

Prevenir antes que lamentar:

Riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana







Prevenir antes que lamentar:

Riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana

**Equipo de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque
Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBByC) del Ideam**



Presidencia de la República de Colombia

Gustavo Francisco Petro Urrego
Presidente de Colombia

Francia Elena Márquez Mina
Vicepresidenta de Colombia

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Irene Vélez Torres
Ministra (e) de Ambiente
y Desarrollo Sostenible

Edith Bastidas Calderón
Viceministra de Políticas
y Normalización Ambiental

Luz Dary Carmona Moreno
Viceministra (e) de Ordenamiento
Ambiental del Territorio

Consejo Directivo

Luz Dary Carmona Moreno

Viceministra (e) de Ordenamiento Ambiental del Territorio

Paola Ricaurte Ayala

Asesora de la Dirección de Ambiente y Desarrollo Sostenible - Departamento Nacional de Planeación (DNP)

Elkin Ernesto Ramírez Niño

Director técnico de la Dirección Técnica Geoestadística - Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)

Giovannys Medrano Martínez

Director general - Corporación para el Desarrollo Sostenible de La Mojana y el San Jorge (Corpomojana)

Liliana María Ospina Arias

Viceministra de Infraestructura (representación de la ministra de Transporte)

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - Ideam

Ghisliane Echeverry Prieto

Directora general

Juan Fernando Acosta Mirkow

Secretario general

Fabio Andrés Bernal Quiroga

Subdirector de Hidrología

Elizabeth Patiño Correa

Subdirectora de Estudios Ambientales

Julio César León Luquez

Subdirector (e) de Ecosistemas e Información Ambiental

Diana Carolina Rueda Dimate

Subdirectora de Meteorología

Jennifer Dorado Delgado

Jefa de Oficina del Servicio de Pronóstico y Alertas

Olga Marcela Vargas Valenzuela

Jefa de Oficina Asesora de Planeación

Wílmer Espitia Muñoz

Jefe de Oficina de Informática

Gilberto Antonio Ramos Suárez

Jefe de Oficina Asesora Jurídica

Adriana María Ocampo Loaiza

Jefa de Oficina de Control Interno

Miguel Ángel Ayala Tovar

Coordinador del Grupo de Comunicaciones y Prensa

Edersson Cabrera Montenegro

Coordinador del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMByC) - Subdirección de Ecosistemas e Información Ambiental

Autores

José Julián González Arenas

Líder técnico del componente de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque, SMByC – Ideam

Beatriz Amalia Garavito Guerrero

Profesional de modelación del componente de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque, SMByC - Ideam

**Alexánder Cubillos González**

Profesional del componente de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque, SMBYC - Ideam

Claudia Alejandra Duque Quevedo

Analista espacial del componente de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque, SMBYC - Ideam

Iván Roberto Pérez Vizcaíno

Profesional de modelación del componente de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque, SMBYC – Ideam

Nidia Andrea Vanegas Pérez

Profesional de Monitoreo Comunitario Participativo de componente de Causas y Agentes de la Transformación del Bosque, SMBYC - Ideam

Equipo Editorial**Coordinación editorial****Andrés Felipe Tapiero Ríos**

Grupo de Comunicaciones y Prensa - Ideam

Corrección de estilo**Cristina Sánchez**

Grafoscopio

Apoyo revisión de pruebas**Andrés Fabián Gullaván Vera**

Grupo de Comunicaciones y Prensa - Ideam

Diagramación y diseño editorial**Camila Barbosa**

Grafoscopio

Apoyo diagramación**Laura Daniela Parra Gutiérrez**

Grupo de Comunicaciones y Prensa - Ideam

Cítese como: González Arenas, J. J., Garavito Guerrero, B. A., Cubillos González, A., Duque Quevedo, C. A., Pérez Vizcaíno, I. R. y Vanegas Pérez, N. A. (2026). *Prevenir antes que lamentar: riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).

Junio de 2026, Bogotá, D. C., Colombia.

ISBN (digital): 978-958-5489-59-2

Depósito legal que establece la Ley.



© Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Calle 25D 96B-70, Bogotá, D. C.

PBX: +57 (601) 352 7160

contacto@Ideam.gov.co

Contenido

Sección didáctica

09



- | | | | |
|----|---|----|--|
| 1. | Introducción general | 10 | |
| 2. | Mensajes clave | 11 | |
| 3. | ¿Cómo se puede usar esta información? | 13 | |
| 4. | Historias desde el bosque amazónico:
dinámicas que impulsan el riesgo de deforestación | 18 | |
| 5. | ¿Qué es el riesgo de deforestación y para qué sirve? | 30 | |
| 6. | Cómo se construyen los mapas de riesgo | 32 | |
| 7. | Principales resultados | 41 | |
| 8. | Retos y cómo avanzar | 50 | |

Sección técnica

54



- | | | | |
|----|-------------------------------|-----|--|
| 1. | Resumen | 55 | |
| 2. | Antecedentes | 57 | |
| 3. | Marco conceptual | 69 | |
| 4. | Metodología | 73 | |
| 5. | Resultados y discusión | 79 | |
| 6. | Conclusiones y próximos pasos | 106 | |
| 7. | Referencias | 109 | |



Sección didáctica

1 • Introducción general



"Todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles", George E. P. Box.

La Amazonia colombiana cubre cerca del 42 % del territorio continental del país y es hogar de una riqueza natural y cultural inigualable. Sin embargo, también concentra alrededor del 50 % de la deforestación nacional, con impactos profundos sobre los ecosistemas, el clima, la conectividad del territorio y las comunidades que lo habitan.

Frente a esta amenaza, no basta con reaccionar cuando el bosque ya ha sido talado. Es necesario anticiparse, identificar dónde y por qué podría ocurrir la pérdida forestal, y actuar con información oportuna para evitarla. Este documento presenta los avances en la construcción de mapas de riesgo de deforestación, una herramienta basada en datos reales y modelación espacial que permite estimar las zonas más propensas a perder bosque en el futuro cercano.

Como dijo el estadístico George E. P. Box, “todos los modelos están equivocados, pero algunos son útiles”. Esta frase nos recuerda que cualquier modelo simplifica la realidad, pero también que esa simplificación puede ser muy valiosa si ayuda a tomar mejores decisiones. Los mapas de riesgo de deforestación no predicen el futuro con certeza, pero sí permiten anticipar escenarios probables y actuar a tiempo para evitar la pérdida del bosque.

A diferencia de los informes y reportes que documentan lo que ya pasó, aquí nos enfocamos en las condiciones actuales que podrían facilitar la deforestación en el futuro si no se actúa a tiempo. Dicho enfoque combina múltiples fuentes de información —como la cercanía a vías, las áreas transformadas, la ocurrencia de fuegos, la distribución de cultivos ilícitos o la presión sobre áreas protegidas— para identificar patrones de transformación del paisaje históricos que nos ayuden a anticipar la pérdida de los bosques naturales.

Esta publicación está dirigida a públicos diversos, que incluyen tanto a instituciones responsables de la toma de decisiones como a personas interesadas en la conservación. La invitación central es a utilizar el conocimiento como herramienta para prevenir, en lugar de limitarse a reaccionar ante las consecuencias. Su estructura permite una lectura continua de principio a fin, pero también facilita recorridos temáticos según los intereses particulares de cada lector.

Quienes se desempeñan en roles de decisión pueden encontrar especial utilidad en los resultados presentados en la sección 7 y en las orientaciones sobre el uso de esta información contenidas en la sección 9. Por otro lado, quienes se aproximan por primera vez al tema pueden iniciar con las explicaciones accesibles sobre el riesgo (sección 4), la construcción de los mapas (sección 5) y las historias del bosque (sección 6), que ofrecen una entrada amigable al contenido.

Para perfiles técnicos o investigadores, los capítulos metodológicos y las secciones 2, 3 y 8 pueden resultar de mayor interés. Finalmente, quienes solo sientan curiosidad general por el tema pueden comenzar por las secciones 4 y 5, dejando para una lectura posterior los capítulos de mayor profundidad técnica.

Si eres...	Podrías empezar tu recorrido en este orden...
Tomador(a) de decisiones	Mensajes clave (pág 13) 📖 ¿Cómo se puede usar esta información? (pág 16) 📖 Principales resultados y hallazgos (pág 41) 📖
Investigador(a) o técnico(a) especializado	Sección técnica Mensajes clave Retos y cómo avanzar (pág 50) 📖
Público general interesado	Mensajes clave ¿Dónde se pierde más el bosque natural en Colombia? (pág 42) 📖 Historias desde el bosque amazónico: dinámicas que impulsan el riesgo de deforestación (pág 18) 📖 ¿Qué es el riesgo de deforestación y para qué sirve? (pág 32) 📖 ¿Cómo se construyen los mapas de riesgo? (pág 35) 📖 Riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana (pág 46) 📖

2. Mensajes clave



a. Un mapa que ayuda a anticiparse

Este estudio actualiza el mapa de riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana y señala las zonas donde el bosque tiene mayor probabilidad de desaparecer en los próximos años si no se toman medidas.

b. La Amazonia sigue en el centro del problema

Aunque la deforestación ha bajado en el país, más del 50 % sigue concentrada en esta región, por eso lo que ocurra en la Amazonia será clave para alcanzar la meta de deforestación neta cero.

c. Cinco zonas bajo presión constante

Los Núcleos de Alta Deforestación Sabanas del Yaré, Guaviare, Sur del Meta, Putumayo y Mapiripán continúan como epicentros del riesgo, impulsados principalmente por acaparamiento de tierras, ganadería extensiva, cultivos ilícitos y vías ilegales.

d. Dos índices que muestran lo urgente y lo importante

Para ayudar a priorizar, se proponen dos índices: uno mide qué tan expuesto está el bosque de un territorio (IEP) y otro que indica cuántas hectáreas están en juego (área ponderada). Juntos muestran dónde enfocar esfuerzos.

e. Hay territorios donde el bosque está en riesgo crítico

Municipios como La Macarena y Solano, algunos parques como Tinigua y resguardos como Río Atabapo e Inírida tienen niveles de riesgo tan altos que podrían perder gran parte de su bosque en poco tiempo si no se actúa de manera preventiva.

f. También hay territorios que siguen resistiendo

Departamentos como Vaupés y Vichada, parques como Chiribiquete y resguardos indígenas bien gestionados muestran que sí es posible conservar el bosque cuando hay control social y se reduce la presión de factores externos.

g. Esta información debe usarse para proteger el bosque

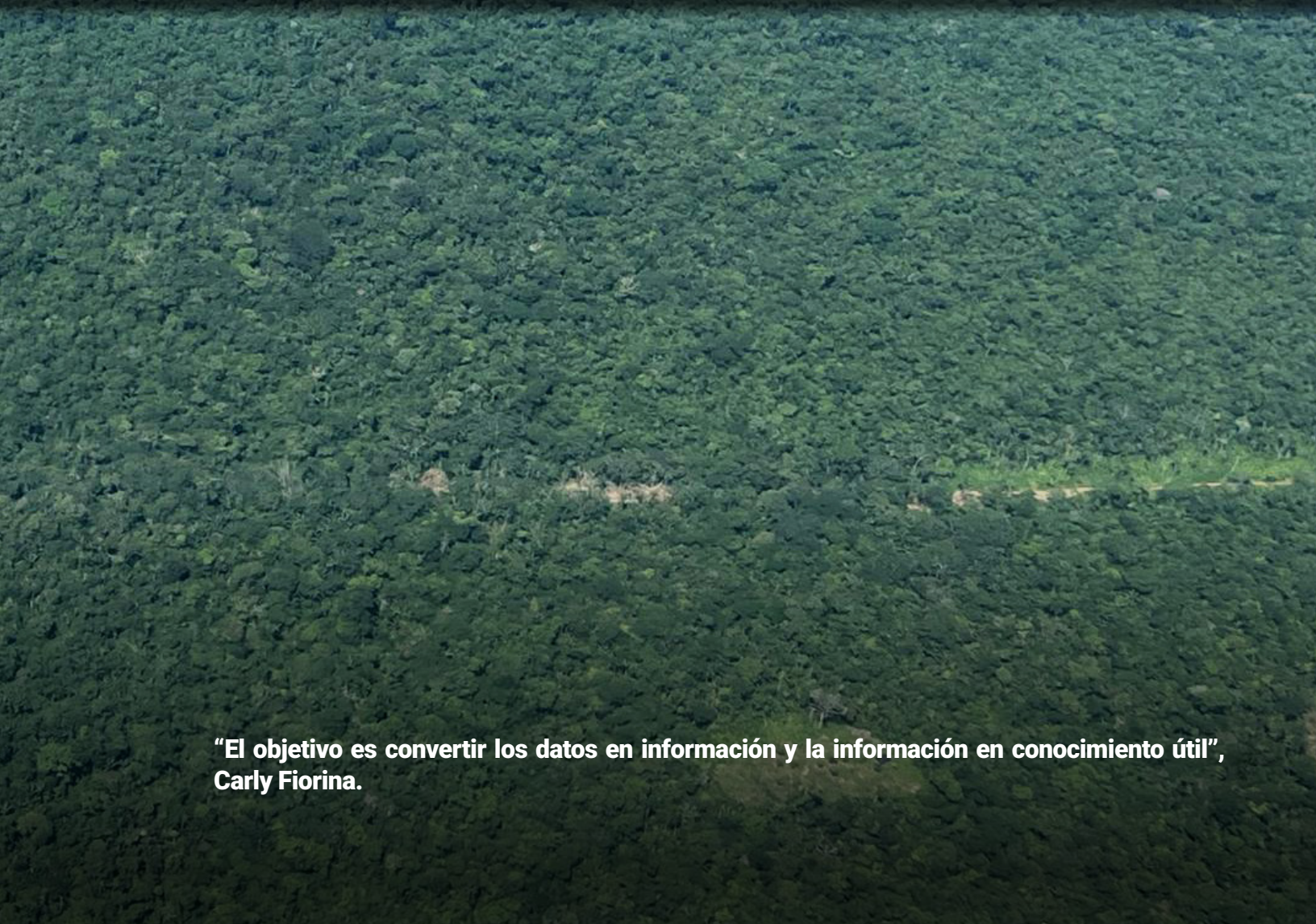
El mapa y los índices sirven para tomar mejores decisiones en ordenamiento del territorio, control ambiental, restauración ecológica y compensaciones como pagos por servicios ecosistémicos o similares.

