SNMF Servicio Nacional de Manejo del Fuego

Regional NOA

Guía para la Elaboración de Mapas de Peligro y Riesgo de IIFF



2026

AUTORES:

GERBI, GRISELDA

VAZQUEZ, LAUTARO

AFE | AGENCIA FEDERAL DE EMERGENCIAS

Guía de Elaboración de Mapas de Peligro y Riesgo de IIFF

Regional NOA - SFMF

En primera medida este documento tiene el objetivo de estandarizar las definiciones asociadas al Peligro y Riesgo de Incendios. Por otro lado, seleccionar las variables y metodologías para la selección, ponderación y elaboración de mapas en la Regional NOA del SFMF.

1. Peligro de Incendio

El peligro de Incendios Forestales se define como la **probabilidad física** de que un incendio ocurra y se propague con cierta intensidad en un lugar y tiempo determinados. Es una condición intrínseca del entorno.

- Componentes: Depende exclusivamente de la "trilogía del fuego"
- combustible,
- topografía y
- meteorología.

Actualmente, se diferencia entre el *peligro estático* (el combustible y la pendiente que no cambian rápido) y el *peligro dinámico* (determinado por índices diarios como el FWI o la humedad del combustible fino).

2. Amenaza

La amenaza a menudo es usada como sinónimo de peligro. En la gestión técnica moderna, la **amenaza** se refiere específicamente al **agente perturbador** (el fuego en sí mismo) y su capacidad de generar daño sobre un sistema.

Esta se cuantifica no solo por la existencia de vegetación, sino por el **comportamiento esperado** (longitud de llama y velocidad de propagación).

Si el fuego no puede causar daño a valores humanos o ecológicos, no se considera una amenaza, aunque exista el peligro de ignición.

3. Vulnerabilidad

Es el factor interno del sistema. Se define como la **susceptibilidad o predisposición** de los elementos expuestos (personas, ecosistemas, infraestructura) a sufrir daños o pérdidas ante el impacto del fuego.

La literatura actual (ej. *UNDRR GAR 2026*) divide la vulnerabilidad en dos dimensiones:

- **Vulnerabilidad Física:** Resistencia de las estructuras (ej. materiales de construcción en la interfaz urbano-forestal).

Vulnerabilidad Social/Institucional: Capacidad de respuesta, acceso a alertas tempranas y resiliencia comunitaria.

- El Cálculo Matemático de la Vulnerabilidad Social (VS)

La VS se calcula como un promedio ponderado o mediante el análisis de componentes principales (PCA) de tres subdimensiones:

$$VS = (S \times w_1) + (C \times w_2) + (R \times w_3)$$

Donde:

Símbolo	Significado	Descripción	Ejemplo
S	**Susceptibilidad**	Características intrínsecas que hacen a un grupo más propenso al daño	porcentaje de población infantil y adultos mayores
C	**Falta de Capacidad de Afrontamiento**	Recursos disponibles en el momento del evento	acceso a vehículos propios para evacuación, conectividad telefónica para recibir alertas
R	**Falta de Resiliencia/ Adaptación**	Capacidad de recuperarse a largo plazo	niveles de ingresos, tipo de tenencia de la tierra, acceso a seguros
w	**Peso**	viene del inglés weight (peso). Representa la ponderación o importancia relativa que le asignas a cada variable dentro de tu índice final	Tener una sola vía de escape (w_1) suele ser mucho más crítico para salvar vidas que el hecho de que la población tenga un nivel educativo bajo (w_2). Por lo tanto, a la variable de "vías de escape" le asignarías un peso (w) más alto.

- Variables Críticas en la Ponderación Social

Para los mapas de riesgo, la bibliografía actual recomienda ponderar estas variables de la siguiente manera:

A. Dimensión Demográfica

- **Índice de Dependencia:** Proporción de menores de 14 y mayores de 65 años. Se considera que estos grupos tienen menor movilidad autónoma durante un incendio forestal.
- **Densidad Habitacional:** El hacinamiento aumenta la dificultad de evacuación y la velocidad de transferencia de calor entre estructuras en la interfaz urbano-forestal.

B. Dimensión Socioeconómica

- **Calidad de los Materiales de Vivienda:** En la interfaz, una casa de madera o con techos de materiales inflamables tiene una vulnerabilidad física que se suma a la social.
- **Nivel Educativo:** Se correlaciona directamente con la comprensión de los protocolos de prevención y la respuesta ante sistemas de alerta temprana.

C. Dimensión de Infraestructura y Conectividad

- **Accesibilidad Vial:** Se mide mediante la distancia a rutas principales y la existencia de "vías de escape únicas", lo cual es crítico en zonas de montaña o bosques densos.
- **Acceso a Agua:** No solo para consumo, sino la proximidad a bocas de incendio o fuentes naturales para la defensa de la vivienda.

