



GEOPETRIS

CARTOGRAFÍA Y ANÁLISIS GEOESPACIAL

INFORME TÉCNICO

Evaluación de susceptibilidad a incendios forestales

Cordón de laderas entre Til Til y Curacaví · Provincia de Chacabuco y Melipilla
Región Metropolitana, Chile

PROFESIONAL RESPONSABLE

Cristopher Tibor Rimler Melo · Geólogo, Universidad Andrés Bello

DOCUMENTO

Informe GP-2026-03 · Rev. A

FECHA

Agosto de 2026

CONTACTO

Geopetris SpA · RUT 78.481.166-2 · contacto@geopetris.cl

Ficha técnica

Título	Evaluación de susceptibilidad a incendios forestales, cordón Til Til – Curacaví
Área de estudio	Cordón de laderas del secano interior entre Til Til y Curacaví, Región Metropolitana. Superficie evaluada: 260,3 km ²
Profesional responsable	Cristopher Tibor Rimler Melo, Geólogo (Universidad Andrés Bello)
Método	Superposición ponderada de factores condicionantes. Ponderación a priori por proceso analítico jerárquico (AHP) y recalibración posterior por razón de frecuencia observada (sección 7)
Factores (modelo final)	Distancia a red vial (0,36), cobertura del suelo (0,31), pendiente (0,24), orientación de laderas (0,09)
Base topográfica	DEM Copernicus GLO-30, tamaño de celda 30 m
Insumos temáticos	ESA WorldCover 2021 v200 (10 m); red vial OpenStreetMap
Sistema de referencia	EPSG:32719 — WGS 84 / UTM huso 19 Sur
Clasificación	Tres clases (Baja, Media, Alta) por cuantiles del índice
Validación	Focos de calor VIIRS/FIRMS, temporada 2023, n = 131. Clase Alta: 53 % de los focos en un tercio del área; razón de frecuencia 1,60. AJUSTE INTERNO, no validación independiente (secciones 7.6 y 8.6)
Escala de uso recomendada	1:50.000. No apto para análisis a escala predial (sección 8.1)
Naturaleza del producto	Evaluación de susceptibilidad del terreno. No constituye estudio de amenaza, plan de protección contra incendios forestales ni estudio de riesgo (art. 2.1.17 OGUC)
Fecha	Agosto de 2026 · Revisión A

1. Resumen ejecutivo

Este informe documenta la elaboración, validación y recalibración de un modelo de susceptibilidad a incendios de vegetación para el cordón de laderas del secano interior comprendido entre Til Til y Curacaví, Región Metropolitana, sobre una superficie de 260,3 km². La evaluación se desarrolló mediante superposición ponderada de factores condicionantes en plataforma SIG, sobre cuatro variables derivadas de información de acceso público: cobertura del suelo (ESA WorldCover), pendiente y orientación de laderas (DEM Copernicus GLO-30) y distancia a la red vial (OpenStreetMap), con clasificación por cuantiles en tres niveles de susceptibilidad relativa.

La ponderación inicial se estableció por proceso analítico jerárquico (AHP), con una matriz de comparación pareada internamente consistente ($\lambda_{\text{máx}} = 4,061$; $CI = 0,020$; $CR = 0,022$). El modelo resultante fue contrastado con 131 focos de calor VIIRS del producto FIRMS correspondientes a la temporada 2023. La validación arrojó razones de frecuencia de 1,09, 0,82 y 1,04 para las clases Alta, Media y Baja respectivamente: valores próximos a la unidad, con la clase Baja capturando más focos que la clase Media. En términos técnicos, el modelo inicial no discriminaba la ocurrencia observada.

Ante ese resultado se ejecutó un análisis de la capacidad discriminante de cada factor por separado, muestreando los cuatro factores reclasificados en la totalidad de los focos y calculando la razón de frecuencia de cada una de sus cinco clases. El análisis mostró que los factores topográficos aportan poco en un territorio de relieve homogéneo y combustible continuo —la orientación de laderas resultó prácticamente plana, con razones de frecuencia entre 0,77 y 1,12— y que el factor de mayor y más limpio poder discriminante es la distancia a la red vial, único factor de origen antrópico del conjunto. Este hallazgo es coherente con el hecho, ampliamente documentado para Chile, de que la práctica totalidad de las igniciones tiene causa humana (Úbeda y Sarricolea, 2016; McWethy et al., 2018; SENAPRED, 2024), de modo que la ocurrencia responde en mayor medida a la probabilidad de ignición que a la susceptibilidad topográfica del terreno.

Sobre esa evidencia se recalibró el modelo, reemplazando el puntaje ordinal de cada clase por su razón de frecuencia observada y reponderando los factores según su capacidad discriminante relativa. El modelo recalibrado alcanza una razón de frecuencia de 1,60 en la clase Alta, monótona y decreciente hacia la clase Baja: la clase Alta, que ocupa un tercio de la superficie, concentra el 53 % de los focos, frente al 17 % de la clase Baja.

Corresponde declarar de manera expresa, y así se hace desde el resumen, que esta segunda validación no es independiente. La recalibración se efectuó ajustando el modelo contra el mismo conjunto de focos empleado para medir su desempeño, por lo que la razón de frecuencia de 1,60 constituye una medida de ajuste interno y no de capacidad predictiva. A diferencia del modelo homólogo elaborado para los cerros de Valparaíso —donde el inventario no participó en la construcción del modelo y la métrica de 2,46 conserva por tanto su carácter de contraste independiente—, el presente producto debe leerse como una hipótesis espacial calibrada, no verificada. Las vías para una validación efectiva se identifican en las secciones 8.6 y 9.

2. Introducción y objetivos

Los incendios de vegetación constituyen uno de los principales procesos de perturbación del paisaje mediterráneo de Chile central. Su frecuencia y magnitud han aumentado de manera sostenida en las últimas décadas, en un proceso asociado al incremento de las olas de calor, a la sequía prolongada y a la mayor continuidad del combustible en el paisaje rural (Úbeda y Sarricolea, 2016; Urrutia-Jalabert et al., 2018; Bowman et al., 2019). Sobre esas condiciones opera un factor determinante y de naturaleza distinta: en Chile la ignición es casi enteramente antrópica, sea por negligencia en el uso del fuego, por descuido o por intencionalidad, con estimaciones oficiales que sitúan la proporción de incendios de causa humana en torno al 99 % (SENAPRED, 2024).