h. No es una foto fija: el riesgo debe monitorearse y actualizarse

Se recomienda actualizar el modelo al menos cada cinco años, incorporar el impacto del cambio climático y usarlo como base para construir estrategias más efectivas de conservación en el futuro.

Dirígete al capítulo 6 de la sección técnica y explora en profundidad las conclusiones del estudio.



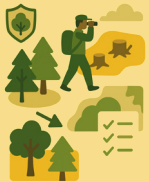


3 • ¿Cómo se puede usar esta información?

**“El objetivo es convertir los datos en información y la información en conocimiento útil”,
Carly Fiorina.**

Los mapas de riesgo no solo indican dónde el bosque podría perderse, actúan como una *brújula que guía un ciclo continuo de gestión*. En cada vuelta de ese ciclo —*priorizar, detectar, anticipar, planificar, actuar y medir/ajustar*— el mismo mapa cumple un papel distinto: desde señalar las

veredas más urgentes hasta comprobar si las intervenciones dieron resultado. La matriz siguiente resume cómo se usa la información en cada paso y qué valor aporta.

	Uso dentro del ciclo	¿Qué aporta?	¿Cómo contribuye el mapa de riesgo?
	Priorizar	Focaliza recursos con los cuales la tala podría acelerarse; por ejemplo, dirige <i>acuerdos de conservación</i> a veredas críticas.	Delimita polígonos de mayor riesgo y orienta la selección de comunidades o predios.
	Detectar	Anticipa frentes emergentes antes de que aparezcan en las alertas; por ejemplo, identifica <i>núcleos prospectivos</i> en el arco de deforestación.	Combina accesibilidad, presión agropecuaria y cercanía a claros recientes para delimitar áreas de alta probabilidad futura.
	Anticipar	Previene efectos indirectos; por ejemplo, modela el <i>desplazamiento del riesgo</i> cuando se restringe la tala en un foco y esta podría saltar a otro.	Permite simular escenarios con restricciones y muestra dónde la presión se reubicaría, orientando refuerzos de gobernanza.
	Planificar	Alinea obras y políticas con la conservación; por ejemplo, reubica <i>infraestructura vial</i> fuera de zonas críticas antes de su licenciamiento.	Posibilita superponer trazados o zonificaciones sobre el mapa y rediseñarlos o condicionarlos antes de aprobarlos.
	Actuar	Ejecuta intervenciones justo donde más se necesitan; por ejemplo, establece <i>patrullajes y restauración</i> en los puntos críticos.	Prioriza control, restauración e incentivos productivos según la intensidad del riesgo.
	Medir y ajustar	Comprueba qué funcionó y corrige lo que no; por ejemplo, compara la superficie en riesgo <i>antes y después</i> de una campaña de acuerdos o controles.	Reejecuta el modelo tras las acciones y cuantifica cuánta superficie de riesgo se redujo o se desplazó, guiando ajustes para la siguiente iteración.

4. Historias desde el bosque amazónico:

dinámicas que impulsan el
riesgo de deforestación



"La tierra habla, pero a veces solo la escuchan quienes la pisan descalzos", proverbio campesino.

Detrás de cada hectárea deforestada en la Amazonia hay una historia. No solo de árboles talados o caminos abiertos, sino de decisiones humanas marcadas por la necesidad, la oportunidad, el abandono institucional y la promesa de un futuro mejor. Este capítulo recoge tres relatos ficticios que ilustran, desde lo cotidiano, las dinámicas que impulsan la transformación del bosque en el sur de Colombia.

Don Miguel, Yulieth y Hernando no se conocen entre sí, pero sus historias tienen puntos en común: la búsqueda de tierra, la llegada de la carretera, la presión del mercado y la ausencia del Estado. A través de sus voces, entendemos cómo la deforestación no es solo un problema ambiental, sino también uno social y económico. Cada testimonio es una ventana a las tensiones entre el deseo de progreso y la necesidad de conservar, entre la supervivencia diaria y la sostenibilidad a largo plazo.

La historia de don Miguel en el Bajo Caguán



Cuando don Miguel llegó con su familia al Bajo Caguán en 2004, lo hizo empujado por la necesidad. Venía del Huila, donde la tierra ya no alcanzaba para todos los hijos, y había escuchado en la plaza que estaban abriendo una trocha nueva al sur del Caquetá.



Dijeron que allá uno podía levantar finca donde hubiera monte, y eso hicimos.



Sembramos pasto para asegurar la propiedad de la tierra.

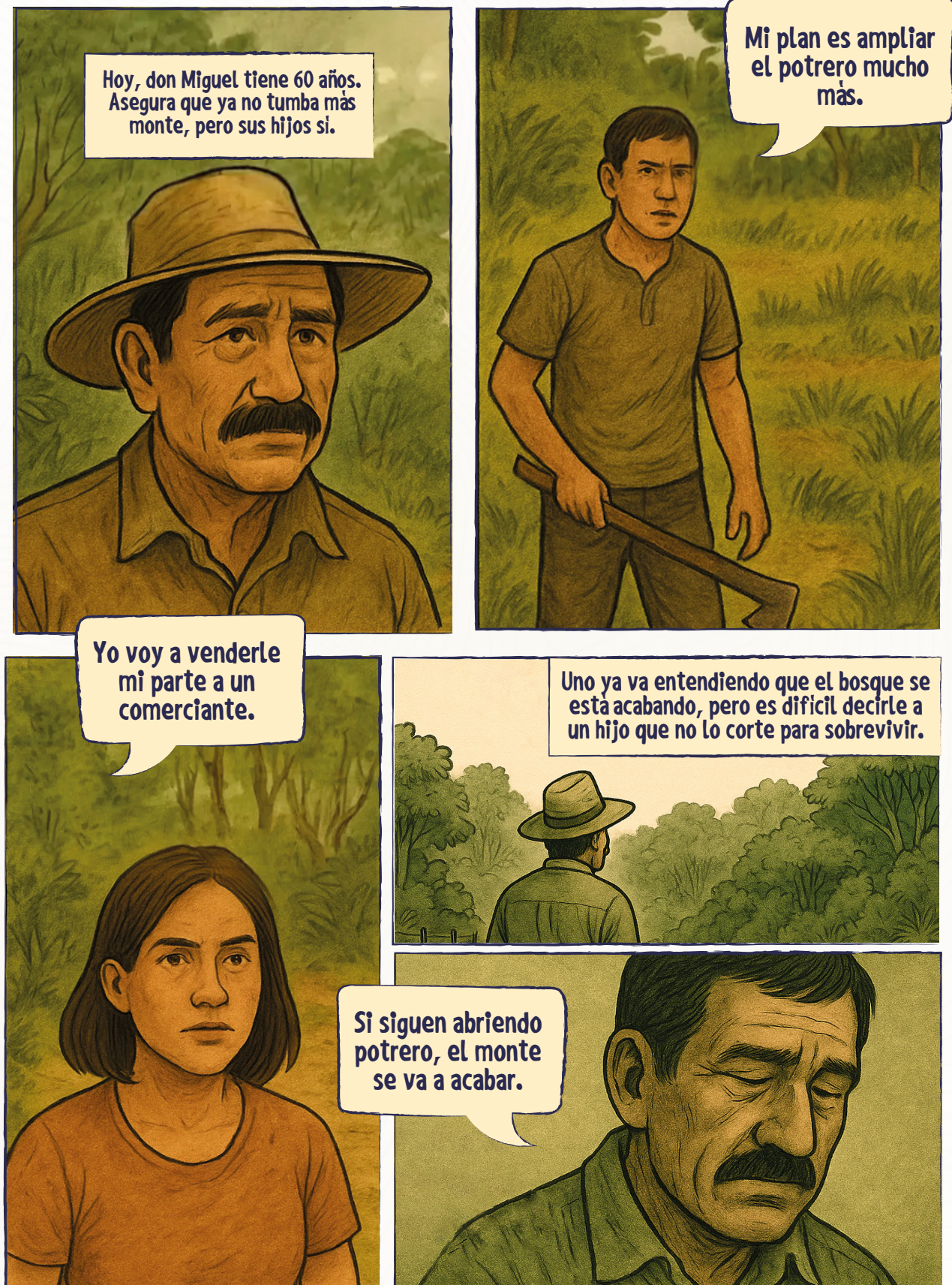




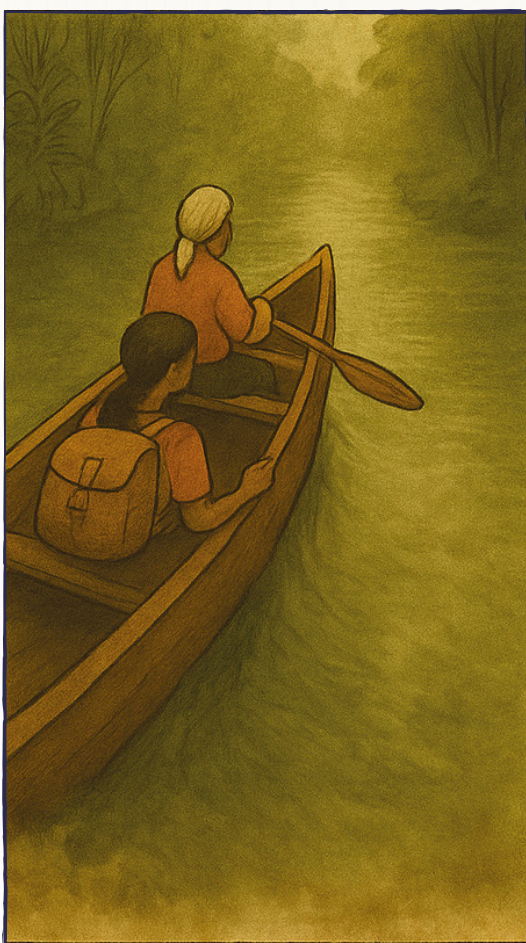
Don Miguel nunca resgistró su tierra formalmente, pero su nombre estaba en el cuaderno de la junta de acción comunal.



