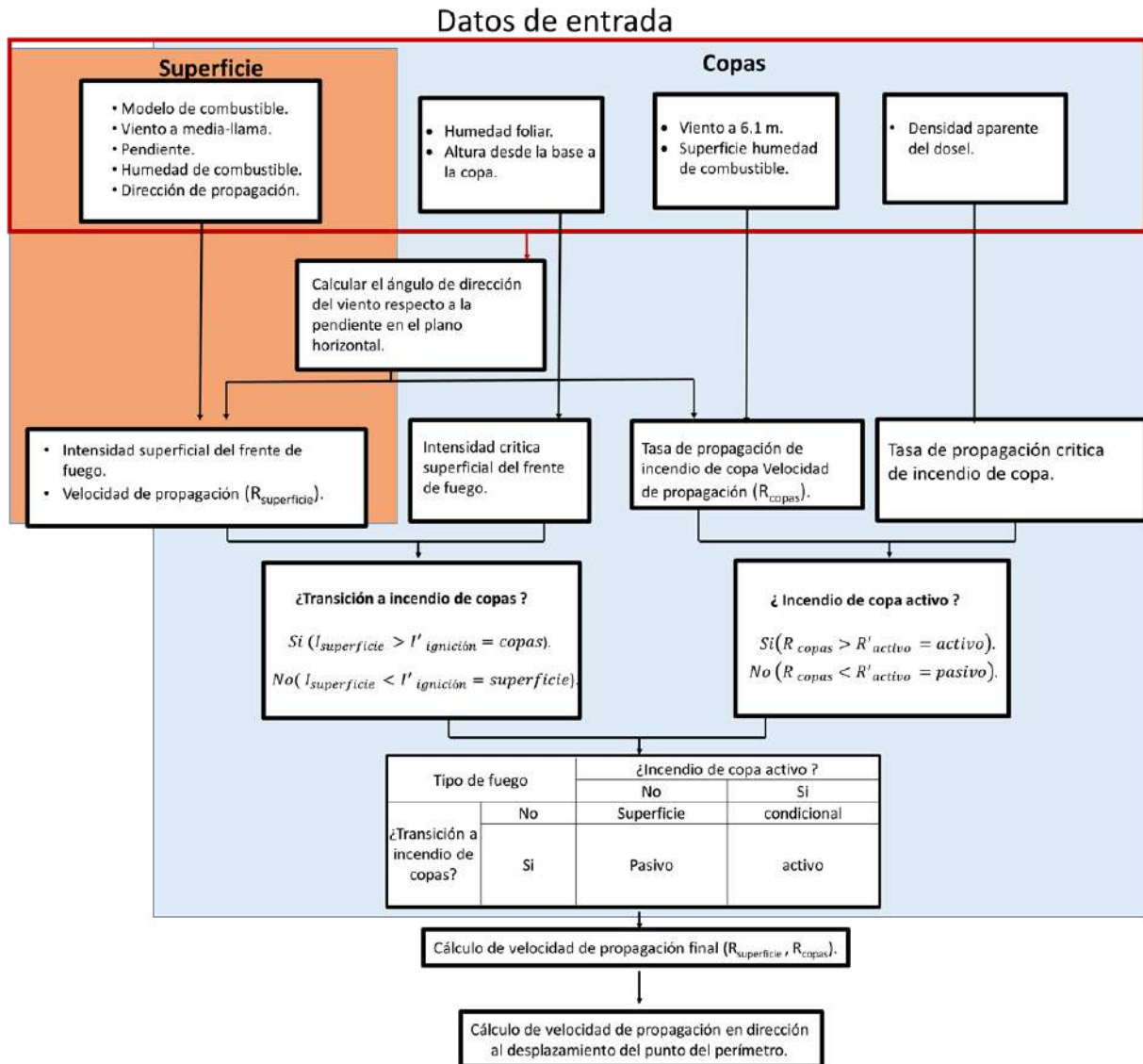


Figura 14. Esquema del procedimiento matemático que debe realizarse en cada uno de los puntos del perímetro.

Modelar la propagación del fuego espacial y temporalmente es uno de los objetivos principales de la evaluación de la amenaza ante un incendio forestal, por consiguiente, en las siguientes secciones se revisarán los conceptos y modelos matemáticos usados dentro de la metodología.

2.3.1 Velocidad de propagación de incendios de superficie

La modelación de la propagación del incendio de superficie está fundamentada en el modelo semi-empírico de Rothermel (1972) y ajustado por Albini (1976). El principio de conservación de energía es aplicado a un volumen unitario de combustible que se encuentra delante de un incendio que avanza constantemente sobre un lecho de combustible homogéneo (Rothermel, 1972). La tasa de propagación es entonces una relación entre el flujo de calor recibido de la fuente y el calor requerido para la ignición del combustible (Zárate, 2004). La representación matemática de la tasa de propagación no ha sido resuelta analíticamente, por lo cual se usan métodos experimentales para establecer los términos desconocidos, así como simplificar el modelo con los siguientes supuestos (Andrews, 2018):

- Se asume un frente de llama lineal y se calcula la velocidad de propagación de un incendio con o sin viento o pendiente.
- El modelo es para el fuego ardiendo cuesta arriba con el viento, a través de un combustible uniforme.
- El combustible es una mezcla de varias clases de tamaño de combustible vivo y muerto, con una sola profundidad representativa.
- El modelo requiere la presencia de combustible muerto fino, que es el componente del combustible más influyente.
- El modelo solo considera combustible que se encuentre en el estrato de superficie hasta aproximadamente 2 metros sobre suelo; el combustible de superficie puede incluir arbustos y árboles pequeños.
- El modelo fue diseñado para utilizar datos de combustible, humedad y topografía que deben estar disponibles antes de que se simule la ignición.
- El modelo no es aplicable para: fuego de copas en árboles, combustión ardiente (combustión sin llamas que es más lenta y presenta temperaturas más bajas), combustión de material después de que ha pasado el frente del incendio.
- El modelo de Rothermel puede ser usado en conjunto con otros modelos (para determinar la longitud de la llama, humedad del combustible, combustible, viento, dirección de propagación, etc.).

La Ecuación 91 representa la tasa de propagación del frente del fuego para vientos ascendentes en la dirección de la pendiente. El numerador simboliza la cantidad de calor transferida al combustible, mientras que el denominador representa la cantidad de calor requerida para llevar este combustible a la temperatura de ignición (Malen, 2009). La definición de los componentes de la ecuación de propagación de incendios de superficie del modelo de Rothermel se presentan en la Tabla 4.

$$R = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \epsilon Q_{ig}} \quad 6$$

Tabla 4. Definición de los componentes de la ecuación de propagación de incendio de superficie del modelo de Rothermel.
Fuente: (Zárate, 2004)

Nombre	Símbolo	Unidades	Explicación
Velocidad de propagación	R	(m/min)	Frente llameante de un fuego superficial.
Intensidad de la reacción	I_R	(KJ/min/m ²)	Tasa de liberación de energía por unidad de área de frente de fuego.
Relación de flujo de propagación	ξ	Fracción	Proporción de intensidad de reacción que calienta las partículas de combustible adyacentes a la ignición (sin viento).
Factor de viento	Φ_w	Fracción	Multiplicador adimensional que representa el efecto del viento en el aumento de la relación de flujo de propagación.
Factor de pendiente	Φ_s	Fracción	Multiplicador adimensional que representa el efecto de pendiente en el aumento de la relación de flujo de propagación.
Densidad aparente	ρ_b	Kg/m ³	Cantidad de combustible seco al horno por metro cúbico de lecho de combustible.
Número de calentamiento efectivo	ε	Fracción	Proporción de una partícula de combustible que se calienta a la temperatura de ignición en el momento en que comienza la combustión en llamas.
Calor de preignición	Q_{ig}	KJ/Kg	Cantidad de calor requerida para encender un kilogramo de combustible.
Flujo de propagación sin-viento, sin-pendiente	$I_R \xi$	(KJ/min/m ²)	Tasa de liberación de calor de un incendio al combustible por delante del fuego, sin viento ni pendiente.
$(1+\Phi_w+\Phi_s)$	-	Adimensional	Aumento del flujo de propagación sin viento y sin pendiente debido al viento y la pendiente.
Fuente de calor	$I_R \xi (1+\Phi_w+\Phi_s)$	(KJ/min/m)	Flujo de propagación.
Calor requerido para la ignición del combustible	$\rho_b \varepsilon Q_{ig}$	KJ/m ³	-
Tasa de propagación sin-viento, sin-pendiente	$I_R \xi / \rho_b \varepsilon Q_{ig}$	(m/min)	-

La determinación de los componentes presentados deriva una serie de cálculos adicionales que fueron implementados en el modelo, los cuales se muestran en la Figura 15 en forma de diagrama de flujo. Para el modelo Rothermel los parámetros intrínsecos a las características del lecho de combustible son asignados a modelos de combustible estandarizados (Anderson, 1982; Scott & Burgan, 2005).

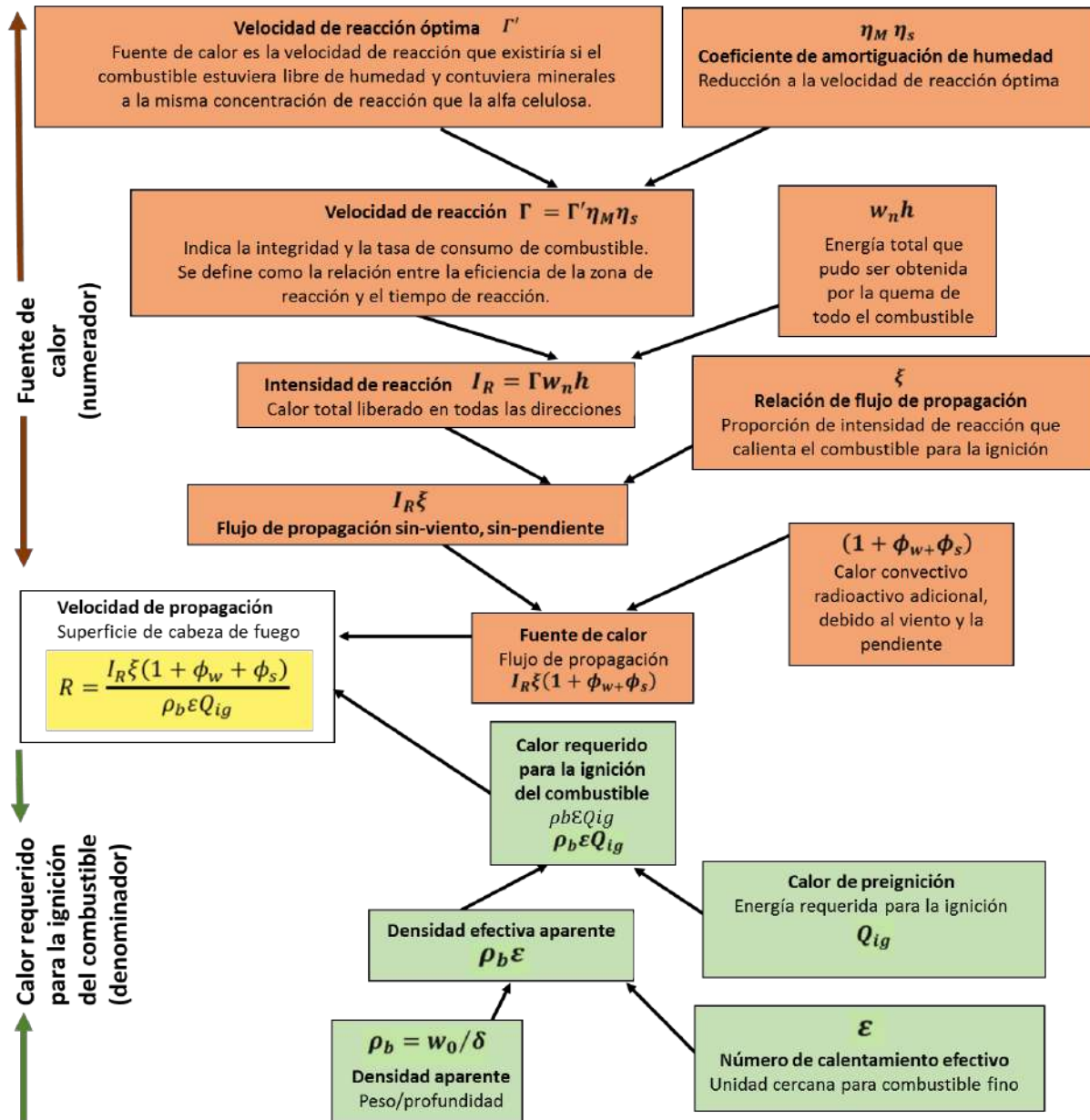


Figura 15. Diagrama de flujo del cálculo de velocidad de propagación del modelo de Rothermel. Fuente: Este esquema fue adaptado de (Andrews, 2018)

2.3.2 Velocidad de propagación de incendios de copas

Un incendio de superficie puede hacer la transición a algún tipo de incendio de copas (pasivo, activo o condicional), dependiendo de la intensidad del incendio de superficie y las características propias de las copas de los árboles (Seli et al., 2019). Un *incendio pasivo de copas* es aquel que se desarrolla principalmente como un incendio de superficie y que a medida que avanza enciende intermitentemente las ramas y follaje de pequeños grupos de árboles, pero no puede mantener una llama sólida en la copa por mucho tiempo (Wooten, 2001). Por otro lado, un *incendio activo de copas* se entiende como un

incendio en donde todo el complejo de combustible está envuelto en llamas, es decir, el dosel de los árboles es consumido como una unidad, pero el movimiento del fuego a través de las copas de los árboles sigue dependiendo del calor liberado por el combustible de superficie para una propagación continua. Existe un tipo de fuego hipotético en el que se cumplen las condiciones requeridas para el fuego de copas activo sostenido, pero no las condiciones requeridas para su ignición. Otro tipo depende del desarrollo activo del incendio de copas y de las condiciones precedentes (si se ha iniciado o no el incendio) del entorno y es considerado como un *incendio condicional* (Scott, 2007).

La metodología para evaluar la amenaza de incendios de copas sigue los lineamientos propuestos por Scott & Reinhardt (2001), quienes proponen evaluar el potencial del incendio de copas vinculándolo con el modelo de superficie, así como generar una transición entre ambos. Rothermel (1991) relacionó, a través de una regresión lineal, las velocidades observadas de propagación de incendios de copas con su modelo de superficie utilizando los parámetros del modelo de combustible de superficie FM10 (carga alta de ramas y tallos bajo arbolado) y considerando la velocidad del viento a media llama como el 40% de la velocidad observada a 6,1 m (Anderson, 1982; Rothermel, 1991; Scott & Reinhardt, 2001). La correlación se muestra a continuación:

$$R = 3.34 \left(\frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \right)_{FM10} \quad 7$$

2.3.3 Determinación del tipo de incendio forestal

El inicio del incendio de copas se da cuando el follaje de las copas de los árboles pierde su humedad y es llevado a temperatura de ignición debido al calor generado por el fuego de superficie. La intensidad y velocidad crítica del frente del fuego a la cual un incendio de copas se inicia ($I'_{inicial}$) se muestran en las Ecuaciones 93 a 95 (Wagner, 1977).

$$I_{superficie} = I_R \left(\frac{384}{\sigma} \right) \quad I'_{inicial} = \left(\frac{CBH(460 + 25.9FMC)}{100} \right)^{\frac{3}{2}} \quad 8$$

$$R_{superficie} = \frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \quad R'_{inicial} = \frac{60I'_{inicio}}{HPA} \quad 9$$

$$R_{copas} = 3.34 \left(\frac{I_R \xi (1 + \Phi_w + \Phi_s)}{\rho_b \varepsilon Q_{ig}} \right)_{FM10} \quad R'_{activo} = \frac{3.0}{CBD} \quad 10$$

Tabla 5. Parámetros de entrada para las ecuaciones de copas.