Esta doble condición —un territorio cuyas características físicas favorecen la propagación, y una ignición gobernada por la actividad humana— es la clave interpretativa del presente estudio y determina el alcance de lo que un modelo construido con factores del terreno puede y no puede representar.

El área seleccionada corresponde a un cordón de laderas del secano interior de la Región Metropolitana, entre Til Til y Curacaví: un territorio de relieve de cerros y quebradas, cobertura dominada por matorral esclerófilo continuo y ocupación rural dispersa, representativo de las condiciones en que se desarrollan los incendios de vegetación de la zona central.

El objetivo general fue elaborar un modelo distribuido de susceptibilidad a incendios de vegetación para el área señalada, basado íntegramente en información de acceso público y en flujos reproducibles en QGIS, y someterlo a validación cuantitativa contra un catastro de focos de calor, documentando con rigor el alcance y las limitaciones del resultado. Los objetivos específicos fueron:

- Derivar y ponderar los factores condicionantes a partir de información de cobertura global y acceso libre, garantizando la reproducibilidad del procedimiento.
- Clasificar el territorio en niveles relativos de susceptibilidad y validar el resultado contra el catastro de focos VIIRS mediante la razón de frecuencia.
- Evaluar la capacidad discriminante individual de cada factor condicionante, como base para una ponderación fundamentada en evidencia y no en ajuste por tanteo.
- Documentar el procedimiento, incluidos sus resultados adversos, con el detalle necesario para su auditoría y replicación.

3. Marco conceptual

3.1. Susceptibilidad, peligro y riesgo aplicados a incendios de vegetación

La cadena conceptual habitual en la evaluación de peligros naturales distingue tres niveles. La susceptibilidad corresponde a la propensión intrínseca de un área a que un proceso se genere o se desarrolle, determinada por la correlación de los factores del terreno que lo condicionan (Glade et al., 2005; Highland y Bobrowsky, 2008). El peligro o amenaza incorpora además la probabilidad de ocurrencia de un evento de determinada magnitud en un lugar y ventana temporal, lo que exige representar el mecanismo detonante. El riesgo resulta de combinar la amenaza con la exposición y la vulnerabilidad de las personas, bienes e infraestructura presentes.

Aplicada a incendios de vegetación, la susceptibilidad describe qué sectores del territorio reúnen las condiciones de combustible y topografía que favorecen la ocurrencia y propagación del fuego. El presente estudio se sitúa en ese primer nivel: no evalúa amenaza, no estima probabilidades temporales, no modela el comportamiento del fuego ni su propagación, y no incorpora exposición ni vulnerabilidad.

3.2. Susceptibilidad del terreno y probabilidad de ignición

En el caso de los incendios de vegetación, la distinción entre susceptibilidad y amenaza adquiere una forma particular que resulta central para interpretar los resultados de este informe: la susceptibilidad del terreno y la probabilidad de ignición son dimensiones de naturaleza distinta y con controles espaciales distintos.

La primera responde a variables físicas relativamente estables —tipo y carga de combustible, pendiente, exposición— y es lo que un modelo construido con factores del terreno representa. La segunda responde, en un país donde prácticamente toda ignición es de causa humana, a la geografía de la actividad antrópica: accesos, caminos, interfaz urbano-rural, usos del suelo y patrones de uso del fuego. Ambas dimensiones se superponen en el territorio, pero no coinciden.

De ello se sigue una consecuencia metodológica que este informe documenta empíricamente: un modelo de susceptibilidad estrictamente topográfico puede ser internamente correcto y, aun así, explicar mal la distribución observada de los focos, porque esa distribución está modulada por la ignición. La literatura para Chile central es consistente con este marco, al describir la actividad de incendios como resultado de la superposición de combustible disponible, condiciones meteorológicas de propagación e ignición humana, siendo esta última el factor gatillante casi exclusivo (Úbeda y Sarricolea, 2016; McWethy et al., 2018).

3.3. Justificación del enfoque adoptado

Se adoptó un enfoque heurístico con ponderación AHP, por las mismas razones expuestas en los informes homólogos de esta serie: los métodos determinísticos de comportamiento del fuego requieren parámetros de combustible, humedad y viento no disponibles de forma distribuida para el área; y el enfoque heurístico mantiene la trazabilidad del razonamiento, dado que cada peso responde a un juicio explícito y auditable.

La contrapartida —el carácter subjetivo de los juicios— se aborda formalizando las comparaciones mediante AHP con verificación de consistencia (sección 5.4) y sometiendo el resultado a validación contra el catastro de focos (sección 7). En el presente caso, y a diferencia de los estudios anteriores de la serie, esa validación obligó a revisar la ponderación inicial, procedimiento que se documenta íntegramente y cuyas consecuencias sobre la independencia de la métrica se declaran de manera expresa.

4. Área de estudio

4.1. Contexto geomorfológico

El polígono evaluado abarca 260,3 km² en el cordón de cerros del secano interior de la Región Metropolitana, entre las comunas de Til Til y Curacaví, en el sector oriental de la Cordillera de la Costa. El relieve corresponde a un conjunto de cordones y laderas de gradiente moderado a fuerte, disectado por quebradas de régimen estacional que drenan hacia los valles circundantes.

La distribución de pendientes en el área es característica de un relieve de cerros maduros: cerca de un 17 % de la superficie presenta pendientes inferiores a 10°, correspondientes a fondos de valle y rellanos; un 22 % se sitúa entre 10° y 20°; un 32 % entre 20° y 30°; un 27 % entre 30° y 40°; y solo un 2 % supera los 40°. La escasa representación de pendientes extremas es relevante para el modelo, pues limita el contraste que este factor puede aportar y determina que su clase superior tenga una base areal demasiado reducida para sustentar inferencias estables.

La orientación de laderas se distribuye de manera relativamente equilibrada entre todos los cuadrantes, sin predominancia marcada de exposiciones, condición que anticipa un bajo poder discriminante de este factor en el área.