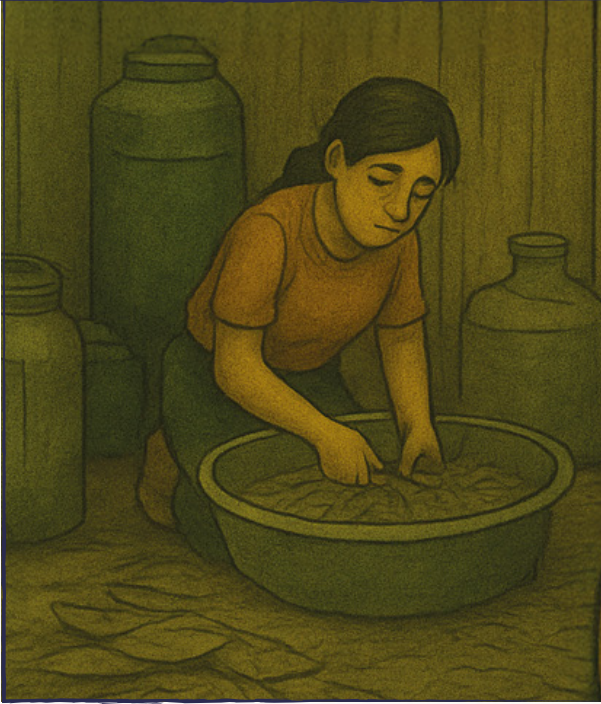
Aquí nadie se asoma para ayudarnos.



La historia de Yulieth en Miraflores



Yulieth aprendió rápido a raspar las hojas, a sacar la pasta...



No era lo que yo quería hacer, pero había que sobrevivir.



Cuando llegó la erradicación, nos tocó correr.



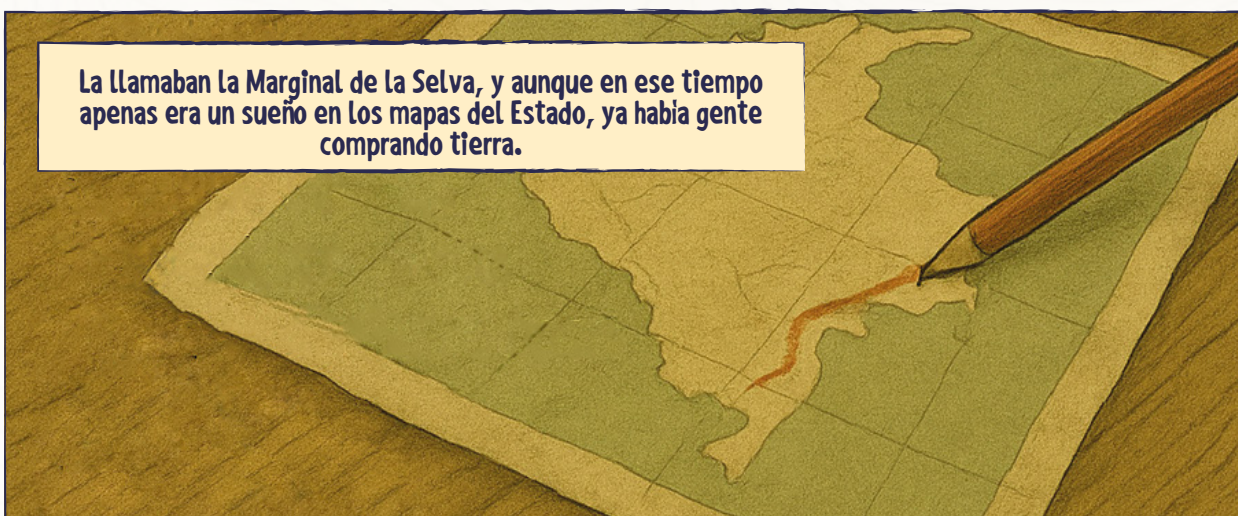


La historia de Hernando y la Marginal de la Selva

Hernando creció en San José del Guaviare, escuchando hablar de una carretera que algún día lo conectaría con todo el sur del país.



La llamaban la Marginal de la Selva, y aunque en ese tiempo apenas era un sueño en los mapas del Estado, ya había gente comprando tierra.



Su papá había trabajado como arriero, llevando víveres en mula a las veredas.



Hernando estudió un técnico agropecuario y, al regresar, quiso hacer algo diferente.



La finca quedaba a un día de camino, pero Hernando aseguraba que cuando terminara la carretera, "iba a quedar a tiro de piedra del progreso".



Aquí el que no tiene tierra no existe. Así que compré una finca con lo que había ahorrado.







5. ¿Qué es el riesgo de deforestación y para qué sirve?



"Saber lo que puede pasar es el primer paso para evitar que pase", Anónimo.

Cuando hablamos de riesgo de deforestación nos referimos a la probabilidad de que un área de bosque sea deforestada en el futuro, dadas ciertas condiciones presentes en el territorio. No se trata de una predicción exacta, sino de una estimación basada en patrones observados y factores que influyen en la transformación del paisaje.

El riesgo surge de la combinación de factores que hacen más vulnerable un lugar al cambio de uso del suelo, como la construcción de

vías, la expansión de la frontera agrícola y la presencia o ausencia de gobernanza ambiental, entre otros. Estos factores no actúan por sí solos, sino que se superponen e interactúan, lo cual genera condiciones más o menos propensas a la pérdida de bosque.

Los mapas de riesgo de deforestación nos permiten ver esas condiciones en el espacio, identificar zonas prioritarias para la acción y tomar decisiones informadas antes de que el bosque desaparezca. Sirven como una herramienta anticipatoria para:



Planificar acciones de conservación y control territorial



Focalizar la inversión de recursos en zonas con mayor vulnerabilidad.



Apoyar procesos de ordenamiento territorial y toma de decisiones en políticas públicas.



Fortalecer la vigilancia ambiental desde lo institucional y comunitario.

Estos mapas no buscan reemplazar otras formas de monitoreo, sino complementarlas con una visión prospectiva, útil para prevenir, no solo para reaccionar.



¿Cómo sabemos si un lugar está en riesgo?

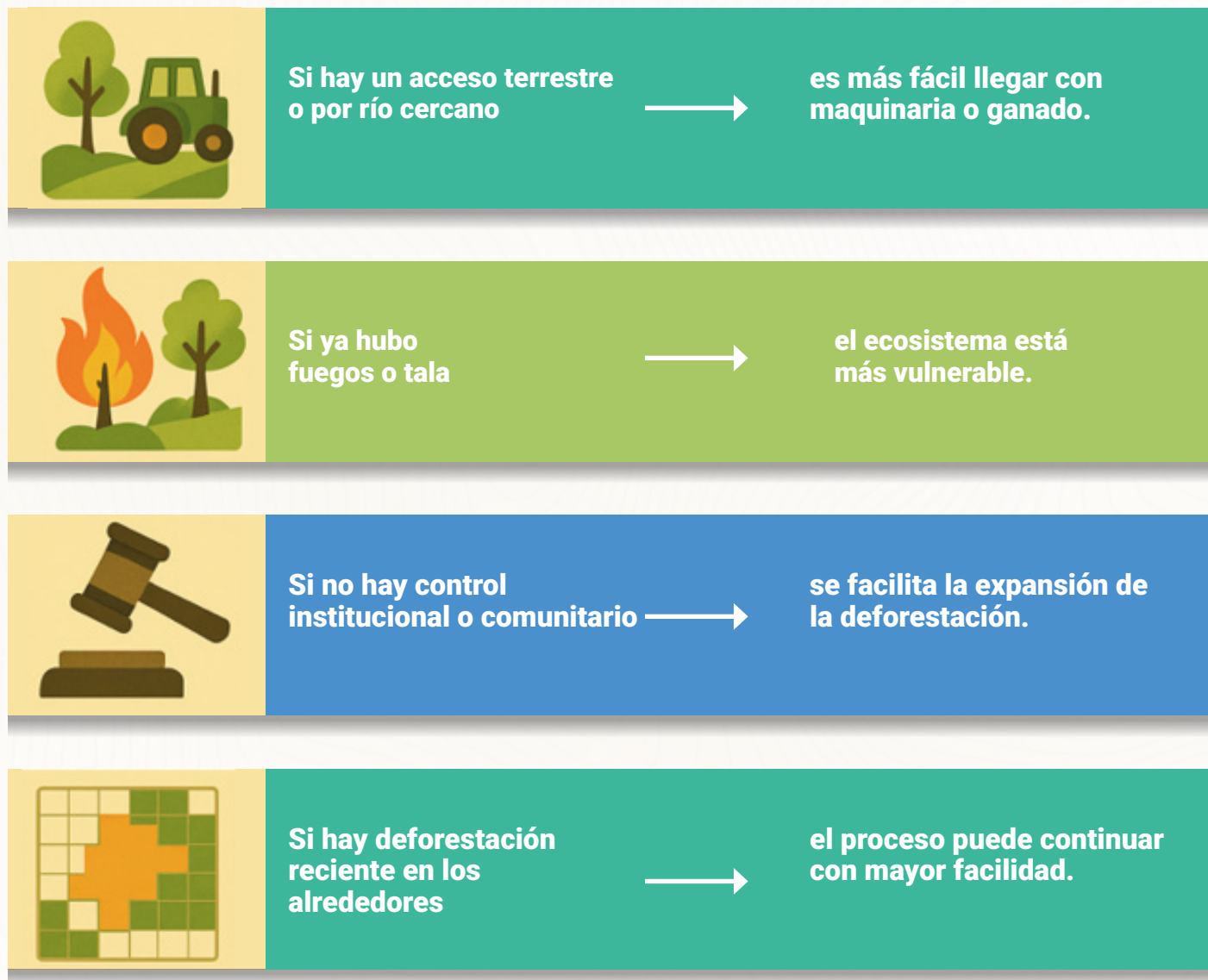
Imagina que el bosque es como una casa construida en una ladera. Si la pendiente es fuerte, ha llovido mucho, no hay barreras de contención y ya hubo un pequeño derrumbe, entonces hay más riesgo de que se venga abajo.

Con los bosques ocurre algo similar: el riesgo aumenta cuando se juntan varias condiciones que ya han estado presentes en lugares donde el bosque se perdió en el pasado.

Dirígete al capítulo 3 de la sección técnica y examina en profundidad el marco conceptual del estudio.



Ejemplos de condiciones que aumentan el riesgo de deforestación en Colombia:



Condiciones como estas no actúan por separado, y es su combinación la que hace que un lugar esté en mayor riesgo.

Dirígete al capítulo 2.3 de la sección técnica y estudia en profundidad los hallazgos de otros investigadores en la temática de modelación de la deforestación.



6. Cómo se construyen los mapas de riesgo

"Un modelo es una mentira que ayuda a ver la verdad", Howard Skipper.

Los mapas de riesgo de deforestación son herramientas que nos ayudan a identificar zonas con condiciones que podrían facilitar la pérdida futura del bosque. No se trata de adivinar el futuro, sino de

aprender del pasado: mirar dónde se ha perdido bosque, en qué contextos y usar esa información para estimar dónde podría volver a pasar.

¿Qué es un modelo?

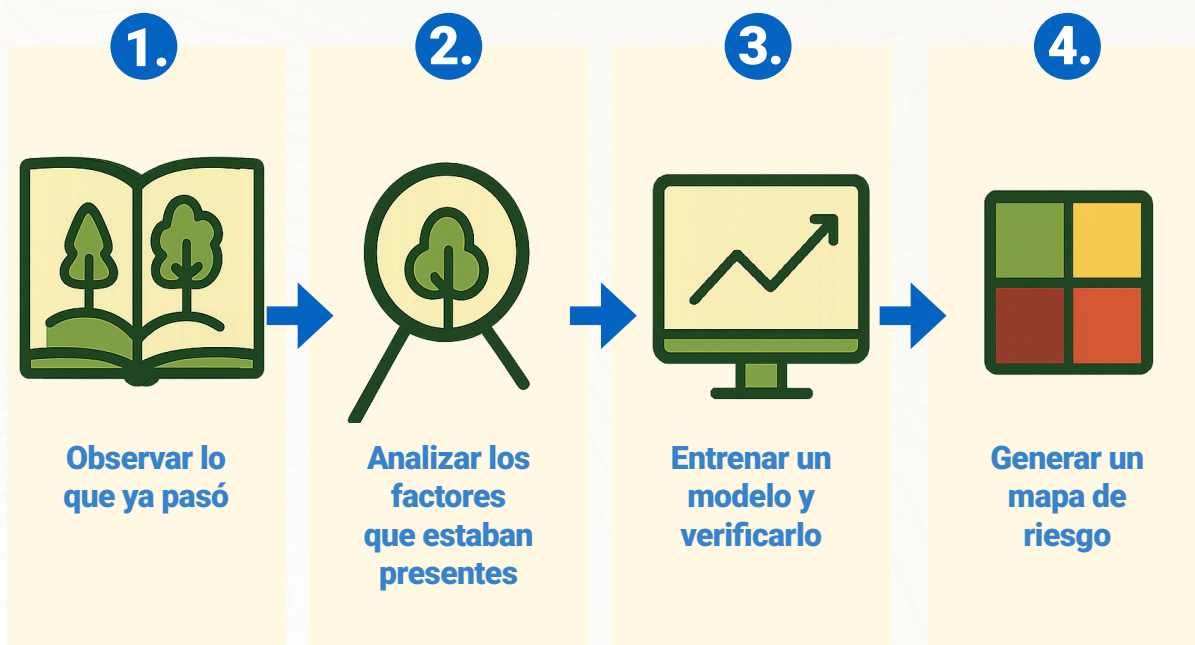
Un modelo es una herramienta que simplifica la realidad para ayudarnos a entenderla mejor. En este caso, combina datos del territorio —como la cercanía a vías o el tipo de cobertura— para evaluar qué zonas tienen mayor probabilidad de perder su bosque.

