

## CARTOGRAFIA DEL RIESGO DE INCENDIOS FORESTALES EN EL CERRADO: Un abordaje integrado de gestión en Três Lagoas

*CARTOGRAFIA DO RISCO DE INCÊNDIOS FLORESTAIS NO CERRADO: uma abordagem integrada de gestão em Três Lagoas*

*FOREST FIRE RISK MAPPING IN THE CERRADO: an integrated management approach in Três Lagoas*

### RESUMEN

Los incendios forestales causan numerosos cambios ambientales, como la reducción de la biodiversidad, la pérdida de los suelos, pérdida de la vegetación y consecuentemente el aumento de la deforestación. El presente trabajo tiene como objetivo principal evaluar el riesgo de incendios forestales, en la región del cerrado brasileño que presenta una fuerte expansión de la silvicultura, utilizando Sistemas de Información Geográfica. Para ello, se utilizan ocho variables ambientales y socioculturales para identificar las áreas más susceptibles a los incendios forestales, que son: área edificada (Ac); pendiente (D); hidrografía (Hi); hotspot (Ho); orientación de la pendiente (Ov); precipitación (P); proximidad a la red vial (Prv) y uso y cobertura del suelo (U), que fueron evaluadas en el SIG usando álgebra de mapas. Los resultados muestran el predominio del riesgo medio de incendio, con el 72,30% del área total del municipio de Três Lagoas. El riesgo de incendio bajo representa poco más del 22%, mientras que el riesgo alto abarca solo el 4,89% del municipio. Lo que evidencia que el municipio presenta riesgos de incendio que pueden manejarse mediante su cartografía. Ya que existe un mayor riesgo en los meses de junio, julio y especialmente agosto y septiembre, lo que requiere especial atención por la baja precipitación y el aumento de la concentración media de los hotspots.

**Palabras-clave:** Sistema de Información Geográfica; cartografía de riesgo de incendios forestales; álgebra de mapas; Mato Grosso do Sul.

### RESUMO

Os incêndios florestais causam numerosas alterações ambientais, como a redução da biodiversidade, a perda de solos, a perda de vegetação e, consequentemente, o aumento do desmatamento. O presente trabalho tem como objetivo principal avaliar o risco de incêndios florestais na região do Cerrado brasileiro, que apresenta uma forte expansão da silvicultura, utilizando Sistemas de Informação Geográfica. Para isso, utilizam-se oito variáveis ambientais e socioculturais para identificar as áreas mais suscetíveis aos incêndios florestais, que são: área edificada (Ac); declividade (D); hidrografia (Hi); hotspot (Ho); orientação da vertente (Ov); precipitação (P); proximidade da malha viária (Prv) e uso e cobertura do solo (U), as quais foram avaliadas no SIG utilizando álgebra de mapas. Os resultados mostram o predomínio do risco médio de incêndio, abrangendo 72,30% da área total do município de Três Lagoas. O risco de incêndio baixo representa pouco mais de 22%, enquanto o risco alto cobre apenas 4,89% do município. Isso evidencia que o município apresenta riscos de incêndio que podem ser gerenciados por meio de sua cartografia, considerando que o risco é maior nos meses de junho, julho e, especialmente, agosto e setembro, o que requer atenção especial devido à baixa precipitação e ao aumento da concentração média de hotspots.

**Palavras-chave:** Sistema de Informação Geográfica; cartografia de risco de incêndios florestais; álgebra de mapas; Mato Grosso do Sul.

-  Víncler Fernandes Ribeiro de Oliveira<sup>a</sup>
-  Edson dos Santos da Silva<sup>b</sup>
-  Erivelton Pereira Vick<sup>c</sup>
-  Bruno Henrique Machado da Silva<sup>d</sup>
-  Amanda Ayumi de Souza Amede Sato<sup>e</sup>
-  Vitor Matheus Bacani<sup>f</sup>
-  Cesar Gustavo da Rocha Lima<sup>g</sup>
-  Aguinaldo Silva<sup>h</sup>
-  Eduardo Salinas Chávez<sup>i</sup>

<sup>a</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>b</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>c</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>d</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>e</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>f</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>g</sup> Universidade Estadual Paulista Júlio Mesquita Filho (UNESP), São Paulo, São Paulo, Brasil

<sup>h</sup> Universidade Federal do Mato Grosso do Sul (UFMS), Campo Grande, Mato Grosso do Sul, Brasil

<sup>i</sup> Universidade de Granada, Granada, Espanha

DOI: 10.12957/geouerj.2024.76889

Correspondência: fulano@gmail.com

Recebido em: 20 jun. 2023

Revisado em: 07 out. 2024

Aceito em: 10 dez.2024





## ABSTRACT

Forest fires cause numerous environmental changes, such as reduced biodiversity, soil loss, loss of vegetation and, consequently, increased deforestation. The main objective of this work is to evaluate the risk of forest fires, in the Brazilian Cerrado region that presents a strong forest expansion, using Geographic Information Systems. To this end, eight environmental and sociocultural variables are used to identify the areas most susceptible to forest fires, which are: built area (Ac); slope (D); hydrography (Hello); access point (Ho); slope orientation (Ov); precipitation (P); proximity to the road network (Prv) and land use and cover (U), which were evaluated in the GIS using cartographic algebra. The results show the predominance of the medium fire risk, with 72.30% of the total area of the municipality of Três Lagoas. The low fire risk represents just over 22%, while the high risk covers only 4.89% of the municipality. This shows that the municipality presents fire risks that can be managed through mapping. Since there is a greater risk in the months of June, July and especially August and September, which requires special attention due to low rainfall and the increase in the average concentration of outbreaks.

**Keywords:** Geographic Information System; forest fire risk mapping; map algebra; Mato Grosso do Sul.



## INTRODUCCIÓN

El fuego ha sido durante mucho tiempo una herramienta utilizada en la limpieza de pastizales y plantaciones (ASSUNÇÃO et al., 2017; FERREIRA et al., 2020) constituyéndose en un aliado importante para la eliminación de hongos, insectos y enriquecimiento del suelo por nutrientes y minerales presentes en las cenizas (CHOWDHURY; HASSAN, 2015), además de ser un elemento indispensable en el funcionamiento de algunos ecosistemas (RAMALHO et al., 2021). Soares (1985) señala que el fuego, cuando se utiliza de manera planificada y cautelosa, puede generar beneficios positivos tanto para el medio ambiente como para las actividades socioeconómicas.

Sin embargo, cuando no se usa de forma planificada, el fuego puede causar daños humanos y ambientales significativos. Los incendios forestales causan numerosos cambios ambientales, como la reducción de la biodiversidad, la pérdida de los suelos (KANDYA et al., 1998; GHESLAGHI et al., 2019), pérdida de la vegetación y consecuentemente el aumento de la deforestación (AHN et al., 2014). En este sentido, los incendios son considerados la principal causa de la pérdida de los recursos forestales en nuestro planeta (DOWDY et al., 2017; PAYETTE, et al., 2017; XU et al., 2020), especialmente en regiones con alto déficit de humedad, lo que ocasiona situaciones de diferente gravedad (LIU et al., 2018).

Tomando en cuenta las condiciones actuales y la posibilidad de una mayor ocurrencia de incendios forestales relacionados con el aumento de la temperatura global y la irregularidad de las precipitaciones como consecuencia del Cambio Climático, el crecimiento de la población y las actividades humanas (PRESTON et al., 2009), los mismos se han convertido en uno de los temas más recurrentes y actuales del debate ambiental a nivel mundial (TIAN et al., 2013; EUGENIO et al., 2016).

En Brasil, la ocurrencia de incendios forestales también es un tema de elevada atención. Según el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE, 2021a), entre los años 2003 y 2020 los incendios forestales destruyeron un área acumulada de 6.033.951 km<sup>2</sup>, lo que equivale al 70,9% del área del territorio brasileño. Según Soares Neto et al. (2016), la mayoría de estos incendios se concentraron en el bioma Cerrado, lo que ha sido ratificado por los datos del INPE (2021a), que señala que las áreas quemadas acumuladas en este bioma representaron casi el 50,7% de todas las áreas quemadas en Brasil entre los años 2003 y 2020, a pesar de que este bioma ocupa aproximadamente el 24% del territorio nacional. Otros biomas significativamente afectados son la Amazonía (26,1% de todas las áreas quemadas acumuladas), Caatinga (12,7%), Mata Atlántica (5,9%), Pantanal (4,1%) y Pampa (0,5%).

De los biomas mencionados, la ocurrencia de incendios forestales es mayor en dos de ellos: Cerrado y Pantanal. El primero, si bien tiene una superficie de 2.036.448 km<sup>2</sup>, registró 3.058.825 km<sup>2</sup> de superficie quemada acumulada, una diferencia superior de más de 1 millón de km<sup>2</sup> (150% del área oficial). En el Pantanal



la situación es aún más grave, ya que mientras el área oficial de este bioma es de 150.355 km<sup>2</sup>, en el periodo analizado, registró más de 244.879 km<sup>2</sup> de área acumulada quemada una diferencia de 94.524 km<sup>2</sup> (163% del área oficial). Estos datos indican la amplia incidencia de los incendios forestales y la vulnerabilidad de dichos biomas a los mismos, lo que impone riesgos para la alta biodiversidad que se encuentra en ambos así como en las poblaciones que los habitan, las infraestructuras y los servicios ambientales que los mismos deben brindar.

Es en este contexto, que el desarrollo de herramientas y políticas para la prevención y el control de los incendios forestales juegan un papel importante, especialmente cuando se basan en una visión de gestión proactiva. Según Oliveira et al. (2020), los mecanismos de prevención adquieren mayor importancia en el marco de una perspectiva basada en una visión integrada, centrada en la identificación de las áreas más susceptible al fuego, el control de los materiales combustibles y la gestión en sí misma, visión cercana a la que Tedim et al. (2016) sintetizaron en el concepto de Territorio Inteligente contra el Fuego (FST), los que mencionaron que los incendios forestales solo pueden gestionarse comprendiendo las características locales y preparando estratégicamente a cada territorio y a sus habitantes para que sean menos susceptibles y más resilientes.

Así, la hipótesis que guía este trabajo es que la cartografía de la riesgo a los incendios (OMENA, et al., 2016; OLIVEIRA et al., 2017; TORRES, et al., 2017; LOPES, et al., 2018; ÇOLAK; SUNAR, 2020), como herramienta que contribuya efectivamente al desarrollo sostenible, tendrá un papel importante en la gestión integrada de estos, permitiendo la identificación de las áreas más susceptibles y la adopción de medidas de planificación territorial y gestión, que permitan la protección y valorización de los recursos naturales, las inversiones socioeconómicas y la biodiversidad. Esta cartografía, realizada mediante el empleo de los Sistemas de Información Geográfica, se convierte entonces en una herramienta rentable, desburocratizada y que contribuye con los responsables del manejo integrado de incendios.

