



Índice de riesgo de incendios rurales (IRIR) alternativo al índice meteorológico de peligro de incendios (FWI)

Rural fire risk index (RFRI) alternative to the fire weather index (FWI)

Carlos Brys

Facultad de Ciencias Económicas, Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Misiones, Argentina
carlos.brys@fce.unam.edu.ar
ORCID: 0000-0002-5872-0444

David La Red Martínez

Facultad de Ciencias Exactas y Naturales y Agrimensura, Universidad Nacional del Nordeste, Corrientes, Corrientes, Argentina
lrmdavid@exa.unne.edu.ar
ORCID: 0000-0003-2038-6468

Marcelo Marinelli

Facultad de Ciencias Exactas, Químicas y Naturales, Universidad Nacional de Misiones, Posadas, Misiones, Argentina
marcelomarinelli@fceqyn.unam.edu.ar
ORCID: 0009-0004-0645-414X

Andrés Leszczuk

Facultad de Ciencias Forestales, Universidad Nacional de Misiones, Eldorado, Misiones, Argentina
leszczukandresalejandro@gmail.com
ORCID: 0000-0003-1626-9330

doi: <https://doi.org/10.36825/RITI.13.29.009>

Recibido: Febrero 10, 2025

Aceptado: Mayo 5, 2025

Resumen: El cambio climático favorece el desarrollo de incendios no urbanos, que se caracterizan por una mayor intensidad y áreas afectadas. El estudio del comportamiento del fuego en los bosques interesa a los científicos, lo que sugiere que existe un enorme potencial para futuras investigaciones. Sin embargo, son pocas las publicaciones que estudian en mayor profundidad las condiciones de la probabilidad de ignición en entornos rurales y no forestales y hayan propuesto nuevos métodos computacionales. Los sistemas de evaluación del riesgo de incendios forestales no siempre son eficaces en las zonas rurales debido a la diversidad de tipos de vegetación. Este trabajo propone un nuevo índice de riesgo de incendios para ponderar el potencial de ignición del combustible en zonas rurales. El modelo utiliza técnicas innovadoras para obtener resultados más precisos que el Índice Meteorológico de Incendios (FWI). Tiene en cuenta las características específicas de las condiciones ambientales locales para proporcionar una evaluación más precisa del riesgo de ignición.

Palabras clave: *Prevención de Incendios, Incendios Rurales, Calificación del Riesgo de Incendio.*

Abstract: Climate change favors the development of non-urban fires, which are characterized by greater intensity and affected areas. The study of fire behavior in forests is of interest to scientists, suggesting that there is enormous potential for future research. However, few publications have studied in greater depth the conditions of ignition probability in rural and non-forest environments and have proposed new computational methods. Wildfire risk assessment systems are not always effective in rural areas due to the diversity of vegetation types. This paper proposes a new fire risk index to weight fuel ignition potential in rural areas. The model uses innovative techniques to obtain more accurate results than the Fire Weather Index (FWI). It takes into account the specific characteristics of local environmental conditions to provide a more accurate assessment of ignition risk.

Keywords: *Fire Prevention, Rural Fires, Fire Risk Rating.*

1. Introducción

El riesgo de un incendio rural es una evaluación de la probabilidad de que se produzcan daños como consecuencia del fuego. El riesgo no es una percepción, sino una valoración. Lo que se percibe es el peligro. Por lo tanto, un peligro de incendio forestal es el potencial de daño físico y ambiental a las formaciones vegetales cuando se quema sin control [1]. La diferencia entre riesgo y peligro es que riesgo es la combinación de la probabilidad de que ocurra un evento peligroso y la gravedad del daño o deterioro que el evento o exposición pueda causar; y peligro es una fuente, situación o acto con el potencial de causar daño [2].

En las últimas décadas, los incendios forestales se convirtieron en una amenaza cada vez más frecuente y devastadora en todo el mundo. Para evaluar y prevenir su aparición, se desarrollaron varios métodos basados en el Sistema Canadiense de Clasificación del Peligro de Incendios Forestales (*Canadian Forest Fire Danger Rating System, CFFDRS*) [3] propuesto en la década de los años 60 bajo el liderazgo del Dr. Douglas McArthur.

El FWI desarrollado por el CFFDRS se utiliza para evaluar el peligro y la propagación de incendios en áreas forestales. Consiste en un conjunto de ecuaciones desarrolladas para un complejo de combustibles determinado. Su cálculo requiere observaciones meteorológicas realizadas a las 12:00 de humedad relativa, temperatura, velocidad del viento y precipitación acumulada en las últimas 24 horas. Se considera que el FWI no es adecuado para su uso en regiones rurales con vegetación diversa, ya que puede subestimar el riesgo real de los incendios. Esto se debe a que la diversidad de la vegetación puede influir en las características de combustibilidad, la tasa de propagación del incendio y la disponibilidad de combustible en una región determinada. Además, el FWI se basa en factores como la temperatura, la humedad relativa y la velocidad del viento, que son variables climáticas generales. Es posible que estas variables no reflejen con precisión las condiciones locales, donde los microclimas y las condiciones específicas pueden influir en el riesgo de incendio.

En resumen, el FWI mide el riesgo potencial de propagación y destrucción de incendios forestales en función de las condiciones climáticas actuales y recientes. Fue diseñado para su uso en ambientes boscosos, disminuyendo así su efectividad en zonas rurales donde se combinan diferentes tipos de vegetación. Postulamos la hipótesis que el FWI no es adecuado para su aplicación en regiones rurales con vegetación diversa y subestima el riesgo real de ignición en dichas zonas. Proponemos un índice alternativo al FWI que tiene en cuenta las características específicas de combustibilidad de la hojarasca senescente del suelo.

En este trabajo se formula un algoritmo basado en información local, utilizando aprendizaje automático e imágenes satelitales para clasificar el uso del suelo, datos en línea de teledetección y estaciones meteorológicas para calcular valores específicos para cada municipio.

2. Antecedentes y trabajos relacionados

Según Yabuku *et al.* [4], no existe una única forma correcta de evaluar el riesgo de incendio, y proponen tres métodos que pueden resultar útiles: El método del indicador de categoría de riesgo, el método de la matriz de valor de riesgo y el método algorítmico.

Dado que el contenido de humedad de los combustibles finos sufre el mayor cambio de una hora a otra, es necesario ajustar el valor de la intensidad del fuego a la hora del día. Este valor se puede ajustar utilizando el sencillo esquema ideado por Lawson *et al.* [5] y adaptado por Beck *et al.* [6].

Dimitrakopoulos *et al.* [7] evaluaron la eficacia del FWI en un entorno del Mediterráneo oriental. Las principales conclusiones del estudio fueron que el FWI subestimó el riesgo de incendio en el entorno del

Mediterráneo oriental y que sólo es adecuado para su aplicación directa en los diferentes entornos para los que fue desarrollado. Recomiendan realizar ajustes y modificaciones para adaptarlo a las condiciones específicas de cada región para mejorar su capacidad predictiva.

Chelli *et al.* [8] propusieron adaptar el FWI a los bosques Mediterráneos para mejorar la evaluación y predicción de incendios forestales. Los resultados mostraron que el índice adaptado pudo proporcionar una evaluación más precisa del riesgo de incendio en comparación con el FWI original. Se encontró una correlación significativa entre el índice adaptado y los incendios forestales observados. Esto demuestra la utilidad y eficacia del nuevo índice para la gestión y prevención de incendios forestales en los bosques Mediterráneos. Estos hallazgos sugieren que adaptar los modelos existentes a condiciones locales específicas puede mejorar la capacidad de predecir y mitigar incendios forestales en diferentes regiones del mundo.