Podemos imaginarlo como una receta: mezcla distintos ingredientes (variables explicativas) y produce un resultado (mapa de riesgo). No predice el futuro con certeza, pero sí señala dónde es más probable que ocurra la deforestación si las condiciones actuales se mantienen.



Etapas principales en el análisis del riesgo

El proceso completo para generar un mapa de riesgo puede parecer ser complejo, pero es posible resumirlo en *cuatro etapas clave* que van desde la observación del pasado hasta la proyección del futuro.



Observar lo que ya pasó

El análisis comienza con los registros históricos de cobertura forestal para el lugar donde queremos generar el mapa de riesgo, es decir, series de mapas que muestran, año tras año, dónde el bosque permaneció y dónde desapareció. Al superponer estas capas se revelan diferentes patrones de avance, como, por ejemplo, franjas que crecen desde vías principales, claros que se abren junto a ríos o cinturones de pérdida alrededor de parques nacionales. Aunque

estos patrones todavía no explican las causas, sí dejan ver rutas recurrentes por donde suele avanzar la deforestación.

Esta primera mirada deja dos resultados clave: un mapa de cambio que señala dónde el bosque ya se perdió, y un boceto claro de las rutas por las que la deforestación ha venido avanzando en el territorio, es decir, los patrones de cambio.



¿Con qué mapas históricos hacemos los mapas de riesgo?

Colombia cuenta con el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBByC) del Ideam, que, como parte de su operación, genera mapas anuales de las áreas de bosque natural y de la deforestación que ocurre en el país.

Analizar qué factores estaban presentes

Una vez identificadas las zonas donde ya ocurrió la deforestación, el siguiente paso es analizar qué factores o condiciones socioeconómicas o ambientales se repiten en esos lugares. Estos factores nos dan pistas sobre los procesos que impulsan la transformación del bosque, en este caso, la deforestación.

Estos factores también se conocen como causales, motores o *drivers de la deforestación* y pueden ser directos, como la expansión agropecuaria o la apertura de vías; o

indirectos, como los cambios en el precio de la tierra, la ausencia de control institucional o las dinámicas migratorias. El resultado de esta etapa es un conjunto de capas geográficas que representan, lo más fielmente posible, las condiciones o los factores asociados a la pérdida de bosque. Este conjunto de “condiciones del terreno” constituye la materia prima con la que el modelo de riesgo calculará, más adelante, dónde esas mismas combinaciones podrían repetir el mismo desenlace: la deforestación.

¿Qué tan fácil es contar con información acerca de los motores de la deforestación?

Obtener datos sobre los motores que impulsan la deforestación en Colombia es difícil porque provienen de fuentes heterogéneas, se actualizan a ritmos distintos o presentan una calidad o cobertura que no es uniforme. Por eso, una parte sustancial del trabajo de modelación se dedica a identificar, recopilar y armonizar esa información antes de poder usarla.



¿Qué son las variables proxy?

A veces no se cuenta con datos directos y detallados sobre ciertos motores de la deforestación, especialmente aquellos sociales o institucionales. En esos casos, se usan variables proxy: indicadores indirectos que permiten representar de forma aproximada su influencia en el análisis.

Por ejemplo, la presión por tenencia informal de tierras no está mapeada explícitamente, pero la apertura de vías informales puede servir como proxy, ya que suele estar asociada a procesos de ocupación y transformación del bosque.



Entrenar un modelo y ver qué tan bueno es

Con los registros de deforestación y sus factores asociados se entrena un modelo estadístico que aprende la combinación de señales que precede a la pérdida forestal. Se le llama “entrenamiento” porque al modelo se le “enseña” con ejemplos del pasado: se le muestran miles de lugares donde el bosque se perdió y miles donde se conservó, junto con las condiciones o los factores de cada sitio. Igual que un aprendiz que practica con ejercicios, el modelo ajusta sus reglas hasta reconocer por sí mismo cuándo el bosque tiende a mantenerse y cuándo es probable que desaparezca.

Luego viene el examen: se le dan mapas de años que nunca vio y se revisa cuánto coincide su pronóstico con la deforestación real. Este procedimiento se conoce como “validación”. Si la correspondencia es alta y, además, las zonas de mayor riesgo tienen sentido geográfico (por ejemplo, más cerca de vías y menos en áreas remotas), el modelo se considera validado. Esta prueba asegura que no solo repita el pasado de memoria, sino que capture patrones que sirvan para prever la deforestación futura.

Una vez superado este examen, el modelo queda graduado como la mejor representación disponible del riesgo: una herramienta capaz de transformar las condiciones actuales del territorio en una estimación probabilística sólida. Con él en mano, el análisis avanza al paso siguiente, en el cual esas probabilidades se plasmarán en un mapa de riesgo fácil de entender y utilizar por quienes planifican, vigilan y actúan sobre el territorio.



¿El mejor modelo es el que presenta los valores de validación más altos?

No siempre. Un puntaje alto de validación muestra que el modelo reproduce bien lo que ya pasó, pero si se ajusta demasiado a esos datos puede fallar cuando el escenario cambie (esto se conoce como sobreajuste). Además de la precisión numérica, se revisa que los resultados tengan sentido en el territorio y que los factores empleados sean claros y útiles para la acción. El mejor modelo es el que equilibra acierto, lógica geográfica y utilidad práctica.

Generar el mapa de riesgo

Una vez elegido el modelo que mejor reproduce la deforestación observada, su salida principal —el cálculo de la probabilidad de pérdida de bosque para cada punto del territorio— se presenta como *mapa de riesgo de deforestación*. Para que cualquier lector pueda interpretarlo más fácilmente, esos valores se traducen a un “semáforo”

de colores en el que *rojo* indica alto riesgo; *amarillo*, riesgo medio, *verde*, riesgo bajo; y *negro*, riesgo nulo. Es entonces cuando el mapa de riesgo se convierte en una guía práctica para decidir dónde concentrar vigilancia, promover acuerdos de conservación o iniciar acciones de restauración antes de que la deforestación ocurra.



¿Con qué frecuencia se actualiza el mapa de riesgo?

No hay un plazo estándar. En general, un mapa de riesgo se renueva cuando cambian las presiones que lo originan o aparecen mejores datos. En Colombia, el Ideam sigue ese mismo criterio: vuelve a ejecutar el modelo cuando mejoran las capas sobre los motores de la deforestación o se detectan cambios marcados en los patrones de pérdida de bosque. En la práctica, esto suele ocurrir cada cinco a diez años, un intervalo que mantiene el mapa vigente sin invertir recursos antes de que la información lo justifique.



¿Cómo leer el mapa de riesgo?

Este mapa muestra la probabilidad de deforestación en el bioma amazónico colombiano, utilizando una escala de colores tipo “semáforo” que facilita su interpretación:

Rojo (riesgo alto): zonas donde hay una alta probabilidad de que ocurra deforestación en el corto plazo. Estas áreas deben ser prioridad para intervenciones urgentes de monitoreo, control y conservación.

Naranja (riesgo medio): áreas con riesgo moderado, donde la deforestación podría presentarse si se mantienen o intensifican las condiciones actuales (por ejemplo, mayor acceso, expansión de fronteras agrícolas o poca gobernanza).

Verde limón (riesgo bajo): regiones con baja probabilidad de deforestación, pero que deben mantenerse en observación, especialmente si están cerca de zonas en transformación.

Negro (riesgo nulo o casi nulo): territorios que, por sus condiciones actuales, muestran una probabilidad mínima de sufrir deforestación en el periodo modelado. Muchas veces corresponden a áreas remotas, protegidas o con baja presión humana.

Dirígete al capítulo 4 de la sección técnica y analiza en profundidad la metodología del estudio.



7 Principales • resultados

*"El mayor valor de una imagen es que nos obliga a ver lo que nunca esperábamos encontrar",
John Tukey.*

¿Dónde se pierde más el bosque natural en la Amazonia colombiana?

El bioma amazónico colombiano abarca total o parcialmente los departamentos del Meta, Guaviare, Caquetá, Vichada, Putumayo, Guainía, Vaupés, Amazonas, Nariño y Cauca. Cuando se superponen los mapas históricos de cambio y se analizan los patrones espaciales de la pérdida de

bosque, aparece un comportamiento claro: la deforestación no avanza de forma homogénea, sino que se concentra de manera persistente en cinco *Núcleos de Alta Deforestación que históricamente han concentrado cerca del 50 % de la deforestación de Colombia*:

¿Qué es un Núcleo de Alta Deforestación (NAD)?

Es una zona donde la deforestación se ha acumulado con mayor intensidad que en el resto del territorio. Para identificarla, se analizan los patrones de pérdida de bosque a lo largo del tiempo y se delimitan aquellas áreas donde la tala ha sido más frecuente y concentrada. El resultado es un contorno que resalta los lugares donde la presión sobre el bosque ha sido más persistente.



Sabanas del Yarí-Bajo Caguán: el principal núcleo de deforestación abarca desde la parte sur del municipio de La Macarena (Meta), en las Sabanas del Yarí, hasta la cuenca baja del río Caguán en Cartagena del Chairá, sobre el límite suroccidental del PNN Serranía de Chiribiquete. El extremo oriental del núcleo se encuentra en el PNN Chiribiquete.

Guaviare (Marginal de la Selva): la mayor parte del núcleo se ubica en los cuatro municipios del departamento del Guaviare (San José del Guaviare, El Retorno, Calamar y Miraflores), con un área más reducida en La Macarena, Vistahermosa y Puerto Rico (Meta).

Sur del Meta: el núcleo está conformado por dos focos de concentración de la deforestación; el primero, desde el sur de los municipios de Uribe y Mesetas hasta La Macarena, sobre el curso de los ríos Leiva, La Reserva, Duda, Losada, Perdido y Guayabero. Esta zona abarca áreas de los PNN Tinigua, Sierra de La Macarena y Cordillera de Los Picachos.

Mapiripán (Meta): se ubica al oriente del municipio de Mapiripán y al sur de Puerto Gaitán (Meta). El núcleo corresponde a una zona en el límite entre el bioma amazónico y la Orinoquía.