Considerando lo anteriormente señalado, el presente estudio tiene como objetivo principal evaluar lo riesgo a los incendios forestales en el municipio de Tres Lagoas en el estado de Mato Grosso do Sul, en el cual se ha originado desde hace décadas una sustitución de la vegetación original del Cerrado por pastos y posteriormente plantaciones de eucaliptos para la producción de celulosa (utilizando herramientas presentes en los Sistemas de Información Geográfica).

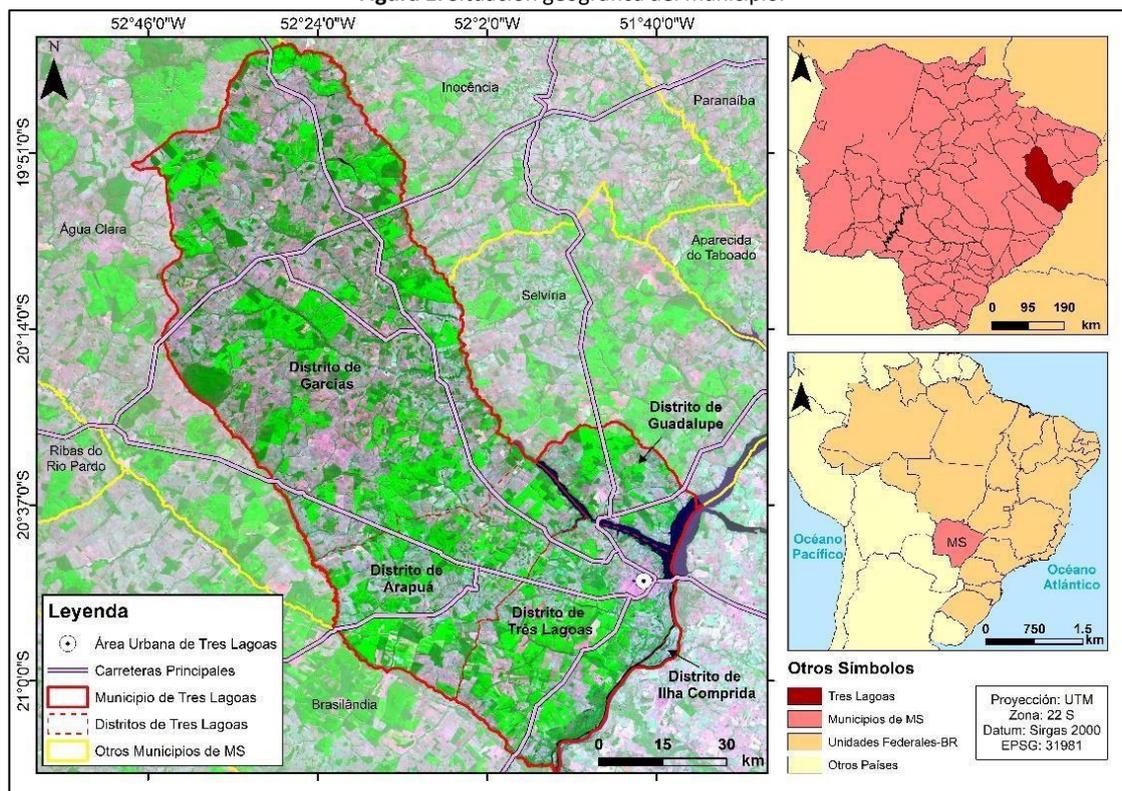
## MATERIAL Y MÉTODOS

### Área de estudio

El municipio de Três Lagoas se encuentra en la región oriental del estado de Mato Grosso do Sul (MS), y comprende el territorio del bioma Cerrado brasileño. Con un área territorial de 10.206 km<sup>2</sup>, este municipio está ubicado entre los ríos Sucuriú (al norte) y Paraná (al este), limitando con los municipios de Brasilândia - MS, Água Clara - MS, Inocência - MS y Selvíria - MS y los municipios de Itapura - SP, Castilho - SP y Paulicéia - SP (Figura 1). En el año 2020, la población de Três Lagoas se estimó en 123.281 habitantes (IBGE, 2020) concentrados principalmente en su área urbana.

Este municipio ha registrado un crecimiento acelerado en las últimas décadas, de las plantaciones de eucalipto como parte del desarrollo del complejo eucalipto-celulosa-papel (LELIS; JUNIOR, 2016). A pesar de un primer ciclo de expansión del monocultivo de eucalipto entre los años 70 y 80 del siglo pasado, es a partir de la década del 2000 que el municipio de Três Lagoas se vio afectado por dicha expansión y la instalación de nuevas plantas industriales para el procesamiento de la celulosa (KUDLAVICZ, 2011). Como resultado de este proceso, actualmente aproximadamente la quinta parte del área municipal está ocupada por plantaciones de eucalipto destinadas a la producción de celulosa y papel.

Figura 1. Situación geográfica del municipio.



Fuente: Organizado por los autores según la información de Áreas Territoriales (IBGE, 2019) e Imagen orbital del satélite Cbers-4, sensor WFI (INPE, 2020).



El municipio se basa en el grupo Bauru con la Formación Santo Anastácio (FERNANDES y COIMBRA, 2000) y debido su estructura geológica, el municipio tiene pendientes poco pronunciadas y una altitud media de 370,6 metros sobre el nivel medio del mar, la que disminuye del noroeste al sureste.

Según el IBGE (2006) el clima de la región puede considerarse como tropical, con veranos lluviosos y baja precipitación en invierno, con 1 a 2 meses secos al año, con precipitación media anual histórica de 1.332,6 mm (ANA, 2021). Y en esta investigación sólo se utilizaron datos de mayo, junio, julio, agosto y septiembre, los cinco meses de mayor estrés hídrico.

### Procedimientos metodológicos

El presente trabajo se sustenta en la aplicación de la metodología de análisis de riesgo de incendio propuesta por Bacani (2016) y adaptada por Oliveira et al. (2020). Para lo cual se utiliza un conjunto de ocho variables ambientales y antrópicas que permiten identificar las áreas más susceptibles a los incendios forestales, estas variables son: área construida (Ac); pendiente (D); hidrografía (Hi); *hotspot* (Ho); orientación de la pendiente (Ov); precipitación (P); proximidad a la red vial (Prv) y uso y cobertura de la tierra (U). Las variables utilizadas para la cartografía del riesgo de incendios forestales son:

Área construida (Ac): Se refiere a toda el área urbana, industrial, de asentamientos y los distritos existentes en el municipio. La concentración de áreas construidas, debido a la presencia constante de personas, es importante para comprender el riesgo de incendios. En estas zonas, y en sus alrededores, el riesgo de ignición de incendios es mayor, dada la ejecución de diversas actividades humanas. Así, estas áreas pueden configurarse como centros generadores de incendios. Por otro lado, los espacios cercanos a las áreas construidas presentan una amenaza constante de reducción o incluso desaparición total, como resultado del mal uso del fuego (GUTZWILLER; BARROW, 2003; SILVEIRA et al., 2008; BACANI, 2016).

Las áreas construidas que se refieren a las áreas urbanas, industriales, asentamientos rurales y los distritos se vectorizaron manualmente a partir de las imágenes de alta resolución se utilizaron para el mapeo utilizando el método de interpretación visual de imágenes (NOVO, 2010). Fue elegido por el método de interpretación visual para identificar áreas urbanizadas en imágenes de Bing de alta resolución (ArcGIS/ArcMap) debido a su capacidad para capturar matices detallados que los algoritmos de clasificación supervisados pueden no reconocer, además de la experiencia local de los analistas que asegura mayor precisión y eficiencia. Inicialmente se utilizó el catálogo de imágenes en el software ARCGIS 10.6® (ESRI, 2018), con una resolución fija de 1:8.000, luego de algunos ajustes utilizando imágenes Sentinel 2-A/B para garantizar la integridad de los datos, ya que las imágenes disponibles en el catálogo tienen datos diferentes.



El área de los asentamientos rurales del municipio fue extraída del IBGE (2019), estos fueron considerados en esta variable por ser una zona antropizada con algunas características de las mismas como son infraestructura vial, servicios y viviendas en una pequeña área, incluso en una zona rural. Entre las zonas rurales y urbanas se consideró la relación con la vegetación forestal, donde las áreas construidas en zonas rurales, especialmente cercanas a vegetación densa, representan un mayor riesgo de ignición de incendios forestales debido a la interfaz entre las estructuras humanas y el combustible natural. Esta proximidad facilita la propagación del fuego, especialmente en zonas con prácticas agrícolas u otras actividades que aumentan el riesgo de ignición. A partir de esta información, se calculó la distancia euclidiana, seguida de la función lineal Fuzzy, indicando la siguiente relación: cuanto mayor es la proximidad de las áreas construidas, mayor es el riesgo de ignición de incendios forestales (Figura 2A).

Pendiente (D): Se asocia principalmente a la propagación del fuego y no tanto a su ignición, constituyendo así una variable de propagación. En consecuencia, PEZZOPANE et al. (2001) señalan que en las laderas más inclinadas hay una mayor probabilidad de que el fuego se propague. Este efecto se produce, porque el calor emitido por el mismo puede calentar la vegetación situada en las zonas más altas de las laderas, acelerando la propagación del fuego. Por lo tanto, las características topográficas del relieve es un factor importante para la ocurrencia de incendios y, aunque inmóviles, son determinantes en la indicación del inicio, dirección y propagación del fuego (LOPES et al., 2018).

En este sentido, el mapa de pendientes del municipio de Três Lagoas se generó a partir de la imagen orbital del Satélite ALOS (Advanced Land Observing Satellite), sensor PALSAR (Phased Array Type L-band Synthetic Aperture Radar). Con una resolución espacial de 12,5 metros, las imágenes de este satélite muestran un mayor nivel de detalle de las características topográficas, como señalan Oliveira et al. (2020). En el software ARCGIS 10.6® (ESRI, 2018), la pendiente se genera mediante la herramienta pendiente y se clasificó en seis clases a intervalos de 0-3%, 3-5%, 5-10%, 10-15% y > 35%, según lo definido por Jaiswal et al. (2002), ya utilizado en estudios en Brasil, como Bacani (2016) y Oliveira et al. (2020). Después de la clasificación, la función lineal creciente Fuzzy se aplicó a la pendiente, utilizando la herramienta Fuzzy Membership (Figura 2B).