Variable	Descripción
CBH	Altura desde la base hasta el inicio de la copa del árbol
HPA	Calor liberado por unidad de área
FMC	Contenido de humedad foliar
CBD	Densidad aparente del dosel
CFL	Carga de combustible de copas
$I'_{inicial}$	Intensidad de la línea de fuego crítica para iniciar un incendio de copas

Variable	Descripción
$I_{superficie}$	Intensidad del fuego superficial
I_R	Intensidad de la reacción
$R_{superficie}$	Velocidad de propagación para un incendio de superficie
ξ	Relación de flujo de propagación
ϕ_w	Coefficiente del viento
ϕ_s	Factor de la pendiente
ρ_b	Densidad aparente del lecho de combustible seco
ϵ	Número de calentamiento efectivo
Q_{ig}	Calor de preignición
R	Velocidad de propagación hacia adelante
$R'_{inicial}$	Velocidad de propagación crítica para iniciar un incendio de copas
R'_{activo}	Velocidad de propagación crítica para mantener un incendio de copas activo
σ	Relación superficie / volumen de las partículas de combustible

Una vez se inicia el incendio de copas, este puede pasar de pasivo a activo si una tasa crítica de flujo de masa horizontal de combustible en la zona de llamas es superada. Esto significa que el dosel de los árboles debe contar con una densidad suficiente para que se pueda transportar el fuego entre las copas. A partir de una tasa crítica de flujo constante e igual a $0.05 \text{ kg/m}^2 \text{ sec}$ se calcula la velocidad crítica (R'_{activo}) de propagación para que se dé un incendio de copas activo (ver Ecuación 95) (Wagner, 1977).

Para que se dé un incendio de copas activo dos criterios deben cumplirse, primero un fuego generado en la superficie con suficiente intensidad debe encender las copas de los árboles ($I_{superficie} > I'_{inicial}$), si este criterio no se cumple el fuego se seguirá propagando en superficie. En segundo lugar, si se puede iniciar el incendio de copas, la tasa de propagación potencial del fuego de copas debe ser suficiente para que se mantenga el flujo de masa horizontal ($R_{copas} > R'_{activo}$) (Wagner, 1977). Si este criterio no se cumple, el fuego seguirá encendiendo los árboles individualmente pero no podrá propagarse. En la Figura 16 se describe el proceso de clasificación del incendio forestal.

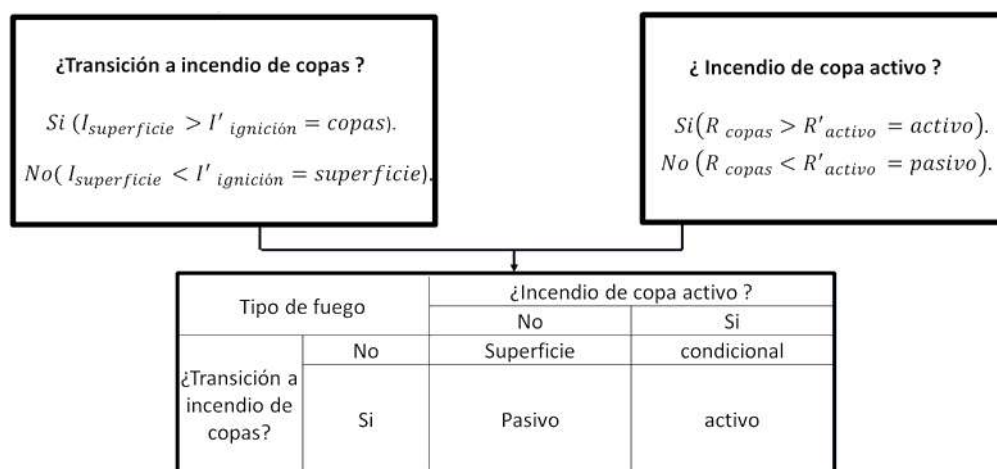


Figura 16. Clasificación del incendio forestal.

2.3.4 Velocidad general de propagación

Después del proceso anterior, donde se calculó la velocidad de propagación de superficie y la velocidad de copas, es necesario relacionar estos dos resultados para determinar la velocidad general de propagación del incendio. Esto se logra mediante la Ecuación 96.

$$R_{final} = R_{superficie} + CFB(R_{activo} - R_{superficie}) \quad 11$$

Donde, CFB es la fracción quemada de copas, y dependiendo de su valor, se puede establecer si el incendio es solo de superficie, o si es de copas pasivo o activo. En caso tal que no exista vegetación con altura de copas, el CFB será 0 y la velocidad final de propagación será igual a la de superficie.

Fracción quemada de copas (CFB)

El CFB (Crown Fraction Burned) es una fracción de las copas de los árboles que han sido consumidas por el fuego, su rango varía entre 0 y 1 (Scott et al., 2001; CWFIS, 2020). Es un concepto teórico usado para modelar y clasificar los incendios de copas en pasivo, activo o independiente (poco probable). El incendio es pasivo cuando el CFB se encuentra entre 0.1 y 0.9, es activo si el valor del CFB supera 0.9, y es independiente generalmente al tener valores cercanos a 1. Cuando el valor es 0 indica que es un incendio de superficie (Scott et al., 2001; 2006; NWCG, 2019; CWFIS, 2020). En la Tabla 6 se resumen las ecuaciones usadas para el cálculo del CFB.

Tabla 6. Ecuaciones para el cálculo del CFB.

Referencia	Ecuación	
Scott et al. (2001)	$CFB = \frac{(R_{superficie} - R_{inicial})}{(R_{sa} - R_{inicial})}$	Lineal
Van Wagner (1989)	$CFB = 1 - e^{(-0.23(R_{superficie} - R_{inicial}))}$	Exponencial
Scott et al. (2001)	$CFB = 1 - e^{\left(-\left(\frac{-\log 0.1}{0.9(R_{activo} - R_{inicial})}\right) * (R_{superficie} - R_{inicial})\right)}$	Farsite

Donde, $R_{superficie}$ es la velocidad de propagación para un incendio de superficie, $R_{inicial}$ es la velocidad de propagación crítica para iniciar un incendio de copas, R_{activo} es la velocidad de propagación para un incendio de copas completamente activo, y R_{sa} es la velocidad de propagación de fuego superficial prevista correspondiente a las condiciones ambientales para las cuales $R_{activo} = R'_{activo}$, con R'_{activo} como la velocidad de propagación crítica para mantener un incendio de copas activo (Scott et al., 2001).

2.3.5 Direcciones de propagación del fuego

El modelo de propagación de superficie de Rothermel fue desarrollado para estimar la extensión del fuego en función de la pendiente ascendente con el viento. Diferentes adaptaciones se han realizado para encontrar la tasa de máxima propagación, intensidad de la línea de fuego y la longitud de la llama, cuando el viento no se encuentra soplando en dirección de la pendiente ascendente y se extiende en direcciones

distintas al máximo (Andrews, 2018; Finney, 2002). En la Tabla 7 se presentan las diferentes variables utilizadas en la propagación del fuego:

Tabla 7. Parámetros de entrada para las ecuaciones de dirección de propagación. Ajustado de (Andrews, 2018).

Variable	Descripción
R_0	Velocidad de propagación, sin viento ni pendiente
ϕ_w	Factor de viento
ϕ_s	Factor de pendiente
$\beta, \beta_{op}, E, C, B$	Valores intermedios usados para calcular la velocidad efectiva del viento
H_A	Calor por unidad de área
t	Tiempo transcurrido
ω	Dirección del viento
γ	Dirección desde el punto de ignición
ψ	Dirección normal al perímetro del incendio

2.3.6 Comportamiento del incendio en dirección diferente a la máxima propagación

La ecuación básica de propagación de superficie asume que el efecto del viento y la pendiente van en la misma dirección.

$$R = R_0(1 + \phi_w + \phi_s) = R_0 + R_0\phi_w + R_0\phi_s \quad 12$$

Para la modelación de la propagación del fuego, cuando el viento no sopla cuesta arriba se usa una suma de vectores como se presenta en la Figura 17. Para un tiempo t , la pendiente del vector tiene magnitud D_s y dirección 0. El vector de viento tiene magnitud D_w en la dirección ω desde la pendiente ascendente.

$$D_s = R_0\phi_s t \quad 13$$

$$D_w = R_0\phi_w t \quad 14$$

El vector de la pendiente es $(D_s, 0)$ y del viento es $(D_w \cos \omega, D_w \sin \omega)$. El vector resultante es $(D_s + D_w \cos \omega, D_w \sin \omega)$. La magnitud del vector de cabeza del fuego es D_H en dirección α .

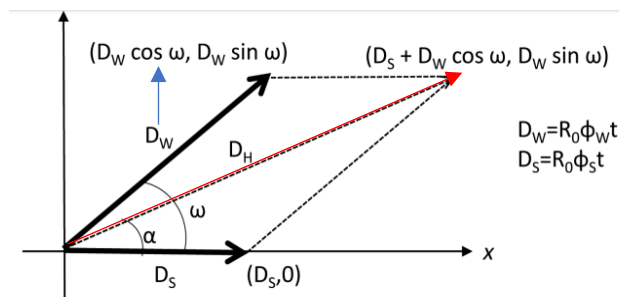


Figura 17. Suma del vector para encontrar la velocidad de propagación de la cabeza de fuego cuando el viento no sopla cuesta arriba (Andrews, 2018).

$$D_H = (X^2 + Y^2)^{1/2} \quad 15$$

$$X = Ds + Dw \cos \omega \quad 16$$

$$Y = Dw \sin \omega \quad 17$$

La dirección de máxima propagación, relativa a la pendiente ascendente es:

$$\alpha = \sin^{-1}(|Y|/D_H) \quad 18$$

La velocidad de propagación en la dirección α (máxima propagación) es:

$$R_H = R_0 + D_H/t \quad 19$$

El factor de viento efectivo (φ_E) en la dirección de máxima propagación es calculada a partir de:

$$R_H = R_0(1 + \varphi_E) \quad 20$$

$$\varphi_E = (R_H/R_0) - 1 \quad 21$$

La velocidad del viento efectiva en dirección de la máxima propagación esta asociada al factor de viento efectivo.

$$U_E = \left[\varphi_E (\beta/\beta_{op})^E / C \right]^{-B} \quad 22$$

2.3.7 Propagación del fuego desde un solo punto de ignición

La propagación de un incendio cuando su ignición es un solo punto, se asume como una forma elíptica con el fuego avanzando constantemente a través del tiempo (Andrews, 2018; Bova et al., 2016) .La dirección de propagación máxima y la velocidad de propagación en esa dirección se describen en la Figura 18.

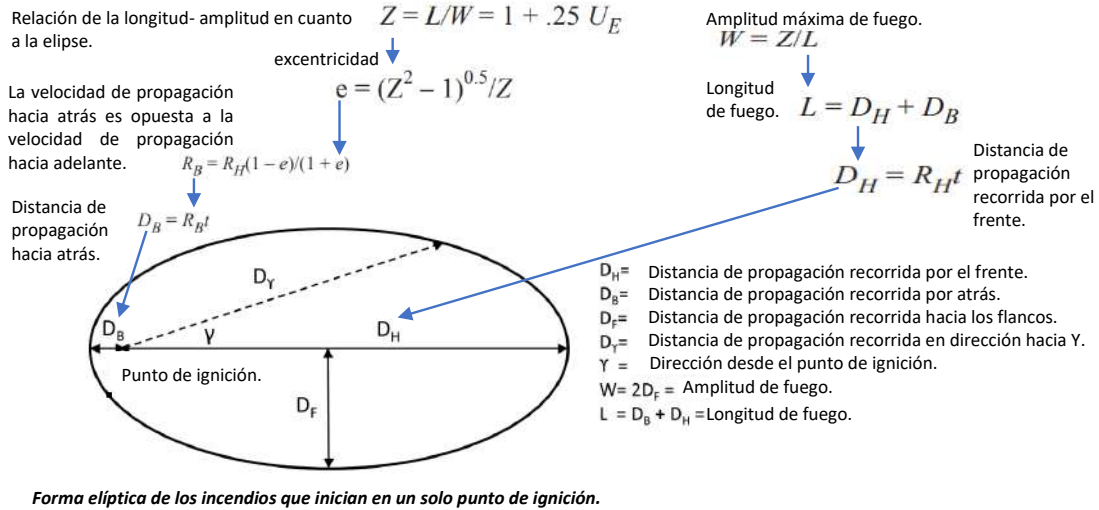
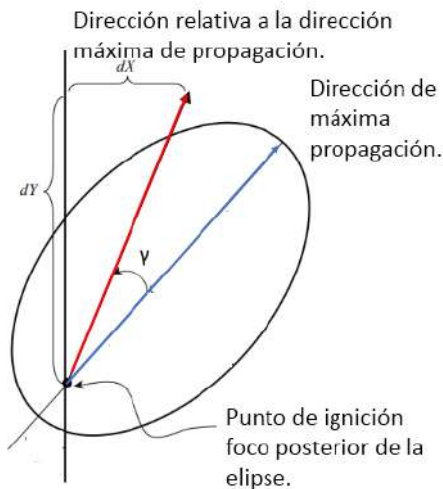


Figura 18. Fuego propagado desde un solo punto de ignición. Ajustado de (Andrews, 2018).

Finalmente la velocidad de propagación desde un punto de ignición relativa a la dirección de máxima propagación (R_Y) es:



$$R_Y = R_H \frac{(1 - e)}{(1 + e * \cos \gamma)}$$

23

Figura 19. Velocidad de propagación desde un punto de ignición relativa a la dirección de máxima propagación. Fuente: (Finney, 2002)

2.3.8 Simulación de la propagación del incendio

La propagación de los incendios se realiza tomando como base el software de código libre Tirailleur, que permite modelar la expansión de un incendio forestal; sin embargo, es necesario combinarlo con otros mecanismos como la función de Rothermel para obtener una tasa de propagación y así obtener un comportamiento realista de la expansión del fuego (Tirailleur, 2012). La Figura 20 muestra la expansión del área activa del incendio.