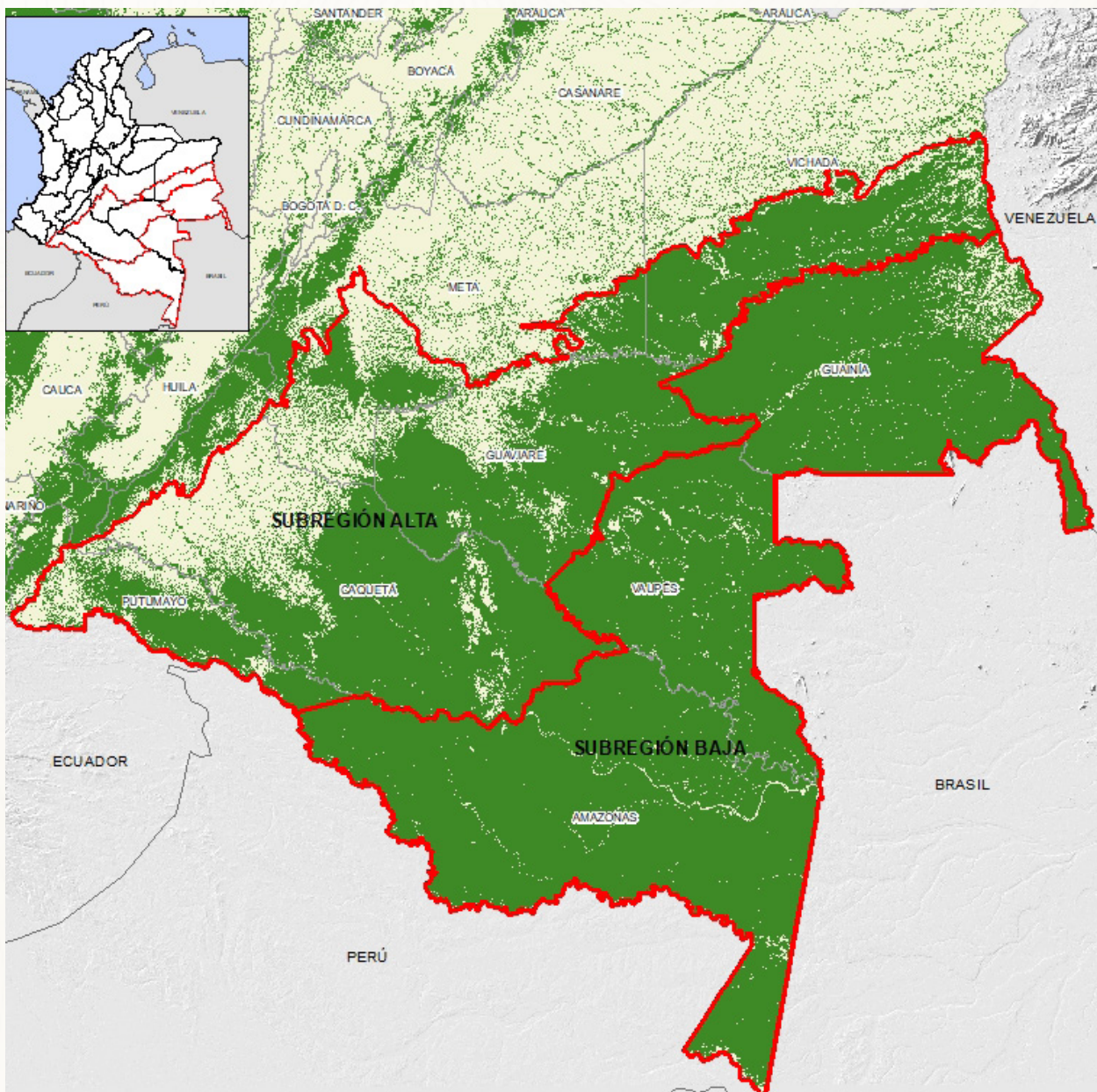
Putumayo: el área más grande del núcleo se ubica principalmente en el departamento de Putumayo.

Los cinco núcleos de alta deforestación emergen alineados en la franja donde la Amazonia se acerca a las estribaciones andinas y a la llanura de la Orinoquia. Esa ubicación permite trazar con nitidez *dos grandes subregiones* dentro del bioma:

Subregión Alta (Putumayo, Caquetá, Meta, Guaviare y Vichada): corresponde al borde noroccidental de la selva, donde

los núcleos se superponen o se tocan entre sí, formando un arco continuo de presión sobre el bosque.

Subregión Baja (Guainía, Vaupés y Amazonas): abarca el corazón de la Amazonia colombiana, con extensiones boscosas prácticamente intactas y focos de pérdida más dispersos y aislados.





¿Qué estamos perdiendo cuando desaparece el bosque amazónico?

Cada hectárea de bosque que se tala en la Amazonia colombiana representa mucho más que árboles. Se pierden fuentes de agua limpia, suelos fértiles que tardan siglos en formarse y hábitats únicos donde viven miles de especies, muchas de ellas que no existen en ningún otro lugar del planeta. También se libera a la atmósfera el carbono que estaba almacenado en los troncos, el suelo y la vegetación, lo que contribuye al cambio climático. Además, se debilitan los sistemas culturales y de sustento de muchas comunidades rurales e indígenas que dependen directamente del bosque para vivir.

Dirígete al capítulo 2.1 de la sección técnica y reconoce en profundidad los patrones de deforestación de la Amazonia colombiana.



¿Cuáles son los motores de la pérdida de nuestros bosques naturales?

El bosque natural no se pierde por casualidad. En la Amazonia colombiana hay varias actividades que lo transforman directamente. Estas son las principales:

1. Tala para sembrar pastos:

En muchos lugares se tumba el bosque para sembrar pasto. Es una forma de preparar el terreno para la cría de ganado, aunque a veces se use solo como forma de ocupar y acaparar las tierras.

2. Cambio por cultivos:

En algunas zonas, el bosque se reemplaza por cultivos como yuca, plátano, maíz o cacao. Estos cultivos pueden ser para consumo familiar o para vender en los pueblos y las ciudades cercanas.

3. Cultivos de coca:

En varias partes de la región, la deforestación está asociada a la siembra de coca. Estas plantaciones suelen abrir nuevas áreas en el bosque y, con el tiempo, esas áreas cambian de uso, principalmente hacia otras actividades agropecuarias.

4. Minería ilegal en los ríos:

La búsqueda de oro y otros minerales en ríos y quebradas, sobre todo cuando se hace sin control, puede destruir directamente la vegetación nativa. Aunque no ocurre en todas partes, puede causar daños muy graves en poco tiempo sobre los recursos hídricos y forestales.

5. Nuevas vías y caminos:

Cuando se abren carreteras, trochas o rutas navegables se facilita la entrada a zonas que antes estaban aisladas. Por eso, aunque no tumben muchos árboles directamente, las vías están muy ligadas a la pérdida de bosque.

6. Corte de árboles valiosos:

En algunas zonas, el bosque empieza a degradarse cuando se saca madera de árboles grandes y valiosos. Esto no siempre se nota de inmediato, pero deja el área más vulnerable a otras formas de transformación como la deforestación

¿Las causas de la deforestación actúan por separado?

En la práctica, las causas de la deforestación no actúan de manera aislada. En muchos casos, varias ocurren juntas o una lleva a la otra. Por ejemplo, una vía puede facilitar la tala, la quema y luego el uso agrícola o ganadero. Estas combinaciones varían según el lugar, el momento y también según quién esté actuando sobre el territorio. Por eso es difícil anticipar con exactitud cómo avanzará la pérdida del bosque. Los modelos ayudan a reconocer patrones, pero no siempre pueden reflejar toda esta complejidad.



Dirígete al capítulo 2.2 de la sección técnica y explora en profundidad las causas y los agentes de la deforestación en la Amazonia colombiana.



¿Qué contempla el mejor modelo de riesgo para la Amazonia?

El modelo que mejor logró anticipar la pérdida de bosque se construyó por partes, tomando en cuenta que no toda la Amazonia colombiana se comporta igual. Para facilitar el análisis y mejorar la precisión, se dividió la región en dos grandes subregiones: una Alta, donde la deforestación ha sido más intensa y concentrada, y otra Baja, donde la pérdida es menos frecuente y más dispersa.

En cada subregión se exploró un conjunto amplio de variables: algunas relacionadas con el acceso al territorio, otras con el uso del suelo, el relieve, la cobertura boscosa o la presencia de fuegos. También se consideraron factores institucionales, demográficos y socioeconómicos. El modelo identifica cuáles de estas condiciones ayudan más a anticipar la pérdida, y a esas se les considera las que tienen mayor peso. No todas se usan al final: solo se quedan las más útiles para reconocer los patrones reales.

En la subregión Alta se usaron datos del periodo 2015-2020. Las variables que más

peso tuvieron fueron: la cercanía a zonas ya transformadas, la facilidad o dificultad del terreno, la presencia de fuegos, la cercanía a áreas sin bosque y la proximidad a sitios que ya han perdido bosque. Con esta combinación, el modelo logró una coincidencia del 63 % con lo ocurrido en 2023.

En la subregión Baja se trabajó con información de 2016-2020. Allí el modelo utilizó tres variables principales: cercanía al cambio, facilidad de acceso y proximidad a zonas ya transformadas. El resultado fue una coincidencia del 55 %.

Aunque los resultados no son perfectos —ni se espera que lo sean—, muestran que el modelo logra reconocer patrones creíbles, útiles y consistentes con lo que ya se ha observado sobre el terreno. Estos patrones son la base para construir los mapas de riesgo que veremos a continuación.



¿Qué significa que una variable pese más en el modelo?

Cuando el modelo aprende a reconocer dónde se pierde el bosque, descubre que algunas condiciones ayudan más que otras a anticipar ese cambio. A esas se les dice que “pesan más” porque influyen más en el resultado final. Por ejemplo, estar cerca de zonas donde ya hubo deforestación suele ser una señal fuerte: en muchas partes de la Amazonia, la pérdida de bosque tiende a extenderse alrededor de los claros ya abiertos.

Dirígete a los capítulos 5.2 y 5.3 de la sección técnica y examina en profundidad la parametrización de los modelos y los resultados de la validación.



Riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana

¿Cómo leer el mapa de riesgo?

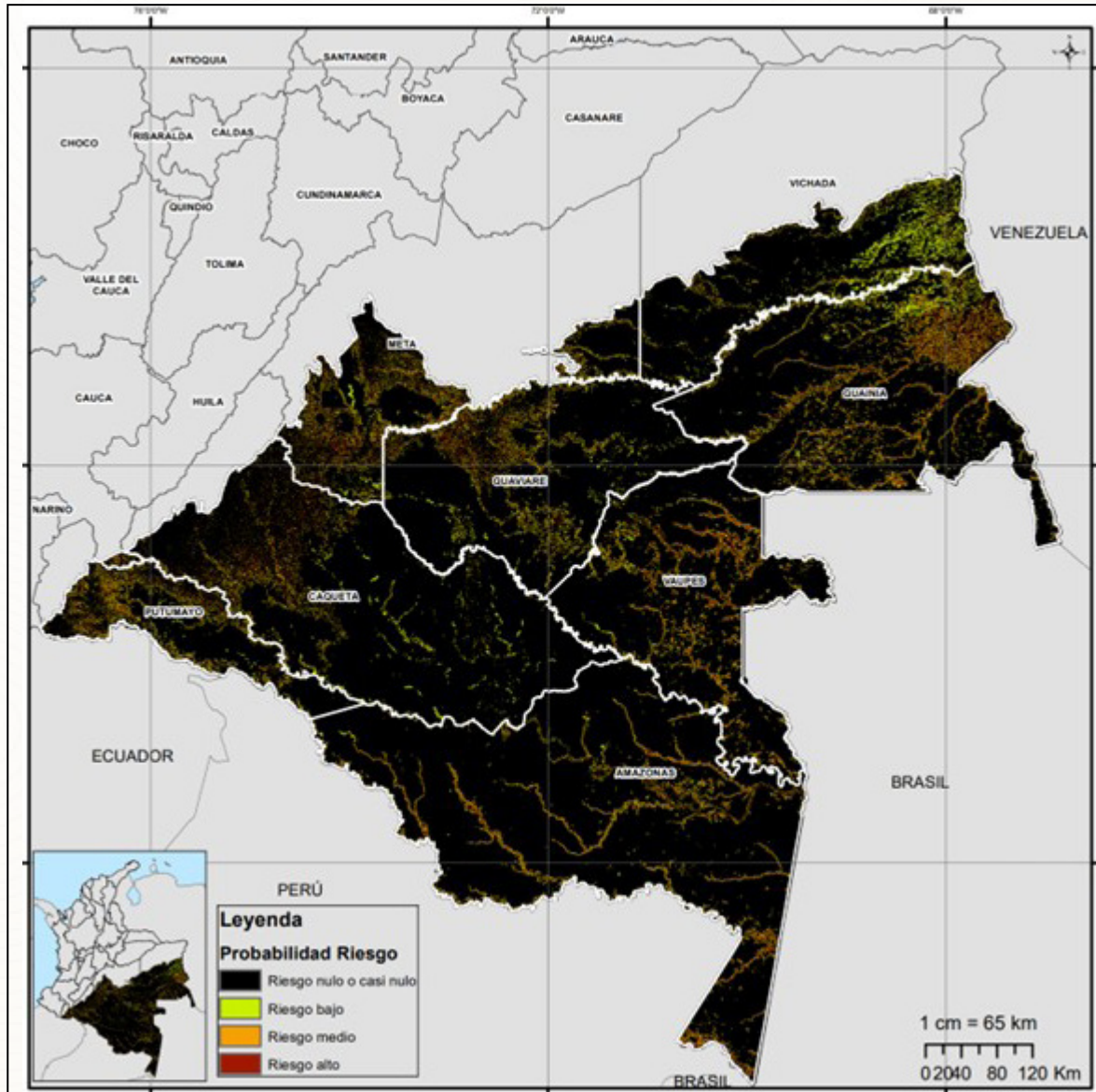
Este mapa muestra la probabilidad de deforestación en el bioma amazónico colombiano, utilizando una escala de colores tipo “semáforo” que facilita su interpretación:

Rojo (riesgo alto): zonas donde hay una alta probabilidad de que ocurra deforestación en el corto plazo. Estas áreas deben ser prioridad para intervenciones urgentes de monitoreo, control y conservación.