Villers *et al.* [9] aplicaron el FWI en el “Parque Nacional Desierto de los Leones” en México, utilizando datos meteorológicos y de incendios recopilados durante un período de 10 años. Concluyen que el FWI puede subestimar el riesgo de incendio, debido a las particularidades del clima y la vegetación de la zona y es necesario adaptar y personalizar los modelos de evaluación del riesgo de incendios a las condiciones específicas de cada zona, teniendo en cuenta factores como el clima, la vegetación y la topografía.

Finkele *et al.* [10] se centraron en la implementación operativa actual del FWI en Irlanda. Encontraron diferencias significativas en la correlación entre los componentes individuales del índice y los registros de incendios forestales en Irlanda en comparación con Canadá. Estas diferencias sugieren que se necesitan ajustes y adaptaciones en la implementación del FWI para mejorar su precisión y utilidad.

En general, los trabajos relacionados sugieren que el FWI es una herramienta útil para evaluar el peligro de incendio, pero no está exenta de limitaciones ya que fue diseñada para incendios forestales en entornos homogéneos. Se evidencia una falta de investigación sobre índices alternativos de peligro de incendio. La mayoría de los estudios se centraron en adaptar el FWI a diferentes entornos, en lugar de desarrollar nuevos índices que sean más completos y precisos.

Se concluye que es necesario profundizar la investigación para desarrollar índices de peligro de incendio precisos y completos. El FWI es una herramienta útil, pero con limitaciones a la hora de aplicarla a escenarios complejos. Al desarrollar índices más sofisticados, podemos mejorar la capacidad para predecir y prevenir incendios forestales.

3. Críticas al FWI

El FWI es criticado por varias deficiencias, un problema importante es su falta de precisión y especificidad al abordar las condiciones locales. Se basa en datos regionales generales, que no consideran adecuadamente las características únicas de la vegetación y el clima en las diferentes microregiones como los municipios, especialmente cuando se trata de bosques naturales, plantaciones forestales y zonas de cultivos. Fue desarrollado basándose en datos de Canadá, donde la vegetación es relativamente homogénea. Este índice funciona como un sistema de clasificación general y no puede pronosticar con precisión la ubicación o el momento de los incendios forestales. En consecuencia, cuando se aplica a regiones con diversos tipos de vegetación y niveles de inflamabilidad, puede generar evaluaciones de riesgos imprecisas.

Una limitación del FWI es que no tiene en cuenta el índice de inflamabilidad de diferentes combustibles. Generaliza los valores como si fueran homogéneos, clasificando potencialmente las regiones con combustibles terrestres altamente inflamables, como los pastizales, con niveles de riesgo más bajos. Al mismo tiempo, puede indicar un mayor riesgo cuando una porción más pequeña de la tierra está cubierta por combustibles de combustión más lenta, como las praderas y los bosques nativos.

Otro inconveniente es que no tiene en cuenta las características específicas de la combustibilidad de los residuos de biomasa. Se centra únicamente en la humedad del suelo y pasa por alto otros factores como la cantidad y el tipo de desecho vegetal, que afectan significativamente la combustibilidad. En resumen, el hecho de que el FWI fuera diseñado para los entornos boscosos homogéneos con datos promedio de Canadá dificulta su precisión y especificidad para abordar las condiciones locales.

4. Ubicación del estudio

El estudio se enfoca en la ecorregión denominada “Selva Misionera”, parte vital del “Bosque Atlántico del Alto Paraná” en la provincia de Misiones en Argentina. La provincia de Misiones no presenta incendios provocados por causas naturales (como rayos). Los incendios reportados son resultado de la actividad humana [11] y todos se iniciaron a nivel del suelo como consecuencia de quemados para preparar el suelo para la siembra de cultivos, mediante la práctica de limpieza denominada “rozado” que se refiere a la tala y quema de la vegetación natural.

La investigación se centra en un área particular de 29,800 kilómetros cuadrados que tiene una inmensa importancia debido a su biodiversidad y patrimonio cultural. En el estudio, se toma en consideración el cálculo del FWI utilizado en la Provincia de Misiones, Argentina, donde el Ministerio de Ecología y Recursos Naturales Renovables (MERNR) publica diariamente un Índice de Peligro de Incendios basado en las fórmulas canadienses. El método que usa el MERNR para calcular el mapa de peligro de incendios tiene en cuenta el Índice de Acumulación de Combustible (*Buildup Index*, BUI) de sólo dos puntos del territorio, y están distantes 240 km, como se muestra en la Figura 1. Estos dos puntos tienen características de vegetación completamente diferentes. El punto (A), que corresponde a la ciudad de Posadas, es la zona más densamente poblada, sin cultivos y con algunas plantaciones de pino y eucalipto. El punto (B), que corresponde a la ciudad de Iguazú, tiene un mínimo desarrollo urbano y prácticamente todo el territorio está cubierto de bosque subtropical. Con esos dos valores de BUI se calcula el FWI para un área semirectangular que tiene una longitud aproximada de 300 km y 150 km de ancho.

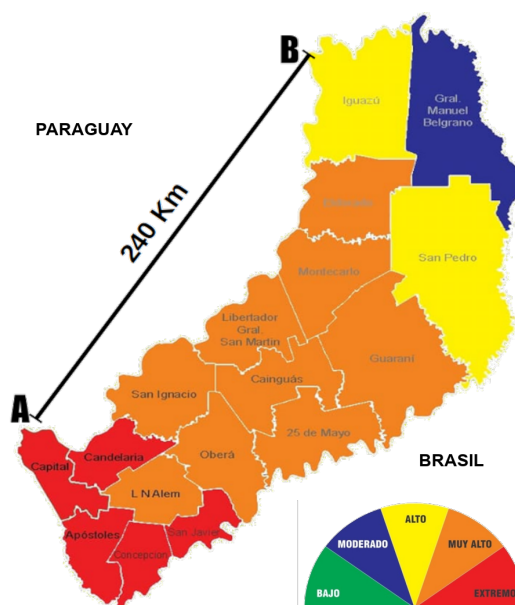


Figura 1. Mapa actual de peligro de incendios por departamentos.

Se considera que los valores obtenidos no son precisos como consecuencia de la distancia entre los puntos de referencia y el tamaño de la superficie de los departamentos considerados. Los valores obtenidos son muy generales y no representan la realidad de cada uno de los 78 municipios. Esto lleva a formular la siguiente pregunta de investigación: ¿Es posible mejorar la precisión del Índice Meteorológico de Peligro de Incendios (FWI) al incorporar la clasificación detallada del uso del suelo mediante aprendizaje automático e imágenes satelitales y factores meteorológicos locales en áreas rurales con vegetación diversa?

5. Índice de riesgo de incendios rurales (IRIR)

Se propone un modelo computacional para medir el riesgo potencial de ignición de la hojarasca senescente, asociado con diferentes tipos de cobertura del suelo en regiones específicas, y determinar un nuevo índice de riesgo de incendios. La propuesta consiste en analizar la cobertura del suelo de cada uno de los 78 municipios en el que se divide políticamente la provincia para obtener un valor ponderado que represente de manera más confiable su tipo, y en función de la inflamabilidad de la hojarasca de cada cubierta de tipo vegetal, determinar un valor referencial del riesgo potencial de incendio asociado.

5.1. Materiales para calcular el IRIR

Como fuente primaria, se procesaron bases de datos ofrecidas por las dependencias del gobierno que recopilaron puntos GPS de los distintos tipos de uso del suelo. Para la recolección y validación de los datos sobre los diferentes tipos de cultivos y uso del suelo, se diseñó un formulario para la toma de datos utilizando la herramienta KoboToolbox (<https://bit.ly/CultivosMisiones>). Esta herramienta es una plataforma de software de código abierto diseñada para la recopilación, gestión y análisis de datos de campo, especialmente útil en entornos de baja conectividad o sin acceso a internet. Se basa en la plataforma Open Data Kit (ODK) y ofrece un conjunto completo de herramientas para crear formularios, recopilar datos en dispositivos móviles, sincronizarlos con un servidor central, visualizarlos y analizarlos. Además, permite la integración con otras plataformas de análisis de y la personalización de informes. Para la carga de los puntos GPS con las coordenadas de los distintos tipos de uso del suelo se utilizó la plataforma uMap (<http://u.osmfr.org/m/1035437/>) que es una herramienta que permite crear mapas personalizados utilizando capas de OpenStreetMap (OSM). Esta herramienta permite exportar las capas de datos en formato CSV para su posterior proceso.