4.2. Cobertura vegetal y combustible

La cobertura del suelo está dominada por matorral esclerófilo, que representa el 61,3 % de la superficie evaluada. Le siguen el pastizal, con un 18,1 %, y la cobertura arbórea, con un 16,6 %. Las superficies construidas, desnudas o de agua alcanzan en conjunto un 3,7 %, y el cultivo apenas un 0,4 % del polígono.

Esta composición configura un escenario de combustible continuo y homogéneo, con predominio de matorral de alta inflamabilidad estacional. La homogeneidad es una característica determinante del área: reduce el contraste espacial que el factor cobertura puede aportar a un modelo de susceptibilidad, dado que una única clase ocupa casi dos tercios del territorio. La escasa presencia de cultivo, por su parte, es una condición favorable para el uso de focos de calor como catastro de contraste, pues limita la incidencia de quemas agrícolas dentro del polígono (sección 5.6).

4.3. Ocupación del territorio y antecedentes de ocurrencia

El territorio es de ocupación rural dispersa, atravesado por rutas y caminos secundarios que conectan los valles de Til Til y Curacaví y por los que se desarrolla el tránsito y la actividad productiva del sector. La red vial presenta una distribución que reparte el área de manera relativamente equilibrada entre las clases de distancia definidas en la sección 5.5, lo que resulta metodológicamente conveniente para evaluar el poder discriminante de este factor.

La Región Metropolitana y la zona central de Chile concentran una proporción significativa de los incendios de vegetación del país durante la temporada estival, con declaración recurrente de alertas por parte de los organismos competentes. El catastro empleado en este estudio registra 131 focos de calor válidos dentro del polígono para la temporada 2023, una base empírica suficiente para el contraste cuantitativo, si bien acotada a un único año, condición cuyas implicancias se discuten en la sección 8.2.

5. Datos y metodología

5.1. Fuentes de información y procesamiento

La totalidad de los insumos proviene de fuentes de acceso público, condición que garantiza la reproducibilidad íntegra del procedimiento. La Tabla 1 individualiza su origen, resolución y condiciones de uso.

Insumo	Descripción	Fuente	Licencia
Modelo de elevación	DEM Copernicus GLO-30, celda 30 m, reproyectado a UTM 19S	ESA / Copernicus	Uso libre
Cobertura del suelo	ESA WorldCover 2021 v200, 10 m, remuestreada a la malla de trabajo	ESA WorldCover	CC BY 4.0
Red vial	Ejes viales del área, base para el cálculo de distancia euclidiana	OpenStreetMap	ODbL
Catastro de focos	Focos de calor VIIRS, temporada 2023; 131 registros válidos tras filtrado (sección 5.6)	NASA FIRMS	Uso libre con atribución

Tabla 1. Insumos utilizados. Sistema de referencia: EPSG:32719 (WGS 84 / UTM 19S). Malla de trabajo: 558 × 543 celdas de 30 m.

El procesamiento se realizó íntegramente en QGIS con módulos GRASS y GDAL. La secuencia fue: reproyección del DEM al sistema métrico de trabajo; derivación de pendiente y orientación de laderas (r.slope.aspect); remuestreo de la cobertura del suelo a la malla común; cálculo de distancia euclidiana a la red vial mediante proximidad GDAL; reclasificación de cada factor a escala común 1–5 con calculadora ráster; superposición ponderada; y clasificación final por cuantiles. Todas las capas se procesaron en el mismo sistema de referencia y sobre la misma malla de celdas, evitando remuestreos intermedios que degradarían la información. La verificación de integridad confirmó dimensiones idénticas (558 × 543) y ausencia de celdas sin dato en las cuatro capas reclasificadas.

5.2. Selección y justificación de los factores

Cobertura del suelo. Determina el tipo, la carga y la continuidad del combustible disponible, condición necesaria para la ocurrencia y propagación del fuego. Se asignó a priori mayor susceptibilidad a las coberturas de vegetación arbustiva y herbácea, de alta inflamabilidad estacional, y menor a las superficies construidas, desnudas o de agua.

Pendiente del terreno. Controla la velocidad de propagación del fuego: el avance pendiente arriba se acelera por precalentamiento del combustible situado por delante del frente de llama, efecto reconocido en la modelación del comportamiento del fuego.

Orientación de laderas. Modula la exposición solar y, por esa vía, la humedad del combustible fino. En el hemisferio sur las laderas de exposición norte reciben mayor insolación y tienden a presentar combustible más seco, por lo que se les asignó a priori la mayor susceptibilidad.

Distancia a la red vial. Se incorporó como variable indicadora de la actividad humana en el territorio y, por tanto, de la probabilidad de ignición antrópica, conforme al marco conceptual de la sección 3.2. A priori se asignó mayor susceptibilidad a la proximidad a las vías, bajo el supuesto convencional de que la ignición se concentra donde se concentra el tránsito. La sección 7 documenta que esta asignación resultó contradicha por la evidencia disponible para este polígono.

No se incorporaron la humedad del combustible, la velocidad y dirección del viento, la densidad de población ni el historial de igniciones. Sus implicancias se desarrollan en la sección 8.4.

5.3. Ponderación inicial: matriz AHP y verificación de consistencia

Los pesos iniciales se obtuvieron mediante proceso analítico jerárquico (Saaty, 1980), formalizando las comparaciones pareadas sobre la escala fundamental. Los juicios adoptados expresan la jerarquía convencional en modelación de susceptibilidad a incendios: el combustible domina moderadamente sobre la pendiente y sobre los dos factores restantes, la pendiente domina moderadamente sobre la orientación y la distancia a vías, y estos dos últimos se consideran de importancia equivalente.

Factor	Cob.	Pend.	Orient.	Dist.	Peso
Cobertura del suelo	1	2	2	2	0,39
Pendiente	1/2	1	2	2	0,28
Orientación de laderas	1/2	1/2	1	1	0,17
Distancia a red vial	1/2	1/2	1	1	0,17

Tabla 2. Matriz de comparación pareada de los factores condicionantes y vector de prioridades resultante.