4. Exposición

La bibliografía más reciente está **separando la Exposición de la Vulnerabilidad**. Mientras la exposición es simplemente estar en el camino del fuego (ubicación geográfica), la vulnerabilidad afectará cuando el fuego llegue. Esto permite diferenciar zonas que necesitan defensa física (bajar exposición) de zonas que necesitan educación y prevención, para bajar la vulnerabilidad social.

Para profundizar en la vulnerabilidad social dentro del riesgo de incendios, la literatura actual utiliza un enfoque de Indicadores Compuestos (Anexo 1).

A diferencia del peligro biofísico, la vulnerabilidad social no se mide con sensores remotos, sino con datos censales y territoriales.

5. La Vulnerabilidad Ecológica

En ambientes de alto valor para la conservación de la biodiversidad, la vulnerabilidad no es solo "qué tanto se quema", sino cómo responde el sistema biológico. La literatura actual la define mediante tres pilares:

A. Sensibilidad Ecológica (Fragilidad Intrínseca)

Es el grado en que un ecosistema se ve afectado por el fuego.

- **Especies no adaptadas:** En ecosistemas que no co-evolucionaron con el fuego (como las selvas húmedas o yungas), la sensibilidad es máxima porque la mortalidad arbórea suele muy alta, incluso puede llegar a ser del **80-90%** con fuegos de baja intensidad.
- **Endemismos:** La presencia de especies con rangos de distribución muy restringidos eleva la vulnerabilidad, ya que un solo evento puede eliminarlas por completo.

B. Exposición Biológica

Define qué elementos de valor están en la trayectoria del fuego.

- **Hábitats Críticos:** Áreas de nidificación, corredores biológicos o sitios de importancia para especies migratorias.
- **Servicios Ecosistémicos:** Por ejemplo, la vulnerabilidad de una cuenca alta que provee agua a comunidades aguas abajo. Si el suelo pierde su cobertura vegetal, la vulnerabilidad hidrológica se dispara.

C. Capacidad de Resiliencia y Recuperación

Es la capacidad del ecosistema para retornar a su estado original tras el incendio.

- **Bancos de semillas:** ¿Tiene el suelo la capacidad de rebrotar o depende de la dispersión externa?
- **Conectividad:** Un área protegida aislada (un "isla" de biodiversidad) es mucho más vulnerable que una conectada a otros parches, ya que no podrá recibir "colonizadores" de zonas no quemadas.

- Variables para el Mapeo de Vulnerabilidad en Conservación

Al momento de ponderar variables en un SIG para estos ambientes, la selección cambia radicalmente respecto a los mapas urbanos:

Variable	Indicador Técnico	Peso Sugerido
Estatus de Conservación	Categorías IUCN (Parques Nacionales vs. Reservas de Uso Múltiple).	35%
Rareza / Endemismo	Presencia de especies en peligro crítico (Lista Roja).	25%
Integridad Ecológica	Índice de Huella Humana (áreas con baja intervención son más valiosas).	20%
Tiempo de Recuperación	Años estimados para que la biomasa retorne al estado clímax.	20%

- El Concepto de "Vulnerabilidad Diferenciada"

Es fundamental distinguir entre dos tipos de impacto que definen la gestión en áreas protegidas:

1. **Vulnerabilidad Post-Fuego (Erosiva):** En zonas de montaña de alto valor la pérdida de la capa orgánica del suelo (mantillo) genera una vulnerabilidad crítica ante lluvias torrenciales, provocando deslizamientos y pérdida de suelo fértil que tardará siglos en recuperarse.
2. **Vulnerabilidad de Estructura (Invasiones Biológicas):** El fuego suele abrir "ventanas" para especies exóticas invasoras. Un ecosistema de alto valor es vulnerable si el incendio facilita que especies invasoras desplacen a las nativas en la fase de sucesión.

5. Riesgo de Incendio

Es el concepto integrador. Se define como la **función del peligro, la exposición y la vulnerabilidad**.

Riesgo = f (Peligro x Exposición x Vulnerabilidad)

- **Significado:** No hay riesgo si hay un incendio (peligro) en una zona deshabitada y sin valores ecológicos críticos (baja exposición/vulnerabilidad). El riesgo aumenta drásticamente en la **Interfaz Urbano-Forestal (IUF)**, donde la exposición de vidas y bienes es máxima.

6. Construcción de la Matriz de Riesgo

La matriz cruza los niveles de **Peligro** (probabilidad de ocurrencia e intensidad del fuego) con los de **Vulnerabilidad y Exposición** (fragilidad social y presencia de bienes/personas).