Naranja (riesgo medio): áreas con riesgo moderado, donde la deforestación podría presentarse si se mantienen o intensifican las condiciones actuales (por ejemplo, mayor acceso, expansión de fronteras agrícolas o poca gobernanza).

Verde limón (riesgo bajo): regiones con baja probabilidad de deforestación, pero que deben mantenerse en observación, especialmente si están cerca de zonas en transformación.

Negro (riesgo nulo o casi nulo): territorios que, por sus condiciones actuales, muestran una probabilidad mínima de sufrir deforestación en el periodo modelado. Muchas veces corresponden a áreas remotas, protegidas o con baja presión humana.



Principales resultados

1. Existe un “arco” de mayor riesgo

La amenaza de perder bosque se concentra en una franja que va desde el Meta, pasa por Guaviare y Caquetá, y llega hasta Putumayo. Allí, el principal motivo es lo fácil que resulta llegar por tierra: donde hay más caminos o rutas, hay más probabilidades de deforestación.

2. Cinco zonas concentran la mitad del riesgo alto

- **Sabanas del Yarí-Bajo Caguán** (28 % del bosque en alto riesgo): principalmente por ganadería extensiva y acaparamiento de tierras impulsados por vías informales dentro y alrededor del PNN Chiribiquete. A esto se suman quemas fuera de control (que a veces derivan en incendios masivos), la extracción informal de madera y la presencia de grupos armados e inversionistas externos.
- **Guaviare (Marginal de la Selva)** (22 % del bosque en alto riesgo): la apertura de carretables informales —especialmente la Marginal de la Selva y el tramo Calamar-Miraflores— facilita la transformación de bosque en pastizales para acaparar tierras y ganadería no sostenible. También hay cultivos de coca en los bordes de la RNN Nukak y quemas asociadas a grupos armados e inversionistas foráneos.
- **Sur del Meta** (23 % del bosque en alto riesgo): muy marcado por la praderización masiva para ganadería extensiva y acaparamiento de tierras, incluso dentro de los PNN Tinigua y Sierra de La Macarena. La expansión de vías informales que invaden áreas protegidas refuerza esta presión.
- **Putumayo** (25 % del bosque en alto riesgo): la conversión de bosque a pastos de baja densidad para ganadería, junto con cultivos ilícitos ribereños (coca) y minería aurífera artesanal, son los motores principales. La tala furtiva para uso doméstico y comercio a pequeña escala también impacta localmente.
- **Mapiripán (Meta)** (14 % del bosque en alto riesgo): amenazado por la expansión de ganadería tecnificada (praderas mejoradas) y palma africana, impulsadas por un mercado informal de tierras manejado por grandes inversionistas. Aunque los cultivos ilícitos han disminuido, siguen presentes en áreas puntuales.

2. Departamentos con más presión

Caquetá, Meta y Putumayo tienen entre el 28 % y el 31 % de su bosque en riesgo medio o alto. Guainía aparece como foco emergente: 44 % de su bosque en riesgo medio o alto.

3. Municipios que requieren acción urgente

- Solano (Caquetá): el 54 % de sus bosques está en alto riesgo.
- La Macarena (Meta) y Cartagena del Chairá (Caquetá): más del 24 % está en alto riesgo.

4. Parques y resguardos: entre luces y sombras

- Parques con mayor riesgo: Yaigojé-Apaporis (29 % en alto riesgo), Tinigua (25 %) y Sierra de La Macarena (16 %).
- Parques con menor riesgo: Serranía de Chiribiquete y Río Puré mantienen más del 90 % de su bosque en bajo riesgo.
- Resguardos indígenas: en general, conservan bien el bosque (> 85 % en bajo riesgo), salvo Río Atabapo-Inírida (12 % alto) y Nukak-Makú (11 % alto), que necesitan refuerzo en acciones de conservación.

5. Motores que mueven el riesgo

En todos los focos de mayor riesgo se repite casi el mismo guion de transformación: apertura de vías (formales o informales) seguida de praderización acelerada ganadería extensiva/acaparamiento. A estos se suman cultivos ilícitos, extracción ilegal de madera y, en Putumayo, minería aurífera a pequeña escala.

6. Las buenas noticias

Departamentos como Vaupés, Vichada y Amazonas —y algunos parques y resguardos como Chiribiquete y Selva de Matavén— mantienen más del 90 % de su bosque en bajo riesgo, por lo cual funcionan como verdaderas “barreras” naturales contra la deforestación.



¿Por qué persiste el riesgo de deforestación en la Amazonia si las tasas históricas recientes muestran un descenso?

El mapa de riesgo no muestra lo que ya se tumbó, sino la probabilidad de que el bosque se pierda si las mismas presiones persisten. Aunque las cifras de deforestación cayeron, la accesibilidad —la variable más potente del modelo— sigue activa en el arco Meta-Caquetá-Guaviare-Putumayo. Allí, la praderización, la ganadería extensiva y el acaparamiento de tierras mantienen encendido el riesgo, de modo que casi un tercio del bosque en Caquetá, Meta y Putumayo continúa expuesto a una nueva ola de tala. En pocas palabras: las alarmas siguen sonando porque las condiciones que facilitan la deforestación todavía están allí.

Dirígete al capítulo 5.4 de la sección técnica y estudia en profundidad el análisis territorial del riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana.



8. Retos y cómo avanzar

"Predecir es muy difícil, especialmente cuando se trata del futuro", Niels Bohr.

¿Usar muchas o pocas variables?

Incluir muchas variables puede parecer una buena idea: mientras más factores se consideren, más completo debería ser el modelo. Pero no siempre es así. Si se usan demasiadas variables, el modelo puede volverse inestable o confuso, captando detalles que no se repiten y perdiendo capacidad para anticipar lo que realmente importa. Por otro lado, si se usan muy pocas, se corre el riesgo de dejar por fuera señales importantes. El reto está en encontrar el punto justo: un conjunto reducido de variables que logren explicar bien el fenómeno, sin hacerlo más complicado de lo necesario.



¿Cómo avanzar?

Las técnicas para elegir y depurar variables ya existen, lo que falta es saber qué combinación funciona mejor. ¿Un paquete mínimo y fácil de actualizar, o un conjunto más amplio que capture matices locales? Probar varios listados —del más básico al más detallado— y comparar su poder predictivo, su costo de actualización y su claridad para quienes toman decisiones.

¿Es más importante la cercanía al bosque o a zonas previamente deforestadas?

En el caso de la Amazonia colombiana, los datos muestran que la deforestación tiende a expandirse desde donde ya ocurrió. Por eso, la cercanía a zonas deforestadas ha resultado ser una señal más útil para anticipar nuevos focos de pérdida, especialmente en los bordes de la frontera agropecuaria. Esto no descarta otras variables, pero ayuda a entender por qué ciertos patrones se repiten más que otros en los modelos de riesgo.

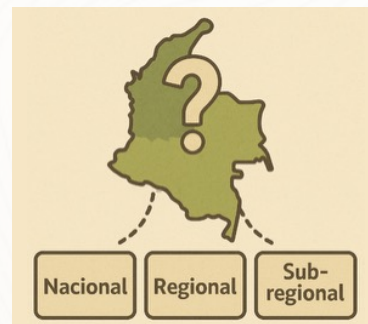


¿Cómo avanzar?

Queda por determinar cuándo y dónde la distancia a zonas deforestadas deja de ser la señal dominante y la cercanía al bosque remanente gana relevancia. Probar distintos radios de influencia, épocas y frentes de expansión —y comparar modelos que usen una, la otra o ambas variables— ayudará a definir en qué contextos cada indicador aporta más y cómo combinarlos sin perder precisión, lo que permite alertar a tiempo sobre la apertura de nuevos frentes de tala.

¿Es mejor un solo modelo nacional o varios modelos subnacionales?

Un solo modelo nacional se entrena una vez y entrega un mapa único, pero tiende a mezclar realidades muy distintas y pierde detalles regionales. Dividir el país en modelos por regiones permite ajustar las variables a cada contexto, aunque exige más datos y esfuerzo para unir resultados. La elección depende de cuán distintos sean los patrones de deforestación y de los recursos disponibles; en Colombia, donde la Amazonia, el Pacífico, los Andes y el Caribe muestran dinámicas muy diferentes, los modelos regionales ofrecen una respuesta más precisa.

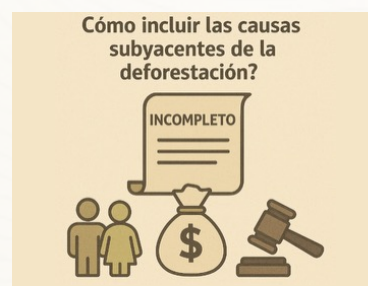


¿Cómo avanzar?

Queda por resolver cuántas regiones son suficientes y cómo combinar sus resultados sin perder coherencia. Explorar distintos esquemas de división territorial —desde pocas macroregiones hasta cortes más finos— y comparar la ganancia en precisión frente al esfuerzo extra de datos y cómputo. Al mismo tiempo, ensayar diferentes reglas para unir los mapas y contrastarlas con la validación independiente permitirá escoger la combinación que ofrezca la señal de riesgo más fiable sin exagerar la amenaza.

¿Cómo incluir las causas subyacentes de la deforestación?

Factores sociales, económicos y políticos influyen de forma decisiva en el uso de la tierra, pero plasmarlos en un mapa es complicado: los datos suelen ser escasos, desiguales o demasiado generales.



¿Cómo avanzar?

El siguiente paso es combinar la búsqueda de nuevas fuentes —censos, catastros, encuestas locales— con formas ingeniosas de transformarlas en capas espaciales explícitas. Probar indicadores derivados de estas fuentes, aun si tienen menor detalle que las variables físicas, permitirá comprobar si enriquecen el modelo y ayudan a explicar patrones que hoy permanecen ocultos.

¿Y los agentes de la deforestación, cómo se representan?

Las personas y los grupos que impulsan la pérdida de bosque —desde pequeños colonos hasta grandes inversionistas— actúan con motivaciones y estrategias distintas; sin embargo, sus pasos no siempre quedan registrados de forma visible o uniforme. Convertir esa diversidad de actores en información cartográfica clara sigue siendo un desafío.



¿Cómo avanzar?

Desarrollar perfiles espaciales de los distintos agentes usando evidencias indirectas: patrones de parcelación, tamaño de los claros, tipo de infraestructura asociada o ciclos de uso del suelo. Contrastar estos indicios con datos de campo permitirá validar si es posible distinguir actores y, así, afinar las acciones de monitoreo y respuesta.

¿Cómo mejorar las zonas donde el modelo acierta menos?

Las áreas con menor validación suelen coincidir con lugares donde faltan datos finos sobre los motores de deforestación (por ejemplo, vías clandestinas recientes o presiones sociales locales). Cuando ese detalle no está disponible, el modelo recurre a aproximaciones (proxies) y su precisión se reduce.



¿Cómo avanzar?

Mejorar la fiabilidad en aquellas zonas donde el modelo no se desempeña tan bien pasa por dos líneas de acción complementarias: mejorar los datos de los motores e integrar enfoques de modelación alternativos que capturen mejor la variabilidad local.

¿Cómo obtener datos espaciales más precisos sobre los motores de la deforestación?

Muchas capas clave —caminos informales, incendios forestales, actividades mineras dispersas o cambios en la tenencia de la tierra— se registran de forma incompleta, con poca resolución o con grandes retrasos. Sin información detallada, el modelo debe recurrir a indicadores aproximados (proxies), lo que limita su capacidad para señalar riesgos emergentes.



¿Cómo avanzar?