El vector de prioridades obtenido es: cobertura 0,392; pendiente 0,279; orientación 0,165; distancia a red vial 0,165. El autovalor principal es $\lambda_{\text{máx}} = 4,061$, de donde $CI = 0,020$ y, con el índice aleatorio $RI = 0,90$ correspondiente a $n = 4$, el ratio de consistencia resulta $CR = 0,022$, muy por debajo del umbral de 0,10 admitido convencionalmente.

Corresponde precisar el alcance de esta verificación, y el presente estudio constituye una ilustración empírica de por qué la precisión importa. El ratio de consistencia acredita que las comparaciones pareadas no se contradicen entre sí; no acredita que los pesos reproduzcan el comportamiento real del sistema. Como se documenta en la sección 7, esta matriz —formalmente consistente— dio origen a un modelo incapaz de discriminar la ocurrencia observada. La consistencia interna y la validez sustantiva son propiedades independientes, y solo la segunda se verifica contra evidencia.

5.4. Reclasificación de los factores

Cada factor se reclasificó a una escala ordinal común de 1 (menor contribución a la susceptibilidad) a 5 (mayor contribución), condición necesaria para que la suma ponderada sea dimensionalmente coherente. Los umbrales adoptados y la distribución de superficie resultante se detallan en la Tabla 3.

Clase	Cobertura del suelo	Pendiente (°)	Orientación	Distancia a vías (m)
1	Construido, desnudo, agua (3,7 %)	0 – 10 (17,0 %)	Plano y Sur (11,9 %)	> 2000 (17,5 %)

2	Cultivo (0,4 %)	10 – 20 (21,7 %)	SE y SO (24,8 %)	1000 – 2000 (29,1 %)
3	Pastizal (18,1 %)	20 – 30 (31,7 %)	E y O (27,2 %)	500 – 1000 (19,7 %)
4	Cobertura arbórea (16,6 %)	30 – 40 (27,4 %)	NE y NO (26,0 %)	200 – 500 (16,3 %)
5	Matorral (61,3 %)	40 – 90 (2,1 %)	Norte (10,2 %)	0 – 200 (17,5 %)

Tabla 3. Umbrales de reclasificación a priori y proporción de superficie de cada clase dentro del polígono evaluado. La clase 5 corresponde, por diseño inicial, a la mayor susceptibilidad asignada.

Los umbrales de pendiente siguen intervalos de uso convencional en zonificación de laderas, coherentes con los adoptados en los informes previos de esta serie. Los de orientación corresponden a sectores de 45° en torno a los puntos cardinales, con el plano asimilado a la clase de menor susceptibilidad. Los de distancia a vías se definieron como múltiplos de la resolución de trabajo, evitando clases de ancho inferior al tamaño de celda, y producen una partición del área relativamente equilibrada, condición que favorece la estabilidad de las razones de frecuencia calculadas por clase.

Debe advertirse desde ya una asimetría relevante en la Tabla 3: las clases 2 de cobertura (0,4 %) y 5 de pendiente (2,1 %) ocupan superficies muy reducidas. Las razones de frecuencia calculadas sobre bases areales tan pequeñas son estadísticamente inestables, pues un número mínimo de focos altera el resultado de manera desproporcionada, y así se consideran en el análisis de la sección 7.

5.5. Integración y clasificación

El índice de susceptibilidad se calculó como suma ponderada de los factores reclasificados. El resultado se clasificó en tres clases —Baja, Media y Alta— mediante cuantiles, de modo que cada clase representa aproximadamente un tercio del área de estudio ordenada por susceptibilidad creciente. Esta decisión favorece la legibilidad para usuarios no especialistas, produce una partición estable y evita la arbitrariedad de umbrales fijos no calibrados localmente. Su contrapartida, discutida en la sección 8.5, es que las clases resultan relativas al área evaluada.

5.6. Catastro de contraste: construcción y filtros aplicados

El conjunto de validación se construyó a partir del producto de focos activos VIIRS del sistema FIRMS de la NASA, para la temporada 2023 sobre el área de estudio. Sobre los registros brutos se aplicaron tres filtros sucesivos, cuyo fundamento se declara expresamente por afectar de manera directa la interpretación de los resultados:

- Tipo de foco: se retuvieron exclusivamente las detecciones clasificadas como vegetación, descartando focos volcánicos, de origen estático o marino.
- Nivel de confianza: se descartaron las detecciones de confianza baja, conservando las de confianza nominal y alta.
- Criterio topográfico: se descartaron los focos situados en terrenos de pendiente inferior a 5°. Este filtro busca excluir las quemas agrícolas de fondo de valle, que el producto FIRMS no distingue de los incendios de vegetación, y se apoya en la muy escasa presencia de cultivo dentro del polígono (0,4 % de la superficie).

El conjunto resultante comprende 131 focos. El tercer filtro es una decisión metodológica deliberada, no una operación neutra de limpieza: al eliminar sistemáticamente los focos de baja pendiente, elimina también aquellos situados en los fondos de valle, que son precisamente los sectores donde se emplaza la infraestructura vial. Su efecto sobre el comportamiento del factor distancia a vías se analiza en la sección 7.4 y se declara como limitación en la sección 8.3.

6. Resultados

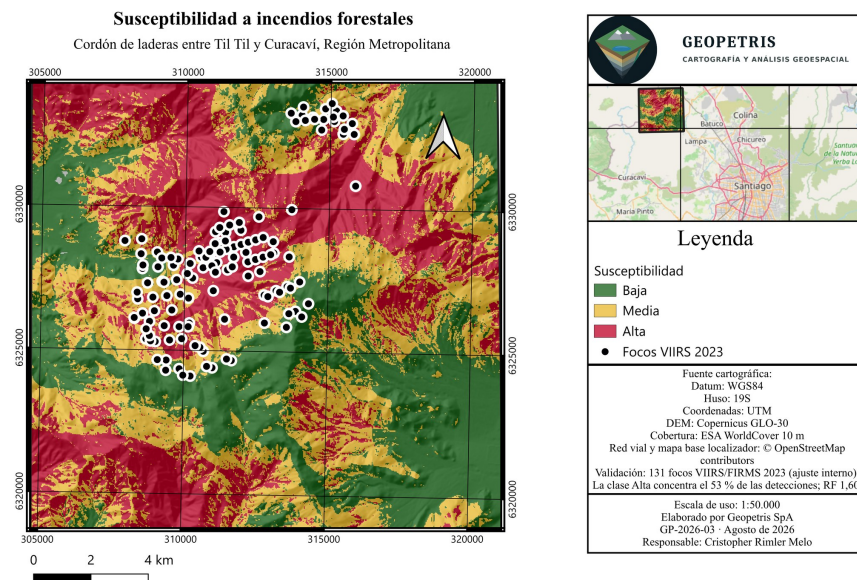


Figura 1. Zonificación de susceptibilidad a incendios forestales, cordón de laderas entre Til Til y Curacaví. Base de relieve: sombreado derivado del DEM Copernicus GLO-30. Puntos negros: focos de calor VIIRS de la temporada 2023 empleados en la validación ($n = 131$). Clasificación en tres clases por cuantiles del índice recalibrado (sección 7.5).