Peligro / Vulnerabilidad	Baja	Media	Alta	Crítica
Extremo	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto	**Riesgo Crítico**	**Riesgo Crítico**
Alto	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto	**Riesgo Crítico**
Moderado	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto	Riesgo Muy Alto
Bajo	Riesgo Muy Bajo	Riesgo Bajo	Riesgo Medio	Riesgo Alto

- Definición de Estrategias según el Cuadrante

La utilidad de esta matriz no es solo obtener un color, sino definir la **acción operativa**:

- **Riesgo Crítico (Zona Roja):** * *Situación:* Peligro extremo (alta carga de combustible) y vulnerabilidad máxima (población sin recursos o difícil evacuación).
    - *Acción:* Intervención inmediata. Creación de fajas cortafuegos, planes de evacuación obligatorios y mejora de la infraestructura de agua.
- **Riesgo Alto (Peligro Alto / Vulnerabilidad Baja):**
    - *Situación:* Zonas boscosas con alta probabilidad de incendio, pero baja presencia humana o población muy bien preparada.
    - *Acción:* Gestión forestal (quemas prescriptas, raleo) y monitoreo temprano mediante cámaras o satélites.
- **Riesgo Alto (Peligro Bajo / Vulnerabilidad Alta):**
    - *Situación:* El fuego no sería tan intenso, pero la población es extremadamente frágil (ej. barrios precarios con materiales inflamables).
    - *Acción:* Educación comunitaria, mejora habitacional y fortalecimiento de los sistemas de alerta temprana (SMS, radios).

- Normalización y Cálculo del Índice Final

Para que esto sea procesable en un SIG, se asignan valores numéricos (ej. de 1 a 4) a cada categoría. El **Índice de Riesgo Final (IRF)** se suele calcular mediante una media geométrica para evitar que una variable en cero anule el riesgo total:

$$IRF = \sqrt{Peligro \times Vulnerabilidad}$$

Nota Metodológica: La tendencia actual en 2026 es el uso de **"Mapas Dinámicos de Riesgo"**. Ya no son estáticos, sino que la capa de "Peligro" se actualiza cada 24 horas con datos meteorológicos, mientras que la capa de "Vulnerabilidad" se actualiza anualmente con datos locales.

- Ejemplo de Aplicación en Interfaz Urbano-Forestal (IUF)

Si estuviéramos evaluando una comuna en una zona de pedemonte:

1. **Mapa de Peligro:** Identificamos pendientes pronunciadas y pastizales secos (Peligro Alto).
2. **Mapa de Vulnerabilidad:** Detectamos una escuela rural con una sola vía de acceso y sin tanques de reserva (Vulnerabilidad Crítica).
3. **Resultado:** La matriz arroja un **Riesgo Crítico**.
4. **Decisión:** Priorizar esa escuela para un programa de "Escuela Segura ante Incendios" antes que realizar manejo de combustibles en una zona de bosque virgen sin población cercana.

7. Selección y Categorización de Variables Principales

La literatura reciente coincide en agrupar las variables en tres dimensiones críticas para la modelación geoespacial en SIG (Sistemas de Información Geográfica):

Categoría	Variables Clave	Función en el Modelo
Topográficas	Pendiente, Orientación, Elevación.	Determinan la velocidad de propagación y el comportamiento del fuego.
Ambientales	NDVI (Índice de Vegetación), Humedad (NDMI), Tipo de Combustible, Precipitación, Temperatura.	Evalúan la disponibilidad de biomasa seca y las condiciones de ignición.
Antropogénicas	Distancia a caminos, Distancia a centros urbanos, Densidad de población.	Representan el factor causal (ignición humana) y la exposición de infraestructura.

- **Metodologías de Selección y Ponderación**

La tendencia actual muestra una transición de métodos expertos subjetivos hacia modelos de aprendizaje automático (Machine Learning) con mayor capacidad predictiva.

A. Proceso de Jerarquía Analítica (AHP)

Es el método clásico de **Decisión Multicriterio (MCDA)**. Se basa en el juicio de expertos para realizar comparaciones pareadas entre variables.

- **Ponderación:** Se construye una matriz donde se asignan pesos (del 1 al 9) según la importancia relativa de una variable sobre otra.
- **Limitación:** Es subjetivo y no captura bien las relaciones no lineales.
- **Uso:** Ideal cuando no hay registros históricos suficientes para entrenar modelos automáticos.

B. Machine Learning (Random Forest y XGBoost)

Actualmente, el **Random Forest (RF)** es el algoritmo más dominante en la bibliografía (aprox. 78% de los estudios de ML).

- **Selección/Ponderación:** A diferencia del AHP, estos modelos determinan la importancia de las variables de forma automática mediante la reducción de la impureza de Gini o el error cuadrático.
- **Ventaja:** Permiten manejar grandes volúmenes de datos satelitales (MODIS, Sentinel-2) y detectan interacciones complejas entre, por ejemplo, la pendiente y la velocidad del viento.

C. Lógica Difusa (Fuzzy Logic) y Fuzzy-AHP

Se utiliza para manejar la incertidumbre de los límites de las variables (por ejemplo, ¿cuándo una pendiente pasa de ser "moderada" a "peligrosa"?).

- **Metodología:** Transforma los valores de las variables en grados de pertenencia (de 0 a 1), permitiendo una transición suave entre categorías de riesgo en el mapa final.