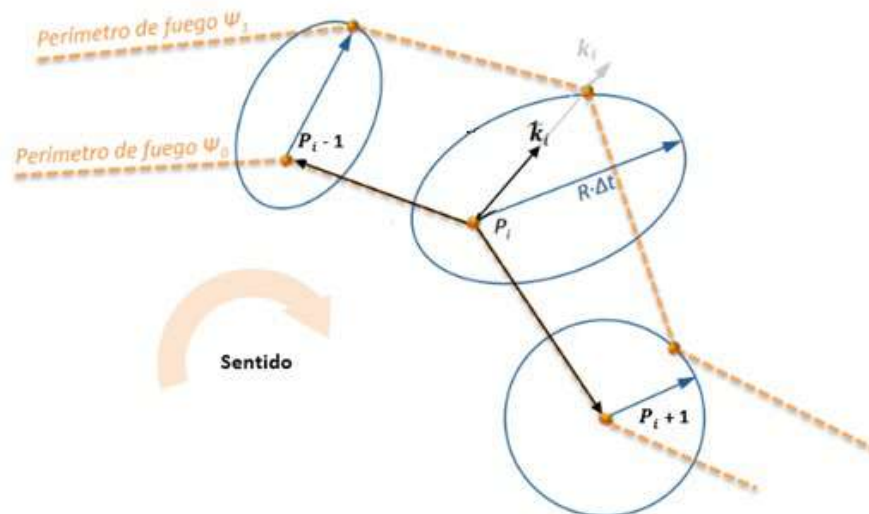


Figura 20. Expansión del área activa de fuego. Fuente: Adaptada de (Torazza, 2014)

En la Figura 21 se puede observar un ejemplo de modelación de un incendio forestal con una duración de 20 horas, sobre una base de información de combustible usada para fines de prueba. En color amarillo se ve el inicio del incendio y cada polígono representa el avance con una diferencia de 2 horas hasta llegar a la línea roja correspondiente a 20 horas.

La simulación muestra como el perímetro del incendio puede avanzar libremente a medida que transcurre el tiempo si no encuentra ninguna restricción, pero al llegar a un tipo de combustible que no es inflamable como el agua o roca, no se puede propagar en esa dirección. También, la influencia de la dirección del viento y la capacidad de combustión de cada tipo de combustible, puede generar que este sea más rápido o lento.

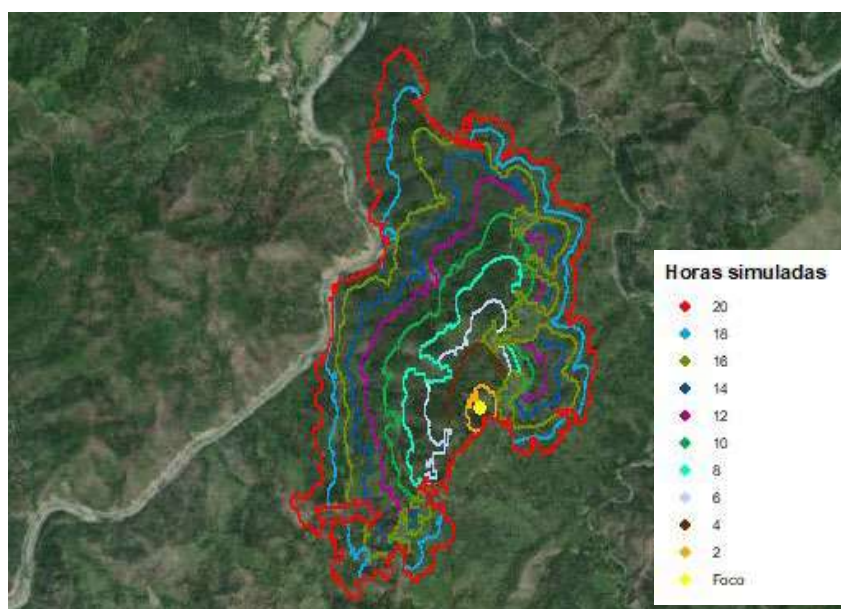


Figura 21. Simulación de un incendio con una duración de 20 horas.

2.4 Extinción

La metodología al calcular la velocidad de propagación de un punto con el modelo de Rothermel utiliza un parámetro del combustible llamado humedad de extinción, que por definición es: “la humedad a la cual el combustible muerto ya no puede soportar la propagación de un incendio de superficie”. En este sentido, con el cambio en las variables climáticas, la humedad de la vegetación se puede comparar con la humedad de extinción, de manera que si la primera es superior no habrá propagación ni intensidad de reacción y se dará por terminado el incendio en ese punto.

Otro factor que se tiene en cuenta es la velocidad del viento, si esta es menor al Índice de Superficie (Surfacing Index), el cual es la velocidad del viento en la que el fuego activo de copas se apaga (Scott and Reinhardt, 2001), también se dejará de propagar el incendio en ese punto.

Adicionalmente si de todos los puntos que conforman el perímetro exterior, ninguno se puede desplazar en un momento determinado por la presencia de barreras no combustibles, se entiende que se dejó de propagar todo el incendio y se procede a finalizar la simulación.

Finalmente, se define un tiempo máximo de extinción que trunca artificialmente la propagación en el modelo. Esto se aplica para evitar que el incendio se propague indefinidamente en caso que ninguna de las condiciones anteriores se cumple, permitiendo simular de forma simplificada los procesos de extinción inducida por el hombre que son de muy alta complejidad.

3 MODELACIÓN DE LA EXPOSICIÓN Y LA VULNERABILIDAD

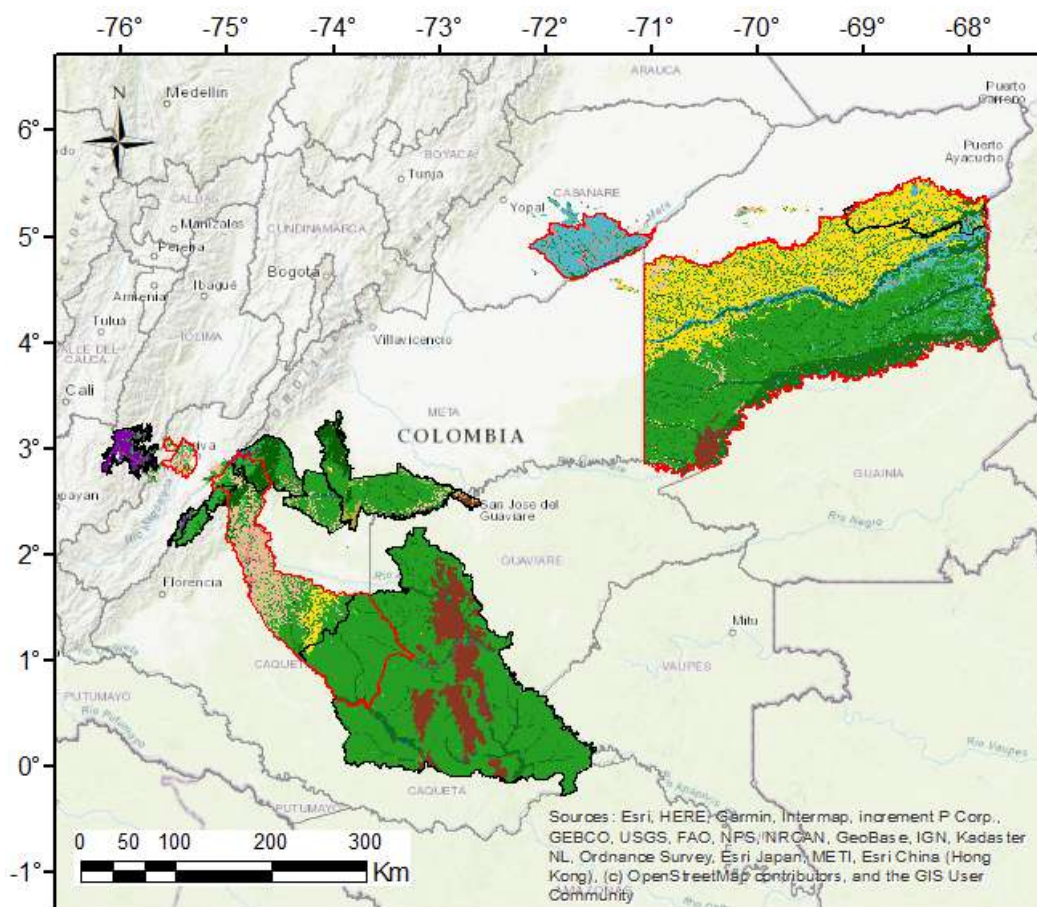
En aplicaciones de modelación del riesgo para el medio ambiente, no es sencillo hacer una separación concreta entre los diferentes componentes de la modelación, siendo esto especialmente cierto para la exposición y la vulnerabilidad. Por esta razón, en esta sección se presentan ambos aspectos combinados en lo que corresponde al portafolio de ecosistemas considerados, el valor estimado de sus servicios prestados, y su correspondiente modelo de combustible.

3.1 Portafolio de ecosistemas

Los ecosistemas varían dependiendo del clima, la geomorfología y los suelos, la cobertura de la tierra y la biota. Estos factores son los responsables de explicar la distribución y diferenciación de las unidades de ecosistemas en terrestres o acuáticas, en transformadas o no transformadas, en húmedas o secas, entre otras características más específicas de cada ecosistema. Los ecosistemas son considerados en este trabajo como los elementos expuestos susceptible a ser afectado por la ocurrencia de un incendio forestal.

A partir de la versión actualizada del Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia 2017 (IDEAM et al., 2017), se exploró la configuración de la región de estudio, revelando una notable diversidad de ecosistemas. En el municipio de Orocué, el 76% del territorio está dominado por sabanas inundables, destacando la presencia de este ecosistema singular. Por otro lado, en los municipios de San Vicente del Caguán y Cumaribo, el bosque basal húmedo abarca el 52.7% y 32.7% de su área respectivamente, contribuyendo significativamente a la riqueza biológica de la región. Además, el municipio de Palermo presenta un paisaje donde el 54% del área está dominado por agroecosistemas, siendo el agroecosistema ganadero el más representativo. Por último, el ecosistema predominante es el bosque basal húmedo en el 52.7% de las áreas protegidas analizadas.

En la Tabla 8 se muestran los 5 ecosistemas predominantes de cada uno de los municipios y áreas protegidas analizadas y en la Figura 22 la distribución de los ecosistemas en el territorio analizado.



Ecosistemas

Agroecosistema arrocero	Complejos rocosos de los andes
Agroecosistema cafetero	Complejos rocosos de serranías
Agroecosistema de mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	Glaciares y nivales
Agroecosistema de mosaico de cultivos y espacios naturales	Cuerpo de agua artificial
Agroecosistema de mosaico de cultivos y pastos	Herbazal andino humedo
Agroecosistema de mosaico de pastos y espacios naturales	Herbazal basal humedo
Agroecosistema forestal	Herbazal inundable basal
Agroecosistema palmero	Herbazal subandino humedo
Agroecosistema ganadero	Laguna Aluvial
Arbustal andino humedo	Laguna Glacial
Arbustal basal humedo	Otras áreas
Arbustal inundable basal	Paramo
Arbustal subandino humedo	Rio de Aguas Blancas
Bosque andino humedo	Rio de Aguas Claras
Bosque basal humedo	Rio de Aguas Negras
Bosque de galería basal humedo	Sabana estacional
Bosque de galería basal seco	Sabana inundable
Bosque de galería inundable basal	Sin informacion
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	Territorio artificializado
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	Transicional transformado
Bosque inundable andino	Vegetación secundaria
Bosque inundable basal	Zona pantanosa basal
Bosque inundable subandino	Municipios
Bosque subandino humedo	Áreas Protegidas

Figura 22. Mapa de clasificación de ecosistemas de los municipios y áreas protegidas. Elaboración propia a partir (IDEAM et al., 2017)

Tabla 8. Porcentaje de área de los 5 ecosistemas predominantes. (Adaptado de IDEAM et al., 2017)³

Municipio	Ecosistemas predominantes				
Palermo	Agroecosistema ganadero (24.4%)	Agroecosistema de mosaico de pastos y espacios naturales (16.4%)	Subxerofitia basal (16.3%)	Complejos rocosos de los andes (8.3%)	Agroecosistema arrocero (7.6%)
San Vicente del Caguán	Bosque basal húmedo (52.7%)	Agroecosistema ganadero (17.5%)	Bosque subandino húmedo (5.6%)	Sabana estacional (4.9%)	Bosque inundable basal (3.9%)
Orocué	Sabana Inundable (76.8%)	Transicional transformado (10.2%)	Bosque de galería inundable basal (6.5%)	Bosque inundable basal (3.2%)	Río de aguas blancas (2.4%)
Cumaribo	Bosque basal húmedo (33.1%)	Sabana estacional (28.6%)	Bosque inundable basal (17.2%)	Sabana inundable (7.1%)	Bosque de galería inundable basal (6.9%)
Áreas protegidas analizadas	Bosque basal húmedo (59.7%)	Complejos rocosos de serranías (11.0%)	Bosque inundable basal (6.3%)	Sabana estacional (6.1%)	Bosque andino húmedo (3.6%)

Se consideran no combustibles los tipos de cobertura de suelo distintos a la vegetación, como afloramientos rocosos, cuerpos de agua, zonas inundables⁴, entre otros. Además, las áreas urbanas, aunque constituyen elementos combustibles, no son tomadas en cuenta en el modelo de incendios forestales. Consulte las Tabla 9 al Tabla 13 para ver en detalle las áreas correspondientes a cada uno de los ecosistemas por municipio.

3.2 Valoración de los servicios ecosistémicos

Para cuantificar las pérdidas generadas por la ocurrencia de incendios de cobertura vegetal es necesario asignar un valor económico de los servicios ecosistémicos asociados a cada tipo de ecosistema. El valor económico de los servicios ecosistémicos puede entenderse como el valor monetario necesario para compensar los impactos generados por la no prestación de estos servicios o como el costo de replicarlos en una biosfera artificial (Costanza et al., 1997, 2014).

Los agroecosistemas de cultivos transitorios o permanentes y las plantaciones forestales son sembrados para el desarrollo de una actividad productiva, en este caso es agrícola y genera un beneficio económico.

³ Porcentajes calculados con la clasificación propia por tipo de ecosistema de acuerdo con los requerimientos de modelación, a partir de las áreas del *Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia. Versión 2.1. Escala 1:100.000. 2017.*

http://www.ideam.gov.co/documents/11769/222663/E_ECCMC_Ver21_100K.pdf/addc175f-3ac6-415b-9b9e-a1c4368b5b3e

⁴ Tener contacto o acceso oportuno a un agente extintor como el agua atenúa la propagación del fuego.
Unidades de ecosistemas inundables: Arbustal inundable, Bosque ripario inundable, Bosque de galería inundable, Bosque inundable, Herbazal inundable, Sabana inundable.

Los pastizales de los agroecosistemas ganaderos también son usados para el desarrollo de una actividad productiva, pero crecen naturalmente. Por otro lado, los bosques colombianos juegan un papel fundamental en la conservación de cuencas hídricas y del suelo, la protección de la fauna y la regulación del clima prestando servicios de aprovisionamiento, servicios reguladores y de hábitat. Adicionalmente, son grandes proveedores de materias primas, prestan servicios culturales y recreación, entre otros. Estos son solo algunos de los numerosos servicios que los bosques prestan y que, en general, los ecosistemas contribuyen al bienestar humano.

En la Tabla 9 se muestra el promedio del valor de los servicios ecosistémicos en (COP/ha/año) de los diferentes ecosistemas. Estos valores están asociados a la inflación y TRM promedio del año 2022. Los valores anuales de los servicios ecosistémicos de los bosques, herbazales, arbustales, y demás unidades ecosistémicas, se obtendrán de los cálculos realizados por Groot et al. (2012) y Constanza et. al (1997, 2014).

Tabla 9. Valoración de los servicios ecosistémicos en el municipio de Orocué y sus ecosistemas.

Ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (Millones de COP/año) ⁵
Arbustal inundable basal	451	0.09	0
Bosque de galería inundable basal	30729	6.46	0
Bosque inundable basal	15446	3.25	0
Cuerpo de agua artificial	85	0.02	0
Laguna Aluvial	752	0.16	0
Rio de Aguas Blancas	11417	2.40	0
Sabana inundable	365582	76.84	0
Territorio artificializado	93	0.02	0
Transicional transformado	48560	10.21	1,973,104.58
Zona pantanosa basal	2648	0.56	0

Tabla 10. Valoración de los servicios ecosistémicos en el municipio de Cumaribo y sus ecosistemas.

Ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (Millones de COP/año)
Agroecosistema de mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	2992	0.05	128,580.56
Agroecosistema de mosaico de cultivos y espacios naturales	1187	0.02	51,028.45
Agroecosistema de mosaico de cultivos y pastos	19672	0.30	422,660.08
Agroecosistema de mosaico de pastos y espacios naturales	28974	0.44	642,096.17
Agroecosistema forestal	9719	0.15	226,029.84
Agroecosistema ganadero	13253	0.20	146,834.21

⁵ Los valores de servicios ecosistémicos están asociados a la inflación y TRM promedio del año 2022. Disponible en <https://www.banrep.gov.co/es/estadisticas/catalogo> y <https://www.dane.gov.co/index.php/estadisticas-por-tema/precios-y-costos/indice-de-precios-al-consumidor-ipc/ipc-informacion-tecnica>

Ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (Millones de COP/año)
Agroecosistema palmero	193	0.00	8,284.29
Arbustal inundable basal	4947	0.08	0
Bosque basal húmedo - denso alto	2147849	32.68	87,272,966.29
Bosque basal húmedo - denso bajo	27925	0.42	1,134,658.56
Bosque de galería basal húmedo	6975	0.11	283,409.57
Bosque de galería inundable basal	452874	6.89	0
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	15002	0.23	609,572.48
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	16185	0.25	657,624.73
Bosque inundable basal	1133568	17.25	0
Complejos rocosos de serranías	108300	1.65	0
Laguna Aluvial	20154	0.31	0
Rio de Aguas Blancas	33519	0.51	0
Rio de Aguas Claras	73240	1.11	0
Rio de Aguas Negras	5281	0.08	0
Sabana estacional	1882551	28.64	20,857,036.52
Sabana inundable	463840	7.06	0
Territorio artificializado	160	0.00	0
Transicional transformado	54208	0.82	2,202,603.47
Vegetación secundaria	48344	0.74	592,545.67
Zona pantanosa basal	1869	0.03	0

Tabla 11. Valoración de los servicios ecosistémicos en el municipio de Palermo y sus ecosistemas.

Ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (Millones de COP/año)
Agroecosistema arrocero	6671	7.55	143,328.88
Agroecosistema cafetero	1180	1.34	50,715.18
Agroecosistema de mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	2196	2.49	94,364.35
Agroecosistema de mosaico de cultivos y espacios naturales	233	0.26	10,024.69
Agroecosistema de mosaico de cultivos y pastos	1366	1.55	29,358.40
Agroecosistema de mosaico de pastos y espacios naturales	14483	16.40	320,958.33
Agroecosistema ganadero	21549	24.40	238,746.94
Arbustal andino húmedo - abierto	31	0.03	377.27
Arbustal andino húmedo - denso	204	0.23	2,501.87
Arbustal inundable basal	60	0.07	0
Arbustal subandino húmedo - abierto	164	0.19	2,015.39
Arbustal subandino húmedo - denso	485	0.55	5,946.90
Bosque andino húmedo - abierto alto	154	0.17	6,253.38
Bosque andino húmedo - denso alto	2199	2.49	89,357.45
Bosque de galería basal húmedo	33	0.04	1,349.41
Bosque de galería basal seco	1927	2.18	78,298.85
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	241	0.27	9,807.93

Ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (Millones de COP/año)
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	1792	2.03	72,802.46
Bosque subandino húmedo	858	0.97	34,854.34
Complejos rocosos de los andes	7352	8.32	0
Cuerpo de agua artificial	87	0.10	0
Herbazal andino húmedo	273	0.31	3,024.27
Herbazal basal húmedo	83	0.09	915.36
Herbazal subandino húmedo	4158	4.71	46,064.05
Laguna Aluvial	57	0.06	0
Otras áreas	47	0.05	0
Paramo	15	0.02	323.11
Rio de Aguas Blancas	707	0.80	0
Sin información	199	0.23	0
Subxerofitia basal	14406	16.31	176,570.35
Territorio artificializado	386	0.44	0
Transicional transformado	3546	4.02	144,090.94
Vegetación secundaria	1171	1.33	14,355.96

Tabla 12. Valoración de los servicios ecosistémicos en el municipio de San Vicente del Caguán y sus ecosistemas.

Ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (Millones de COP/año)
Agroecosistema de mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	768	0.04	32,997.94
Agroecosistema de mosaico de pastos y espacios naturales	59073	3.38	1,309,143.79
Agroecosistema ganadero	304821	17.46	3,377,151.04
Arbustal basal húmedo	1663	0.10	20,382.28
Bosque andino húmedo	63281	3.63	2,571,289.33
Bosque basal húmedo - denso alto	919130	52.66	37,346,739.18
Bosque basal húmedo - denso bajo	745	0.04	30,279.50
Bosque de galería basal húmedo	15213	0.87	618,129.73
Bosque de galería inundable basal	942	0.05	0
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	10613	0.61	431,219.62
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	9685	0.55	393,534.80
Bosque inundable basal	68263	3.91	0
Bosque subandino húmedo	97019	5.56	3,942,128.01
Complejos rocosos de los andes	236	0.01	0
Herbazal inundable basal	2888	0.17	0
Laguna Aluvial	292	0.02	0
Paramo	10385	0.60	230,145.79
Rio de Aguas Blancas	7824	0.45	0

Rio de Aguas Negras	545	0.03	0
Sabana estacional	86136	4.94	954,314.71
Territorio artificializado	145	0.01	0
Transicional transformado	31401	1.80	1,275,919.02
Vegetación secundaria	53500	3.07	655,737.70
Zona pantanosa basal	768	0.04	0

Tabla 13. Valoración de los servicios ecosistémicos de las áreas protegidas y sus ecosistemas.

Nombre ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (COP/año)
Agroecosistema cafetero	88	0.00	3,794.07
Agroecosistema de mosaico de cultivos pastos y espacios naturales	21569	0.34	926,900.87
Agroecosistema de mosaico de cultivos y espacios naturales	919	0.01	39,472.21
Agroecosistema de mosaico de cultivos y pastos	5783	0.09	124,255.49
Agroecosistema de mosaico de pastos y espacios naturales	21149	0.33	468,692.50
Agroecosistema ganadero	68403	1.07	757,844.75
Arbustal andino húmedo - abierto	1418	0.02	17,384.01
Arbustal andino húmedo - denso	425	0.01	5,212.23
Arbustal basal húmedo - abierto	3110	0.05	38,123.71
Arbustal basal húmedo - denso	8441	0.13	103,460.20
Arbustal inundable basal	529	0.01	0
Arbustal subandino húmedo	109	0.00	1,330.36
Bosque andino húmedo - abierto alto	11	0.00	460.78
Bosque andino húmedo - abierto bajo	563	0.01	22,874.19
Bosque andino húmedo - denso alto	228752	3.56	9,294,820.09
Bosque andino húmedo - denso bajo	1001	0.02	40,679.85
Bosque basal húmedo - denso alto	3650449	56.88	148,327,667.79
Bosque basal húmedo - denso bajo	183061	2.85	7,438,258.69
Bosque de galería basal húmedo	1427	0.02	57,991.83
Bosque de galería inundable basal	74850	1.17	0
Bosque fragmentado con pastos y cultivos	7971	0.12	323,891.95
Bosque fragmentado con vegetación secundaria	15734	0.25	639,325.38
Bosque inundable andino	5	0.00	0
Bosque inundable basal	404946	6.31	0
Bosque inundable subandino	924	0.01	0
Bosque subandino húmedo - denso alto	223292	3.48	9,072,956.90
Bosque subandino húmedo - denso bajo	367	0.01	14,909.36
Complejos rocosos de los andes	1617	0.03	0
Complejos rocosos de serranías	707563	11.03	0
Glaciares y nivales	2347	0.04	0
Herbazal basal húmedo	20647	0.32	228,749.79
Herbazal inundable basal	3518	0.05	0
Herbazal subandino húmedo	465	0.01	5,151.13
Laguna Aluvial	7571	0.12	0

Nombre ecosistema	Área (ha)	Área (%)	Valor expuesto (COP/año)
Laguna Glacial	95	0.00	0
Otras áreas	11	0.00	0
Paramo	146655	2.29	3,250,062.10
Rio de Aguas Blancas	12454	0.19	0
Rio de Aguas Claras	15280	0.24	0
Rio de Aguas Negras	28877	0.45	0
Sabana estacional	391245	6.10	4,334,660.53
Sabana inundable	96361	1.50	0
Sin información	251	0.00	0
Territorio artificializado	39	0.00	0
Transicional transformado	26173	0.41	1,063,468.81
Vegetación secundaria	30584	0.48	374,863.27
Zona pantanosa basal	375	0.01	0

3.3 Modelo de combustible

La vegetación combustible del territorio debe ser representada por medio de propiedades que permitan establecer la facilidad o no para el avance del fuego, tanto a nivel de superficie como en las copas de los árboles. Esto está asociado con diversas características del territorio, que tienen que ver con aspectos climáticos y con la disposición y conformación final de cada tipo de ecosistema. Variables como el porcentaje de cobertura herbácea o arbustiva, la proporción entre cobertura leñosa y hojarasca en el bosque, o la densidad y altura del dosel arbóreo, permiten identificar posibles diferencias en los modelos de combustible.

La Figura 23, a modo de ejemplo para los municipios y áreas protegidas analizadas, muestra algunas de estas variables fueron extraídas del Mapa Global de Combustibles creado por Pettinari y Chuvieco (2016). Este mapa se construyó integrando diversas variables espaciales derivadas tanto de productos de observación de la Tierra por satélite como de bases de datos de combustibles locales de todo el mundo.

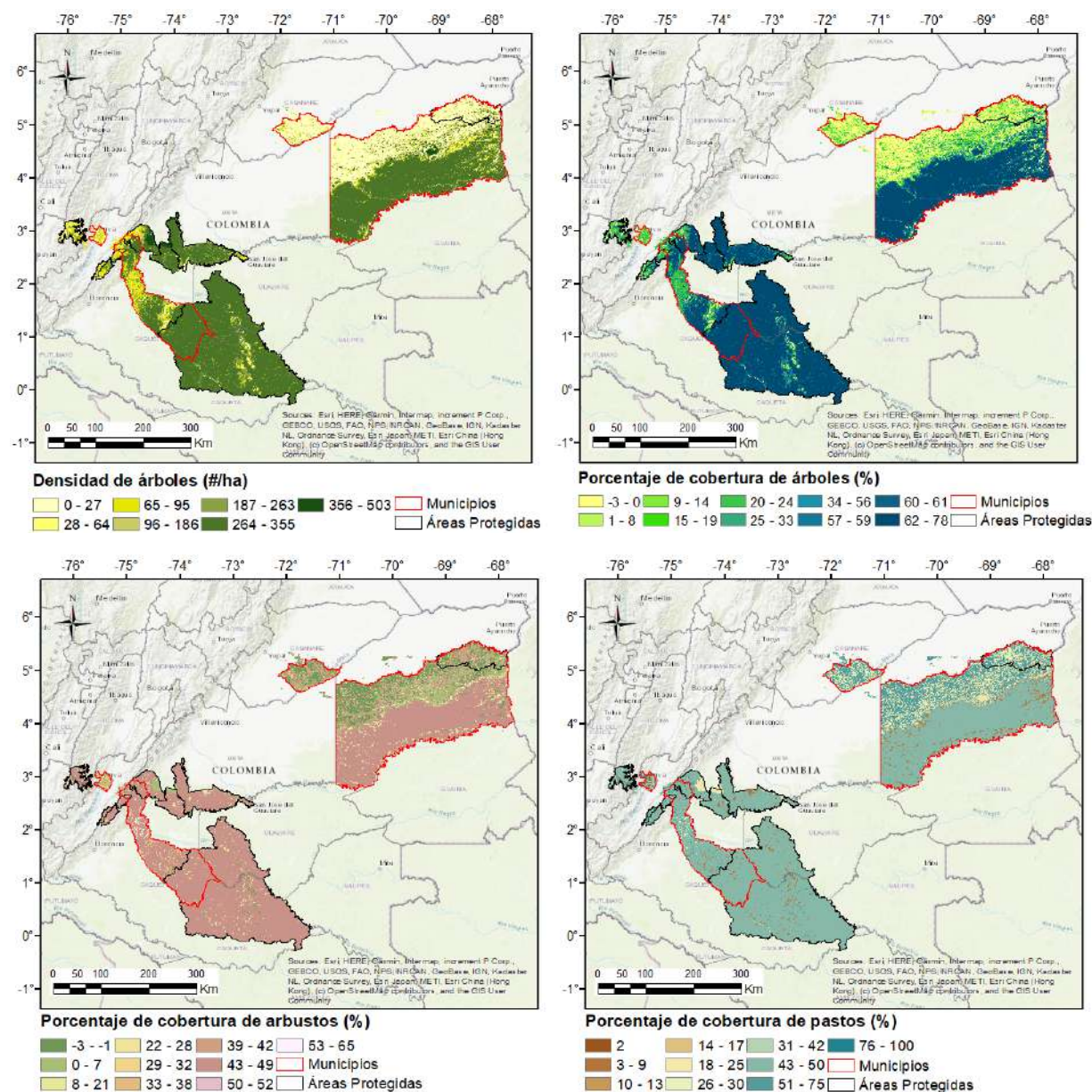


Figura 23. Ejemplos de variables indicativas del tipo de combustible presente (Valores negativos indican *no presente o no aplicable*).

A partir del estudio de estas variables, en conjunto con la clasificación de ecosistemas para los municipios y áreas protegidas analizadas (ver Figura 22), se establece una clasificación de estos en alguna de las clases de combustible contenidas en los modelos estándar de Scott y Burgan (2005). Estos modelos permiten asociar características de combustible a la vegetación de cada ecosistema.

La Tabla 14 muestra las propiedades de cada combustible en el modelo, mientras que la Figura 24 muestra la asignación para los municipios y áreas protegidas analizadas.