5.1.1 Metodología del Cálculo del IRIR

Se detalla procedimiento utilizado para calcular el IRIR con un resumen paso a paso de cómo se abordaron las tareas y cómo se vincularon entre sí:

- Uso del Suelo:
 - Se inicia con la descripción del uso del suelo en los 78 municipios de la provincia de Misiones, dividiéndolos en categorías según la cobertura vegetal predominante.
 - Se identifican las áreas con mayor presencia de combustible vegetal muerto en el suelo, lo cual influye en el riesgo de incendios.
 - Se establece una relación directa entre el tipo de cobertura vegetal y el riesgo potencial de incendio asociado.
- Inflamabilidad:
 - Se analiza la inflamabilidad de la hojarasca de cada tipo de cubierta vegetal presente en los municipios.
 - Se considera el volumen de hojarasca producido por ciertas especies vegetales y su capacidad de propagar el fuego.
 - Se vincula la inflamabilidad de la vegetación con el riesgo de ignición y la velocidad de propagación del fuego.
- Factor de Humedad del Combustible del Suelo:
 - Se estudia el efecto de la humedad del combustible del suelo en la propagación de incendios.
- Se establece la importancia de la humedad del suelo en la combustión y en la generación de incendios.
 - Se vincula la humedad del suelo con la inflamabilidad de la vegetación y el riesgo de incendios.
- Efecto de la Velocidad del Viento:
 - Se analiza cómo la velocidad del viento influye en la propagación de incendios en áreas con alta carga de combustible vegetal.
 - Se considera la dirección y la intensidad del viento como factores determinantes en la velocidad de propagación del fuego.
 - Se vincula la velocidad del viento con la inflamabilidad de la vegetación y el riesgo de incendios.

Al vincular esta secuencia de acciones, se establece una relación integral entre el uso del suelo, la inflamabilidad de la vegetación, la humedad del combustible del suelo y el efecto del viento en el riesgo de incendios rurales.

5.2. Uso del suelo

Para el análisis y procesamiento de la cobertura del suelo se generó un mosaico de imágenes satelitales a partir de los datos de Sentinel 1 y 2 de la misión Copernicus. Se usaron imágenes de radar de Sentinel 1 Ground Range Detection (GRD), con polarización dual VV+VH (vertical-horizontal). Del satélite Sentinel 2 se usaron imágenes

multiespectrales y una combinación de índices espectrales para estudios de vegetación como el NDVI, EVI, SAVI, entre otros.

Todas las bandas e índices espectrales fueron promediados y agrupados en una pila de bandas. Para contrarrestar las distorsiones asociadas a las pendientes en el mosaico, se incorporó un modelo digital de elevación basado en SRTM. En total el mosaico usado para la clasificación contiene 31 bandas. Se aplicaron filtros temporales para seleccionar las imágenes capturadas en un intervalo de tiempo comprendido entre junio y diciembre de 2024. Se utilizaron filtros de nubes, seleccionando imágenes con una cobertura de nubes inferior al 20 %.

Se utilizó el producto SENTINEL-1 SAR GRD: a escala logarítmica, con una resolución de 10 m, que brinda imágenes del tipo Radar de Apertura Sintética (SAR), banda C. Se utilizó el Modelo Digital de Elevación (DEM) provisto por el Instituto Geográfico Nacional (IGN) con una resolución de 30 m para proveer de información de altitud al clasificador [12].

Las imágenes satelitales de trabajo corresponden a las fechas desde 1 de junio de 2024 al 31 de diciembre de 2024, seleccionando las bandas espectrales de entrada: “A8B” (infrarrojo cercano, sensible a la vegetación y clorofila), “B4” (espectro rojo, sensible a la clorofila y otros pigmentos en las plantas, así como al suelo y otras superficies sin vegetación), y “B11” (infrarrojo de onda corta, sensible al agua y la humedad) con un máximo del 20 % de cobertura de nubes. En la Tabla 1 se detallan los recursos utilizados para calcular el índice

Tabla 1. Recursos para la generación del IRIR.

Recurso	Nombre	URL
Mapa interactivo	Usos del suelo misiones	https://u.osmfr.org/m/1035437
Archivo Shapefile	Misiones	https://tinyurl.com/phrp64rh
Archivo Shapefile	Municipios de misiones	https://tinyurl.com/wsdnc6r3
Archivo Shapefile	Áreas urbanas	https://tinyurl.com/mryzc3k9
Archivo CSV	Usos del suelo misiones	https://tinyurl.com/2m3j2kxp
Imagen bitmap	Clasificación uso suelo misiones	https://tinyurl.com/2m3j2kxp
Código Javascript	Generación imagen satelital compuesta	https://tinyurl.com/2m3j2kxp
Código Javascript	Clasificación <i>Random-Forest</i>	https://tinyurl.com/ycdu62jw
Código Javascript	Calculo superficie por uso del suelo	https://tinyurl.com/mbnju9dk
Hoja de cálculo	Índice de inflamabilidad por municipio	https://tinyurl.com/4d48pwa6
Mapa interactivo	Centroides de municipios	http://u.osmfr.org/m/1046438/
Mapa interactivo	Puntos mapa de calor	http://u.osmfr.org/m/1049109/

Fuente: Elaboración propia.

Para validar los datos sobre los diferentes tipos de cultivos y uso del suelo, se realizó una campaña de encuestas públicas, invitando a la comunidad a identificar las coordenadas de las parcelas y el tipo de cultivo en toda la provincia. Para lograr este objetivo, se diseñó un formulario de recolección de datos utilizando la herramienta KoboToolbox (<https://www.kobotoolbox.org/>), el cual se encuentra accesible en: <https://bit.ly/CultivosMisiones>. Se definieron 22 categorías (clases) de cobertura terrestre para la clasificación del uso de la tierra: pastizales, matorrales, pradera, selva, coníferas, eucaliptos, kiri, tabaco, té, yerba mate, maíz, caña de azúcar, yuca, soja, cítricos, piña, bambú, suelo descubierto, agua y humedales.

Para un análisis de superficies más preciso, se delimitó en las imágenes satelitales espectrales los 78 municipios en los que se subdivide políticamente la provincia de Misiones. Utilizando las imágenes satelitales y los datos de la encuesta validados, se realizó una clasificación supervisada por aprendizaje automático usando el algoritmo de clasificación *Random Forest* [13], [14], obteniendo los polígonos correspondientes a cada tipo de cultivo de interés como se muestra en la Figura 2. Las áreas de entrenamiento fueron divididas en 70% para aprendizaje del modelo y 30% para validación. Los resultados de la clasificación obtuvieron unos índices de precisión globales de *Random Forest* del 0.87% y un coeficiente Kappa del 0.85 %. Con el postprocesamiento de

los polígonos se determinó el tamaño del área en km² de cada uno y el porcentaje de cobertura de cada tipo en el municipio analizado.