6.1. Distribución espacial de la susceptibilidad

La clase Alta se organiza en franjas continuas sobre las laderas de matorral de los cordones centrales y del sector nororiental del área, con desarrollo preferente en los sectores interiores del polígono, alejados de los ejes viales que recorren los valles. La clase Baja domina los sectores periféricos de menor pendiente, los fondos de valle y las superficies próximas a la infraestructura vial, así como los sectores de cobertura no combustible. La clase Media ocupa posiciones de transición entre ambas.

El patrón obtenido es coherente con la estructura del territorio evaluado: la susceptibilidad se concentra en los sectores de combustible continuo situados en posición interior, y decrece hacia los bordes del polígono y hacia los fondos de valle. La agrupación principal de focos de la temporada 2023, situada en el sector centro-occidental del área, se dispone mayoritariamente sobre las franjas clasificadas como Alta y Media, si bien una fracción apreciable de las detecciones cae sobre sectores de clase Baja, condición que la validación cuantifica en la sección 7 y que acota el desempeño del modelo.

7. Validación y análisis por factor

7.1. Diseño de la validación y métrica empleada

La validación se efectuó mediante la razón de frecuencia (RF), definida como el cociente entre la proporción de focos observados en una clase y la proporción de superficie que esa clase ocupa (Lee y Pradhan, 2007). Un valor de 1,00 corresponde a una distribución aleatoria: la clase captura exactamente los focos que le corresponderían por su tamaño. Valores superiores a 1 indican concentración de focos por sobre lo esperable por azar, y valores inferiores, dispersión. Un modelo útil debe presentar razones de frecuencia crecientes desde la clase Baja hacia la clase Alta, con la clase Alta claramente por encima de la unidad.

La métrica se reporta por clase y no como tasa de éxito agregada, dado que esta última puede elevarse trivialmente ampliando la superficie de la clase de mayor susceptibilidad. Solo la relación entre focos capturados y área ocupada permite juzgar el desempeño real de una zonificación.

7.2. Validación del modelo inicial

El modelo construido con los pesos AHP a priori (sección 5.4) fue contrastado con los 131 focos. Los resultados se presentan en la Tabla 4.

Clase	Proporción del área	Focos	Proporción de focos	Razón de frecuencia
Alta	38,4 %	55	42,0 %	1,09
Media	28,7 %	31	23,7 %	0,82
Baja	32,9 %	45	34,4 %	1,04

Tabla 4. Desempeño del modelo inicial, con pesos AHP a priori, frente al catastro de focos VIIRS 2023 (n = 131).

El resultado es negativo en dos sentidos simultáneos. Primero, las tres razones de frecuencia se sitúan próximas a la unidad, entre 0,82 y 1,09: la zonificación distribuye los focos de manera prácticamente indistinguible del azar. Segundo, y de mayor gravedad diagnóstica, la clase Baja (RF 1,04) captura proporcionalmente más focos que la clase Media (RF 0,82), lo que rompe la monotonía que la definición misma de una zonificación exige. Como referencia comparativa, el modelo homólogo de remociones en masa elaborado para los cerros de Valparaíso bajo un procedimiento equivalente alcanzó una razón de frecuencia de 2,46 en su clase Alta.

Se concluye que el modelo inicial no discrimina la ocurrencia observada y que, en consecuencia, no puede sostenerse como producto de zonificación. Antes de modificar la ponderación, se estimó necesario establecer la causa del fallo mediante el análisis de la contribución individual de cada factor.

7.3. Análisis de la capacidad discriminante por factor

Se muestrearon los cuatro factores reclasificados en la posición de cada uno de los 131 focos y se calculó la razón de frecuencia de cada una de sus cinco clases, contrastando la proporción de focos con la proporción de superficie consignada en la Tabla 3. El procedimiento mide cuánto discrimina cada factor por separado, con independencia de la ponderación con que participe en el índice. Los resultados se presentan en la Tabla 5.

Factor	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Rango
Cobertura del suelo	0,42	0,00	0,89	1,56	0,92	1,15
Pendiente	0,54	0,88	0,99	1,42	0,73	0,88
Orientación de laderas	0,77	0,86	1,12	1,12	0,98	0,35
Distancia a red vial	1,71	1,21	0,93	0,61	0,39	1,31

Tabla 5. Razón de frecuencia por clase y factor, calculada sobre los 131 focos VIIRS 2023. En negrita, la clase de máxima concentración de focos en cada factor. La columna Rango expresa la diferencia entre la razón de frecuencia máxima y mínima del factor, como indicador de su capacidad discriminante.

Los hallazgos son cuatro y explican de manera completa el fallo del modelo inicial:

- Distancia a la red vial es el factor de mayor capacidad discriminante (rango 1,31) y el único que presenta una razón de frecuencia estrictamente monótona a lo largo de sus cinco clases, de 1,71 a 0,39. Sin embargo, el

sentido de la relación es inverso al asignado a priori: los focos se concentran en los sectores alejados de las vías y escasean en su proximidad inmediata. En el modelo inicial este factor operaba, por tanto, en dirección contraria a la evidencia, cancelando señal en lugar de aportarla, y lo hacía además con el peso más bajo de la matriz.