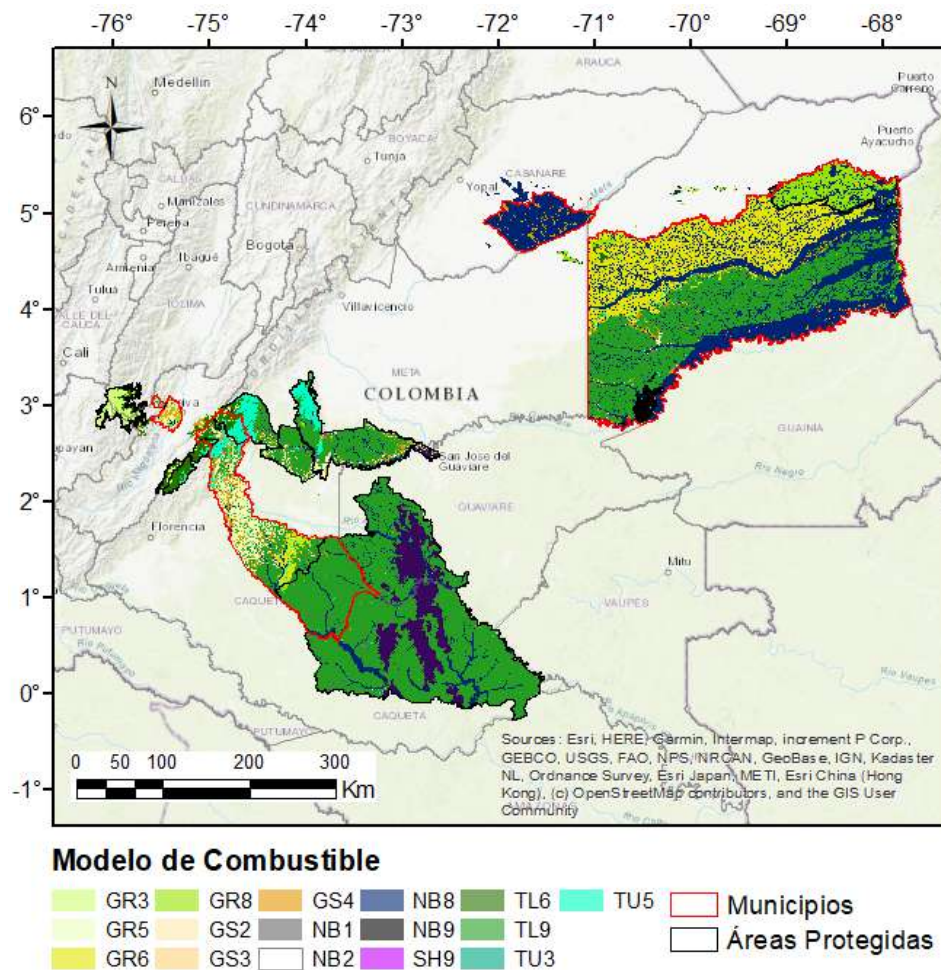


Figura 24. Mapa de distribución de modelos de combustible vegetal de superficie para los municipios y áreas protegidas.

Tabla 14. Parámetros asociados a los modelos estándar de combustible de Scott y Burgan (2005) ⁶.

Modelo de combustible		Carga de combustible w_0 (ton/ha)					Relación entre el área superficie y el volumen SAV (m^2/m^3)					Prof. lecho (cm)	Humedad de extinción (%)	Contenido de Calor (KJ/Kg)
Código	Tipo ⁷	1hr	10hr	100hr	HB	MD	1hr	10hr	100hr	HB	MD			
GR3	D	0.2	0.9	0	3.4	0	4921	358	98	4265	0	61	30	18622
GR5	D	0.9	0	0	5.6	0	5906	358	98	5249	0	46	40	18622
GR6	D	0.2	0	0	7.6	0	7218	358	98	6562	0	46	40	20934
GR8	D	1.1	2.3	0	16.4	0	4921	358	98	4265	0	122	30	18622
GR9	D	2.3	2.3	0	20.2	0	5906	358	98	5249	0	152	40	18622
GS2	D	1.1	1.1	0	1.4	2.3	6562	358	98	5906	5906	46	15	18622
GS3	D	0.7	0.6	0	3.3	2.8	5906	358	98	5249	5249	55	40	18622
GS4	D	4.3	0.7	0.2	7.6	16.0	5906	358	98	5249	5249	64	40	18622
SH2	S	3.0	5.4	1.7	0	8.7	6562	358	98	0	5249	30	15	18622
SH9	D	10.1	5.5	0	3.5	16.0	2461	358	98	5906	4921	134	40	18622
TU2	S	2.1	4.0	2.8	0	0.5	6562	358	98	0	5249	30	30	18622
TU3	D	2.5	0.3	0.6	1.5	2.5	5906	358	98	5249	4593	40	30	18622
TU5	S	9.0	9.0	6.7	0	6.7	4921	358	98	0	2461	30	25	18622
TL6	S	5.4	2.7	2.7	0	0	6562	358	98	0	0	9	25	18622
TL9	S	14.9	7.4	9.3	0	0	5906	358	98	0	5249	18	35	18622

Las variables requeridas para caracterizar el modelo de copas se establecen de nuevo en función de la información disponible e ilustrada en la Figura 22. De esta manera se complementa el modelo de combustible presentado, permitiendo así la simulación de la transición a fuego de copas y el progreso de este como incendio activo o pasivo. La Figura 25 muestra algunas de las variables principales que definen el modelo de copas.

⁶ Para el modelo de combustible, el *Tipo*, se refiere a si el combustible es dinámico (D) o estático (S). Si es estático la carga herbácea (viva) es fija y no se convierte a muerta, si por el contrario es dinámico, la carga viva sí pasa a ser carga muerta cuando pierde la humedad (Andrews, 2018).

⁷ 1hr: Tiempo de retardo de una hora. Tamaño del combustible menor 0-5 mm de diámetro, como hierbas, agujas de pino y hojas. 10hr: Tiempo de retardo de diez horas. Tamaño del combustible de 5-25 mm de diámetro, como ramas pequeñas. 100hr: Tiempo de retardo de cien horas. Tamaño del combustible de 25-75 mm de diámetro, como ramas mayores, restos de podas, etc. HB: Combustible herbáceo vivo y MD: Combustible leñoso vivo. Prof. lecho: Profundidad del lecho.

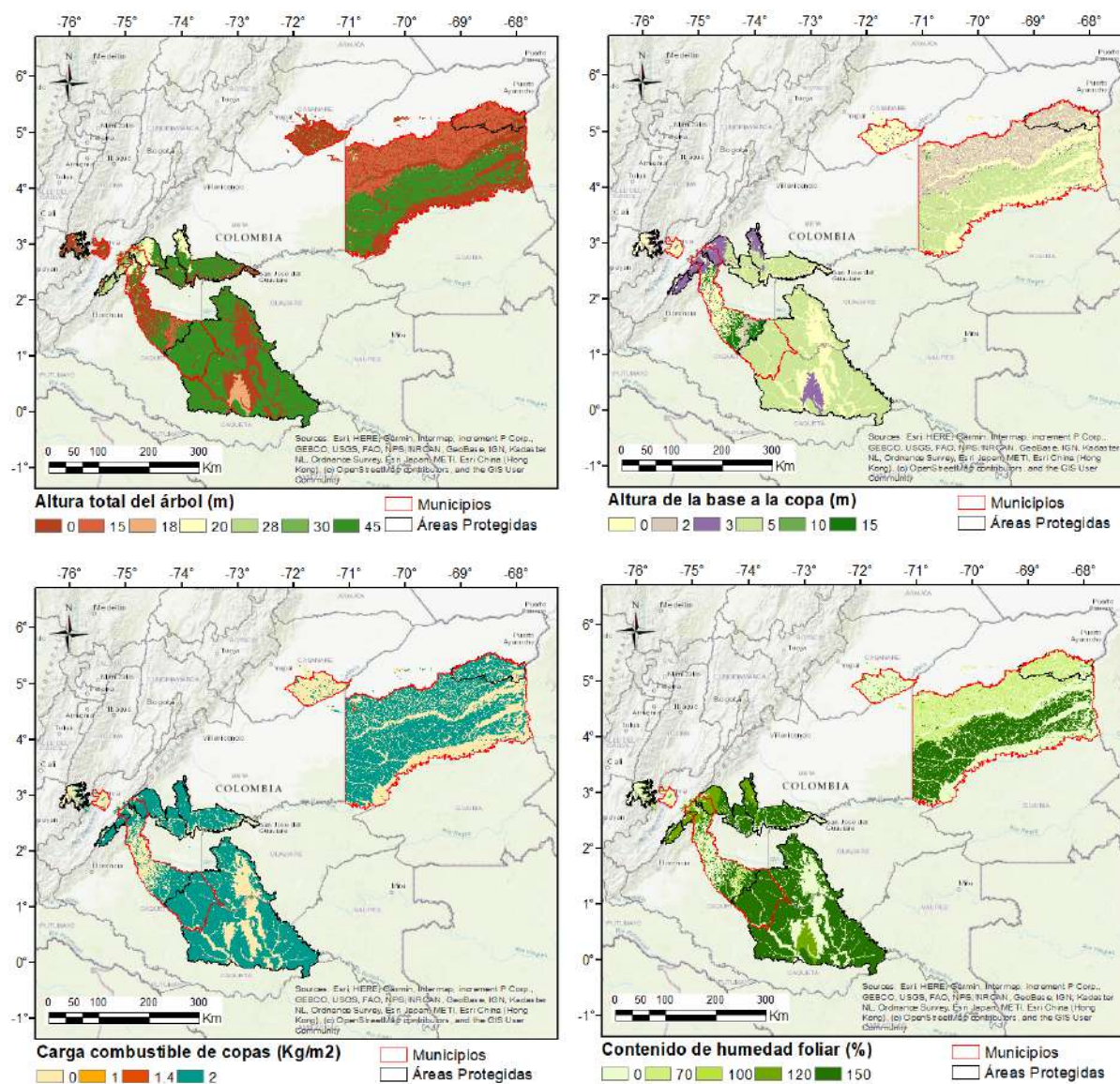


Figura 25. Ilustración de variables del modelo de combustible de copas.

4 EVALUACIÓN DEL RIESGO

En esta sección se incluyen algunas consideraciones generales sobre la metodología de evaluación del riesgo y la formulación matemática requerida. Para mayores detalles, consultar Bernal et al. 2021. Al realizar la evaluación de riesgo por escenarios, los eventos de sequía o incendio valorados se organizan en una gráfica de pérdida vs. tiempo, como se muestra en la Figura 26. Al establecer una pérdida económica p , se puede identificar en la gráfica todos los eventos cuyas pérdidas exceden p . Los tiempos entre eventos $(T_1, T_2, \dots, T_{1n})$ también se estiman a partir de la Figura 26 y se usan para estimar el parámetro λ de una distribución exponencial, la cual corresponde a la distribución de probabilidad del tiempo entre eventos de un proceso de Poisson. Además, este parámetro de la distribución exponencial tiene la particularidad de ser el mismo λ que define el proceso de Poisson completamente (i.e. es la misma tasa de excedencia, $\lambda = v(p)$). Para el caso de la evaluación prospectiva del riesgo por sequía, la ventana de tiempo considerada para calcular λ es igual al número de simulaciones estocásticas de las series climáticas, y en este caso es de 1,000 años equivalentes.

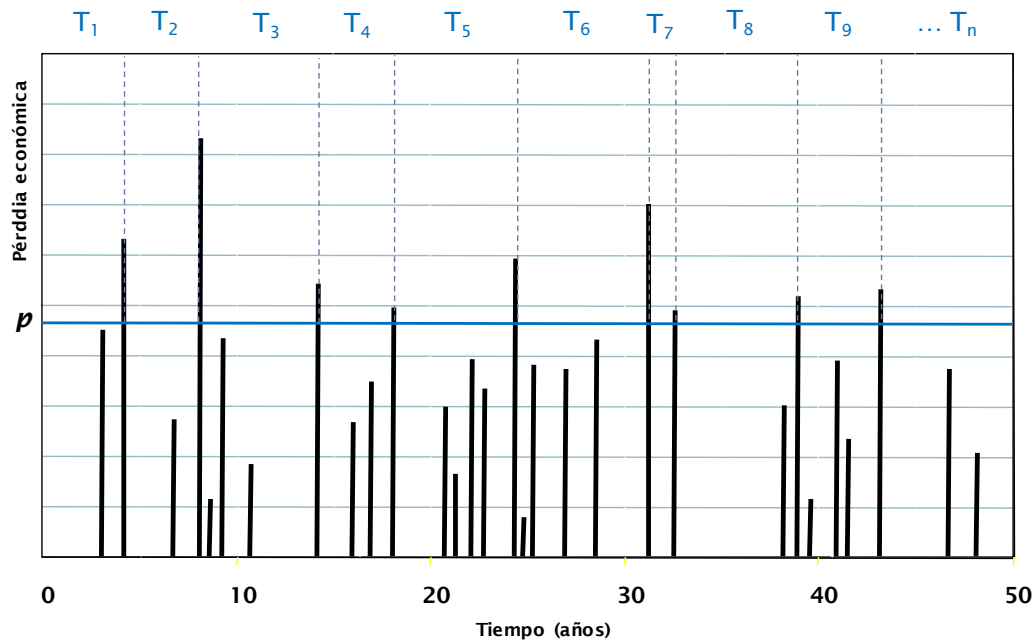


Figura 26. Pérdidas por evento en una ventana amplia de tiempo

La tasa de excedencia poblacional (λ) es estimada mediante la tasa de excedencia empírica (Λ) de la siguiente manera:

$$\Lambda = \frac{n-1}{\sum_{i=1}^n T_i} \quad 19$$

En donde n es el número de eventos que superan la pérdida p y T_i son los tiempos observados. Este estimador cumple con los cuatro criterios estadísticos de calidad de la estimación de parámetros de distribuciones de probabilidad: es no sesgado, de varianza mínima, consistente y suficiente. Ahora bien, es posible demostrar que el estimador Λ sigue una distribución de probabilidad *Gamma inversa* con parámetros n y $(n-1)\lambda$, a partir de lo cual se puede determinar su coeficiente de variación (CV) como:

$$CV = \frac{1}{\sqrt{n-2}}$$

20

El coeficiente de variación indica la relación entre la desviación estándar y la media de una variable aleatoria. Como se indica en la Ecuación 11, CV disminuye a medida que el número de datos (n) aumenta. La Ecuación 11 es una fórmula estándar, aplicable a cualquier problema de estimación del riesgo por eventos, en donde el CV de la tasa de excedencia varía con el tamaño de la muestra cómo se indica en la Figura 27.

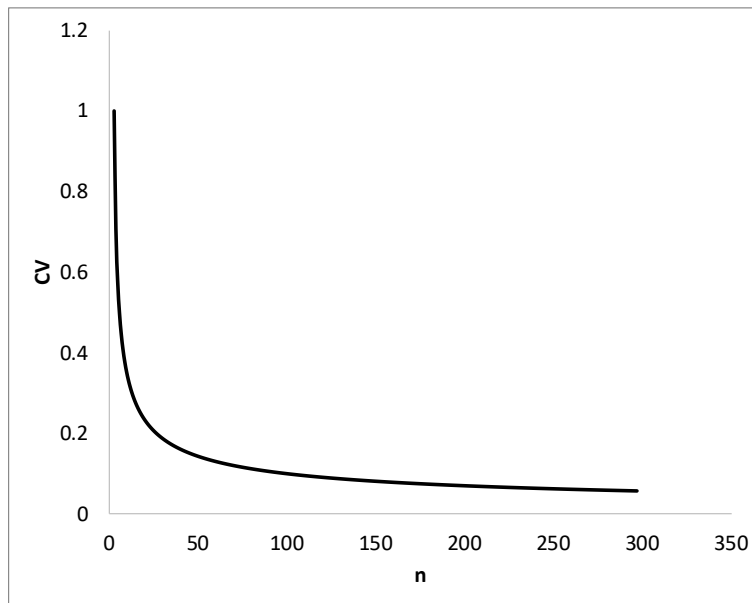


Figura 27. Variación del coeficiente de variación de la tasa de excedencia con el tamaño de la muestra.