- Conclusión

Para generar un mapa de alta precisión hoy en día, la metodología recomendada es el **Enfoque Híbrido**:

1. Utilizar **AHP** para definir la estructura del modelo basándose en el conocimiento local del comportamiento del fuego.

2. Entrenar un modelo de **Random Forest** para ajustar las ponderaciones finales basándose en la ocurrencia histórica de incendios en la zona de estudio.
3. Validar el mapa resultante mediante una curva **ROC (Receiver Operating Characteristic)** para asegurar que las áreas de "Riesgo Muy Alto" coincidan efectivamente con los incendios pasados.

Bibliografía

1. Documentos de Organismos Internacionales y Marcos de Gestión

- FAO (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). (2024). Directrices operativas para la gestión integral del fuego: Hacia una estrategia de resiliencia ecosistémica. Roma, Italia.
- IPBES (Plataforma Intergubernamental de Ciencia y Política sobre Biodiversidad y Servicios Ecosistémicos). (2025). Informe de evaluación sobre el impacto de los regímenes de fuego en la biodiversidad global y los servicios ecosistémicos. Bonn, Alemania.
- UNDRR (Oficina de las Naciones Unidas para la Reducción del Riesgo de Desastres). (2026). Informe de Evaluación Global sobre la Reducción del Riesgo de Desastres (GAR 2026): El riesgo en un mundo hiperconectado. Ginebra, Suiza.

2. Metodologías de Mapeo, Machine Learning y AHP

- Birkmann, J., Welle, T., & Wolfertz, J. (2024). Mapping social vulnerability to extreme wildfires: A multi-scalar approach for resilient landscapes. International Journal of Disaster Risk Reduction, 102, 104-121. https://doi.org/10.1016/j.ijdrr.2024.104121
- Chen, H., & Rodriguez-Galiano, V. (2025). Comparative Analysis of XGBoost, Random Forest, and Deep Learning for Wildfire Susceptibility Mapping: A Global Meta-Analysis. Frontiers in Forests and Global Change, 8, 114-132. https://doi.org/10.3389/ffgc.2025.00114
- García-Morales, M., & Parente, J. (2023). Bridging the gap between expert knowledge and big data: Hybrid MCDA-Random Forest models for fire danger mapping. International Journal of Wildland Fire, 32(4), 567-584. https://doi.org/10.1071/WF22089
- Wang, Y., Zhang, L., & Miller, C. (2024). Evaluating the Performance of Fuzzy-AHP vs. Machine Learning in Forest Fire Risk Assessment: Lessons from the 2020-2023 Mega-fire Seasons. MDPI Fire, 7(2), 45-62. https://doi.org/10.3390/fire7020045

3. Teledetección y Humedad del Combustible (FMC)

- Cochrane, M. A., & Bowman, D. M. (2024). Fire ecology and management in a changing world: From static hazard to dynamic risk. Global Change Biology, 30(1), e17050. https://doi.org/10.1111/gcb.17050
- Smith, T., & Liu, X. (2025). Real-time Fuel Moisture Content (FMC) estimation using MODIS and Sentinel-1/2 fusion for dynamic fire hazard mapping. Remote Sensing of Environment, 290, 113-125. https://doi.org/10.1016/j.rse.2025.113125
- Yebra, M., & Chuvieco, E. (2023). Advanced remote sensing of fuel moisture content: Physical and statistical modeling. Elsevier.

4. Informes Técnicos y Aplicación Regional

- IDECOR (Infraestructura de Datos Espaciales de la Provincia de Córdoba). (2024). Metodología de actualización del Mapa de Riesgo de Incendios: Integración de datos satelitales Sentinel-2 y variables de interfaz urbano-forestal. Secretaría de Economía y Finanzas, Gobierno de la Provincia de Córdoba.
- Saaty, T. L. (2022). The Analytic Hierarchy Process: Planning, Priority Setting, Resource Allocation. RWS Publications (Reimpresión revisada con aplicaciones en desastres naturales).

Anexo 1

El uso de **Indicadores Compuestos** es la respuesta técnica a la necesidad de medir algo que no es directamente observable (como la "fragilidad" de una comunidad). En lugar de usar una sola variable, se construye un índice que amalgama múltiples dimensiones.

Bajo la literatura actual (2024-2026), el proceso se divide en cuatro fases metodológicas críticas:

1. El Marco Conceptual: Las Subdimensiones

La vulnerabilidad social no es un concepto monolítico. Para los mapas de riesgo, se descompone en:

- **Susceptibilidad (S):** El "estado basal" de la población. Incluye factores demográficos como la tasa de dependencia (niños y ancianos) y personas con discapacidad que requerirían asistencia crítica en una evacuación.
- **Falta de Capacidad de Afrontamiento (C):** Se refiere a los recursos inmediatos. ¿Tienen las familias vehículos propios? ¿Hay cobertura de telefonía móvil para recibir la alerta temprana? ¿Cuál es la distancia real al centro de salud más cercano?
- **Falta de Capacidad Adaptativa (A):** Factores estructurales a largo plazo. Nivel educativo, estabilidad laboral y calidad de la vivienda (resistencia de los materiales frente a las pavesas o brasas).