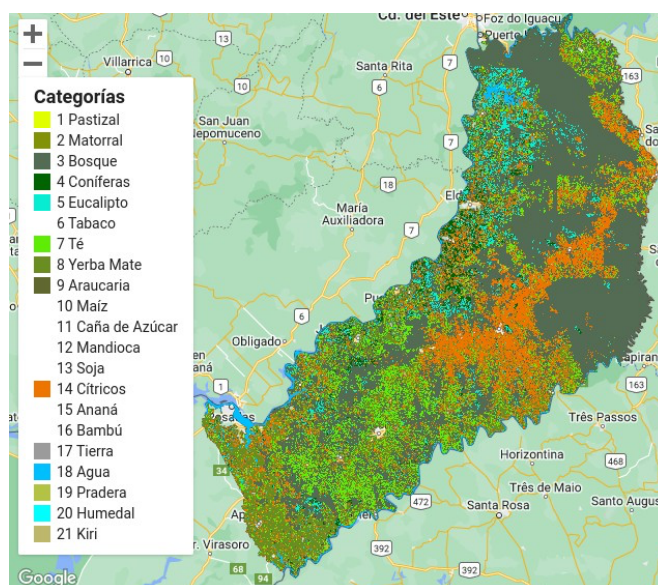


Figura 2. Clasificación de usos del suelo.

La suma de los índices de inflamabilidad de cada tipo de combustible multiplicados por su porcentaje de cobertura en el área total de cada municipio es el valor del índice de inflamabilidad del municipio IIM.

5.3. Inflamabilidad

La inflamabilidad se refiere a la capacidad de los combustibles para encenderse y arder. Martin *et al.* [15] y Varner *et al.* [16] propusieron que la inflamabilidad se compone de cuatro elementos: la “inflamabilidad”, el retraso en la ignición; la “sostenibilidad”, la duración de la combustión; la “combustibilidad”, la tasa de pérdida de masa; y la “consumibilidad”, la proporción de combustible consumido por el fuego.

Estos componentes están vinculados al comportamiento del fuego en el terreno, la probabilidad de ignición, la velocidad de propagación (inflamabilidad), la intensidad del fuego (combustibilidad), la duración de la llama (sostenibilidad) y el consumo de combustible (consumibilidad). Para el cálculo de la propagación del fuego sobre suelos combustibles considerando los distintos usos del suelo utilizamos los valores proporcionados por Brys *et al.* [17], [18] y [19]. Estos valores se combinan con las observaciones empíricas recopiladas por los responsables del manejo del fuego, como se presenta en la Tabla 2.

Tabla 2. Cobertura del suelo, propagación del fuego en el suelo, tiempo promedio de combustión e índice de inflamabilidad.

Uso del suelo	Velocidad del fuego (tpp) en metros por hora	Velocidad de propagación por hora (vph): (0,5/tpp*60)	Índice de inflamabilidad (1/vph*100)
Bambú	36	0.83	120.00
Pastizal	30	1.00	100.00
Caña de azúcar	30	1.00	100.00
Coníferas	10	3.00	33.33
Té	10	3.00	33.33
Yerba mate	10	3.00	33.33
Tabaco	10	3.00	33.33
Maíz	10	3.00	33.33

Yuca	10	3.00	33.33
Soja	10	3.00	33.33
Cítricos	10	3.00	33.33
Piña	10	3.00	33.33
Bosque	8	3.75	26.67
Eucalipto	6	5.00	20.00
Pradera	5	6.00	16.67

Fuente: <https://tinyurl.com/5n7pj2ry>.

Como lo afirma el director de Manejo de Fuego y Emergencias Ambientales del Ministerio de Ecología de la provincia de Misiones en [11], en la zona de estudio no se registran incendios provocados por causas naturales. Los incidentes son el resultado de la actividad antropogénica y todos comienzan a nivel del suelo, por lo cual, en el estudio de riesgo, solo se consideró la velocidad de propagación del fuego en la hojarasca senescente y no consideraremos la velocidad del fuego en la copa de los árboles [20].

Se define a la velocidad de propagación horaria vph (1), como el tiempo medido en minutos decimales que tarda el combustible en suelo en arder en un círculo de 1 metro de diámetro, multiplicado por 60, iniciando la combustión en el centro del círculo (Ecuación 1).

$$vph = \left(\frac{0.5}{tpp} \right) * 60 \quad (1)$$

Donde: tpp es el tiempo promedio de propagación.

Se define al índice de inflamabilidad diferencial IDc (2) de cada tipo de combustible c , como el número entero de la inversa de la velocidad de propagación horaria vph multiplicada por 100 (Ecuación 2).

$$ID_c = ent \left(\frac{1}{vph_c} * 100 \right) \quad (2)$$

5.4. Factor de humedad del combustible del suelo

Los incendios provocados por el hombre comienzan en lugares con menor cobertura arbórea y durante periodos con condiciones meteorológicas más extremas, Hantson *et al.* [21]. Estos incendios se inician siempre a nivel del suelo, quemando primero el combustible compuesto por el residuo de biomasa y extendiéndose a las copas de los árboles o a las hojas de la cubierta vegetal.

Para que se produzca y mantenga la ignición, el combustible debe tener un nivel de humedad bajo, por lo que es importante tener en cuenta las precipitaciones en los días previos y la sequedad del clima que condicionan la humedad del combustible. La deuda de lluvia es la diferencia entre la cantidad de lluvia que debería haber caído en un área determinada y la cantidad que cayó. La sequía es un período de clima anormalmente seco que dura un período prolongado. Tanto la deuda de lluvia como la sequía pueden afectar el contenido de humedad del combustible en el suelo.

El factor de humedad del suelo (FHS) resulta de calcular el peso de la deuda hídrica, utilizando como parámetro el día del año en que se realiza el análisis para obtener la evaporación superficial y el número de días transcurridos desde la última lluvia registrada. La humedad del combustible del suelo ligada a la deuda hídrica condiciona la propagación inicial del incendio. Si llovió el día del cálculo, el combustible se saturará y la deuda de agua será igual a 0. Dependiendo de la época del año, los expertos estiman que en verano el suelo se seca (<5 % de humedad superficial) en 2 días después de una lluvia y en invierno el suelo se seca en 6 días. Con base en estas condiciones determinamos en cuántos días se seca el combustible calculando el valor de días de secado (ds) considerando el día ordinal de la fecha de cálculo como se muestra en la Figura 3.

Se tomaron como referencia los valores diarios de evaporación superficial observados en el ciclo anual 2022 que fueron registrados por la Estación Experimental Agrícola “INTA Cerro Azul” [22]. Para reducir la influencia de las mediciones extremas, suavizamos la curva aplicando promedios móviles a los datos observados con una ventana de 10 días. A continuación, utilizamos técnicas de aprendizaje automático para entrenar un modelo para ajustar una función sinodal periódica que represente el comportamiento de la evaporación como se muestra en el cuaderno Colab: Climatología EE INTA Cerro Azul 2022.

Al final de un evento de lluvia, comienza el proceso de evapotranspiración de la humedad superficial del suelo. Este proceso de secado del suelo sigue un patrón determinado por una función exponencial decreciente en el tiempo, como lo demuestran Rondinelli *et al.* [23] y Kurc *et al.* [24]. El tiempo de retardo de secado de los combustibles finos y medianos en el suelo ocurre a una tasa directamente asociada con la relación área por unidad de volumen. En base a Kunst [25] y Lawson [26] concluyen que el tiempo de secado ocurre entre 1 y 100 horas posteriores a la última lluvia registrada.

La cantidad de tiempo en que se seca el suelo saturado de agua es la inversa de la evaporación superficial de la humedad del suelo. Dedujimos el número mínimo de días para que el suelo y el combustible se sequen según el día del año en el hemisferio sur (la temporada húmeda ocurre aproximadamente en los meses de noviembre a marzo) como se muestra en la Figura 3.