El CV crece rápidamente a medida que n disminuye. Esto quiere decir que, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas grandes (eventos catastróficos) a partir de pocos eventos modelados, para los cuales se contará con un valor pequeño de n (es decir, pocos eventos que exceden esa pérdida dentro del conjunto de escenarios de sequía), la dispersión de la estimación (i.e. su desviación estándar) es muy grande en comparación a la estimación misma, lo cual implica una mayor incertidumbre. Por el contrario, al estimar la tasa de excedencia de pérdidas con un mayor número de eventos modelados, n será necesariamente un número más grande y, en consecuencia, la dispersión de la tasa disminuye a valores incluso despreciables en la práctica. Esto es por lo que, para que el resultado sea estadísticamente suficiente se debe hacer uso de un gran número de años simulados dentro de los cuales se pueda identificar un número considerable de eventos de sequía.

4.1 Curva de excedencia de pérdidas

Como se mencionó anteriormente, la tasa de excedencia es igual al parámetro λ que define la ocurrencia en el tiempo de los eventos de pérdida, es decir:

$$v(p) = \frac{n_p - 1}{\sum_{i=1}^{n_p} T_i}$$

21

en donde p es la pérdida económica, $v(p)$ es su tasa anual de excedencia, n_p es el número total de eventos en los cuales se supera p y T_i es el tiempo i entre eventos que superan p . El periodo de retorno $Tr(p)$ se calcula como el inverso de la tasa de excedencia $v(p)$.

$$Tr = \frac{1}{v(p)}$$

22

El periodo de retorno es el valor esperado del tiempo entre eventos. Es decir, corresponde al periodo de tiempo promedio para el cual, considerando una ventana temporal de observación suficientemente amplia, se verá igualada o excedida una pérdida dada.

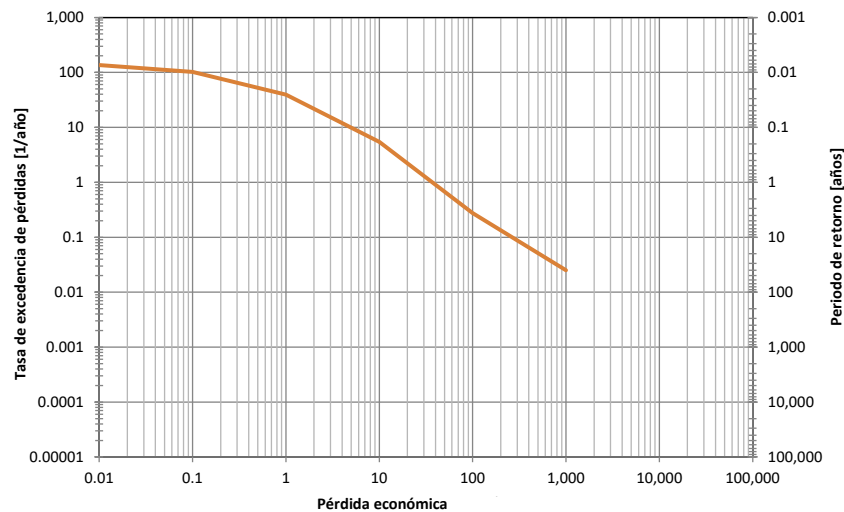


Figura 28. Ejemplo de curva de excedencia de pérdidas. El eje vertical muestra la tasa de excedencia (izquierda) y su valor inverso o periodo de retorno (derecha). El eje horizontal muestra la pérdida asociada.

El cálculo de la Ecuación 12 corresponde a la estimación de la tasa de excedencia de las cuantías de pérdida que ocurren en todos los elementos expuestos para todos los eventos potencialmente nocivos incluidos en el modelo de amenaza (el conjunto de escenarios estocásticos de sequía o incendio previamente identificados).

4.2 Métricas del riesgo

A partir de la curva de excedencia de pérdidas es posible obtener diversas métricas del riesgo, las cuales son útiles para diferentes fines dentro de la toma de decisiones y la gestión del riesgo. Estas métricas pretenden proporcionar una representación integral del riesgo, por lo general condensada en uno o unos pocos números, en lugar de proporcionar todo el conjunto de las pérdidas por escenarios o la curva de excedencia de pérdidas completa.

4.2.1 La pérdida anual esperada (PAE)

La PAE corresponde al valor esperado de la pérdida anual. Indica el valor anual que debe pagarse para compensar, en el largo plazo, todas las pérdidas futuras. En un esquema simple de seguro, la PAE sería la prima pura anual justa. Se calcula como la integral de la curva de excedencia de pérdidas,

$$PAE = \int_0^{\infty} v(p) dp \quad 23$$

La pérdida anual esperada es un indicador importante dado que integra en un único valor el efecto, en términos de pérdida, de la ocurrencia de los escenarios de amenaza sobre los elementos expuestos vulnerables. Se considera como el indicador más robusto de riesgo, no solo por su capacidad de resumir el proceso de generación de pérdidas en un solo número, sino por ser insensible a la incertidumbre, debido a que determina la esperanza matemática de las pérdidas en una base anual, y no su incertidumbre.

4.2.2 La pérdida máxima probable (PML)

Se denota PML por sus siglas en inglés (Probable Maximum Loss). Corresponde a una pérdida que ocurre poco frecuentemente, es decir, que está asociada a un periodo de retorno grande. En realidad, la PML es una curva que relaciona las pérdidas a su correspondiente periodo de retorno. No obstante, es práctica común definir la PML como un único valor. La selección del periodo de retorno de la PML depende exclusivamente de la aversión al riesgo del tomador de decisiones. Por ejemplo, en la industria aseguradora el periodo de retorno de la PML se toma usualmente entre 200 y 1500 años. Mayores detalles sobre el significado y aplicación de la PML pueden encontrarse en Marulanda (2013).

4.2.3 La probabilidad de quiebra (PQ)

Asumiendo que el proceso de ocurrencia de las pérdidas en el tiempo sigue un proceso de Poisson, es posible determinar la probabilidad de alcanzar o exceder un nivel de pérdida dado, en un periodo de exposición particular,

$$Pr(P > p)_T = 1 - e^{-v(p)T} \quad 24$$

en donde $Pr(P > p)_T$ es la probabilidad de excedencia de la pérdida p , en el lapso de tiempo T (dado en años). Si la pérdida p corresponde a la PML, se obtiene lo que se conoce como la probabilidad de quiebra (P_Q), la cual no es más que la probabilidad de exceder la PML en un lapso T .

$$P_Q = 1 - e^{-T/Tr(PML)} \quad 25$$

4.2.4 Otras métricas del riesgo

La curva de excedencia de pérdidas contiene toda la información necesaria para caracterizar de manera rigurosa la ocurrencia de pérdidas. Es posible determinar directamente de $v(p)$ otras métricas del riesgo que pueden ser relevantes para la toma de decisiones. Aquí se presentan algunos ejemplos.

La función de densidad de probabilidad de la pérdida durante el próximo evento, o un evento tomado al azar, se obtiene como,

$$f(p) = -\frac{1}{v(0)} \frac{dv(p)}{dp} \quad 26$$

La probabilidad de exceder un nivel de pérdida particular tras la ocurrencia del próximo evento, o un evento tomado al azar, se puede calcular como,

$$Pr(P > p) = \frac{v(p)}{v(0)} \quad 27$$

La función de densidad de probabilidad del tiempo hasta la ocurrencia del próximo evento (t) es exponencial y se define como,

$$f(t) = v(p)e^{-v(p)t} \quad 28$$

El número de eventos (N) que ocurrirán en un lapso T , que igualan o exceden la pérdida p , se distribuye Poisson, por lo cual la probabilidad que ese número sea igual a n es,

$$Pr(N = n) = \frac{(v(p)T)^n e^{-v(p)T}}{n!} \quad 29$$

4.3 Resultados de la evaluación

La Tabla 15 muestra los valores de la pérdida anual esperada (PAE) para los 4 municipios, tanto para el clima actual como para los climas futuros considerados. La Figura 29 presenta la PAE relativa de forma gráfica, en donde es posible comparar la diferencia en el riesgo causada por el cambio climático en cada municipio. La Figura 30 muestra las curvas de PML de cada municipio.

Tabla 15. Pérdidas Anuales Esperadas por incendios forestales

Municipio	Valor expuesto	Clima base		RCP 2.6		RCP 4.5	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
San Vicente del Caguán	\$ 53,183,615	\$ 154,416	2.9	\$ 223,371	4.2	\$ 212,734	4.0
Palermo	\$ 1,576,243	\$ 2,999	1.9	\$ 4,408	2.8	\$ 4,571	2.9
Orocué	\$ 1,972,901	\$ 9,544	4.8	\$ 12,025	6.1	\$ 20,490	10.4
Cumaribo	\$ 115,224,020	\$ 407,677	3.5	\$ 556,479	4.8	\$ 506,742	4.4

Municipio	Valor expuesto	RCP 6.0		RCP 8.5		IDEAM	
		(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)	(COP millones)	(‰)
San Vicente del Caguán	\$ 53,183,615	\$ 203,829	3.8	\$ 463,248	8.7	\$ 202,098	3.8
Palermo	\$ 1,576,243	\$ 5,044	3.2	\$ 5,848	3.7	\$ 4,209	2.7
Orocué	\$ 1,972,901	\$ 19,469	9.9	\$ 28,631	14.5	\$ 2,072	1.1
Cumaribo	\$ 115,224,020	\$ 880,582	7.6	\$ 910,270	7.9	\$ 460,896	4.0

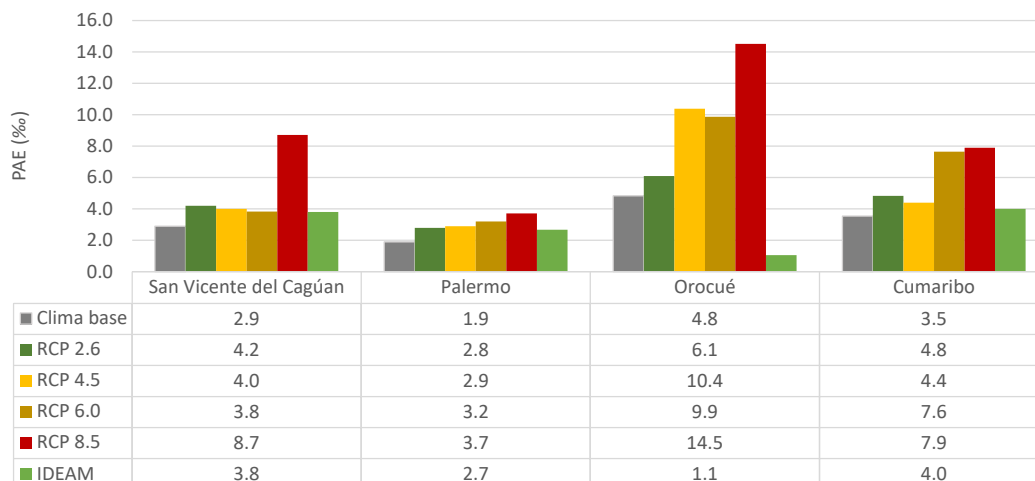


Figura 29. Pérdida anual esperada relativa por incendios forestales (al millar) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

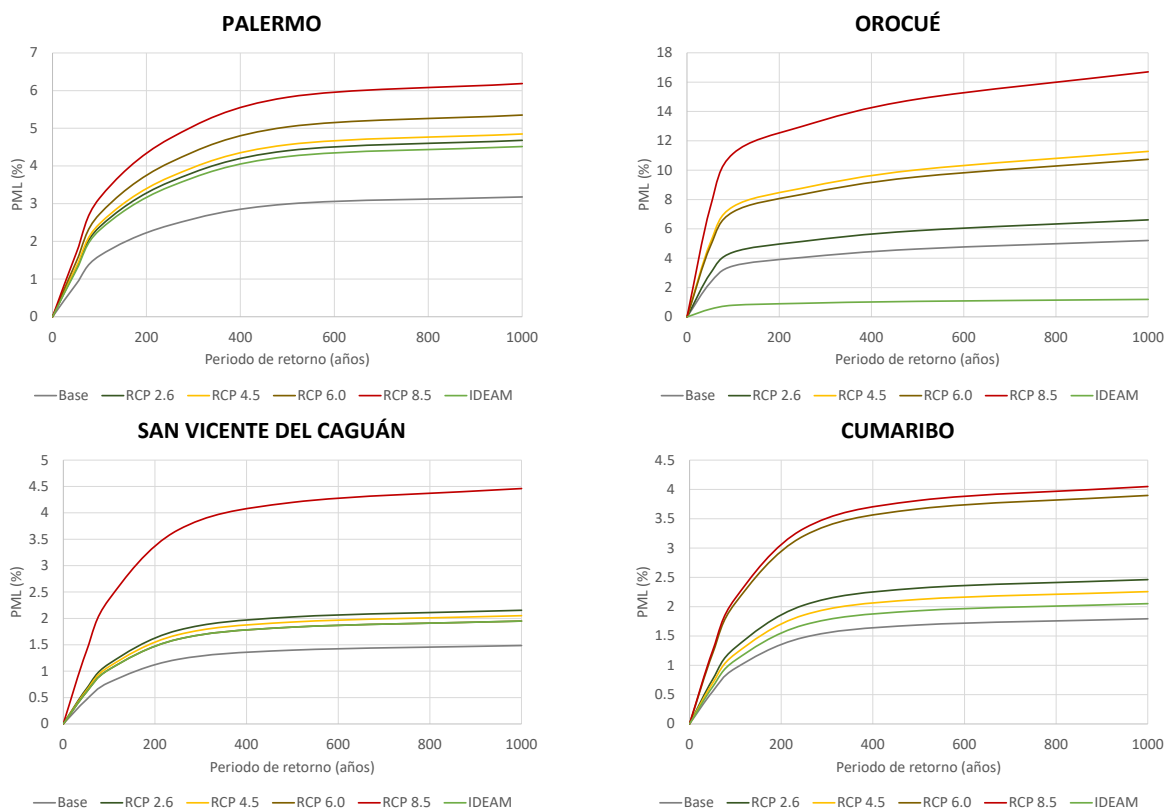


Figura 30. Curvas de PML relativa por incendios forestales (en porcentaje) para los 4 municipios, ante clima base y clima futuro.

En este caso, y dado que la evaluación se realiza a una escala detallada, es posible construir mapas de áreas quemadas para la totalidad de los eventos simulados. De la Figura 23 a la Figura 28 se presentan los mapas áreas quemadas ante diferentes climas, cubriendo la totalidad del territorio de evaluación. Así mismo, de la Figura 29 a la Figura 34, se presentan mapas de pérdida anual esperada por municipio y área protegida. Los archivos georreferenciados correspondientes se incluyen en el Anexo Digital.