Aprovechar nuevas fuentes y tecnologías (imágenes satelitales de alta frecuencia, radar que penetra nubes, drones, cartografía participativa) e integrar estos datos con registros administrativos y de campo para crear capas más exactas y actualizadas de los motores. Evaluar cómo la mejora en cada insumo se refleja en la precisión del modelo permitirá priorizar inversiones en monitoreo y cerrar las brechas más críticas.



| Sección técnica

1. Resumen



La Amazonia colombiana concentra históricamente más del 50 % de la deforestación nacional, con patrones muy definidos por ciclos de incremento y disminución. Entre 2013 y 2023, la deforestación alcanzó su máximo en 2017 (144 000 ha) y experimentó un drástico descenso hacia 2023 (44 000 ha), posiblemente vinculado a intervenciones institucionales más efectivas y cambios territoriales en la dinámica de uso del suelo. El fenómeno se concentra en especial en cinco Núcleos de Alta Deforestación (NAD): Sabanas del Yarí-Bajo Caguán, Guaviare (Marginal de la Selva), Sur del Meta, Mapiripán y Putumayo, asociados a prácticas insostenibles como praderización para acaparamiento de tierras, ganadería extensiva, infraestructura vial no planificada, cultivos ilícitos, extracción ilegal de madera y minerales. La modelación espacial del riesgo de deforestación se ha consolidado como herramienta esencial para anticipar y prevenir la pérdida forestal.

El Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam), mediante técnicas de modelación espacial como Land Change Modeler (LCM) y Dinamica EGO, ha logrado identificar variables clave explicativas, particularmente la accesibilidad y proximidad a áreas antes deforestadas. La regionalización del análisis en las subregiones Alta y Baja ha permitido obtener predicciones más precisas, con índices de validación espacial (similaridad difusa) del 63 % y el 55 %, respectivamente. Los resultados cuantitativos, a través de índices integrados de exposición ponderada (IEP) y área ponderada de riesgo, destacan

territorios críticos como el Meta, Putumayo y Caquetá, en el ámbito departamental, y La Macarena, Solano y San Vicente del Caguán, en el municipal. Los NAD Sabanas del Yarí-Bajo Caguán y Sur del Meta evidencian la mayor urgencia de intervención. Igualmente, los resguardos indígenas y las áreas protegidas presentan escenarios diferenciados que requieren estrategias específicas según la intensidad y magnitud del riesgo detectado.

El estudio enfatiza la importancia de enfoques anticipatorios, basados en información técnica robusta, para orientar la toma de decisiones territoriales, prevenir la deforestación y contribuir al cumplimiento de la meta nacional de deforestación neta cero hacia 2030.

2. Antecedentes



Patrones y dinámica de la deforestación histórica

En las dos últimas décadas, Colombia ha experimentado una pérdida superior a tres millones de hectáreas de bosques naturales (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [MADS], 2023). Entre 2013 y 2023 (figura 1), la deforestación en Colombia exhibe un ciclo de “pico-caída” bien marcado. Tras un aumento moderado de 116 000 ha en 2013 a 137 000 ha en 2014, el país experimentó un descenso puntual en 2015, seguido de un repunte pronunciado que culmina en el máximo histórico de la serie en 2017 ($\approx$ 220 000 ha). Este pico coincide con los primeros años del posconflicto, cuando la retirada de actores armados y el reacomodo

territorial facilitaron la expansión ganadera y el acaparamiento de tierras. A partir de 2018, se observa una tendencia descendente interrumpida por un ligero rebote en 2020-2021 —probablemente asociado a la reactivación económica tras la pandemia y a la reconfiguración de dinámicas ilícitas—, pero la curva vuelve a caer de forma drástica en 2022 y 2023, al situarse en unas 79 000 ha, el valor más bajo de la década (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales [Ideam], 2024).

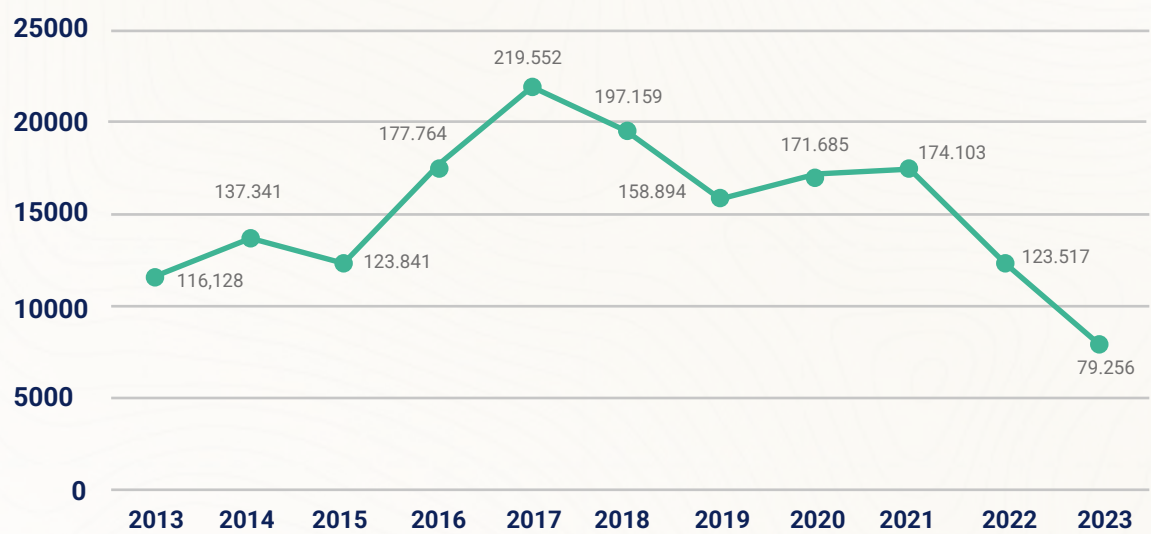


Figura 1. Deforestación nacional periodo 2013-2023. Fuente: Ideam.

En el mismo periodo (2013-2023), la Amazonia colombiana refleja una dinámica de deforestación que no solo sigue el patrón nacional, sino que en buena medida lo define (figura 2). Esta región concentra sistemáticamente más del 50 % del total nacional, lo que

convierte sus oscilaciones en un indicador clave para entender la tendencia general.

La curva amazónica también exhibe un ciclo de “pico-caída” claramente marcado, con un máximo en 2017 de más de 144 000 ha,

seguido de una disminución parcial y un repunte en 2020-2021, hasta superar nuevamente las 110 000 ha; sin embargo, a diferencia del patrón nacional, la Amazonia muestra una reducción mucho más pronunciada en los dos años más recientes: en 2022 cae a $\approx 71\,000$ ha, y en 2023 a tan solo $\approx 44\,000$ ha, el valor más bajo de toda la serie. Este descenso abrupto podría estar reflejando una mayor efectividad de las intervenciones

institucionales y comunitarias en la región, así como un cambio de foco territorial en las dinámicas de acaparamiento y transformación. Pese a ello, la Amazonia continúa siendo el epicentro de la deforestación en Colombia y su evolución será determinante para alcanzar la meta de deforestación neta cero en 2030.

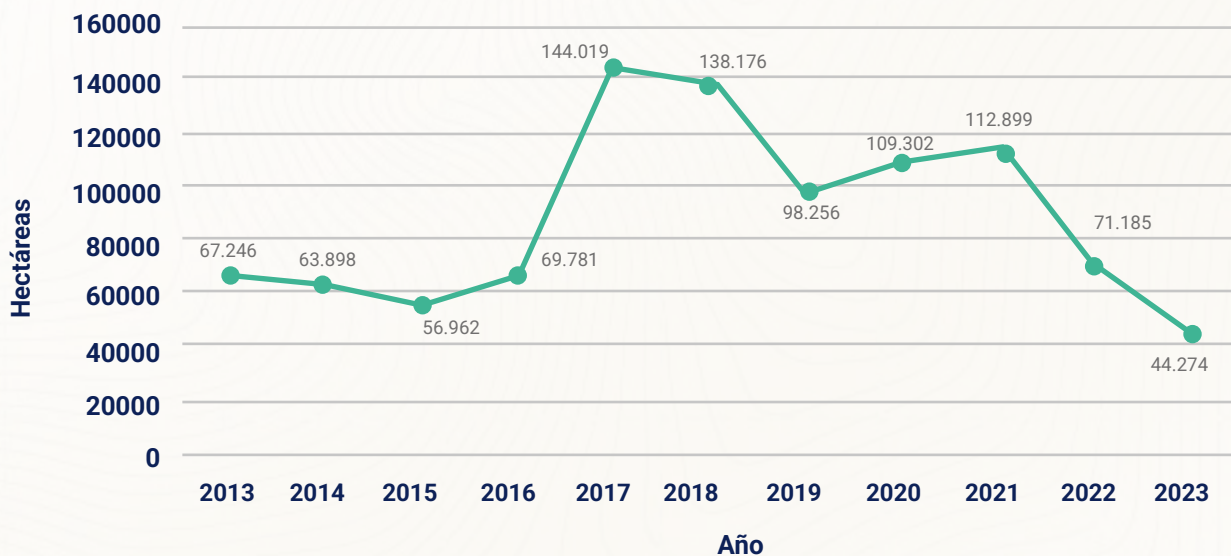
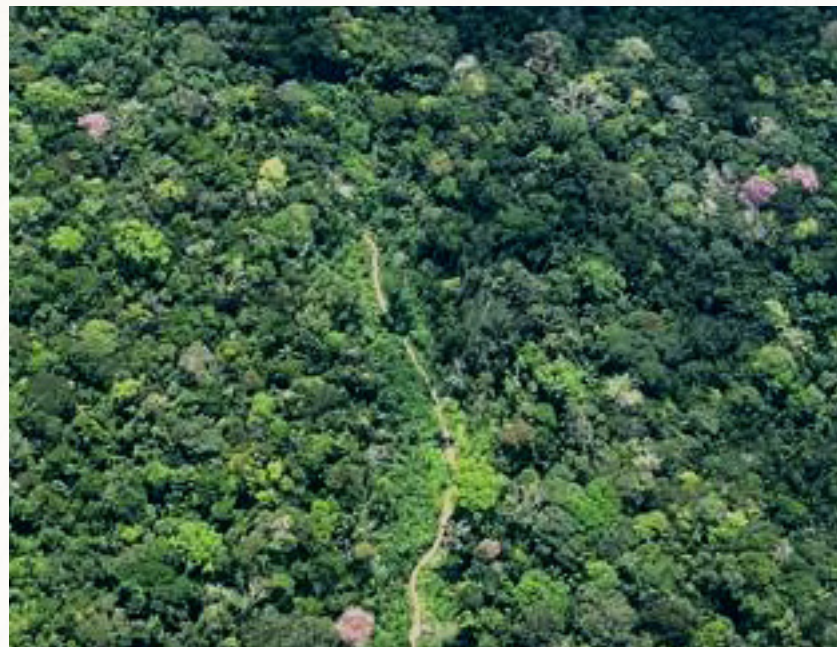


Figura 2. Deforestación histórica en la Amazonia colombiana. Periodo 2013-2023. **Fuente:** Ideam.

Históricamente, la deforestación se ha concentrado de manera relativamente constante en 15 Núcleos de Alta Deforestación (NAD), ubicados en su mayoría en la región Amazónica, pero también presentes en zonas del Pacífico, Antioquia, Nariño, Arauca, sur de Bolívar y Catatumbo en Norte de Santander. Este patrón de concentración está estrechamente vinculado con contextos territoriales marcados por agudas brechas socioeconómicas, presencia de economías ilícitas asociadas al narcotráfico y el crimen organizado, conflictos por la tenencia de la tierra y una débil gobernanza estatal (González et al., 2018) (figura 3).