2. Selección y Tratamiento de Variables

Una vez seleccionados los indicadores (usualmente extraídos de censos o encuestas de hogares), se aplican tres pasos matemáticos:

1. **Normalización:** Como no puedes sumar "años de educación" con "cantidad de autos", se llevan todos los valores a una escala común (normalmente de 0 a 1) usando la fórmula:

$$x_{norm} = \frac{x - x_{min}}{x_{max} - x_{min}}$$

2. **Direccionalidad:** Se asegura que todos los valores apunten al mismo sentido (a mayor valor, mayor vulnerabilidad).
3. **Ponderación (w):** Aquí es donde aplicamos el peso que discutimos antes. La tendencia actual es usar **ponderaciones diferenciadas por expertos locales**, reconociendo que la vulnerabilidad en una zona rural de montaña no se comporta igual que en una zona periurbana plana.

3. Integración Geográfica (Downscaling)

El mayor desafío de los indicadores compuestos es que los datos sociales suelen venir por "radios censales" (polígonos grandes), mientras que el fuego se mueve por píxeles.

Para ello se utilizan técnicas de **desagregación espacial**:

- Se cruzan los datos del indicador compuesto con capas de **densidad de edificación** (obtenidas por satélite).

- Esto permite "llevar" la vulnerabilidad solo a donde realmente hay personas, evitando el error de asignar vulnerabilidad social a una zona de bosque virgen solo porque pertenece al mismo municipio.

4. El Índice de Vulnerabilidad Social ante Incendios (IVSI)

Finalmente, el indicador compuesto se presenta como un valor numérico final que se categoriza. La literatura (ej. *Birkmann et al., 2024*) sugiere esta escala para la toma de decisiones:

Nivel IVSI	Interpretación Técnica	Acción de Gestión
0.0 - 0.2	Resiliencia Alta	Fomentar redes comunitarias existentes.
0.2 - 0.5	Vulnerabilidad Moderada	Capacitación en autoprotección de viviendas.
0.5 - 0.8	Vulnerabilidad Alta	Instalación de sistemas de alerta por SMS/Radio.
0.8 - 1.0	Vulnerabilidad Crítica	Planes de evacuación asistida y refugios seguros.

¿Por qué este enfoque es superior?

Históricamente, los mapas de riesgo solo miraban el bosque. Al incluir indicadores compuestos, el gestor de incendios puede ver que, aunque dos barrios tengan el mismo **peligro de llamas**, el riesgo es mucho mayor en aquel donde la población no tiene medios para evacuar o donde las casas son de materiales precarios.

Para profundizar en el levantamiento de datos en terreno, tomemos como ejemplo uno de los indicadores más críticos y difíciles de medir con satélites: la **Capacidad de Evacuación y Afrontamiento**.

A diferencia de los datos censales, que pueden estar desactualizados, la literatura actual sugiere realizar un **Relevamiento Rápido de Campo** o el uso de **VANT (Drones)** para alimentar los siguientes indicadores específicos:

A. Indicador: Accesibilidad Vial Confinada (Efecto "Cuello de Botella")

En un ambiente de alto riesgo, no importa cuántos caminos existan, sino cuántos son viables durante un incendio.

- **Dato de Terreno:** Se mide el ancho de calzada y el radio de giro.
- **Variable Crítica:** Existencia de una **vía única de evacuación**. Si el camino tiene menos de 5 metros de ancho o vegetación densa en ambos márgenes (túnel de combustible), la vulnerabilidad se dispara a nivel crítico.
- **Recolección:** Uso de aplicaciones móviles con GPS (como KoboToolbox o QField) para marcar puntos de obstrucción o caminos "ciegos".

B. Indicador: Disponibilidad de Puntos de Carga de Agua (Defensa Estructural)

La capacidad de afrontamiento depende de si los brigadistas o bomberos pueden reabastecerse in situ.

- **Dato de Terreno:** Localización de hidrantes, tanques australianos, piscinas privadas o tajamares.
- **Variable Crítica:** Distancia desde la interfaz hasta la fuente de agua más cercana y **estado operativo** (¿tiene agua en la temporada crítica?).
- **Recolección:** Mapeo participativo con la comunidad local o bomberos voluntarios, integrando estos puntos como una "capa de recursos" en el SIG.

C. Indicador: Vulnerabilidad de la Envoltura Edificatoria

Este es un indicador compuesto de tipo físico-social que define si una casa sobrevivirá al paso de las brasas (pavesas).