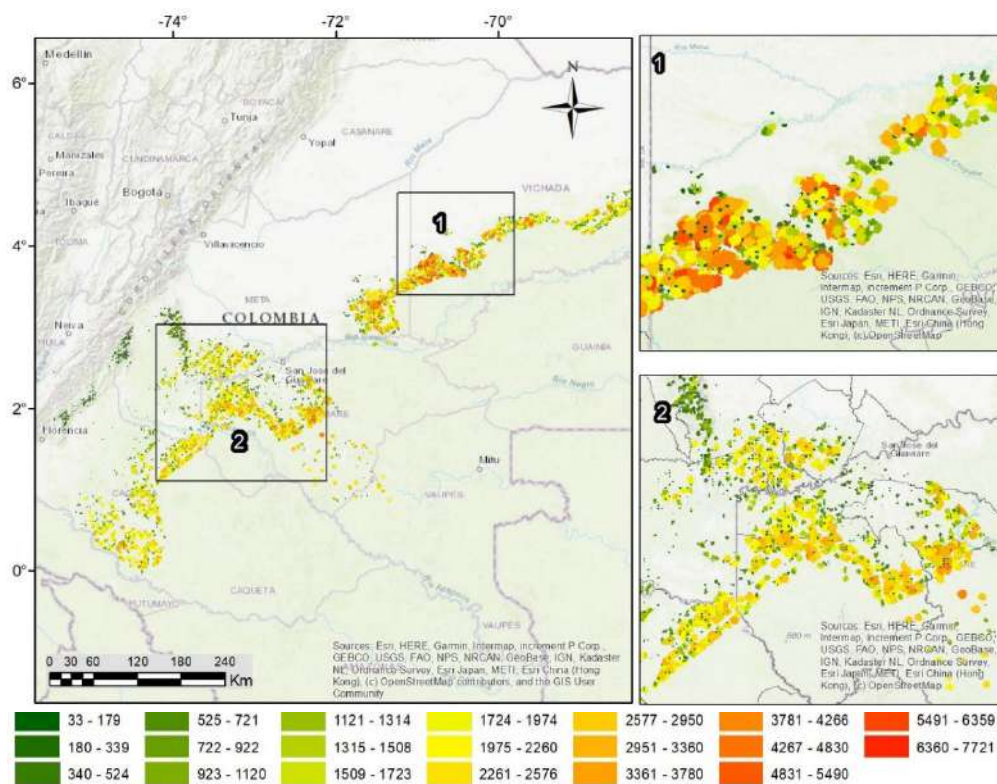


Figura 31. Ejemplo de áreas quemadas simuladas para un periodo de 30 años. Clima base

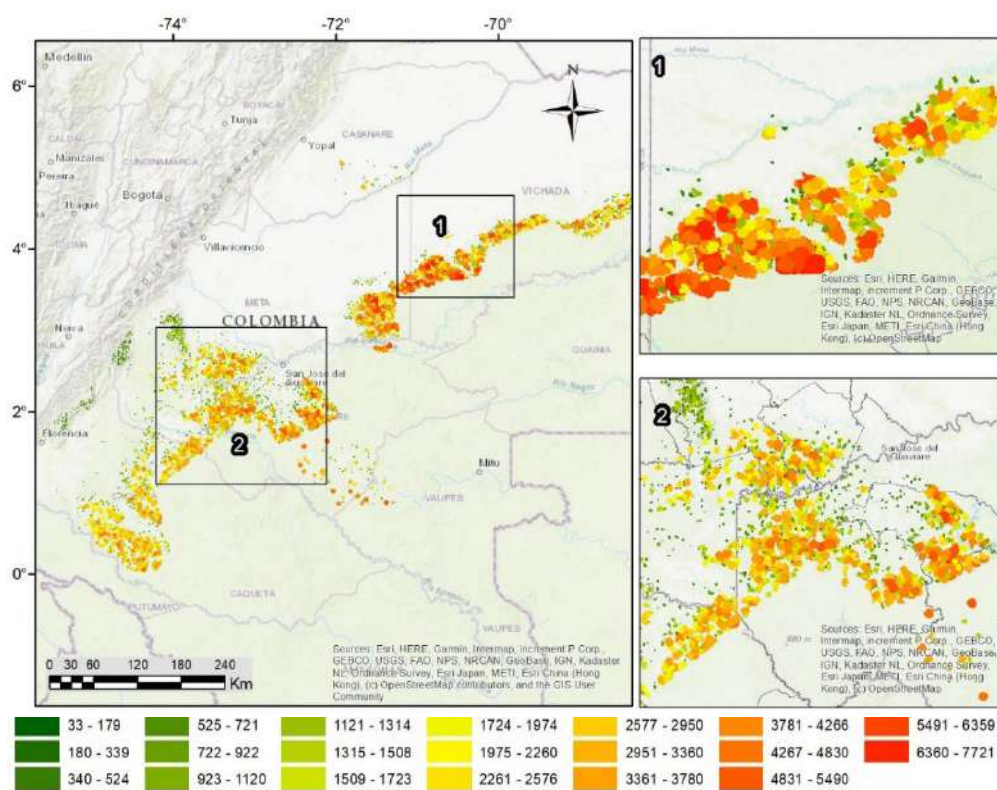


Figura 32. Ejemplo de áreas quemadas simuladas para un periodo de 30 años. RCP 2.6

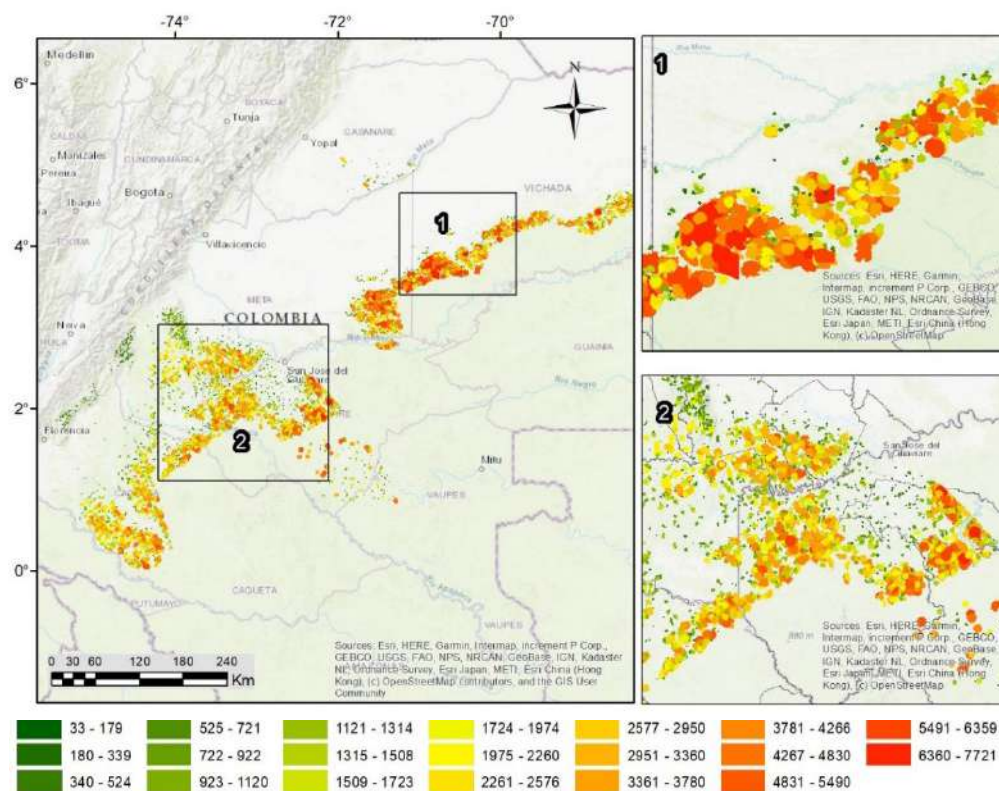


Figura 33. Ejemplo de áreas quemadas simuladas para un periodo de 30 años. RCP 4.5

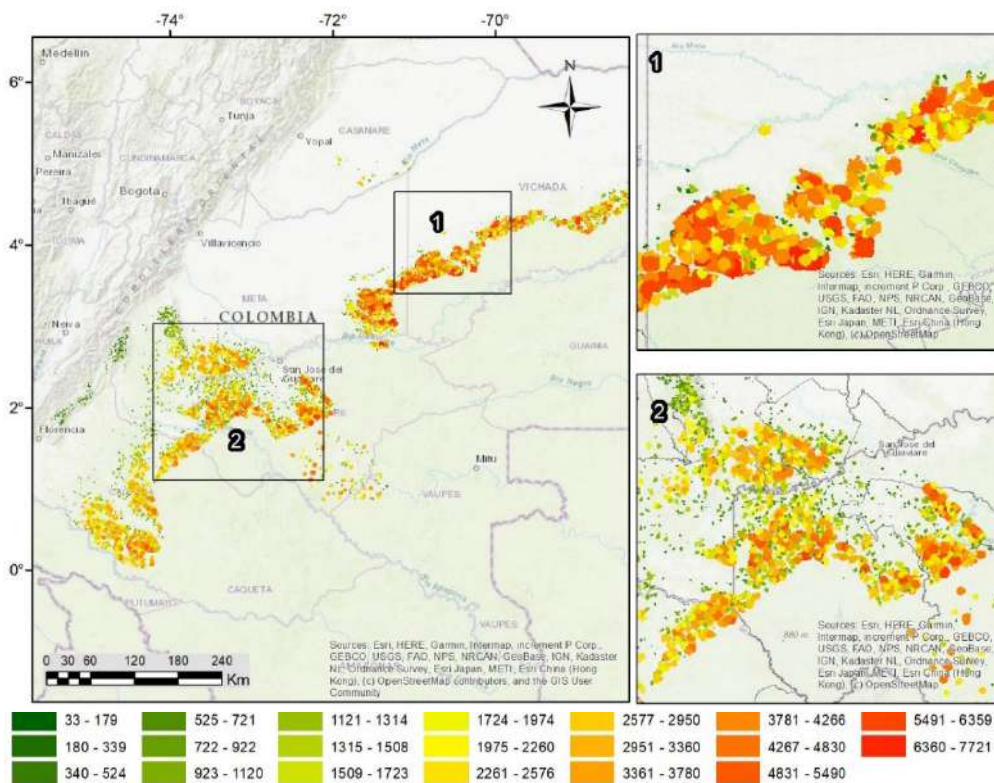


Figura 34. Ejemplo de áreas quemadas simuladas para un periodo de 30 años. RCP 6.0

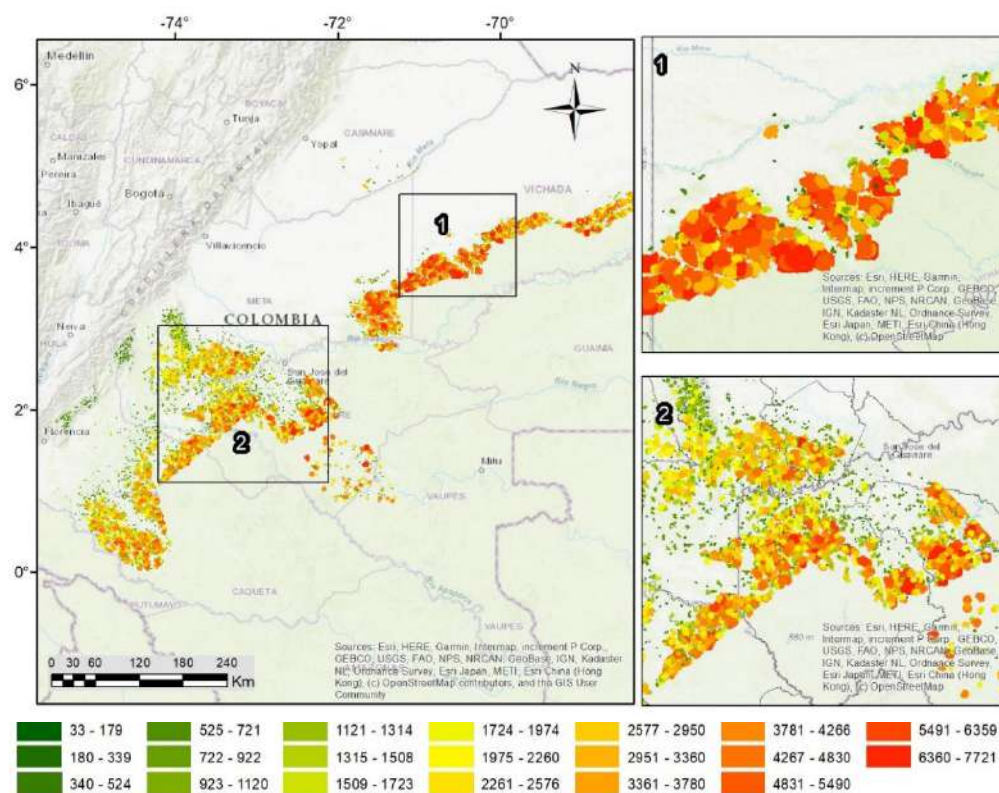


Figura 35. Ejemplo de áreas quemadas simuladas para un periodo de 30 años. RCP 8.5

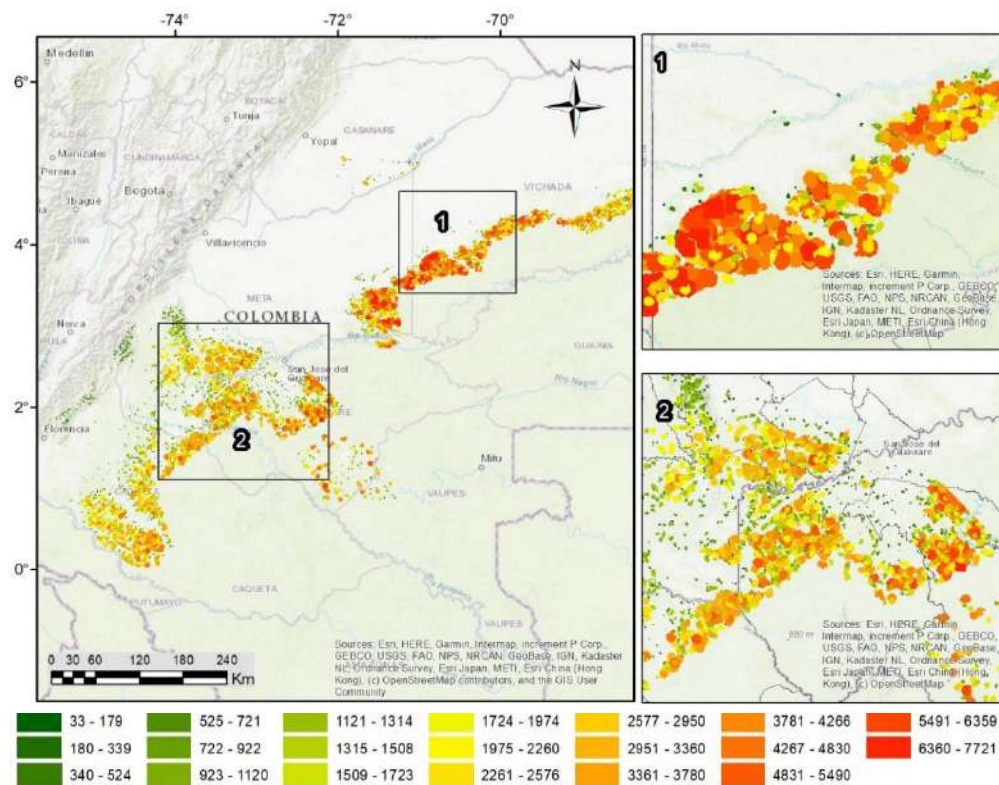


Figura 36. Ejemplo de áreas quemadas simuladas para un periodo de 30 años. Clima IDEAM