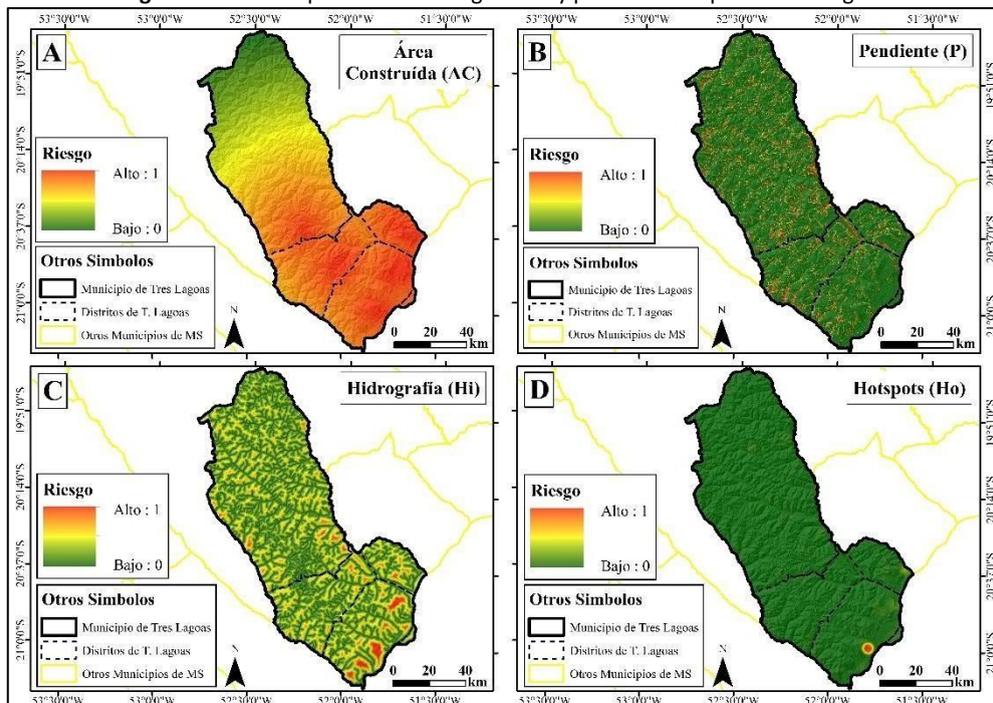
Hidrografía (Hi): Esta variable juega un papel importante en la contención del fuego, ya que constituye una barrera natural para la propagación de los incendios forestales (FORMAN; COLLINGE, 1997), además, los recursos hídricos tienen un papel destacado en la lucha contra las llamas, permitiendo la captación del agua (WHITE et al., 2016). Sobre la base de este principio, la relación establecida fue: cuanto más cerca de la red de drenaje, menor es el riesgo de incendios.

Así, la red hidrográfica del municipio fue extraída del proyecto GEOMS (SILVA et al., 2011), siendo sometida al proceso de distancia euclidiana (herramienta Distancia Euclidiana) y luego a la función lineal Fuzzy (Figura 2C).

*Hotspot* (Ho): son firmas de calor recogidas por sensores remotos de la temperatura de 47°C que pueden indicar la ocurrencia de incendios forestales. Considerando que la serie histórica de dichos puntos generada por el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE) tiene más de 20 años de datos (desde 1998 hasta la fecha) y que estos pueden indicar la ocurrencia de incendios, el uso de estos puntos críticos como variable para comprender lo riesgo a los incendios es muy importante, indicando un aspecto histórico de la ocurrencia de incendios y permitiendo identificar las áreas más afectadas por los incendios puntuales, según Bacani (2016), reflejan una cierta propensión al riesgo de incendio.

Así, al igual que en los trabajos de Bacani (2016), Santos et al. (2017), Barbosa et al. (2019) y Oliveira et al. (2020), se utilizaron datos de los *hotspots* de 1998 al 2020 extraídos de la base de datos de quemadas del Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE, 2021b). Estos fueron filtrados para eliminar los datos redundantes según Santos (2017) y luego fueron tratados con el procedimiento estadístico de Kernel (PARZEN, 1962), mediante la herramienta Kernel Density, con el objetivo de distribuir la concentración de puntos para el período analizado. Luego, se aplicó la función lineal fuzzy que indica la relación siguiente: cuanto mayor es la concentración de *hotspots*, mayor es el riesgo de incendios (Figura 2D).

Figura 2. Variables procesadas en lógica Fuzzy para el municipio de Três Lagoas.



Fuente: autores.

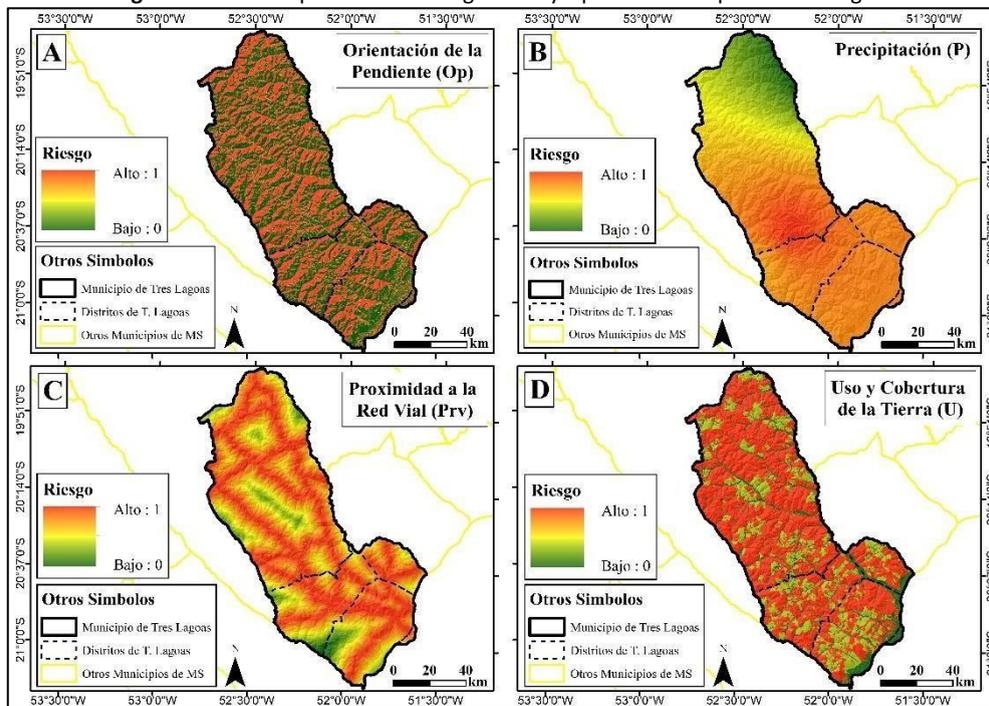


Orientación de la pendiente (Ov): esta variable está asociada con el tiempo más o menos largo en que los materiales combustibles (como la materia orgánica) permanecen bajo la incidencia solar directa, lo que resulta en el aumento de la temperatura local y la reducción de su humedad (SILVEIRA et al., 2008). En consecuencia, a partir de este escenario es posible establecer según Pezzopane et al. (2001), Bacani (2016) y Oliveira et al. (2020) que: cuanto mayor es la incidencia solar sobre el material combustible, mayor es el riesgo de ignición y propagación de los incendios. Además, White et al. (2016) señalan que, debido a la situación geográfica de Brasil principalmente al sur del ecuador, las laderas orientadas al norte reciben una mayor radiación solar en relación con las orientadas al sur, evidenciando la importancia de comprender esta variable para el manejo de los incendios forestales.

Así, para determinar la orientación al Sol de las diferentes zonas del municipio, utilizamos la imagen del satélite ALOS, sensor Palsar procesado en el software ARCGIS 10.6® (ESRI, 2018), mediante la herramienta Aspect. A partir de esta herramienta las laderas se clasificaron de acuerdo con los intervalos definidos por Cunha y Bacani (2015) y los pesos determinados por Bacani (2016), en el siguiente orden: 135-225 (Sur); 45 a 135 (Este); 315-45 (Norte) y 225-315 (Oeste) (Figura 3A).

Precipitación (P): es importante determinar los períodos de disponibilidad y estrés hídrico, ya que nos permiten comprender la presencia o no de humedad en el ambiente (OLIVEIRA et al., 2020). En este sentido, los datos de precipitación utilizados en este trabajo provienen de cinco estaciones pluviométricas (ANA, 2021), con datos registrados de 1998 al 2019. La utilización de los datos específicos de los meses más secos se justifica por el aumento, según Bacani (2016), del riesgo de incendios en este período. En general, en periodos de estrés hídrico hay una mayor propensión a los incendios forestales, mientras que en los momentos más húmedos hay menor susceptibilidad a los incendios. Por otro lado, las áreas con tasas de precipitación anual más bajas pueden presentar un mayor riesgo a los incendios que aquellas con altas precipitaciones. En este sentido, la precipitación es una variable restrictiva para la ignición y propagación de los incendios, y se puede establecer la siguiente relación: cuanto mayor es la precipitación, menor es el riesgo de incendios; También se aplica la relación inversa.

Figura 3. Variables procesadas en lógica Fuzzy para el municipio de Três Lagoas.



Fuente: autores.

A estos datos se aplicó el método de interpolación de los valores medios mediante la herramienta Ponderación del Inverso de la Distancia (IDW). Luego, el resultado de interpolación fue restringido al límite del municipio de Três Lagoas y sometido a la función lineal Fuzzy, en la que las áreas con mayor precipitación presentaron menor probabilidad de incendio (Figura 3B).

Proximidad a la red vial (Prv): la red vial aquí presentada se refiere a las carreteras pavimentadas federales y estatales y otras principales sin pavimentar, así como un tramo ferroviario que atraviesa el municipio. Estas infraestructuras fueron consideradas debido a su alto potencial de ignición para incendios forestales. Según Oliveira et al. (2020) la vecindad de la red vial presenta altos riesgos debido al flujo de vehículos y personas que eventualmente pueden contribuir directa o indirectamente a la ignición de incendios. Las colillas de cigarrillos encendidas, así como metales y vidrios, son ejemplos de materiales comúnmente arrojados alrededor de las carreteras que pueden iniciar un incendio.