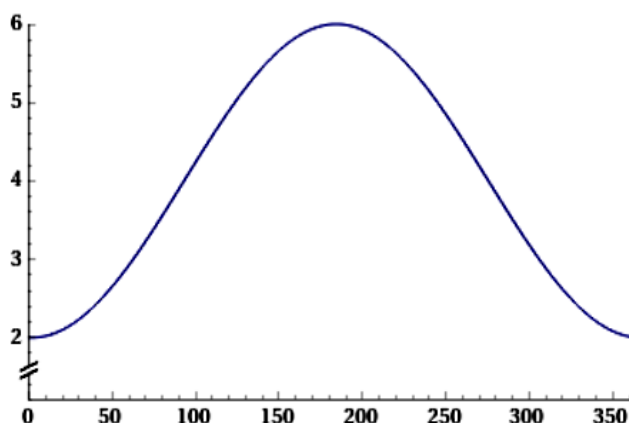


Figura 3. Número mínimo de días para que el suelo se seque según el número del día del año.

La fórmula que describe la curva de sequedad del suelo (ds) se presenta en la Ecuación (3).

$$ds = 2 * \sin \left(2 * \pi * \left(\frac{(x - 93)}{366} \right) \right) + 4 \quad (3)$$

Donde x es el valor ordinal del día del cálculo (desde 1 hasta 366).

Esta fórmula resulta de invertir la curva de evaporación (dando como resultado la Figura 4). Usando el método de mínimos cuadrados de la función sinusoidal, tomando como parámetros la amplitud, el período y la fase, derivamos la fórmula que usamos para calcular el valor de ds .

Se propone una nueva fórmula como alternativa al Código de Sequía (DC) que se desarrolló en la década de los años '70 como parte del FWI basado en Miller *et al.* [27], que difiere de la mayoría de los índices y códigos de peligro de incendio. Se basa en la tasa de evaporación superficial diaria en lugar del contenido de humedad gravimétrico y utiliza una ecuación de secado diferente para representar la difusión. Este modelo conceptualmente simple permite un cálculo más fácil y utiliza menos variables, sin depender de atributos específicos del suelo.

Con valores de registros empíricos locales de expertos en manejo de incendios adaptamos el método de Rondinelli [23] y se transformó la función exponencial decreciente en el tiempo a su representación cuadrática normalizada para simplificar los cálculos y obtener el factor de humedad superficial (FHS) como la raíz cuadrada del cociente entre el número de días desde la última lluvia registrada (ulr) y el número de días para que el suelo se seque con la Ecuación (4).

$$FHS_m = \sqrt{\left(\frac{ulr_m}{ds}\right)} \quad (4)$$

Donde m es el valor ordinal en la lista de municipios cuyo resultado se muestra en la Figura 5.

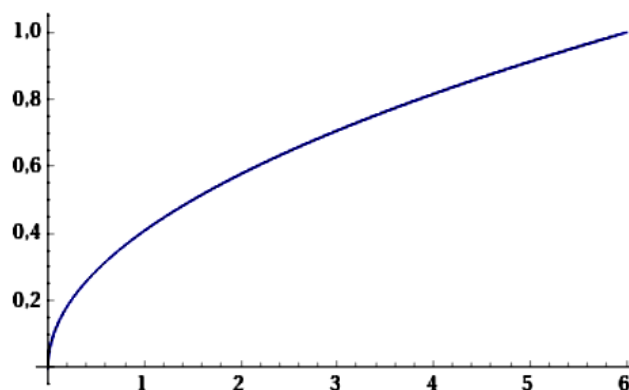


Figura 5. Factor de humedad del suelo basado en los días de deuda de agua.

El número de días desde la última lluvia registrada (ulr) se obtiene de las condiciones climáticas en tiempo real consultando la API de VisualCrossing [28], pasando como argumento las coordenadas de los centroides de cada municipio, obteniendo como resultado la temperatura, presión atmosférica, humedad del aire, velocidad del viento, dirección del viento y precipitación histórica.

La precipitación registrada en los 7 días anteriores debe ser mayor a 5 mm para que la cantidad de agua caída humedezca y sature la capa de hojarasca compuesta por combustibles finos y medianos. Si la precipitación registrada es menor a 5 mm se considera el valor 0 [25], [26].

5.4.1. Efecto de la Temperatura

El aumento de la temperatura puede acelerar las reacciones químicas involucradas en el proceso de combustión, este hecho no solo reduce el contenido de humedad, sino que también afecta la velocidad a la que los materiales se encienden y arden. Al considerar un cambio específico en la temperatura y su efecto en la inflamabilidad, se puede estimar que un incremento significativo podría resultar en un aumento del 50 % en la inflamabilidad de la hojarasca. La relación entre temperatura, humedad y combustibilidad es fundamental para comprender el comportamiento del fuego en los ecosistemas forestales y resalta la importancia del monitoreo climático para la gestión del riesgo de incendios. El efecto de la temperatura se calcula utilizando la Ecuación (5).

$$FT_m = \left(0.152 * \left(e^{(0.05 * T_m)}\right)\right) + 0.344 \quad (5)$$

Donde, t es el valor la temperatura en grados Celsius, m es el valor ordinal en la lista de municipios, e es la constante de Euler, el resultado se muestra en la Figura 6.

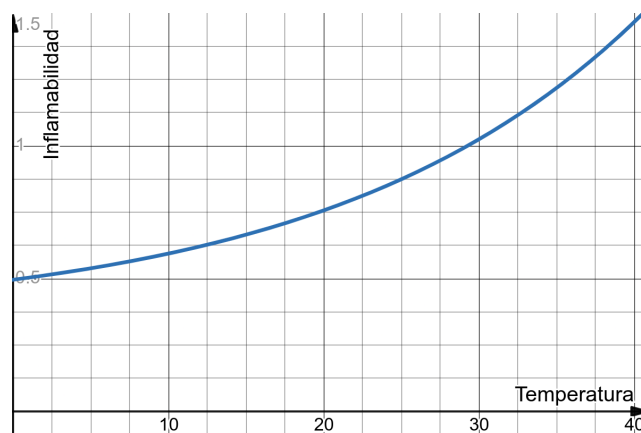


Figura 6. Relación de la temperatura con la inflamabilidad.

5.5. Factor de la presión atmosférica

De acuerdo con Hurtado [29] la disminución de la presión del aire tiene un impacto significativo en la humedad de la hojarasca en el suelo a través del proceso de evapotranspiración. A medida que la presión atmosférica disminuye, como al pasar de 1020 hPa a 750 hPa, se reduce la capacidad del aire para retener vapor de agua como se muestra en la Figura 7. Este fenómeno provoca que el agua se evapore más rápidamente tanto del suelo como de las hojas de las plantas, ya que el déficit de presión de vapor (DPV) aumenta. Un DPV alto significa que el aire es relativamente seco y puede absorber más vapor de agua, lo que intensifica la evapotranspiración y, por ende, disminuye la humedad disponible en la hojarasca.

Al pasar de una presión de 1020 hPa a 750 hPa, se estima que la inflamabilidad de la hojarasca podría aumentar hasta un 50 %. Sin embargo, en el contexto de los ciclones tropicales, éstos se observan a bajas presiones. Por ejemplo, en el estudio de Reed [30], se reportan valores de presión inferiores a 880 hPa en la formación de ciclones, lo que indica que valores inferiores a este valor son compatibles con una intensa actividad ciclónica. En este caso, el coeficiente de la presión atmosférica sobre la humedad PHF_m pasa a tener valor cero (Ecuación 6).

$$PHF_m = \frac{1}{(-0.33 * (e^{(-0.22 * (p_{am} - 750))}) + 1)} \quad (6)$$

Donde p_a es el valor de la presión atmosférica en hPa, m es el valor ordinal en la lista de municipios y e es la constante de Euler.