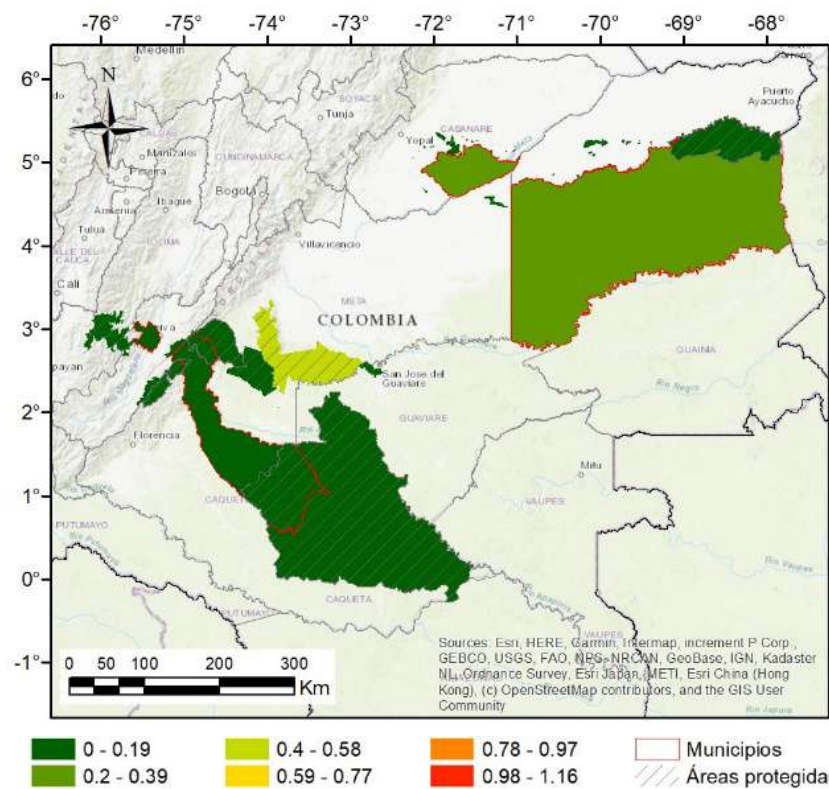


Figura 37. Pérdida anual esperada (al millar) por municipio y área protegida. Clima base

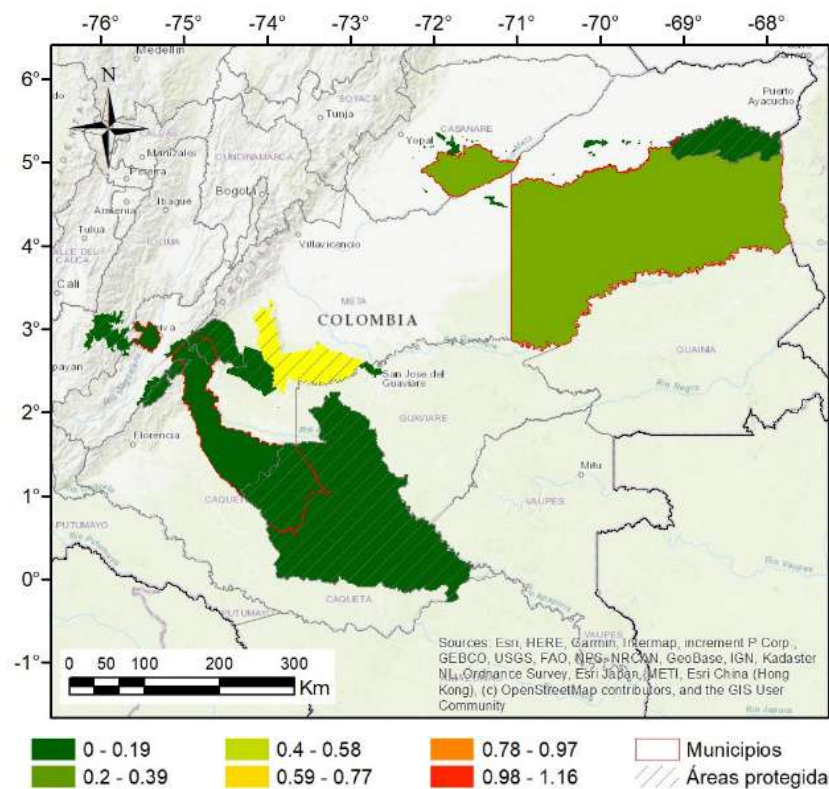


Figura 38. Pérdida anual esperada (al millar) por municipio y área protegida. RCP 2.6

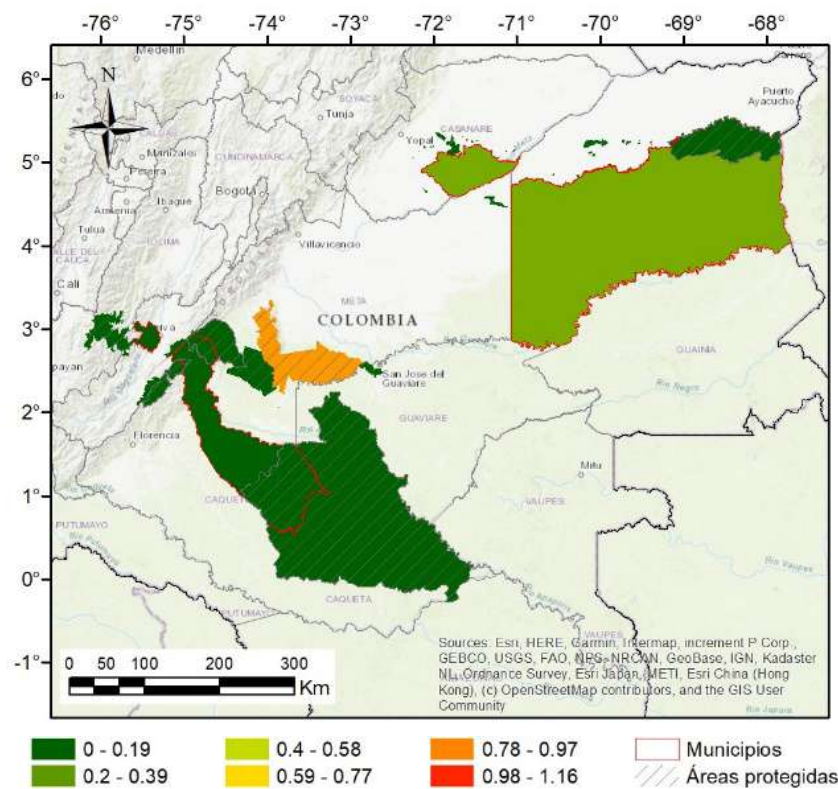


Figura 39. Pérdida anual esperada (al millar) por municipio y área protegida. RCP 4.5

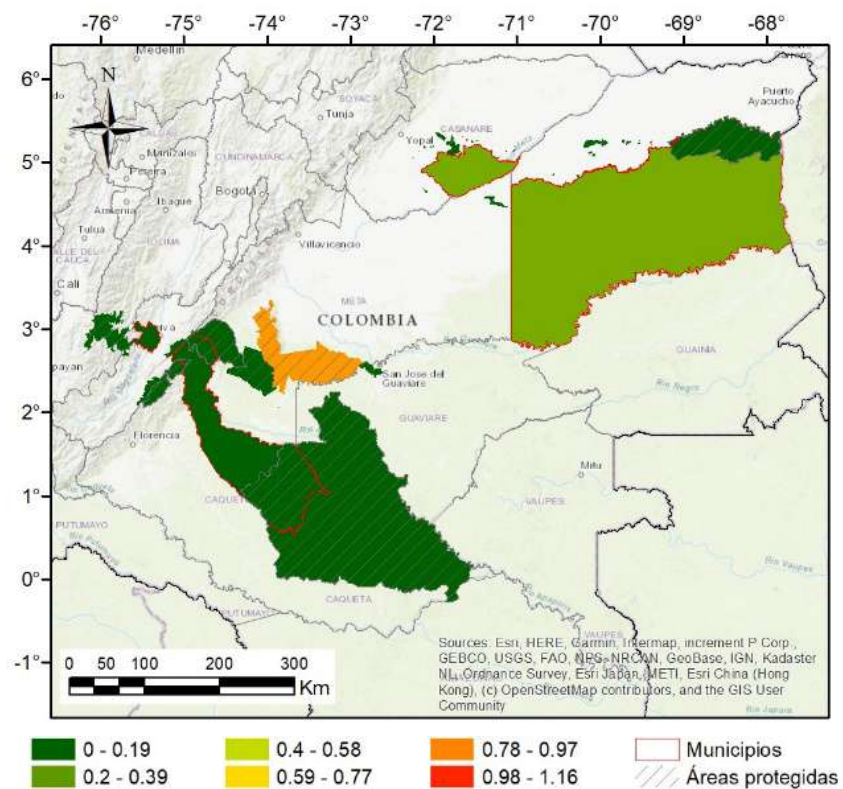


Figura 40. Pérdida anual esperada (al millar) por municipio y área protegida. RCP 6.0

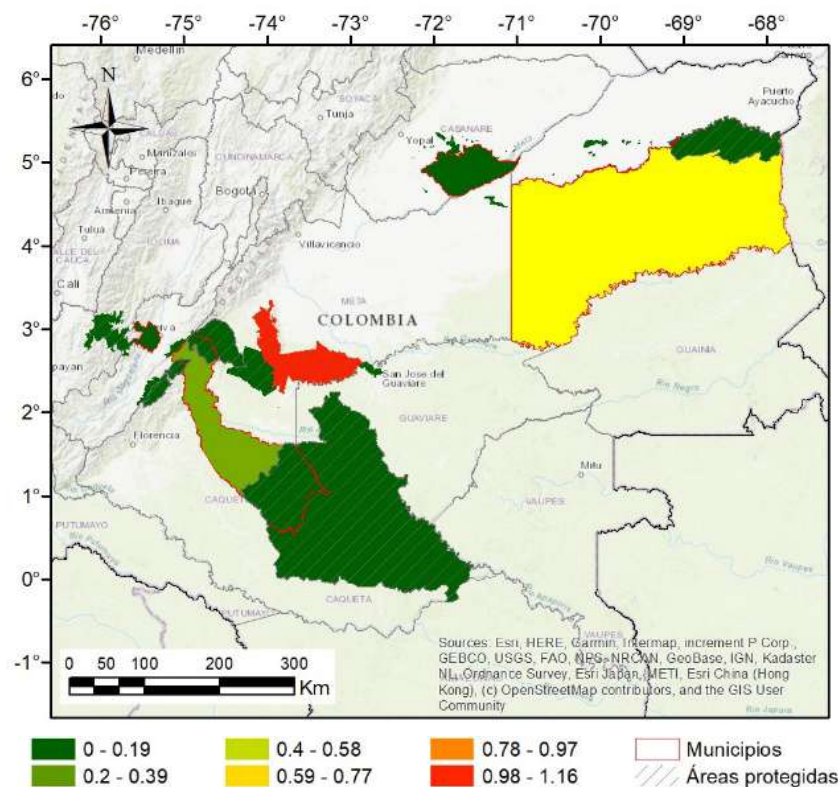


Figura 41. Pérdida anual esperada (al millar) por municipio y área protegida. RCP 8.5

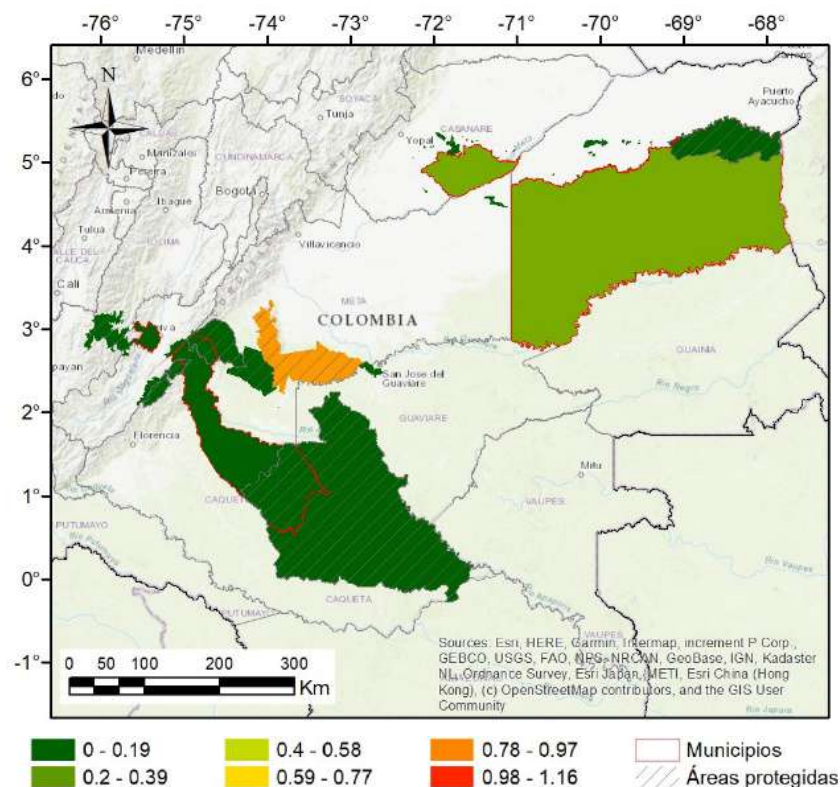


Figura 42. Pérdida anual esperada (al millar) por municipio y área protegida. Clima IDEAM

5 REFERENCIAS

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (Instituto Humboldt), Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras José Benito Vives de Andrés (Invemar) e Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC). (2017). Mapa de ecosistemas continentales, costeros y marinos de Colombia (MEC), escala 1:100.000.

IDEAM (30 de agosto de 2023). Variación de la Superficie de Cobertura Vegetal Afectada por Incendios. Extraído de: http://bart.ideam.gov.co/indiecosistemas/ind/bosques/variacion_incendios.html

ASTER GDEM (2019). ASTER Global Digital Elevation Model V003. Extraído de: <https://search.earthdata.nasa.gov/search>

EARTHDATA NASA (2023). Fire Information for Resource Management System (FIRMS). Extraído de <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/find-data/near-real-time/firms>

Copernicus Climate Change Service. (2017). ERA5: Fifth generation of ECMWF atmospheric reanalyzes of the global climate. Copernicus Climate Change Service Climate Data Store (CDS). Retrieved from <https://cds.climate.copernicus.eu/cdsapp#!/home>

IDEAM. (2017) Mapa de Ecosistemas Continentales, Costeros y Marinos de Colombia. Escala 1:100.000. Versión 2.1. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales.

Costanza, R., D'Arge, R., De Groot, R., Farber, S., Grasso, M., Hannon, B., ... Van Den Belt, M. (1997). The value of the world's ecosystem services and natural capital. *Nature*, 387(6630), 253-260. <https://doi.org/10.1038/387253a0>

Costanza, R., de Groot, R., Sutton, P., van der Ploeg, S., Anderson, S. J., Kubiszewski, I., ... Turner, R. K. (2014). Changes in the global value of ecosystem services. *Global Environmental Change*, 26(1), 152-158. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2014.04.002>

Groot, R., Brander, L., van der Ploeg, S., Costanza, R., Bernard, F., Braat, L., ... van Beukering, P. (2012). Global estimates of the value of ecosystems and their services in monetary units. *Ecosystem Services*, 1(1), 50-61. <https://doi.org/10.1016/j.ecoser.2012.07.005>

Scott, J. H., & Burgan, R. E. (2005). Standard Fire Behavior Fuel Models: A Comprehensive Set for Use with Rothermel's Surface Fire Spread Model. S Department of Agriculture, Forest Service, Intermountain Forest and Range Experiment Station. <http://www.fs.fed.us/rm/publications>

Pettinari M., & Chuvieco E. (2016). Generation of a global fuel data set using the Guel Characteristic Classification System. <https://doi.org/10.5194/bg-13-2061-2016>