Así, los datos de las autopistas, carreteras y vías férreas utilizadas en esta etapa fueron extraídos del IBGE (2019) y corregidos manualmente en una escala de 1:8.000 mediante el software ARCGIS 10.6®; durante la vectorización, se agregaron algunos caminos rurales no cartografiados por el IBGE (2019). Después de la corrección, se aplicó el proceso de distancia euclidiana a los datos, de la red vial, seguido de la función lineal Fuzzy, lo que permite establecer la relación siguiente: cuanto mayor es la proximidad a la red vial, mayor es el riesgo de incendios (Figura 3C).



Uso y cobertura de la tierra (U): Esta variable se refiere tanto al proceso de ignición como a la propagación de los incendios forestales. Cada clase de uso y cobertura de la tierra tiene un grado de susceptibilidad a los incendios, y este grado se clasifica atendiendo a su comportamiento frente a los mismos (FERRAZ; VETTORAZZI, 1998; PEZZOPANE et al., 2001; MISTRY; BERARDI, 2005; BACANI, 2016). En este contexto, las grandes superficies arbóreas, constituidas por formaciones forestales, tienden a ser más "resistentes" a los incendios en relación a las formaciones arbustivas. En esta misma línea de razonamiento, la vegetación ribereña tiende a ser más resistente que las gramíneas o las gramíneas leñosas.

Así, para analizar el uso y la cobertura de la tierra del municipio de Três Lagoas, se realizó una clasificación digital orientada a objetos, utilizando dos imágenes satelitales Landsat-8 (sensor OLI) con orbita-punto 223/74 y 223/75, con fecha 28 de julio del 2017. En vista del papel que juega el estado de la atmósfera en estas imágenes y su posible influencia en el proceso de clasificación digital se realizó procesamiento de imágenes digitales (JENSEN, 2009). Inicialmente se adoptó la corrección atmosférica, realizada en el software ENVI 5.4®, utilizando el algoritmo de corrección FLAASH (ARIAS et al., 2014). A continuación, las imágenes corregidas se importaron al software eCognition 9.2® para realizar su clasificación utilizando la herramienta GEOBIA (Geographic Object-Based Image Analysis).

Para el análisis de las imágenes se utilizó la segmentación multiresolución, en la cual se asignó un peso de 10 para la banda infrarroja cercana, con el fin de resaltar mejor las áreas de vegetación. Se realizó la composición en falso color RGB 654, con el propósito de descifrar visualmente mejor los objetos. Siguiendo el patrón adoptado en la cartografía del proyecto GEOMS (SILVA et al. 2011), se definieron diez clases de uso y cobertura de la tierra, mostradas en la Tabla 1.

Después de su cartografía, estas clases fueron reclasificadas recibiendo pesos de acuerdo con su grado de riesgo a los incendios forestales. Estos pesos se definieron siguiendo lo propuesto por Bacani (2016) y Setzer et al. (2017) (Tabla 1). Después se aplicó la función lineal Fuzzy, definiendo el mayor riesgo para cada uso del suelo y las clases de cobertura más susceptible a los incendios forestales (Figura 3D).



Tabla 1. Clases de uso y cobertura de la tierra reclasificadas según el riesgo de incendio.

Uso y Cobertura de la Tierra	Peso	Riesgo (Fuzzy)	Área (Km <sup>2</sup> )	Área (%)
Agua	0	Nulo	183,1	1,79
Fa -Vegetación riparia: aluvial, herbácea y arbustiva, a lo largo del río.	1	Muy Bajo	1254,62	12,29
R – Plantaciones Forestales de Eucaliptos y Pinos.	2	Bajo	2069,84	20,28
SNc/(Sd+Fs) - Bosque estacional semi-deciduo submontano.	3	Medio	1,1	0,01
Sd - Sabana (Cerrado) forestal.	3	Medio	88,65	0,87
Sd - Sabana (Cerrado) arbolada.	3	Medio	1085,62	10,64
Sps - Sabana (Cerrado) Parque.	3	Medio	3,63	0,04
Sgf-Sabana (Cerrado) gramíneo- leñosa.	4	Alto	30,19	0,30
Ac.s - Agricultura en las áreas de sabana.	5	Muy Alto	7,49	0,07
Ap.s – Pastos plantados en las áreas de sabana.	5	Muy Alto	5423,75	53,14
Lu - Áreas Urbanas.	5	Muy Alto	58,01	0,57
<b>TOTAL</b>			<b>10.206</b>	<b>100</b>

Fuente: Organizada por los autores a partir de Bacani (2016) y Oliveira et al. (2020).

Tomando en cuenta todas las variables ya sometidas a la función lineal Fuzzy, éstas se combinaron para obtener el producto final: el mapa de riesgo de incendios forestales. Este proceso se realizó con la herramienta Raster Calculator, aplicando la relación expresada en la ecuación 1.

Ec. 1:

$$RI = \frac{Ac + D + HI + Ho + Ov + P + Prv + U}{8}$$

Donde RI: riesgo de incendio; Ac: área construida; D: pendiente; Hi: hidrografía; Ho: *hotspot*; Ov: orientación de la pendiente; P: precipitación; Prv: proximidad a la red vial y U: uso y cobertura de la tierra.

La media fue la única entre la combinación de variables que presentó buenos resultados en cuanto a la distribución del riesgo de incendio. Anteriormente, se probaron la media potenciada y la mediana. Es importante resaltar que debido a la aplicación de la lógica difusa hubo una distribución de mayor o menor riesgo combinado entre las variables. No es necesario asignar mayor peso por la importancia de una determinada variable.



Aunque los valores de la función Fuzzy lineal tienen originalmente un rango que varía entre 0 y 1 (siendo 0 el menor riesgo y 1 el mayor), para una mejor representación, visualización y comprensión del riesgo de incendios forestales se clasificó en cinco categorías con intervalos de 0,2, siguiendo lo propuesto por Oliveira et al. (2020). La utilización de este intervalo se debe a la clara diferenciación de clases de riesgo de incendio en el municipio. Se probó el Jenks Natural Break, pero no respondió bien a la distribución de clases.

## RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Con la combinación de las ocho variables analizadas, se establecieron cuatro clases de riesgo de incendios forestales en el municipio de Três Lagoas, como se muestra de forma cuantitativa en la Tabla 2 y espacialmente en la Figura 4.

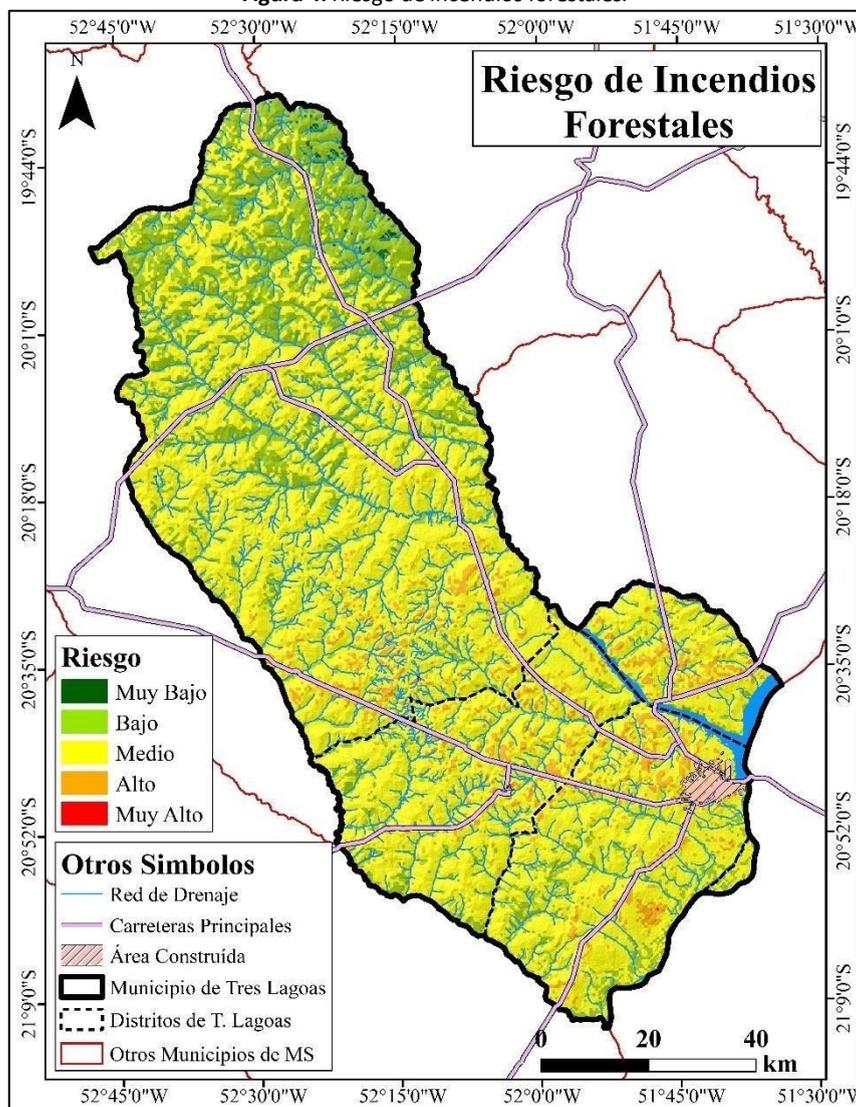
**Tabla 2.** Distribución de las clases de riesgo a los incendios forestales.

CLASES	ÁREA (km <sup>2</sup> )	ÁREA (%)
Muy baja	35,32	0,35
Baja	2.294,09	22,48
Media	7.377,23	72,28
Alta	499,36	4,89
<b>TOTAL</b>	<b>10.206</b>	<b>100</b>

Fuente: autores.

Las áreas que presentan riesgo de incendio muy bajo se concentran en el norte del municipio, ocupando una superficie de aproximadamente 35,32 km<sup>2</sup> (Tabla 2), como resultado de una mayor precipitación, un uso y cobertura de la tierra poco susceptible a los incendios, mayor distancia a las áreas construidas, menor concentración de *hotspots* y la orientación de las laderas hacia el sur y el este principalmente. Estas últimas suelen presentar un bajo riesgo de incendios forestales, debido a la menor insolación, restringida principalmente a los periodos de temperaturas diurnas más suaves (SOARES, 1985; OLIVEIRA, 2002; ILLANA, 2006; WHITE et al., 2016).

Figura 4. Riesgo de incendios forestales.



Fuente: autores.