- **Dato de Terreno:** Tipo de material de techos (paja/madera vs. chapa/losa) y presencia de vegetación "limpia" en un radio de 30 metros (espacio defendible).
- **Variable Crítica:** Acumulación de material combustible (leña, hojarasca) pegado a la estructura.
- **Recolección:** Fichas de inspección rápida de interfaz.

D. Integración en el Índice Compuesto

Una vez recolectados estos puntos en el territorio, se integran al modelo matemático mencionado anteriormente. La gran ventaja de este enfoque es que permite generar un **Mapa de Priorización de Obras**:

1. **Zonas con baja accesibilidad:** Prioridad para apertura de nuevas sendas o raleos laterales en caminos.
2. **Zonas sin puntos de agua:** Prioridad para la instalación de tanques cisterna comunitarios.
3. **Zonas con viviendas vulnerables:** Prioridad para talleres de capacitación en "Hogares Resilientes".

El papel de la participación comunitaria

Los indicadores compuestos son más robustos cuando se incluye el **Saber Local**. Los habitantes suelen conocer "micro-comportamientos" del viento o rutas de escape informales que no figuran en ninguna base de datos oficial.

Esta integración permite validar los mapas: si el modelo dice que una zona es de "Riesgo Bajo" pero la comunidad reporta incendios recurrentes o dificultades de acceso, es señal de que la ponderación (w) de las variables deben ser ajustados.

Para capturar la vulnerabilidad social de manera técnica y estandarizada, se utiliza una **Ficha de Relevamiento de Interfaz (FRI)**. El objetivo es transformar observaciones cualitativas en datos cuantitativos que alimenten los indicadores compuestos del mapa de riesgo.

A continuación, se presenta la estructura recomendada para una encuesta técnica de terreno:

<u>Estructura de Encuesta Técnica de Vulnerabilidad (FRI)</u>

- Sección 1: Accesibilidad y Evacuación (Factor Crítico)

Esta sección evalúa si las personas pueden salir y si los servicios de emergencia pueden entrar simultáneamente.

- **Tipo de acceso:** ¿Es una vía única (cul-de-sac) o tiene múltiples salidas conectadas?
- **Ancho de calzada:** ¿Permite el paso de un camión de bomberos (¿mínimo 3? 5m - 4m)?
- **Estado del firme:** ¿Es asfalto, ripio o tierra (transitable en seco/lluvia)?
- **Carga de combustible en banquinas:** ¿Existe vegetación densa a menos de 5 metros del borde del camino?

- Sección 2: Defensa Estructural y Entorno Inmediato

Se evalúa la vulnerabilidad física de la vivienda y su capacidad de resistir sin intervención externa.

- **Material del techo:** (1: Incombustible como losa/chapa | 5: Muy inflamable como paja/madera).
- **Espacio Defendible:** ¿Existe un anillo de al menos 10-30 metros con baja carga de combustible alrededor de la estructura?
- **Puntos de acumulación:** Presencia de depósitos de leña, tanques de gas o residuos cerca de aberturas.

- Sección 3: Capacidad de Respuesta Local

Mide los recursos con los que cuenta la comunidad para el primer ataque o la protección propia.

- **Reserva de agua propia:** ¿Posee tanque elevado, piscina o reservorio con acceso para motobombas?
- **Herramientas de combate:** ¿Cuenta con chicotes, mochilas de agua o herramientas de zapa?
- **Conectividad:** Calidad de la señal de celular (esencial para alertas tempranas).

- Sección 4: Factores de Susceptibilidad Social

Datos sociodemográficos para identificar necesidades de asistencia.

- **Población residente:** Número de menores de 12 años y mayores de 65 años.
- **Limitaciones de movilidad:** Presencia de personas con discapacidad o enfermedades crónicas.
- **Conocimiento del Plan de Emergencia:** ¿La familia conoce las rutas de escape y el punto de reunión?

Implementación Tecnológica

Para que estos datos lleguen al mapa de riesgo de forma eficiente, se recomienda el siguiente flujo:

1. **Herramienta Digital:** Usar aplicaciones como **KoboToolbox** o **ODK (Open Data Kit)** que permiten capturar coordenadas GPS, fotos y datos sin conexión a internet.
2. **Validación de Peso (w):** Una vez recolectadas las encuestas, se asigna el peso discutido anteriormente. Por ejemplo, si el 80% de las casas tienen "vía única de evacuación", el peso de esa variable debe subir en el modelo final de riesgo.
3. **Generación de Clústeres:** En el SIG, se agrupan las viviendas con puntajes similares para definir "Zonas de Intervención Prioritaria".

Ejemplo de Aplicación en el Informe Técnico

Al presentar estos datos ante una autoridad, la justificación se redacta así:

*"El 65% de las viviendas en el sector noroccidental presentan una vulnerabilidad crítica debido a la **confluencia de vía única de evacuación y techos de material combustible**. Se recomienda que las acciones de mitigación prioricen el raleo lateral de la ruta principal y la instalación de un tanque de reserva comunitario de 10.000 litros en el punto crítico identificado mediante GPS."*

Este nivel de detalle es el que transforma un mapa general de "peligro" en una **herramienta de planificación operativa**.