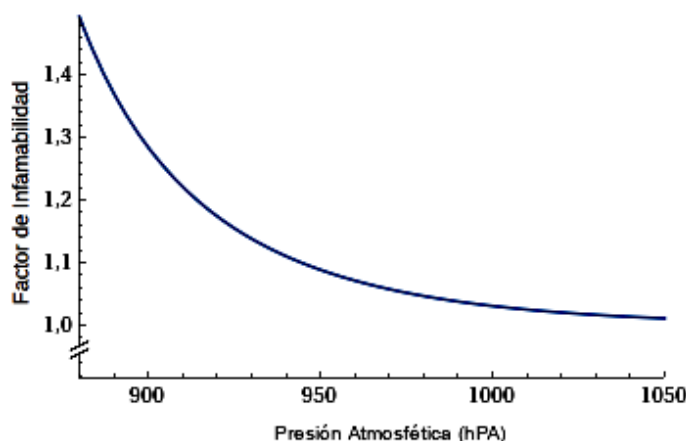


Figura 7. Relación de la presión y la humedad del combustible.

5.6. Efecto de la velocidad del viento

La velocidad del viento afecta directamente a la velocidad de propagación del fuego, lo que implica que cuanto mayor sea la velocidad del viento, mayor será el riesgo de propagación del fuego. Así, incorporamos al algoritmo la fórmula propuesta por Cruz *et al.* [31], donde sugieren que el factor de la velocidad del viento (FVV) se puede calcular como el 10% de la velocidad superficial del viento registrado (Ecuación 7).

$$FVV_m = (1 + (vv_m * 0.1)) \quad (7)$$

Donde vv es el valor la velocidad superficial del viento en km/h ym es el valor ordinal en la lista de municipios. Se suma 1 al valor del producto, dado que si no hay viento superficial el valor de FVV sería cero, lo que anularía en valor del producto de la Ecuación (9). Esta regla simple y general dio buenos resultados en bosques de coníferas, por lo que podemos generalizarla en el contexto geográfico del estudio.

6. Algoritmo del índice de riesgo de incendio rurales

El IRIR utiliza técnicas computacionales avanzadas que incluyen el uso de algoritmos, aprendizaje automático para procesar y analizar datos relacionados con la cobertura de suelo, la combustibilidad de la biomasa en el suelo y factores meteorológicos.

Se basa en un coeficiente de inflamabilidad de los combustibles en el suelo de cada municipio, que depende de la velocidad de propagación del fuego y su proporción con el valor de la superficie, y se ajusta mediante un coeficiente de humedad. Este valor es más significativo y específico que el FWI ya que representa el potencial de ignición en función de las características específicas de cada tipo de combustible en cada zona. El índice de inflamabilidad del municipio IIM_m es el resultado de la suma de la propagación combustible del suelo de cada tipo de cubierta ID_c y el porcentaje de la superficie de cada tipo de cubierta vegetal PS_c .

El valor del riesgo de incendio IRIR (Ecuación 9) de cada municipio m es el índice de inflamabilidad del municipio IIM_m , ajustado por el factor normalizado de humedad del suelo FHS y el factor de velocidad del viento FVV en esta zona. Este valor representa la ignitabilidad y el riesgo de inicio de un incendio.

Luego de determinar qué porcentaje de la superficie del área PS_c está cubierta por cada tipo de cobertura c del suelo, se lo multiplica por el índice de inflamabilidad diferencial ID_c de cada uno de ellos para obtener el índice de inflamabilidad de base de cada municipio IIM_m .

Para establecer el valor del índice de inflamabilidad IIM , multiplicamos el valor de inflamabilidad base de la zona por el coeficiente de humedad actual. Este valor indica el riesgo de que se inicie un incendio y la magnitud de la propagación del fuego (Ecuación 8).

$$IIM_m = \left(\sum ID_{(m,c)} * PS_{(m,c)} \right) * 10 \quad (8)$$

Donde:

m : (1 ··· 78) es el valor ordinal en la lista de municipios.

IIM_m es el valor del índice de inflamabilidad de cada municipio m .

n : (22) es la cantidad de tipos de cobertura del suelo.

c : (1 ··· n) son los tipos de cobertura del suelo

$ID_{(m,c)}$ es el índice de inflamabilidad para cada tipo de cobertura en el municipio m según la Tabla 2.

$PS_{(m,c)}$ es el porcentaje de la superficie de cada tipo de cobertura del suelo en el municipio m .

El cálculo de IIM se realiza semestralmente y los resultados se publican en el índice de inflamabilidad por municipio.

El valor de riesgo de incendio IRIR se calcula como se muestra en la Ecuación 9.

$$IRIR_m = IIM_m * FHS_m * FT_m * FPH_m * FVV_m \quad (9)$$

Donde:

m es el valor ordinal en la lista de municipios.

$IRIR_m$ es el índice de riesgo de incendio.

IIM_m es el índice de inflamabilidad del municipio.

FHS_m es el factor de humedad del suelo.

FT_m es el factor de la temperatura.

FPH_m es el factor de la humedad en relación con la presión atmosférica.

FVV_m es el factor de la velocidad superficial del viento.

6.1. Validación del IRIR

Para validar el modelo se compararon 50 registros del índice de peligrosidad publicados en Facebook por el MERNR de la provincia de Misiones, en el período de tiempo comprendido entre el 31 de agosto de 2024, y, el 21 de octubre de 2024. El MERNR no publica datos procesables del índice de peligrosidad, sólo imágenes de mapa de bits en Facebook, por lo que se realizó un análisis de diferencia de color de las imágenes en los mapas publicados. Para cada día comparado, se determinó en cuántos municipios el FWI subestima, iguala o sobreestima los valores que se obtuvieron con el modelo. Ver los datos de validación en GitLab (<https://tinyurl.com/RFRI-Validation>). Estos valores se promedian para establecer la diferencia de criterio de cada modelo.

En conclusión, el FWI utilizado por el MERNR subestimó el riesgo en el 20.70 % de los casos, igualó en el 44.69 %, y sobreestimó en el 34.90 %. Esto significa que en el 55.6 % de los casos, el FWI indicó valores inferiores o sobreestimó los obtenidos con nuestro modelo. Estas diferencias en los valores subestimados y sobreestimados implican que en el 20 % de los casos, los organismos responsables del control de incendios prestarán menos atención a las zonas con riesgo real de ignición y centrarán su atención en el 35 % de las zonas que no entrañan mayor peligro. Esto nos lleva a concluir que el FWI proporciona valores inexactos para determinar un criterio de peligro de incendio aceptable en entornos rurales donde la vegetación y el combustible no son homogéneos.

6.2. Visualización del IRIR

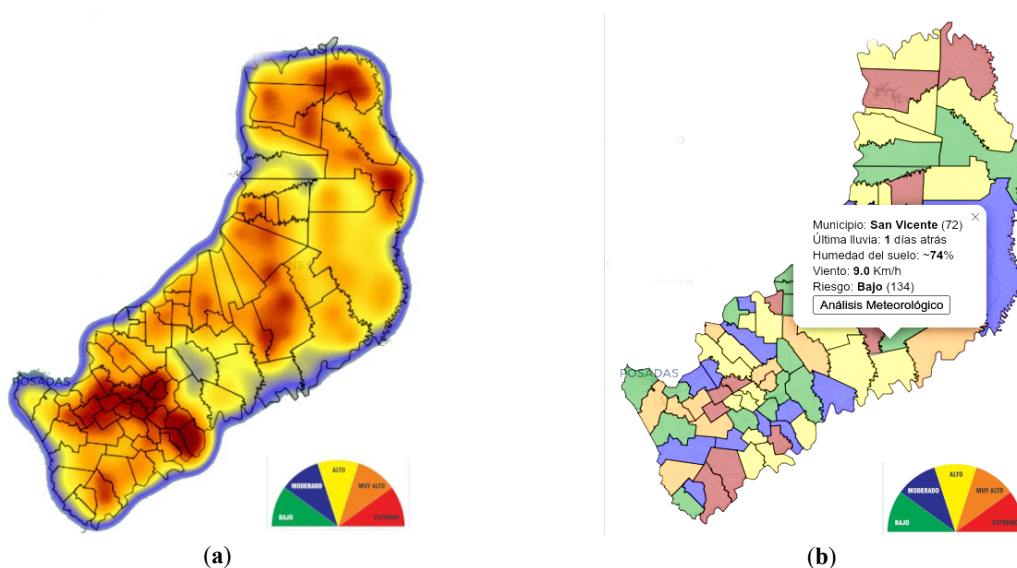
Usando el procedimiento que se detalla en el Algoritmo 1 (se incluye Tabla 3 para mayor claridad), el cálculo del IRIR para cada municipio se realiza diariamente a las 12:00, consultando vía API a las estaciones meteorológicas aledañas utilizando el valor de las coordenadas del centroide de cada uno de los 78 municipios. Utilizando el lenguaje *Python* y las bibliotecas de *Leaflet.js*, una biblioteca JavaScript de código abierto para mapas interactivos, se genera una imagen de un mapa de colores categóricos y un mapa de calor para representar el riesgo de incendio en las diferentes áreas geográficas como se muestra en la Figura 8a. La tonalidad roja indica un mayor riesgo de incendio, mientras que la tonalidad verde indica un riesgo bajo. Esta visualización es útil para identificar áreas con mayor riesgo y ayudan a los usuarios a comprender mejor el IRIR para tomar medidas preventivas para reducir el riesgo de incendios rurales y actuar en consecuencia.