Las áreas que presentan un riesgo de incendio bajo ocupan 2.294,09 km<sup>2</sup>, algo más del 22% de la superficie total del municipio, estando distribuidas por todo el territorio, pero con mayor concentración en la zona centro-norte, donde son elevadas las precipitaciones, la distancia a las áreas construidas es media, la pendiente es poco pronunciada y existe una alta concentración de cursos de agua. Sin embargo, los cambios en dos variables son responsables del aumento del riesgo de incendios: por un lado, hay un cambio en el uso y cobertura de la tierra con la presencia de clases más susceptibles a los incendios, como los pastizales (riesgo muy alto); y una mayor proximidad a la red vial.

La clase de riesgo de incendio medio es la de mayor extensión en todo el municipio, ocupando aproximadamente 7.377,23 km<sup>2</sup>, es decir, más del 72% de la superficie municipal, influyendo principalmente: el uso y cobertura de la tierra (por el predominio de los pastos); la proximidad a las áreas construidas (zona



urbana, distrito y asentamientos); proximidad a la red vial (carreteras principales y caminos sin asfaltar); la orientación de las pendientes (con grandes áreas orientadas al norte y al oeste) y la reducción de las precipitaciones. Por otro lado, no se identificaron cambios importantes en la hidrografía, la pendiente y los *hotspots*.

Encontrando entonces un aumento del riesgo de incendio en cinco de las ocho variables analizadas en este trabajo, incluyendo algunas de gran importancia, como el uso y la cobertura de la tierra, las precipitaciones y la presencia de personas y vehículos. Así, el riesgo medio de incendio es una clase de singular importancia para el municipio y requiere tomar medidas adecuadas de gestión, por el propio riesgo que caracteriza a esta clase, así como, por su amplia distribución espacial.

En este artículo, al igual que en el trabajo de White et al. (2016), no se ha diferenciado el riesgo de incendio en función del tipo de vía, ya que existe una ausencia importante de datos en cuanto al flujo de vehículos por las carreteras del municipio. Sin embargo, se puede suponer que el riesgo de incendios forestales (principalmente en lo que respecta a su ignición) es mayor cerca de las carreteras más transitadas, a saber, las carreteras federales BR-262 y BR-158, un resultado similar al señalado por Oliveira et al. (2020).

La clase de alto riesgo de incendio sintetiza una mayor combinación de variables con altos valores. En este caso, además de las variables mencionadas en la clase anterior (riesgo medio), en la determinación de la misma influyen una reducción aún mayor de las precipitaciones, una menor densidad de los cauces fluviales (lo que aumenta el riesgo de propagación del fuego), un aumento de la pendiente (que registra índices de riesgo altos) y un aumento de la densidad de *hotspots* e historial de ocurrencia de los mismos en la zona.

Como se puede observar en la Figura 4, el riesgo alto de incendio se distribuye de forma irregular y discontinua en las áreas central, oriental y sur del municipio, ocupando una superficie de aproximadamente 500 km<sup>2</sup>, es decir, el 4,89% de este. Aunque esta clase se distribuye en un área menor en comparación con el riesgo medio, tiene gran importancia porque puede considerarse como área de ignición y posterior propagación de los incendios forestales, pudiendo alcanzar otras partes del municipio, especialmente en periodos de estrés hídrico, cuando la vegetación (incluso la más resistente) presenta mayor susceptibilidad al fuego. En estas zonas debe definirse y aplicarse una atención especial y, por lo tanto, un conjunto de medidas de gestión, especialmente durante los períodos de estrés hídrico

Es preciso señalar que, aunque gran parte del municipio resultó como de riesgo medio de incendio, este resultado podría ser peor si tomamos en cuenta que más de la mitad de este está cubierto por pastos a pesar de que aproximadamente el 89% de la superficie municipal está ocupada por un relieve que varía entre plano



y muy suave, con pendientes que oscilan entre el 0 y el 5%, ya que como conocemos si las pendientes fueran más pronunciadas esto influiría en la diseminación del fuego, como lo señala Soares (1984).

Otra variable que desempeña un papel importante en la existencia del riesgo de incendios es el uso y la cobertura de la tierra. Teniendo en cuenta que más del 53,79% de la superficie municipal está cubierta por usos del suelo clasificados como de muy alto riesgo de incendios, se puede extender lo riesgo de la zona a los incendios, especialmente en los periodos más secos. En estos periodos, la oferta de material combustible procedente de algunos usos y cobertura puede aumentar como consecuencia de la menor disponibilidad de agua en el sistema. Así, la asociación entre la baja humedad y la gran cantidad de material combustible influyen en el mayor riesgo de incendios forestales (KOVALSYKI et al., 2019).

En cuanto al uso y la cobertura de la tierra, otro punto a destacar es el hecho de que algo más del 20% de la superficie del municipio está ocupada por plantaciones comerciales, concretamente por el monocultivo de eucaliptos. Esta clase se define como de bajo riesgo de incendio (BACANI 2016, OLIVEIRA et al., 2020) por entender que se trata de un entorno controlado y frecuentemente vigilado, aunque Lopes et al. (2018) lo consideran como de alto riesgo.

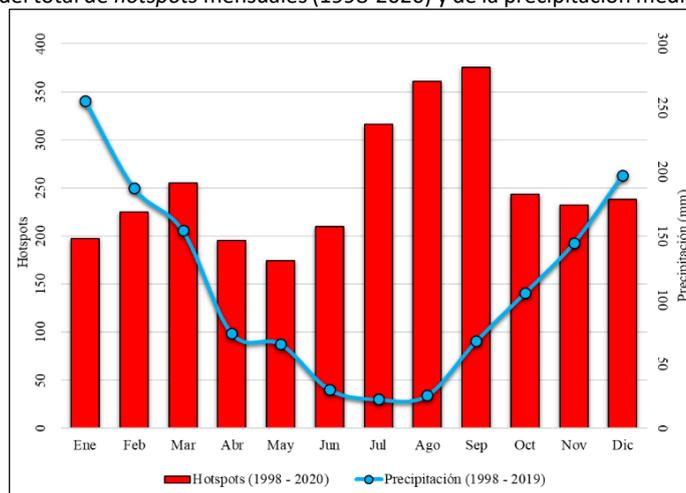
En este contexto, se puede resumir que las áreas ocupadas por la silvicultura de eucaliptos se gestionan tanto en términos de prevención de incendios (la lucha contra el riesgo) como en la supresión de los mismos, por la pérdida financiera potencial que pueden causar los mismos. Sin embargo, hay que tener en cuenta que el riesgo de incendio no sólo se refiere a la ignición del fuego, sino también a su propagación. La progresión de los incendios iniciados en otras zonas del entorno, puede poner en peligro los bosques plantados, así como otras clases de uso y cobertura de la tierra. Por lo tanto, la gestión del riesgo de incendios debe ser parte de un proceso sistémico que involucre a los agentes públicos y privados y a los residentes locales (TEDIM et al., 2016).

Para esto, la gestión del riesgo de incendios forestales debe realizarse de forma conjunta, implicando a todo el término municipal. En este sentido, estudios recientes promueven el desarrollo de medios de prevención de incendios, como en Batista y Biondi (2009), Batista et al. (2012), Biondi et al. (2014), Kovalsyki et al, (2016) y Kovalsky (2019) quienes destacan el uso de especies arbóreas de menor índice de inflamabilidad como cortina de seguridad alrededor del monocultivo principal.

Además del uso y la cobertura mencionados, la distribución de las precipitaciones en el municipio es otro factor que influye directamente en el riesgo de incendios. De esta forma las precipitaciones, son mayores en la región norte y disminuyen hacia el sur, siendo de importancia también la distribución temporal de las mismas. Según el análisis de los datos pluviométricos de las cinco estaciones situadas en el municipio y sus

alrededores, con datos registrados desde 1998 hasta el 2019, junio, julio y agosto son los meses de menores precipitaciones, mientras que las lluvias son superiores en los meses de noviembre a marzo (Figura 5).

**Figura 5.** Distribución del total de *hotspots* mensuales (1998-2020) y de la precipitación media mensual (1998-2019).



Fuente: Elaboración propia a partir de *Hotspots* (INPE, 2021b); precipitación (ANA, 2021).

En este contexto, cuando se analiza la distribución de los *hotspots* en el periodo de 1998 al 2020, se observa una mayor incidencia en los meses de julio, agosto y septiembre (Figura 5). Pudiendo explicarse, la mayor concentración de los *hotspots* en los meses de julio y agosto por la distribución temporal de las precipitaciones. Pero hay dos aspectos complicados de entender: una menor concentración de *hotspots* en junio y una mayor concentración en septiembre. La primera puede explicarse por la acumulación de la humedad procedente de los meses lluviosos anteriores; y que, a pesar de una reducción constante de la humedad, junio constituye sólo el primer mes del período más seco del año y probablemente aún mantiene índices positivos de agua almacenada en el suelo. Septiembre es el primer mes de reanudación de la época de lluvias, pero todavía a un nivel que no es capaz de revertir el déficit hídrico registrado en los meses anteriores. Así, las lluvias de septiembre no consiguen cambiar la situación de los incendios forestales, sino que los atenúan. Sólo se registra una reducción significativa de los *hotspots* en octubre, cuando la época de lluvias comienza (Figura 5).

Tomando en cuenta que a medida que disminuyen las precipitaciones aumenta la concentración media de *hotspots*, julio, agosto y septiembre son los meses más críticos en relación con los incendios, lo que aumenta el riesgo de los mismos. Por lo tanto, en este periodo deben adoptarse medidas adicionales de gestión de riesgos.

Siempre en relación con los *hotspots*, su ubicación dentro de las clases de riesgo de incendio apunta a su mayor distribución relativa a medida que aumenta el riesgo de incendios forestales. Considerando que las



clases de riesgo de incendio con mayor distribución espacial presentan un mayor porcentaje de *hotspots* (caso de riesgo bajo y medio), se aplicó una relación simple entre los mismos para cada clase y su respectiva superficie, obteniendo su distribución relativa (H/km<sup>2</sup>) expresada en la Tabla 3.

**Tabla 3.** Relación espacial entre las clases de riesgo a los incendios y los hotspots.

Clase	Área de la clase		Hotspot (H)		Distribución relativa (H/km <sup>2</sup> )
	km <sup>2</sup>	(%)	Número	(%)	
Muy bajo	35,32	0,35	2	0,08	0,06
Bajo	2.294,09	22,48	441	16,92	0,19
Medio	7.377,23	72,28	1965	75,37	0,27
Alto	499,36	4,89	199	7,6	0,40
<b>TOTAL</b>	<b>10.206</b>	<b>100</b>	<b>2607</b>	<b>100</b>	-

Fuente: autores.