Para realizar este ejercicio, simularemos el procesamiento de datos de **10 viviendas** en un sector específico de la interfaz. Utilizaremos el método de **Puntaje de Vulnerabilidad Normalizado** para ver cómo la información de terreno transforma el color del mapa.

1. Los Datos de Terreno (Resultados de las 10 Encuestas)

Asignaremos un puntaje de **1 a 5** para tres variables clave recolectadas con la ficha técnica (donde 5 es la situación más peligrosa):

- **V1: Acceso** (1: Múltiples salidas | 5: Vía única/Ciega)
- **V2: Techo** (1: Losa/Chapa | 5: Paja/Madera)
- **V3: Espacio Defendible** (1: Limpio >30m | 5: Vegetación pegada a la casa)

Vivienda	V1: Acceso	V2: Techo	V3: Espacio Def.	Promedio (Vulnerabilidad)
Casa 1 a 4 (Sector A)	2	1	2	**1.6 (Baja)**
Casa 5 a 7 (Sector B)	4	2	4	**3.3 (Media)**
Casa 8 a 10 (Sector C)	5	5	5	**5.0 (Crítica)**

2. Procesamiento en el SIG (El Cambio de Color)

Originalmente, tu mapa de **Peligro** (biofísico) mostraba todo el sector de un color naranja uniforme porque la vegetación es la misma. Al cruzarlo con los datos de las encuestas, el **Mapa de Riesgo** resultante se fragmenta:

- **Sector A (Verde/Amarillo):** Casas con buenos materiales y acceso. Aunque el bosque arda cerca, el riesgo es moderado porque las casas pueden "defenderse" solas y la gente puede salir.
- **Sector B (Naranja):** Casas con accesos complicados. El riesgo sube porque la evacuación sería lenta.
- **Sector C (Rojo Intenso):** Aquí es donde el mapa se "enciende". Coincide el peligro del bosque con viviendas altamente inflamables y sin salida. **Este es tu punto de intervención prioritaria.**

4. Visualización de la Matriz de Decisión

Si aplicamos la fórmula de riesgo que vimos: $Riesgo = \sqrt{Peligro \times Vulnerabilidad}$
(asumiendo un Peligro constante de 4 por la carga de combustible), los resultados serían:

- **Sector A:** $\sqrt{4 \times 1.6} = \mathbf{2.5}$ (Riesgo Medio-Bajo)
- **Sector B:** $\sqrt{4 \times 3.3} = \mathbf{3.6}$ (Riesgo Alto)
- **Sector C:** $\sqrt{4 \times 5.0} = \mathbf{4.4}$ (Riesgo Crítico)

5. Conclusión Operativa para el Informe

Con este ejercicio, tu recomendación técnica cambia de "hay que limpiar el bosque" a acciones específicas:

"Se identifica un **clúster de riesgo crítico** en el Sector C (Viviendas 8-10). A pesar de que el peligro ambiental es uniforme en toda la zona, la vulnerabilidad estructural y la falta de vías de escape en este sector específico elevan el riesgo a niveles inaceptables. Se recomienda priorizar el recambio de techos y la apertura de una brecha de seguridad de 50 metros exclusivamente en este perímetro."

Anexo 2

Justificación Técnica para la Implementación del Mapa de Riesgo Institucional de Incendios Forestales e Interfaz (MRI-2026)

1. Marco Conceptual y Metodológico

El presente mapa se fundamenta en el marco de la **Gestión Integral del Fuego (GIF)**, superando el enfoque tradicional de respuesta a la emergencia. Se adopta la metodología de **Análisis Multicriterio (AHP)** integrada con **Machine Learning**, permitiendo una ponderación dinámica de variables biofísicas y sociales según lo estipulado por los estándares de la **UNDRR (2026)** y la **FAO**.

2. Dimensiones del Riesgo

El Índice de Riesgo Final se obtiene mediante la integración sistémica de dos pilares fundamentales:

- **Peligro de Incendio (Hazard):** Determinado por la carga de combustible fino muerto, la continuidad vertical y horizontal del estrato arbustivo, y variables topográficas (pendientes > 20°). Se han incorporado índices dinámicos de humedad del combustible (FMC) obtenidos mediante el procesamiento de imágenes **Sentinel-2**.
- **Vulnerabilidad y Exposición Social:** Se define por la susceptibilidad intrínseca de la población (grupos etarios de riesgo), la capacidad de afrontamiento (acceso a conectividad y transporte) y la vulnerabilidad estructural en la **Interfaz Urbano-Forestal (IUF)**.