Algoritmo 1. IRIR, obtención del índice de riesgo de incendios rurales.

1. Cargar en uMap (<http://u.osmfr.org/m/1035437/>) desde las BDI y el RUS los puntos de usos del suelo y cultivos según la CUS
2. Exportar la tabla TUS en formato CSV
3. Cargar en GGE la TUS y los archivos de los ML (Ver el proyecto en <https://tinyurl.com/299j78pc>)
4. Obtener el MSBE. Aplicar la CRF y obtener la tabla STUS
5. Cargar las tablas STUS y VPTC (Tabla 2) en una hoja de cálculos para obtener el IIM según la fórmula (9) (Ver el cálculo en <https://tinyurl.com/4d48pwa6>)
6. Cada día a las 12:00 procesar:
7. **for** municipio = 1 . . . 78 **do**
8. Para cada IIM obtener los datos meteorológicos DM: Calcular el FHS según la fórmula (4) y el FVV según la fórmula (8) desde VisualCrossing y obtener el IRIR aplicando la fórmula (10).
(Ver el código Python en <https://tinyurl.com/yc7n9up6>)
9. **end for**
10. Almacenar los valores de IRIR para cada municipio en una tabla con formato CSV
11. Mostrar la página en el sitio de Internet del IRI

Tabla 3. Elementos del algoritmo IRIR.

Acrónimo	Descripción
BDI	Bases de Datos Institucionales con coordenadas de cultivos y Usos del Suelo
RUS	Relevamiento de Usos del Suelo
CUS	Clasificación de Usos del Suelo
uMap	Aplicación para realizar mapas personalizados
TUS	Tabla de Usos del Suelo. (Tabla 2)
ML	Mapas de contorno de límites provincial, de municipios y áreas urbanas
GGE	<i>Google Earth Engine</i> . Aplicación para el procesamiento de datos geográficos
CRF	Algoritmo de clasificación <i>Random Forest</i>
MSBE	Mapa Satelital de Bandas Espectrográficas
STUS	Superficies de Tipos de usos del Suelo por municipio
VPTC	Velocidad de Propagación del Fuego por tipo de combustible en el suelo. (Tabla 2)
IIM	Índice de Inflamabilidad por Municipio
DM	Datos Meteorológicos
FHS	Factor de Humedad del Suelo
FVV	Factor de Velocidad del Viento
IRIR	Índice de Riesgo de Incendios Rurales

**Figura 8.** Mapa de calor y de colores categóricos del IRIR por municipio.

El modelo computacional del IRIR está operativo en el sitio del Índice de Riesgo de Incendios Rurales, y los detalles técnicos de la implementación están accesibles en el proyecto GitLab (<https://gitlab.com/Modernizacion.Misiones/incendios-rurales>).

7. Limitaciones

La limitación del estudio se centra en la necesidad un preprocesamiento de las imágenes de satélite para clasificar el uso del suelo. Esto se debe a que el estudio utiliza algoritmos de aprendizaje automático para clasificar las zonas de cubierta vegetal predominante, y para ello se requiere información precisa sobre los distintos tipos de cultivos

y usos del suelo. La eficacia del sistema RFRI depende en gran medida de la disponibilidad y precisión de los datos, en particular de los datos en tiempo real sobre la cubierta vegetal, la inflamabilidad del combustible y las condiciones meteorológicas. Las variables del clima podrían obtenerse directamente con sensores *in-situ* [32].

Para mantener la precisión del sistema RFRI, es necesario un seguimiento y actualización continuos de los algoritmos subyacentes y las fuentes de datos. El clima, la vegetación y otros factores medioambientales pueden cambiar con el tiempo, lo que requiere ajustes regulares del índice.

Aunque el RFRI se centra en el riesgo percibido de inicio de incendios debido a la actividad humana, es esencial considerar y tener en cuenta el comportamiento humano y las igniciones causadas por el hombre al aplicar el índice en escenarios del mundo real.

El estudio prueba y valida el índice RFRI en la provincia de Misiones de Argentina, conocida por sus diversos tipos de vegetación y la alta incidencia de incendios rurales y forestales. Aunque puede funcionar bien en esta región específica, su generalización a otras regiones con diferente vegetación y condiciones ambientales debe ser evaluada antes de su implementación.

8. Conclusiones

El aporte de este trabajo es un algoritmo computacional para calcular el potencial de ocurrencia de un incendio en el tiempo inmediato denominado “Índice de Riesgo de Incendios Rurales” (IRIR), que toma en cuenta variables estáticas como la inflamabilidad del combustible en el suelo y otras altamente variables dinámicas como datos enfocados en tiempo real como la meteorología.

El IRIR evalúa el riesgo inminente de incendios al considerar la inflamabilidad del combustible en el suelo y datos meteorológicos en tiempo real. A diferencia del FWI, el modelo propuesto se enfoca en predecir a corto plazo las condiciones que propician el inicio de incendios en áreas con vegetación diversa.

El IRIR se centra en la probabilidad de incidencia de incendios provocados por la actividad antropogénica, calculando la ignitabilidad del combustible en función del uso del suelo, el tipo y el tamaño de la superficie cubierta. Esto permite una predicción más precisa del riesgo de incendios. Se destaca por su enfoque dinámico y su capacidad para utilizar datos en línea sin la necesidad de intervención humana ni preprocesamiento de datos.