La distribución relativa de *hotspots* por kilómetro cuadrado muestra su mayor concentración en la clase de riesgo de incendio forestal alto (0,40), mientras que las clases de riesgo muy bajo, bajo y medio presentan una cantidad ascendente de los mismos. Así, a pesar de que la clase de riesgo medio presenta un mayor porcentaje de *hotspots* en relación con la clase de riesgo alto (75,37% y 7,6%, respectivamente), su distribución relativa es menor en la clase de riesgo medio en relación con la clase de riesgo alto (0,27 H/km<sup>2</sup> y 0,40 H/km<sup>2</sup>, respectivamente). De este modo, este resultado normaliza la distribución de los *hotspots* dentro de cada clase, disminuyendo los malentendidos que podría presentar un simple porcentaje. Por lo tanto, este resultado está de acuerdo con lo que se esperaba en esta cartografía, ya que se presenta una mayor distribución relativa de los *hotspots* en las clases de riesgo de incendios superiores.

### RIESGO DE INCENDIO DENTRO DE LAS CLASES DE USO Y COBERTURA DEL SUELO

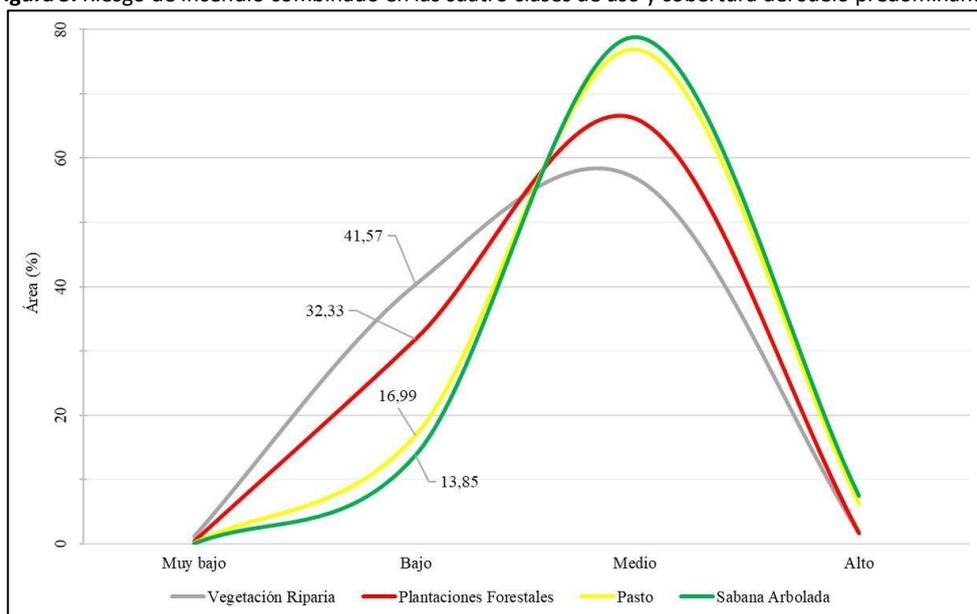
La cartografía realizada nos muestra una visión particular del riesgo de incendios forestales basada en el análisis de ocho variables diferentes. Este análisis permite encuadrar el término municipal en diferentes niveles de riesgo, mostrando las áreas más susceptibles a los incendios, a partir de la combinación de ocho variables y no de una sola.

Así, además de las características internas de cada variable, su mayor o menor susceptibilidad al fuego viene determinada por su interacción con las otras siete. Así, por ejemplo, mientras que el uso y cobertura de la tierra, presentan una riesgo potencial al fuego, determinada por su comportamiento ante el mismo, su mayor o menor riesgo de incendio viene determinado por la interacción de sus características con las de las

demás variables que contribuyen al desarrollo de incendios forestales. En resumen, el resultado de la interacción entre las variables puede denominarse riesgo combinado (porque es el riesgo integrado), mientras que las características internas de cada variable apuntan a un riesgo potencial e interno.

En este contexto, la comprensión del riesgo combinado dentro de cada clase de uso y cobertura de la tierra, muestra la mayor o menor riesgo de esta clase al fuego, señalando aquellas que requieren mayor atención en su gestión. Así, se analizó el riesgo de incendio combinado dentro de las cuatro clases principales de uso y cobertura de la tierra en el municipio, buscando identificar el comportamiento combinado de estas clases tras el análisis del riesgo integrado. Las clases seleccionadas son las de mayor distribución espacial: plantaciones forestales, vegetación ribereña, pastos y sabana arbolada. En conjunto, estas cuatro clases ocupan 9.833,83 km<sup>2</sup>, es decir, el 96,35% de la superficie municipal (Figura 6).

Figura 5. Riesgo de incendio combinado en las cuatro clases de uso y cobertura del suelo predominantes.



Fuente: autores.

El análisis realizado muestra que la vegetación riparia es la clase de uso y cobertura de la tierra con mayor superficie en las áreas de riesgo de incendio muy bajo y bajo. Una situación opuesta a la de la sabana arbolada que sólo registra un 13,85% de su superficie en las clases de riesgo bajo. Entre las clases más antropizadas, las plantaciones forestales representan el 32,33% de su superficie con riesgo muy bajo y bajo, mientras que los pastizales presentan sólo el 16,99% de sus áreas en estas dos clases de menor riesgo.

Por otro lado, la sabana arbolada es la clase con mayor superficie en riesgo medio de incendio, casi un 79%. Los pastizales también presentan índices elevados, con casi el 77% de su superficie con riesgo medio de incendio. Por su parte, las plantaciones forestales presentan una superficie de riesgo medio menor, pero aún alto: el 66%. Por último, la vegetación riparia es la clase que presenta los índices más bajos, aunque el riesgo



medio sigue ocupando más de la mitad del total, 56,79%.

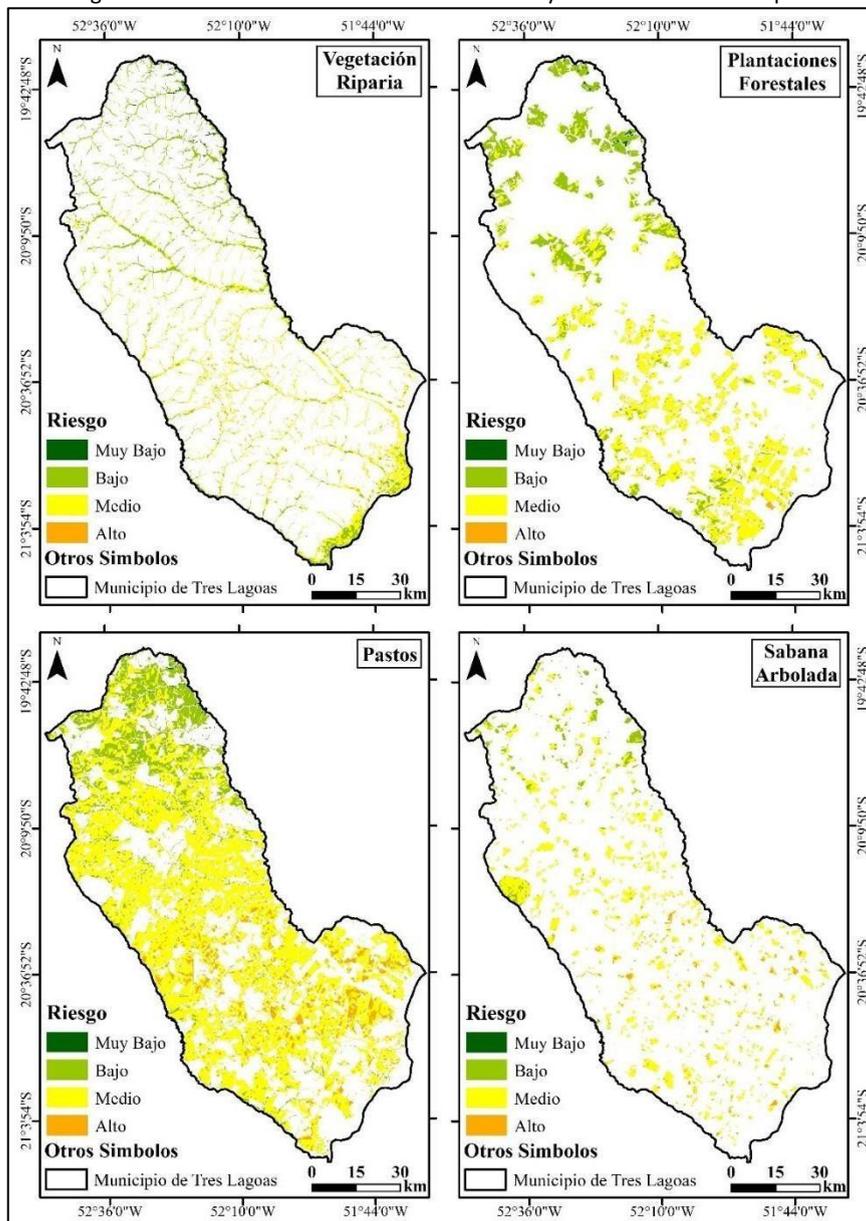
En cuanto al riesgo alto, las áreas de repoblación forestal y la vegetación riparia ocupan una superficie inferior al 2%, mientras que los pastos y la sabana arbolada, presentan respectivamente, índices del 6,22% y del 7,42%, siendo estos índices superiores al 4,89%, que es la media de la superficie municipal cubierta por esta clase de riesgo. En este contexto, las áreas de riesgo de incendio combinadas de las cuatro clases principales de uso y cobertura pueden visualizarse espacialmente en la Figura 7.

Este resultado indica que la vegetación riparia constituye la de menor riesgo de incendios entre las cuatro analizadas, presentando grandes áreas en las clases de riesgo muy bajo y bajo y una pequeña porción en las áreas de riesgo alto. Este resultado se debe a las características de esta clase, la proximidad a la red de drenaje, la pendiente plana, la orientación de las laderas y las precipitaciones, especialmente en la región norte y central del municipio. Por otro lado, más de la mitad (56,79%) de la vegetación riparia se encuentra en riesgo medio de incendio, especialmente en las áreas ubicadas cerca del río Paraná (Figura 7).