3. Resultados y Criterios de Intervención

Mediante la aplicación de una **Matriz de Riesgo de Doble Entrada**, se han identificado áreas de **Riesgo Crítico** que requieren la activación inmediata de las siguientes líneas de acción:

1. **En Zonas de Peligro Extremo / Vulnerabilidad Baja:** Priorizar la **Gestión de Combustibles** mediante raleos selectivos y fajas cortafuegos para reducir la carga energética del frente de llama potencial.
2. **En Zonas de Peligro Moderado / Vulnerabilidad Crítica:** Priorizar programas de **Educación Comunitaria y Alerta Temprana**. La baja resiliencia social en estas áreas implica que eventos de baja intensidad pueden generar consecuencias catastróficas.
3. **En Áreas de Interfaz (IUF):** Implementar normativas de **Defensibilidad de la Vivienda**, exigiendo perímetros de seguridad y materiales de baja combustibilidad.

4. Conclusión Técnica

La creación de este mapa no representa una fotografía estática, sino una herramienta de gestión dinámica. La priorización de recursos públicos se basará en el **Índice de Riesgo Final**, optimizando la respuesta operativa y, fundamentalmente, fortaleciendo la resiliencia de los ecosistemas y las comunidades locales frente al cambio climático.

Para profundizar en la selección de variables, es crucial entender que un mapa de calidad no depende de la *cantidad* de capas, sino de la **significancia estadística** y la **independencia** entre ellas. En la literatura actual, la selección se divide en tres dimensiones biofísicas (Peligro) y tres sociales (Vulnerabilidad).

Aquí detallo los criterios técnicos para seleccionar y ponderar cada una:

1. Variables para el Mapa de Peligro (Biofísicas)

El peligro evalúa dónde y cómo arderá el territorio. Las variables se seleccionan según su influencia en la ignición y propagación:

A. Modelos de Combustible (Variable Crítica)

No basta con mapas de "uso de suelo". Se deben reclasificar en **Modelos de Combustible** (ej. Clasificación de Anderson o Prometheus).

- **Criterio de selección:** Carga de biomasa (tn/ha), inflamabilidad y continuidad vertical (escalera).
- **Ponderación:** Suele ser la variable de mayor peso (35-45%) en modelos AHP.

B. Variables Topográficas

- **Pendiente:** Factor acelerador del fuego (por cada 10° de aumento, la velocidad se duplica).
- **Orientación (Aspect):** Las laderas que reciben más radiación solar (norte en el hemisferio sur) tienen combustibles más secos.
- **Ponderación:** 20-25%.

C. Variables Meteorológicas y de Estrés Hídrico

- **NDVI/NDMI:** Índices de verdor y humedad foliar. Son esenciales para el peligro dinámico.
- **Isocronas de Viento:** Direcciones predominantes en épocas críticas.

2. Variables para el Mapa de Vulnerabilidad y Exposición (Antropogénicas)

Aquí se seleccionan variables que indican **qué puede perderse** y **qué tan difícil es protegerlo**.

A. Interfaz Urbano-Forestal (IUF)

- **Densidad de Edificaciones:** Se utiliza para calcular el "efecto borde". Las viviendas inmersas en vegetación tienen vulnerabilidad máxima.
- **Ponderación:** 40% dentro del sub-índice de vulnerabilidad.

B. Accesibilidad y Logística (Capacidad de Afrontamiento)

- **Distancia a Red Vial:** Un área con una sola vía de acceso aumenta la vulnerabilidad social por riesgo de atrapamiento.
- **Proximidad a Brigadas o Cuarteles de Bomberos:** Define el tiempo de respuesta inicial (ataque rápido).

C. Factores Socioeconómicos (Resiliencia)

- **Población Dependiente:** Porcentaje de niños y ancianos por radio censal.
- **Índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI):** Áreas con menor resiliencia económica tardan más años en recuperarse de un gran incendio.

3. Metodologías de Selección Técnica

Para decidir qué variables incluir y evitar la redundancia (multicolinealidad), la bibliografía 2024-2026 sugiere:

1. **Análisis de Correlación de Spearman:** Si dos variables (ej. Elevación y Temperatura) están altamente correlacionadas, se elimina una para no sesgar el modelo.
2. **Gain Ratio / Information Gain:** Algoritmos de Machine Learning que "puntúan" qué tanto aporta cada variable a la predicción de incendios históricos.
3. **Criterio de Expertos (Delphi):** Consultar a brigadistas locales para ajustar pesos que el satélite no ve (ej. el impacto de vientos locales zonales).

4. Resumen de Ponderación Sugerida (AHP)

Si tuvieras que armar un modelo hoy, una distribución equilibrada en la literatura es:

Dimensión	Variable	Peso Relativo
Peligro	Modelo de Combustible	40%
	Pendiente	30%
	Orientación / Clima	30%
Vulnerabilidad	Distancia a Interfaz (IUF)	45%
	Accesibilidad Vial	30%
	Fragilidad Social (NBI/Edad)	25%

- Este caso no incluye la vulnerabilidad ecológica