- Cobertura del suelo no presenta un comportamiento monótono: la máxima concentración de focos se produce en la clase de cobertura arbórea (RF 1,56) y no en el matorral (RF 0,92), pese a que este último constituye la cobertura dominante en superficie. El elevado número absoluto de focos sobre matorral —74 de 131— refleja la extensión de esa cobertura, no una propensión desproporcionada. La clase 2 (cultivo) registra RF nula, resultado consistente con el filtro topográfico aplicado y con la escasa superficie implicada.
- Pendiente aporta de manera moderada, con máximo en la clase de 30° a 40° (RF 1,42) y valores decrecientes hacia las pendientes bajas. Su clase superior (40°–90°) presenta RF 0,73 sobre solo el 2,1 % del área y 2 focos, base insuficiente para sustentar interpretación alguna.
- Orientación de laderas es prácticamente plana, con razones de frecuencia comprendidas entre 0,77 y 1,12 y un rango de apenas 0,35. Su capacidad discriminante en este territorio es marginal, y no se verifica la mayor concentración de focos en laderas de exposición norte que el criterio de insolación anticipaba.

7.4. Interpretación

El patrón descrito es coherente con el marco conceptual expuesto en la sección 3.2. En un territorio de relieve homogéneo, sin contrastes topográficos marcados, y con un combustible continuo que ocupa casi dos tercios de la superficie, los factores físicos disponen de poco margen para discriminar: si prácticamente todo el territorio reúne condiciones comparables de combustible y pendiente, la variabilidad de la ocurrencia no puede explicarse por ellos. El control espacial dominante pasa entonces a ser la dimensión antrópica, consistentemente con que la ignición en Chile es de causa humana en la práctica totalidad de los casos (SENAPRED, 2024; McWethy et al., 2018).

El sentido invertido de la relación con la distancia a vías exige, no obstante, una interpretación cautelosa, y no debe leerse como evidencia de que la ignición ocurra preferentemente lejos de los caminos. Concurren al menos dos condicionantes de diseño que explican el resultado sin recurrir a esa conclusión.

El primero es el filtro topográfico descrito en la sección 5.6. Al descartar los focos situados en pendientes inferiores a 5°, se eliminaron sistemáticamente las detecciones de los fondos de valle, que son precisamente los sectores por donde discurre la red vial. El filtro, concebido para excluir quemas agrícolas, remueve de manera concomitante buena parte de los focos próximos a caminos, sesgando la distribución remanente hacia posiciones interiores.

El segundo es la propia selección del área de estudio. El polígono comprende un cordón de laderas de secano interior, no una interfaz urbano-rural: dentro de él, la mayor distancia a la vía se asocia a la posición de cerro, donde el combustible es continuo, y la menor a los bordes de valle, donde la cobertura es más intervenida y discontinua. En este contexto, la distancia a vías opera como variable indicadora de la posición interior del combustible antes que como medida directa de la fuente de ignición.

En consecuencia, la relación se documenta como regularidad empírica observada en este conjunto de datos y para este polígono, y no como relación causal ni generalizable a otros territorios. Esta precisión es necesaria para que el uso del factor en el modelo recalibrado no se interprete como una afirmación sobre el comportamiento de la ignición en Chile central.

7.5. Recalibración del modelo

El análisis por factor evidenció que el problema del modelo inicial no residía únicamente en la magnitud de los pesos, sino en la estructura del puntaje: en dos de los cuatro factores la escala ordinal 1–5 asignada a priori contradecía la evidencia, de manera invertida en la distancia a vías y de manera no monótona en la cobertura. Una reponderación

que mantuviera esos puntajes habría trasladado el error a un modelo formalmente distinto pero igualmente desalineado.

La recalibración se ejecutó, por tanto, en dos niveles. En el primero, el puntaje ordinal de cada clase se reemplazó por su razón de frecuencia observada (Tabla 5), procedimiento estándar en el método de razón de frecuencia, que corrige simultáneamente el sentido de la relación y su falta de monotonía. En el segundo, los pesos entre factores se reasignaron en proporción a su capacidad discriminante, medida por el rango de razones de frecuencia de cada factor, excluyendo del cómputo las clases de base areal inferior al 3 % por su inestabilidad estadística. Los pesos resultantes se contrastan con los iniciales en la Tabla 6.

Factor	Peso AHP a priori	Capacidad discriminante	Peso recalibrado
Distancia a red vial	0,17	1,31	0,36
Cobertura del suelo	0,39	1,15	0,31
Pendiente	0,28	0,88	0,24
Orientación de laderas	0,17	0,35	0,09

Tabla 6. Comparación entre la ponderación AHP a priori y la ponderación recalibrada según capacidad discriminante observada.

El contraste es ilustrativo del sesgo de la formulación inicial: la distancia a la red vial, subponderada a menos de la mitad del peso que su comportamiento justifica, era el factor más informativo del conjunto; la orientación de laderas, sobreponderada al doble, resultó ser el menos informativo. La cobertura del suelo y la pendiente conservan aproximadamente su jerarquía relativa.

7.6. Validación del modelo recalibrado y declaración de independencia

El modelo recalibrado se clasificó nuevamente en tres clases por cuantiles del índice, con cortes en 0,919 y 1,119, y se contrastó con el mismo conjunto de 131 focos. Los resultados se presentan en la Tabla 7.

Clase	Proporción del área	Focos	Proporción de focos	Razón de frecuencia
Alta	33,3 %	70	53,4 %	1,60
Media	33,3 %	39	29,8 %	0,89
Baja	33,3 %	22	16,8 %	0,50

Tabla 7. Desempeño del modelo recalibrado frente al catastro de focos VIIRS 2023 ($n = 131$). Métrica de ajuste interno; véase la declaración siguiente.

La zonificación recalibrada presenta razones de frecuencia monótonas y decrecientes desde la clase Alta hacia la Baja, con la clase Alta concentrando el 53 % de los focos en un tercio de la superficie (RF 1,60) y la clase Baja apenas el 17 % (RF 0,50). El comportamiento es el que una zonificación útil debe exhibir, y contrasta con el del modelo inicial.