9. Referencias

- [1] Arnaldos Viger, J., Castelló Vidal, J. I., Giménez Pujol, A., Puchal Vergara, J. (2004). *Manual de ingeniería básica para la prevención y extinción de incendios forestales*. Ediciones Mundi-Prensa.
- [2] Canadian Institute for Fire Safety Research (CIFSR). (2023). *Glossary of Fire Weather Terms*. <https://glossary.ciffc.ca/>
- [3] Stocks, B. J., Lawson, B. D., Alexander, M. E., Wagner, C. E., McAlpine, R. S., Lynham, T. J., Dubé, D. E. (1989). Canadian Forest Fire Danger Rating System: An Overview. *The Forestry Chronicle*, 65 (4), 258–265. <https://doi.org/10.5558/tfc65258-4>
- [4] Yakubu, I., Mireku-Gyimah, D., Duker, A. (2015). Review of methods for modelling forest fire risk and hazard. *African Journal of Environmental Science and Technology*, 9 (2), 155–165. <https://doi.org/10.5897/AJEST2014.1820>
- [5] Lawson, B. D., Armitage, O. B., Hoskins, W. D. (1996). *Diurnal variation in the Fine Fuel Moisture Code: tables and computer source code*. Natural Resources Canada. <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/entities/publication/9f6a43e0-644e-43b5-8e27-c176687e364c>
- [6] Beck, J. A., Alexander, M. E., Harvey, S. D., Beaver, A. K. (2002). Forecasting diurnal variations in fire intensity to enhance wildland firefighter safety. *International Journal of Wildland Fire*, 11 (3), 173–182. <https://doi.org/10.1071/WF02002>
- [7] Dimitrakopoulos, A. P., Bemmerzouk, A. M., Mitsopoulos, I. D. (2011). Evaluation of the Canadian Fire Weather Index system in an eastern Mediterranean environment. *Meteorological Applications*, 18 (3), 331–340. <https://doi.org/10.1002/met.214>
- [8] Chelli, S., Maponi, P., Campetella, G., Monteverde, P., Foglia, M., Paris, E., Lolis, A., Panagopoulos, T. (2015). Adaptation of the Canadian Fire Weather Index to Mediterranean forests. *Natural Hazards*, 75 (2), 1795–1810. <https://doi.org/10.1007/s11069-014-1397-8>

- [9] Villers-Ruiz, L., Chuvieco, E., Aguado, I. (2019). Aplicación del Índice Meteorológico de Incendios Canadiense en un parque nacional del centro de México. *Revista Mexicana de Ciencias Forestales*, 3 (11), 25–40. <https://doi.org/10.29298/rmcf.v3i11.515>
- [10] Finkele, K., Flattery, P., Nugent, C. & Downes, P. (2021). *Current Operational Implementation of the Canadian Forest Fire Weather Index System in the Republic of Ireland*. <https://ui.adsabs.harvard.edu/abs/2023EGUGA..25.7853F/abstract>
- [11] El Territorio. (2024). *Chemes: “El 99% de los incendios es producto del humano”*. <https://www.elterritorio.com.ar/noticias/2024/01/31/818322-chemes-el-99por-ciento-de-los-incendios-es-producto-del-humano>
- [12] Instituto Geográfico Nacional (IGN). (2023). *Clasificación de cobertura del suelo en Argentina a partir de imágenes satelitales utilizando el algoritmo Random Forest*. <https://bit.ly/IGNRF>
- [13] Gupta, A., Watson, S., Yin, H. (2021). Deep learning-based aerial image segmentation with open data for disaster impact assessment. *Neurocomputing*, 439, 22–33. <https://doi.org/10.1016/j.neucom.2020.02.139>
- [14] Qin, R., Liu, T. (2022). A Review of Landcover Classification with Very-High Resolution Remotely Sensed Optical Images-Analysis Unit, Model Scalability and Transferability. *Remote Sensing*, 14 (3), 1-28. <https://doi.org/10.3390/rs14030646>
- [15] Martin, R. E., Gordon, D. A., Gutierrez, M. E., Lee, D. S., Molina, D. M., Schroeder, R. A., Sapsis, D. B., Stephens, S. L., Chambers, M. (1994). *Assessing the flammability of domestic and wildland vegetation*. International Conference on Fire and Forest Meteorology. Jekyll Island, GA.
- [16] Varner, J. M., Kane, J. M., Kreye, J. K., Engber, E. A. (2015). The Flammability of Forest and Woodland Litter: A Synthesis. *Current Forestry Reports*, 1 (2), 91–99. <https://doi.org/10.1007/s40725-015-0012-x>
- [17] Brys, C., Navas-Delgado, I., Aldana-Montes, J. (2023). Wildfire Risk Weighting and Behavior Prediction Using Open Geospatial Data and Ontologies. *Journal of Information Science*. <https://doi.org/10.1177/01655515231202757>
- [18] Dirección de Modernización de la Gestión y Gobierno Electrónico (DMGGE). (2023). *Ponderación del Riesgo y Predicción del Comportamiento de Incendios Rurales (ER-01)*. <https://gitlab.com/Modernizacion.Misiones/incendios-rurales/-/wikis/informe-experimento-01>
- [19] Rossa, C. G., Fernandes, P. M. (2018). Empirical Modeling of Fire Spread Rate in No-Wind and No-Slope Conditions. *Forest Science*, 64 (4), 358–370. <https://doi.org/10.1093/forsci/fxy002>
- [20] IMIBIO. (2024). *Instituto Misionero de Biodiversidad*. <https://imibio.misiones.gov.ar/es>
- [21] Hantson, S., Andela, N., Goulden, M. L., Randerson, J. T. (2022). Human-ignited fires result in more extreme fire behavior and ecosystem impacts. *Nature Communications*, 13 (1). <https://doi.org/10.1038/s41467-022-30030-2>
- [22] Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA). (2023). *Estación Experimental Agrícola “INTA Cerro Azul”*. <https://inta.gob.ar/cerroazul>
- [23] Rondinelli, W. J., Hornbuckle, B. K., Patton, J. C., Cosh, M. H., Walker, V., Carr, B. D., Logsdon, S. D. (2015). Different Rates of Soil Drying after Rainfall Are Observed by the SMOS Satellite and the South Fork in situ Soil Moisture Network. *Journal of Hydrometeorology*, 16 (2), 889–903. <https://doi.org/10.1175/JHM-D-14-0137.1>
- [24] Kurc, S. A., Small, E. E. (2004). Dynamics of evapotranspiration in semiarid grassland and shrubland ecosystems during the summer monsoon season, central New Mexico. *Water Resources Research*, 40 (9), 1-15. <https://doi.org/10.1029/2004WR003068>
- [25] Kunst, C. R., Ledesma, R. R., Bravo, S., Defossé, G. E., Godoy, J. A., Navarrete, V. D. C. (2014). Dinámica de la humedad de los combustibles y su relación con la ecología y manejo de fuego, region chaqueña occidental (Argentina) II: follaje y residuos de árboles y arbustos. *Revista de Investigaciones Agropecuarias (RIA)*, 40 (2), 165–181. <https://ria.inta.gob.ar/wp-content/uploads/2014/08/ria-vol-40-n2-2014.pdf>
- [26] Lawson, B. D., Armitage, O. B. (2008). *Weather Guide for the Canadian Forest Fire Danger Rating System*. Natural Resources Canada. <https://ostrnrcan-dostrnrcan.canada.ca/handle/1845/219568>
- [27] Miller, E. (2020). A Conceptual Interpretation of the Drought Code of the Canadian Forest Fire Weather Index System. *Fire*, 3 (2), 1-8. <https://doi.org/10.3390/fire3020023>
- [28] Visual Crossing Corporation. (2023). *Weather Data & API*. <https://www.visualcrossing.com/>
- [29] Hurtado, R., Specha, L. (2011). Evaporación y evapotranspiración. En G. M. Murphy, R. H. Hurado (Eds.) *Agrometeorología* (pp. 85–102). Editorial Facultad de Agronomía. <https://tinyurl.com/Hurtado2011>

- [30]Reed, K. A., Jablonowski, C. (2011). Assessing the Uncertainty in Tropical Cyclone Simulations in NCAR's Community Atmosphere Model. *Journal of Advances in Modeling Earth Systems*, 3 (2), 1-16. <https://doi.org/10.1029/2011MS000076>
- [31]Cruz, M. G., Alexander, M. E. (2019). The 10% wind speed rule of thumb for estimating a wildfire's forward rate of spread in forests and shrublands. *Annals of Forest Science*, 76 (2), 1-11. <https://doi.org/10.1007/s13595-019-0829-8>
- [32]Tatayo Vinueza, E., Llugsi Cañar, R. (2022). Implementación de una mini-red de sensores inalámbricos para detección temprana de incendios forestales. *Revista de Investigación en Tecnologías de la Información (RITI)*, 10 (21 Especial), 88–99. <https://doi.org/10.36825/RITI.10.21.008>