Las plantaciones forestales constituyen otra clase de uso y cobertura con menor riesgo de incendios en comparación con los pastos y la sabana arbolada. A pesar de presentar una amplia área con riesgo medio, también presentan importantes áreas de riesgo muy bajo y bajo (32,33%) y una pequeña área con riesgo alto (1,76%). La pendiente, la orientación de las laderas, la proximidad a la red hidrográfica y la baja densidad de *hotspots* contribuyen a este resultado. En cualquier caso, es evidente que la gestión y el seguimiento mitigan el riesgo en las áreas reforestadas, pero no lo eliminan y, teniendo en cuenta las inversiones asociadas a estos proyectos, se entiende que deberían redoblar y definirse para gestionar también las áreas que rodean a las mismas.

Por último, los pastos y la sabana arbolada constituyen las clases más susceptibles al fuego entre las cuatro principales. En el caso de los pastizales, el 83,01% de sus áreas presentan un riesgo medio y alto, mientras que en la sabana arbolada este índice es del 86,15%. Así, el resultado apunta a un alto riesgo de incendios combinado en los pastizales y la sabana arbolada, lo que puede ser resultado de las características internas de estas dos clases.

Figura 7. Riesgo de incendio combinado en las clases de uso y cobertura de la tierra predominantes.



Fuente: autores.

Los pastos presentan un riesgo potencial muy alto, mientras que la sabana arbolada presenta un valor medio. En el caso de los pastos, la combinación de las demás variables da lugar a una disminución del riesgo, que se manifiesta en el predominio del riesgo medio. Como ya se ha dicho, la orientación de las laderas, las pendientes poco pronunciadas del municipio y las mayores precipitaciones (principalmente en el norte) disminuyen el riesgo a los incendios forestales, lo que se complementa con una densidad restringida de *hotspots* y la proximidad a la red de drenaje. Sin embargo, se percibe que el riesgo de incendios de los pastos aumenta en el centro y sur del municipio, mientras que en el norte predominan las áreas de riesgo medio y bajo (Figura 7) lo que refleja el papel de las precipitaciones (más altas en el norte y más bajas en el centro y el



sur del municipio), y la mayor proximidad a las áreas construidas y a las carreteras/autopistas, presentes precisamente en el centro-sur del municipio.

Así, se evidencian al menos dos situaciones importantes: en general, las cuatro principales clases de uso y cobertura de la tierra presentan un mayor riesgo de incendio en la región centro-sur del municipio, hecho que se deriva principalmente de la reducción de las precipitaciones y de la mayor proximidad a las carreteras/autopistas; también en general, los pastizales y las sabanas arboladas constituyen las clases de uso y cobertura de la tierra más susceptibles a los incendios, aunque las plantaciones forestales y la vegetación riparia presentan más de la mitad de su superficie con un riesgo medio combinado.

También con mayor o menor riesgo, todas las clases de uso y cobertura de la tierra se presentan como susceptibilidad a los incendios, con algún riesgo relevante asociado; en segundo lugar, el riesgo combinado es mayor en la región centro-sur del municipio. Estas diferencias generales encontradas en el área de estudio no pueden obviarse en la gestión del riesgo de incendios a realizar.

En el contenido de este apartado deben identificarse y describirse los hallazgos de manera inteligible y concisa. Así, se emplearán tablas, gráficos o esquemas que muestren los resultados que faciliten el análisis y la interpretación de los resultados.

## CONCLUSIONES

La cartografía de lo riesgo a los incendios forestales se realizó mediante la combinación de ocho variables que en conjunto revelaron la susceptibilidad de cada región del municipio, logrando el cumplimiento del objetivo de este trabajo.

En el municipio de Três Lagoas predomina el riesgo medio a los incendios, que ocupa la mayor parte del mismo con el 72,30% del área total. El riesgo de incendio bajo cubre algo más del 22% de su superficie, mientras que el riesgo alto se distribuye por aproximadamente el 4,89% del municipio.

Como complemento a la espacialización del riesgo realizada, este trabajo pone de manifiesto que el mayor riesgo de incendios forestales ocurre en los meses de junio, julio y, sobre todo, agosto y septiembre, lo que requiere una atención especial debido a las bajas precipitaciones y al aumento de la concentración media de hotspots en dicho periodo del año. Otro resultado importante de este trabajo es el tratamiento de los hotspots, lo que hizo posible minimizar la ocurrencia de marcas repetidas en el mismo punto y período de tiempo, que corrobora la efectividad del análisis de la ocurrencia del aumento de la temperatura, permitiendo una mejor comprensión de la distribución de los mismos a lo largo del año.



Cabe destacar que la metodología aplicada para la cartografía de lo riesgo al incendio es una herramienta que debe ayudar a las instituciones gubernamentales, privadas y a la sociedad civil a tomar decisiones para la minimización del riesgo de incendios florestales. También evidenció las alternativas que pueden ser consideradas como caminos a seguir en este proceso de gestión, controlando los incendios florestales y reduciendo las pérdidas ambientales y económicas asociadas.

Este trabajo pretende transformar la visión tradicional de la supresión absoluta de cualquier incendio forestal, ya que destaca el papel de la quema controlada en la gestión del riesgo, ya sea mediante la contención de materiales combustibles o la construcción de cortafuegos. Por lo tanto, se hace hincapié en que la gestión integrada del riesgo de incendios florestales debe incluir las quemas, utilizándolas de forma estratégica y planificada.

Finalmente, se puede señalar que este artículo constituye un elemento probatorio y propositivo que viene a contribuir al establecimiento de la gestión integral del riesgo de incendios que implique conjuntamente a los agentes públicos y privados y a la sociedad civil en general.

## AGRADECIMIENTOS

Este estudio fue financiado en parte por el Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) (proceso n° 403993/2021-0 y proceso n° 313303/2023-1), por la Fundação Estadual de Apoio ao Desenvolvimento da Educação, da Ciências e Tecnologia de Mato Grosso do Sul - FUNDECT (proceso n° 71/002.368/2022), por la Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) - Código de Financiamento 001, y por la Fundação Universidade Federal de Mato Grosso do Sul – UFMS/MEC-Brasil.

## REFERÊNCIAS

AHN, Young Sang et al. Erratum to: Effects of forest fires on forest ecosystems in eastern coastal areas of Korea and an overview of restoration projects. *Landscape and Ecological Engineering*, v. 10, p. 239-239, dez. 2014. <https://doi.org/10.1007/s11355-013-0212-0>

ANA, Agência Nacional de Água, 2021. Disponible en:< <https://www.snirh.gov.br/hidroweb/serieshistoricas>>. Accedido: 23 abr 2021.

ARIAS, Heileen Aguilar; ZAMORA, Rodolfo Mora; BOLAÑOS, Christian Vargas. Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, Rapideye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo Flaash del software ENVI. *Revista Geográfica de América Central*, v. 2, n. 53, p. 39-59, jul./dez. 2014. <https://doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>

ASSUNÇÃO, Rafaela; TETTO, Alexandre França; BATISTA, Antonio Carlos. O uso tradicional do fogo no assentamento Vale Verde, em Gurupi/TO. *Espacios*, v. 38, n. 17, abr. 2017.

BACANI, Vitor Matheus. Geoprocessing applied to risk assessment of forest fires in the municipality of Bodoquena, Mato Grosso do Sul. *Revista Árvore*, v. 40, p. 1003-1011, nov./dez. 2016. <https://doi.org/10.1590/0100-67622016000600005>

BARBOSA, Maria Lucia Ferreira et al. Occurrence of fire foci under different land uses in the State of Amazonas during the 2005



- drought. *Environment, Development and Sustainability*, v. 21, p. 2707-2720, mai. 2019. <https://doi.org/10.1007/s10668-018-0157-4>
- BATISTA, Antonio Carlos et al. Evaluation of the flammability of trees and shrubs used in the implementation of green barriers in southern Brazil. In: *International Symposium on Fire Economics, Planning, and Policy: Climate Change and Wildfires*. 2012. p. 256-264.
- BATISTA, Antonio Carlos; BIONDI, Daniela. Avaliação da inflamabilidade de *Ligustrum lucidum* Aiton (Oleaceae) para uso potencial em cortinas de segurança na região sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, v. 4, n. 4, p. 435-439, out./dez. 2009. <http://dx.doi.org/10.5039/agraria.v4i4a11>
- BIONDI, Daniela; BATISTA, Antonio Carlos; MARTINI, Angeline. The flammability of ornamental species with potential for use in highways and wildland urban interface (WUI) in Southern Brazil. In: *VIEGAS, Domingos Xavier (org.). Advances in forest fire research*. Coimbra: Imprensa da Universidade de Coimbra, 2014. p. 992-997.
- CHOWDHURY, Ehsan H.; HASSAN, Quazi K. Operational perspective of remote sensing-based forest fire danger forecasting systems. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, v. 104, p. 224-236, jun. 2015. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2014.03.011>
- ÇOLAK, Emre; SUNAR, Filiz. Evaluation of forest fire risk in the Mediterranean Turkish forests: A case study of Menderes region, Izmir. *International journal of disaster risk reduction*, v. 45, mai. 2020. <https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2020.101479>
- CUNHA, Elias Rodrigues; BACANI, Vitor Matheus. Sensoriamento remoto e SIG aplicados ao mapeamento geomorfológico da bacia hidrográfica do córrego Indaiá-MS. *GEOUSP Espaço e Tempo (Online)*, v. 19, n. 3, p. 630-646, dez. 2015. <http://dx.doi.org/10.11606/issn.2179-0892.ge USP.2015.107612>
- DOWDY, Andrew J.; FROMM, Michael D.; MCCARTHY, Nicholas. Pyrocumulonimbus lightning and fire ignition on Black Saturday in southeast Australia. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, v. 122, n. 14, p. 7342-7354, jul. 2017. <https://doi.org/10.1002/2017JD026577>
- ESRI. ArcGIS Desktop: Release 10. Redlands, CA: Environmental Systems Research Institute, 2018.
- EUGENIO, Fernando Coelho et al. Applying GIS to develop a model for forest fire risk: A case study in Espírito Santo, Brazil. *Journal of environmental management*, v. 173, p. 65-71, mai. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jenvman.2016.02.021>
- FERNANDES, L. A.; COIMBRA, A. M. Revisão estratigráfica da parte oriental da bacia Bauru (Neocretáceo). *Revista Brasileira de Geociências*, v.30(4), p.717-728, 2000.
- FERRAZ, Silvio Frosini de Barros; VETTORAZZI, Carlos Alberto. Mapeamento de risco de incêndio florestal por meio de sistema de informações geográficas (SIG). *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 53, p. 39-48, jun. 1998.
- FERREIRA, Heitor Renan et al. Incêndios em vegetação em conjunto com outros materiais combustíveis na interface urbano-rural de Curitiba-PR. *BIOFIX Scientific Journal*, v. 5, n. 1, p. 108-113, 2020. <https://doi.org/10.5380/biofix.v5i1.67832>
- FORMAN, Richard T. T.; COLLINGE, Sharon K. Nature conserved in changing landscapes with and without spatial planning. *Landscape and Urban Planning*, v. 37, n. 1-2, p. 129-135, jun. 1997. [https://doi.org/10.1016/S01692046\(96\)00378-7](https://doi.org/10.1016/S01692046(96)00378-7)
- GHESHLAGHI, Hassan Abedi; FEIZIZADEH, Bakhtiar; BLASCHKE, Thomas. GIS-based forest fire risk mapping using the analytical network process and fuzzy logic. *Journal of Environmental Planning and Management*, v. 63, n.3, p. 481 – 499, jun. 2019. <https://doi.org/10.1080/09640568.2019.1594726>
- GUTZWILLER, Kevin J.; BARROW, Wylie C. Influences of roads and development on bird communities in protected Chihuahuan Desert landscapes. *Biological Conservation*, v. 113, n. 2, p. 225-237, out. 2003.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Coordenação de População e Indicadores Sociais. Estimativas da População Residente no Brasil e Unidades da Federação com Data de Referência em 1º de Julho de 2020. Rio de Janeiro, 2020.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Sistematização das Informações sobre Recursos Naturais: Mapa de Clima do Brasil. Escala 1:5.000.000. Rio de Janeiro, 2006.
- IBGE. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Diretoria de Geociências. Base cartográfica continua do Brasil. Escala 1:250.000 - BC250. Rio de Janeiro, 2019.