Declaración sobre la independencia de esta validación. Los valores de la Tabla 7 no constituyen una validación independiente del modelo. La recalibración descrita en la sección 7.5 se efectuó utilizando la información contenida en el mismo conjunto de 131 focos con el que se calcula el desempeño, tanto para definir los puntajes de clase como para asignar los pesos entre factores. La razón de frecuencia de 1,60 mide, por tanto, el grado de ajuste del modelo a los datos que lo originaron, y no su capacidad de predecir ocurrencia no observada. Una métrica predictiva exigiría particionar el catastro —de manera temporal, calibrando con una temporada y verificando con otra, o espacial, reservando un subconjunto de focos— y evaluar el modelo exclusivamente

contra el subconjunto no empleado en su construcción. Con 131 focos de una sola temporada, esa partición no es viable sin comprometer la significación del resultado. En consecuencia, y a diferencia del informe GP-2026-01, donde el inventario no participó en la construcción del modelo, el presente producto se declara como calibrado y no como validado.

7.7. Análisis de sensibilidad

No se ejecutó el análisis de sensibilidad de la ponderación en el rango de $\pm 0,05$ que constituye práctica habitual en esta serie de informes y que fue aplicado en el informe GP-2026-01. Se declara expresamente su ausencia. En el presente caso, además, su valor informativo sería limitado mientras la ponderación provenga del mismo conjunto de datos con el que se evalúa el resultado: la estabilidad frente a perturbaciones de los pesos no aportaría evidencia sobre la validez del modelo, que es la cuestión pendiente. Su ejecución se recomienda de manera conjunta con la validación particionada, conforme se indica en la sección 9.

8. Discusión y limitaciones

8.1. Resolución del dato y escala de uso válida

El modelo se construyó sobre una malla de 30 m derivada del DEM Copernicus GLO-30. Aplicando el criterio convencional según el cual el tamaño de celda no debiera representar menos de 0,5 mm en el documento impreso, la escala de uso máxima recomendada es del orden de 1:50.000. La lámina de la Figura 1 se presenta a 1:100.000, escala más conservadora que el límite anterior y por tanto compatible con él. El producto no es apropiado para análisis a escala predial ni para decisiones sobre lotes individuales.

En consecuencia, elementos determinantes a escala de sitio —cortafuegos existentes, caminos menores no cartografiados, discontinuidades locales del combustible, faenas y accesos prediales— no están representados en el modelo.

8.2. Naturaleza del catastro de focos de calor

El conjunto de contraste presenta tres limitaciones que condicionan la lectura de todas las métricas reportadas.

Un foco no equivale a un incendio. El producto VIIRS registra detecciones de anomalías térmicas en pasadas sucesivas del sensor. Un mismo evento de incendio, si persiste en el tiempo o se propaga, genera múltiples detecciones en distintas pasadas y en celdas contiguas. El conjunto de 131 registros corresponde, por tanto, a focos y no a eventos, y su número es necesariamente superior al de incendios reales ocurridos. La densidad de focos sobreestima la frecuencia de incendios, y esa sobreestimación no es homogénea: los eventos de mayor duración y extensión aportan más detecciones, ponderando implícitamente el catastro hacia los incendios de mayor magnitud.

El producto no distingue el origen del fuego. FIRMS detecta anomalías térmicas, no incendios de vegetación: las quemas agrícolas controladas, la combustión de residuos y otras fuentes de calor son registradas de manera indistinguible. La discriminación en este estudio se realizó por criterio topográfico y por selección del área, ambos indirectos, y su efecto se discute en la sección 8.3.

El catastro cubre una sola temporada. Los 131 focos corresponden al año 2023. La base no captura la variabilidad interanual de la ocurrencia, que en Chile central es sustancial y responde tanto a la variabilidad climática como a la disponibilidad de combustible acumulado en temporadas previas (Urrutia-Jalabert et al., 2018). Los resultados describen el patrón de una temporada, no un régimen.

8.3. Efecto del filtro topográfico sobre el factor distancia a vías

El filtro que excluye los focos en pendientes inferiores a 5° cumple su propósito de reducir la incidencia de quemas agrícolas, pero introduce un sesgo espacial que afecta directamente al factor de mayor peso en el modelo recalibrado. Al eliminar las detecciones de fondo de valle se eliminan también, de manera correlacionada, las situadas próximas a la red vial, que discurre por esos mismos fondos.

Parte de la relación inversa observada entre ocurrencia y proximidad a vías es, por tanto, atribuible al diseño del filtro y no necesariamente al comportamiento del fenómeno. Esta circunstancia constituye la limitación de mayor peso del presente modelo, pues el factor afectado es el que gobierna la zonificación resultante. Su resolución requiere reconstruir el catastro con un criterio de discriminación independiente de la topografía —por ejemplo, mediante contraste con cartografía de uso agrícola o con registros de quemas autorizadas— y repetir el análisis por factor sobre esa base.

8.4. Factores no incorporados

El modelo se construye con cuatro variables condicionantes de carácter estático. No incorpora:

- Humedad del combustible y meteorología de fuego. La temperatura, la humedad relativa, el déficit de presión de vapor y, especialmente, la velocidad y dirección del viento son determinantes de primer orden en la propagación, y ninguno está representado.
- Variables antrópicas explícitas. Densidad de población, interfaz urbano-rural, distribución de predios y actividades con uso del fuego. La distancia a la red vial constituye una aproximación gruesa y, como se ha discutido, ambigua de esta dimensión.
- Historial de ignición. No se incorpora un registro de puntos de inicio de incendios previos, información que en modelación de ocurrencia constituye uno de los predictores más informativos.
- Estructura vertical y carga del combustible. La clasificación de cobertura distingue tipos generales, no carga, continuidad vertical ni estado fenológico.

8.5. Naturaleza relativa de las clases

La clasificación por cuantiles produce clases relativas al área evaluada: por construcción, un tercio del territorio queda en la clase Alta con independencia de los valores absolutos del índice. La clase Alta de este mapa no es comparable en términos absolutos con la clase Alta de otro polígono modelado por separado, incluidos los productos de esta misma serie. La comparación entre áreas exige unificar el dominio de cálculo o adoptar umbrales absolutos calibrados.

8.6. Carácter estático del modelo y alcance de la validación

El modelo representa condiciones condicionantes estables y no la dinámica del fenómeno. No captura la variación estacional de la carga y humedad del combustible, ni el efecto de incendios previos sobre la disponibilidad de material combustible, que reduce transitoriamente la susceptibilidad de las superficies recientemente afectadas.

En cuanto a la validación, y reiterando lo declarado en la sección 7.6, la métrica reportada corresponde a un ajuste interno sobre el mismo dominio y el mismo conjunto de datos empleados en la calibración. No constituye validación predictiva. Cualquier uso de este producto debe considerar que su desempeño frente a ocurrencia futura o no observada es, a la fecha, desconocido.

9. Aplicaciones y desarrollo futuro

En su estado actual el producto es apropiado como capa de diagnóstico preliminar para la priorización relativa de sectores dentro del polígono evaluado, y como material de referencia metodológica: documenta un flujo de trabajo reproducible y, en particular, un procedimiento de diagnóstico —el análisis de capacidad discriminante por factor— que permite establecer las causas del fallo de un modelo de superposición ponderada en lugar de corregirlo por tanteo.

No es apropiado, en cambio, para fundar decisiones de gestión del fuego por sí solo, ni para sustituir los instrumentos de planificación y respuesta de los organismos competentes, dada la condición de calibrado y no validado declarada en la sección 7.6.

Las líneas de desarrollo identificadas, en orden de prioridad, son las siguientes.

- Extender el catastro a múltiples temporadas y ejecutar una validación con partición temporal: calibrar el modelo con un subconjunto de años y verificarlo exclusivamente contra los años no empleados. Es la mejora estructural prioritaria, pues convertiría la métrica actual de ajuste en una métrica predictiva.
- Reconstruir la discriminación entre incendio de vegetación y quema agrícola mediante un criterio independiente de la topografía, eliminando el sesgo descrito en la sección 8.3 y permitiendo una lectura limpia del factor distancia a la red vial.
- Incorporar un factor explícito de probabilidad de ignición, construido sobre densidad de población, interfaz urbano-rural e historial de puntos de inicio, en lugar de aproximarlos mediante la distancia a vías.
- Incorporar variables dinámicas de humedad del combustible y meteorología de fuego, con lo que el producto transitaría desde una zonificación de susceptibilidad hacia una evaluación de peligro en sentido estricto.
- Ejecutar el análisis de sensibilidad de la ponderación en el rango de $\pm 0,05$, de manera conjunta con la validación particionada, conforme a lo señalado en la sección 7.7.
- Evaluar el uso de un modelo de elevación de mayor resolución y de una clasificación de combustible específica, si el objetivo exige elevar la escala de uso válida del producto.

10. Alcance del estudio y limitación de responsabilidad

Este informe corresponde a una evaluación técnica preliminar de susceptibilidad a incendios de vegetación, elaborada mediante análisis geoespacial de escritorio, sobre la base de la información pública individualizada en la Tabla 1, sin levantamiento de terreno. Identifica propensión relativa del terreno a la ocurrencia y propagación de incendios de vegetación, a la escala de uso declarada en la sección 8.1.

El modelo fue calibrado contra el catastro de focos de calor descrito en la sección 5.6 y no cuenta con validación predictiva independiente, condición declarada expresamente en las secciones 1, 7.6 y 8.6.

No constituye un estudio de riesgo en los términos del artículo 2.1.17 de la Ordenanza General de Urbanismo y Construcciones, ni un estudio de amenaza, ni un plan de protección contra incendios forestales, ni un plan de prevención o de manejo del combustible, ni una declaración sobre la seguridad de predios, edificaciones o instalaciones específicas. No sustituye ni reemplaza los instrumentos, competencias y procedimientos que corresponden a la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y al Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres (SENAPRED) en materia de prevención, combate y gestión de incendios forestales, materias que requieren estudios de detalle suscritos por los profesionales competentes que la normativa establece.

Las decisiones que se adopten a partir de este documento deben considerar estas limitaciones de alcance.

11. Referencias

- Bowman, D.M.J.S.; Moreira-Muñoz, A.; Kolden, C.A.; Chávez, R.O.; Muñoz, A.A.; Salinas, F.; González-Reyes, Á.; Rocco, R.; de la Barrera, F.; Williamson, G.J.; Borchers, N.; Cifuentes, L.A.; Abatzoglou, J.T.; Johnston, F.H. 2019. Human-environmental drivers and impacts of the globally extreme 2017 Chilean fires. *Ambio* 48 (4): 350-362.
- European Space Agency. Copernicus Global Digital Elevation Model GLO-30.
- European Space Agency. ESA WorldCover 10 m 2021 v200. © ESA WorldCover project / Contains modified Copernicus Sentinel data (2021) processed by ESA WorldCover consortium.
- Glade, T.; Anderson, M.; Crozier, M.J. 2005. *Landslide hazard and risk*. John Wiley & Sons Ltd.: 793 p. Chichester.
- Highland, L.M.; Bobrowsky, P. 2008. *The landslide handbook — A guide to understanding landslides*. Geological Survey Circular 1325: 129 p. Reston.
- Lee, S.; Pradhan, B. 2007. Landslide hazard mapping at Selangor, Malaysia using frequency ratio and logistic regression models. *Landslides* 4 (1): 33-41.
- McWethy, D.B.; Pauchard, A.; García, R.A.; Holz, A.; González, M.E.; Veblen, T.T.; Stahl, J.; Currey, B. 2018. Landscape drivers of recent fire activity (2001-2017) in south-central Chile. *PLoS ONE* 13 (8): e0201195.
- NASA FIRMS. Fire Information for Resource Management System, producto de focos activos VIIRS (VNP14IMG). National Aeronautics and Space Administration.
- OpenStreetMap contributors. Datos de red vial. © OpenStreetMap contributors, disponibles bajo Open Database License (ODbL).
- Saaty, T.L. 1980. *The Analytic Hierarchy Process*. McGraw-Hill: 287 p. New York.
- SENAPRED. 2024. Incendios forestales. Servicio Nacional de Prevención y Respuesta ante Desastres, Chile.
- Úbeda, X.; Sarricolea, P. 2016. Wildfires in Chile: A review. *Global and Planetary Change* 146: 152-161.
- Urrutia-Jalabert, R.; González, M.E.; González-Reyes, Á.; Lara, A.; Garreaud, R. 2018. Climate variability and forest fires in central and south-central Chile. *Ecosphere* 9 (4): e02171.