ILLANA, Vinícius Borges. Técnicas de geoprocessamento na determinação do índice de perigo de incêndios. 2006. 60f. Dissertação (Mestrado em Geomática) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, RS. 2006.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2021a). Áreas Queimadas – Produto AQ1km. Disponível em: <<https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/aq1km/>>. Acesso: 21 fev. 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2021b). Sistema de Monitoramento – Banco de Dados de Queimadas. Disponível em: <https://queimadas.dgi.inpe.br/queimadas/bdqueimadas> . Acesso: 16 jul. 2021.

INPE. Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais (2020) Divisão de Geração de Imagens. Catálogo de Imagens. São José dos Campos-SP, 2020. Disponível em: <http://www.dgi.inpe.br/catalogo/>. Acesso: 03 dez. 2020.

JAISWAL, Rajeev Kumar et al. Forest fire risk zone mapping from satellite imagery and GIS. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, v. 4, n. 1, p. 1-10, ago. 2002.

JENSEN, John R. Sensoriamento Remoto do Ambiente: Uma Perspectiva em Recursos Terrestres. São José dos Campos, SP: Parêntese, 2009.

KANDYA, A. K. et al. Application of Geographic Information System in Identification of 'Fire-Prone' Areas: A Feasibility Study in Parts of Junagadh (Gujarat). *Indian Forester*, v. 124, n. 7, p. 531-536, jun. 1998.

KOVALSYKI, Bruna et al. Avaliação de espécies arbóreas para composição de cortinas de segurança contra incêndios florestais. *Nativa*, v. 7, n. 2, p. 197-203, mar. 2019. 10.31413/nativa.v7i2.6270

KOVALSYKI, Bruna et al. Inflamabilidade de espécies arbóreas para uso em cortinas de segurança na prevenção de incêndios florestais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v. 36, n. 88, p. 387-391, dez. 2016. <http://dx.doi.org/10.4336/2016.pfb.36.88.991>

KUDLAVICZ, Mieczslau. Dinâmica agrária e a territorialização do complexo celulose/papel na microrregião de Três Lagoas/MS. 2011. 177f. Dissertação (Mestrado em Geografia) – Campus de Três Lagoas, Universidade Federal de Mato Grosso do Sul, Três Lagoas. 2011.

LELIS, Leandro Reginaldo Maximino; JÚNIOR, Francisco José Avelino. Territorialização do Complexo Eucalipto-Celulose-Papel e Resistência Camponesa em Três Lagoas–MS. *Caminhos de Geografia, Uberlândia*, v. 17, n.58, p. 81–102, jun. 2016. <https://doi.org/10.14393/RCG175806>

LIU, Qiang et al. Spatial and temporal distribution of forest fire frequency and forest area burnt in Jilin Province, Northeast China. *Journal of Forestry Research*, v. 29, n. 5, p. 1233-1239, jan. 2018. <https://doi.org/10.1007/s11676-018-0605-x>

LOPES, Elfany Reis et al. Zoneamento de Risco de Incêndio e Queimadas na Cidade de Sorocaba – São Paulo. *Revista do Departamento de Geografia*, v. 36, p. 117-129, dez. 2018. <https://doi.org/10.11606/rdg.v36i0.148048>

MISTRY, Jayalaxshmi; BERARDI, Andrea. Assessing fire potential in a Brazilian Savanna nature reserve. *Biotropica*, v. 37, n. 3, p. 439-451, set. 2005.

NETO, Gervásio Barbosa Soares et al. Riscos de incêndios florestais no parque nacional de Brasília. *Brasil. Territorium*, n. 23, p. 161-170, nov. 2016. [https://doi.org/10.14195/1647-7723\\_23\\_13](https://doi.org/10.14195/1647-7723_23_13)

NOVO, E. M.L.M. Sensoriamento Remoto: princípios e aplicações. Editora Blucher, 2010.

OLIVEIRA, André Luiz Sá de et al. Comparação e validação de modelagem especial de risco a incêndios considerando diferentes métodos de predição. *Boletim de Ciência Geodésica*, v. 23, n. 4, p. 1-22, out./dec.2017). <https://doi.org/10.1590/s1982-21702017000400037>

OLIVEIRA, Daniele dos Santos. Zoneamento de risco de incêndios em povoados florestais no norte de Santa Catarina. 2002. 113f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2002

OLIVEIRA, Víncler Fernandes Ribeiro et al. Geoprocessamento aplicado ao mapeamento de risco a incêndios. *Revista Brasileira de Geografia Física*, v. 13, n. 3, p. 1194-1212, 2020. <https://doi.org/10.26848/rbgf.v13.3.p1194-1212>

OMENA, Michel Tadeu R. N. et al. Zoneamento do Risco de Incêndio Florestal para o Parque Nacional de São Joaquim – SC. *Biodiversidade Brasileira*, n. 2, p. 173-186, out. 2016.



PARZEN, Emanuel. On estimation of a probability density function and mode. *The Annals of Mathematical Statistics*, v. 33, n. 3, p. 1065-1076, set. 1962.

PAYETTE, Serge et al. Fire History of Appalachian Forests of the Lower St-Lawrence Region (Southern Quebec). *Forests*, v. 8, n. 4, p. 120, mar. 2017. <https://doi.org/10.3390/f8040120>

PEZZOPANE, José Eduardo M.; NETO, Silvio Nolasco de O.; VILELA, Marina de Fatima. Risco de incêndios em função da característica do clima, relevo e cobertura do solo. *Floresta e Ambiente*, v. 8, p. 161-166, 2001.

PRESTON, Benjamin L. et al. Igniting change in local government: lessons learned from a bushfire vulnerability assessment. *Mitigation and Adaptation Strategies for Global Change*, v. 14, p. 251-283, nov. 2009. <https://doi.org/10.1007/s11027-008-9163-4>

RAMALHO, Antonio Henrique Cordeiro et al. Allocation of water reservoirs to fight forest fires according to the risk of occurrence. *Journal of environmental management*, v. 296, p. 1-12, out. 2021. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2021.113122>

SANTOS, Sarah Moura Batista dos et al. Quantificação e Avaliação dos Focos de Calor no Parque Nacional Da Chapada Diamantina e Entorno no Período de 2007 a 2016. *Revista Brasileira de Cartografia*, v. 69, n. 4, p. 701-712, abr. 2017.

SETZER, Alberto Waingort; SISMANOGLU, Raffi Agop; MARTINS, Guilherme. Metodologia do cálculo do risco de fogo do Programa Queimadas do INPE-Versão 10, junho/2016. INPE, São José dos Campos, 2017.

SILVA, João dos Santos Vila da et al. Projeto GeoMS: Cobertura vegetal e uso da terra do Estado de Mato Grosso do Sul. Campinas/SP: Embrapa Informática Agropecuária, v. 64, jan. 2011.

SILVEIRA, Hilton Luis Ferraz da; VETTORAZZI, Carlos Alberto; VALENTE, Roberta de Oliveira Aversa. Avaliação multicriterial no mapeamento de risco de incêndios florestais, em ambiente SIG, na bacia do rio Corumbataí, SP. *Revista Árvore*, v. 32, p. 259-268, abr. 2008

SOARES, Ronaldo Viana. Incêndios florestais: controle e uso do fogo. Curitiba: FUPEF, 1985. 213p.

SOARES, Ronaldo Viana. Prevenção e controle de incêndios florestais. Curitiba: FUPEF, 1984. 160p.

TEDIM, Fantina; LEONE, Vittorio; XANTHOPOULOS, Gavriil. A wildfire risk management concept based on a social-ecological approach in the European Union: Fire Smart Territory. *International Journal of Disaster Risk Reduction*, v. 18, p. 138-153, set. 2016. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ijdrr.2016.06.005>

SANTOS, Sadi Castro. Distribuição e validação de focos de calor no estado do Rio de Janeiro no período de 2009-2014. 2015. 28f. Monografia (Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2015.

TIAN, Xiaorui et al. Distribution characteristics and the influence factors of forest fires in China. *Forest Ecology and Management*, v. 310, p. 460-467, dez. 2013. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2013.08.025>

TORRES, Fillipe Tamiozzo Pereira et al. Mapeamento do risco de incêndios florestais utilizando técnicas de geoprocessamento. *Floresta e Ambiente (Online)*, v. 24, p. 10, 2017. <https://doi.org/10.1590/2179-8087.025615>

WHITE, Larissa Alves Secundo; WHITE, Benjamin Leonardo Alves; RIBEIRO, Genésio Tâmara. Modelagem espacial do risco de incêndio florestal para o Município de Inhambupe, BA. *Brazilian Journal of Forest Research/Pesquisa Florestal Brasileira (Online)*, v. 36, n. 85, p. 1-10, jul. 2016. <https://doi.org/10.4336/2016.pfb.36.85.850>

XU, Xiyan et al. Climate regime shift and forest loss amplify fire in Amazonian forests. *Global Change Biology*, v. 26, n. 10, p. 5874-5885, mar. 2020. <https://doi.org/10.1111/gcb.15279>