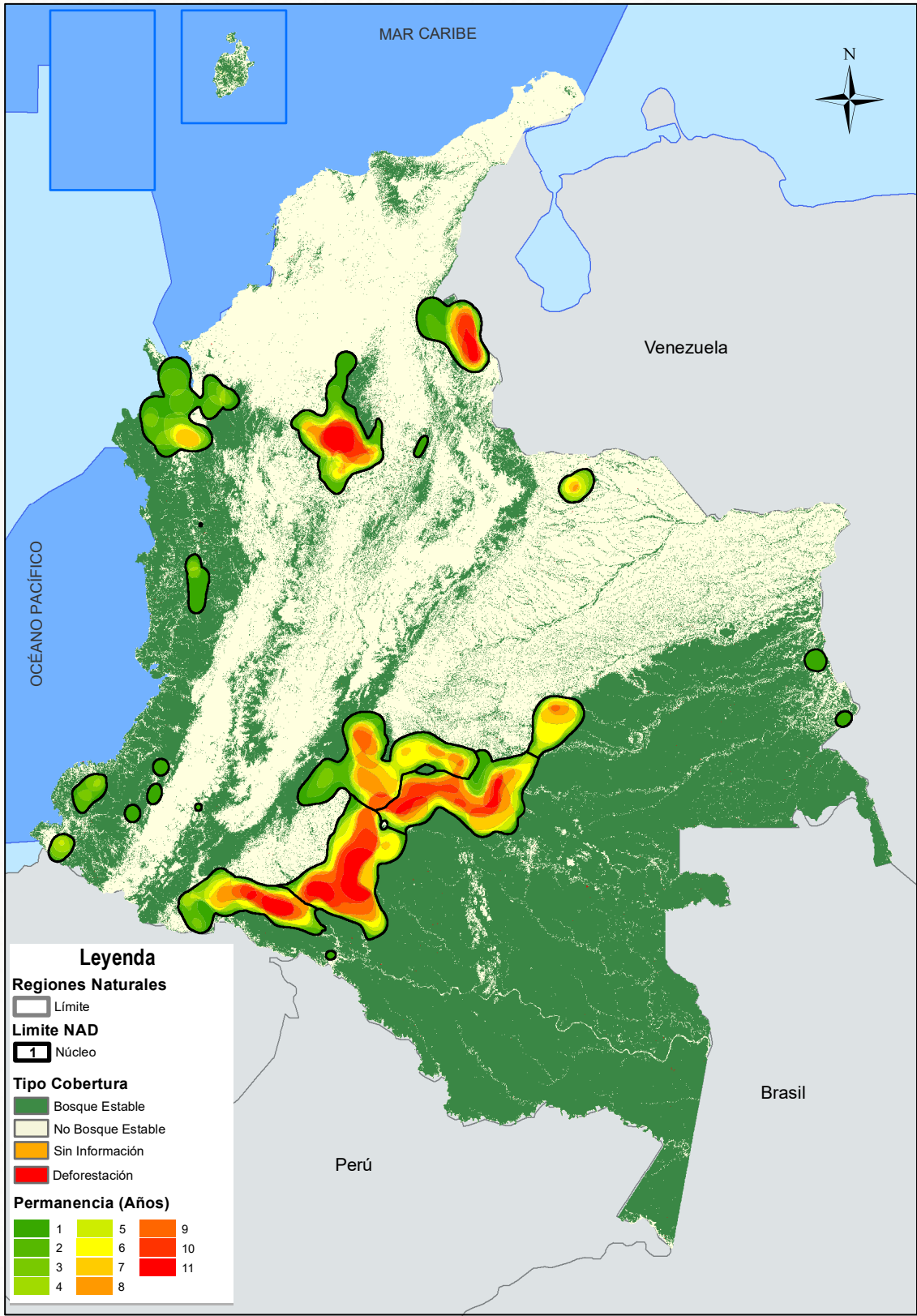


Figura 3. Núcleos de Alta Deforestación en Colombia. Periodo 2013-2023. Fuente: Ideam.

Cerca del 50 % de la deforestación en Colombia se concentra en cinco NAD en la Amazonia colombiana (figura 4):

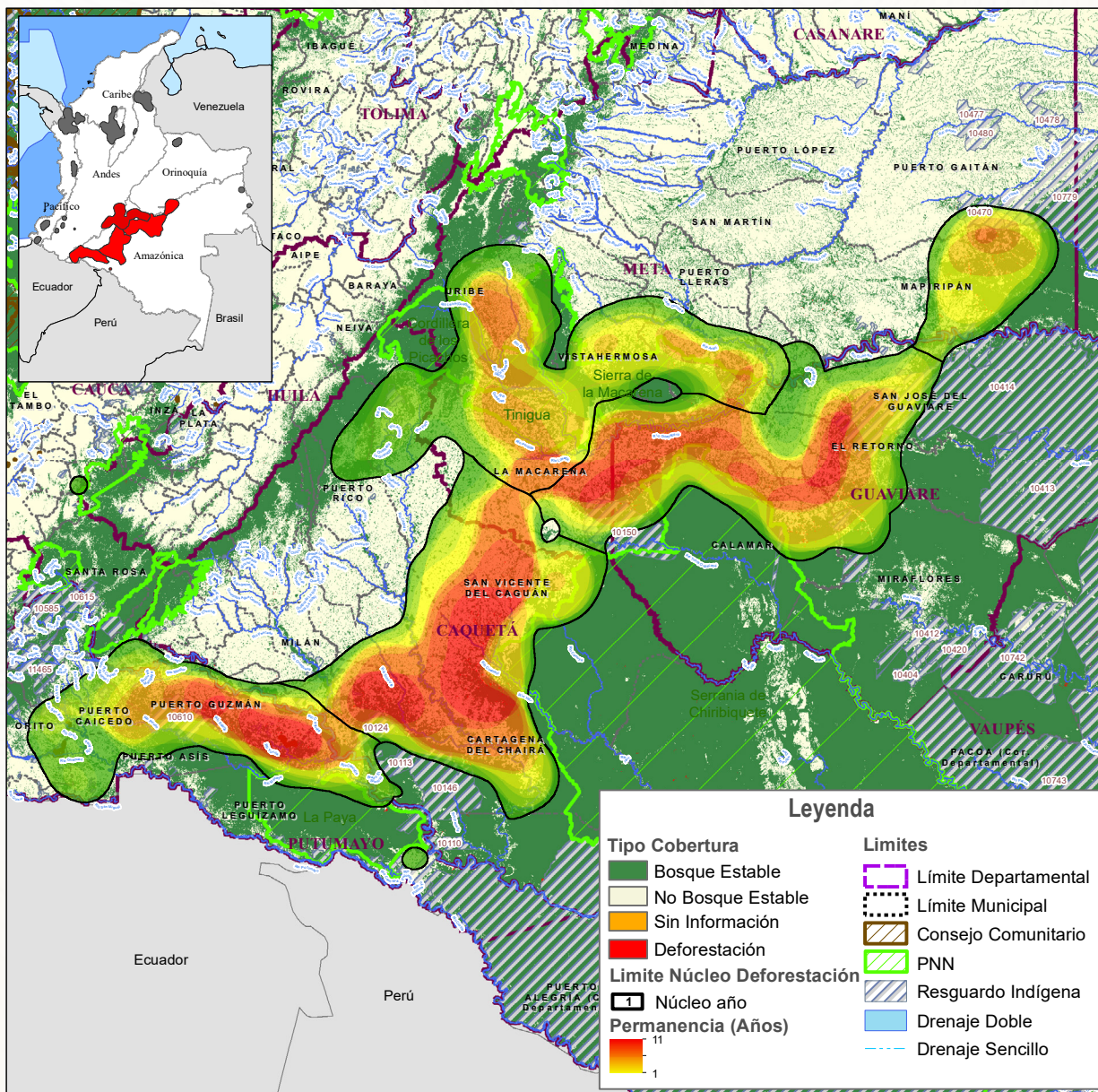


Figura 4. Núcleos de Alta Deforestación en la Amazonia colombiana. Periodo 2013-2023. **Fuente:** Ideam.

1. Sabanas del Yarí-Bajo Caguán (Caquetá): el principal núcleo de deforestación en el cual la deforestación se da principalmente por fenómenos de praderización para acaparamiento de tierras por parte de inversores que buscan la valorización de nuevas áreas

productivas o la generación de rentas, o para la expansión de prácticas ganaderas no sostenibles. Esta actividad se desarrolla en sistemas extensivos, que se amplían a medida que los suelos agotan su pobre capacidad productiva; las condiciones de los suelos y la limi-

tada accesibilidad dificultan la producción agrícola, por lo cual los agentes priorizan la producción pecuaria. Esta dinámica está fuertemente asociada a la realización de quemas que frecuentemente derivan en incendios de grandes masas boscosas, a la presencia de grupos armados ilegales y a la expansión de vías informales, incluso en el límite occidental del PNN Chiribiquete. A lo anterior, se suma la presión sobre los bosques para la extracción informal de madera con fines de autoconsumo y comercio a pequeña escala.

2. **Guaviare (Marginal de la Selva):** la expansión y consolidación de la infraestructura vial informal es el principal factor dinamizador de la deforestación en el núcleo, con especial relevancia de la vía Marginal de la Selva y sus conexiones hacia el sur, que incluyen los carretables que se internan en el extremo noroccidental del PNN Chiribiquete y atraviesan el resguardo Llanos del Yará-Yaguará II. También tienen un amplio efecto los tramos iniciales del carretable Calamar-Miraflores. Estos accesos permiten el accionar de agentes deforestadores que transforman grandes áreas de bosque en pastizales para acaparar tierras, para su uso en ganadería no sostenible o, en menor medida, para cultivar coca. Esta última actividad se concentra sobre el límite occidental de la RNN Nukak y el resguardo Nukak Makú. Los incendios derivados de quemas, así como la presencia de grupos armados ilegales y de inversionistas externos a la región son factores que también dinamizan el proceso.
3. **Sur del Meta:** afectado por la praderización a gran escala para la implemen-

tación de prácticas insostenibles de ganadería extensiva y el acaparamiento de tierras, que constituye la causa de deforestación más importante en el núcleo. Esta dinámica se da incluso en las áreas protegidas, especialmente en los PNN Tinigua y Sierra de La Macarena. El incremento reciente del hato ganadero y su movilización por vías informales que se expanden sobre los límites de los parques, y que, en algunos casos, se internan en estas áreas, contribuye en gran medida al proceso de transformación.

4. **Putumayo:** la conversión de bosques a pastos con fines de acaparamiento de tierras y expansión de prácticas ganaderas no sostenibles (con densidades de ganado muy bajas), y la proliferación de cultivos de uso ilícito sobre varios tramos de los ríos mencionados, constituyen las principales causas de la deforestación en la zona. La extracción ilícita de oro y la extracción informal de madera para uso doméstico y comercio a pequeña escala ocasionan impactos más puntuales sobre el bosque. Esta dinámica de intervención es promovida principalmente por grupos armados ilegales e inversionistas externos a la región, que afectan áreas importantes de los resguardos indígenas presentes en el núcleo (especialmente el resguardo Villa Catalina de Puerto Rosario) y el extremo noroccidental del PNN La Paya.
5. **Mapiripán (Meta):** las amenazas están relacionadas con la expansión de la ganadería extensiva (basada en la sustitución de sabanas o bosques de galería por praderas mejoradas técnicamente) y de la palma africana. En el extremo sur del núcleo, en el departamento del

Guaviare, los cultivos informales de palma africana se expanden en áreas no permitidas, lo que afecta el resguardo Barranco Colorado. En el periodo de análisis se consolidó en el núcleo un mercado informal de tierras con fines de acaparamiento, manejado por grandes

inversionistas, que presiona el avance de los pequeños productores hacia nuevas áreas de bosque. Los cultivos de uso ilícito presentan una tendencia de reducción, pero aún amenazan los bosques naturales en la zona.

Caracterización de las causas y los agentes de la deforestación en la región natural de la Amazonia

La deforestación en la región amazónica se ha consolidado en su área noroccidental, en el denominado “arco de la deforestación de la Amazonia colombiana”. En el área del arco la pérdida de bosques es ocasionada principalmente por fenómenos de praderización orientados al acaparamiento de tierras y la expansión de prácticas de ganadería extensiva. El fenómeno está presente en áreas de especial protección como reservas naturales, áreas protegidas y resguardos indígenas, con especial referencia a las afectaciones en los Parques Nacionales Naturales Tinigua, Sierra de La Macarena, Serranía de Chiribiquete, Cordillera de Los Picachos, La Paya y Reserva Nukak, y en los resguardos indígenas Llanos del Yará-Yaguara II y Nukak Makú. En varias zonas persisten los cultivos de uso ilícito y la tala ilegal para la comercialización de especies con alto valor comercial.

Todo lo anterior está dinamizado por la realización de quemas que pueden derivar en incendios forestales y la expansión de infraestructura vial no planificada, principalmente vías informales asociadas al trazado de la carretera Marginal de la Selva, las Sabanas del Yará (Caquetá) y la conexión Calamar-Miraflores (Guaviare). En la zona oriental de la región (de baja deforestación)

las afectaciones son comparativamente más reducidas y aisladas, y se relacionan con la expansión agropecuaria a pequeña escala, la extracción de madera (tala ilegal) para uso local, la extracción ilícita de minerales sobre el curso de algunos ríos importantes para la comunicación y el comercio regional, y los fenómenos biofísicos. A continuación, se describen las principales causas directas de la deforestación que operan en la región natural de la Amazonia:

1. **Praderización para acaparamiento de tierras:** corresponde al cambio de uso de la tierra de bosque natural a pastos que realizan los agentes de la deforestación para la apropiación ilegal y acumulación de tierras con ciertas adecuaciones para su uso productivo, incluso en áreas de protección especial como reservas naturales y resguardos indígenas. Esta actividad es dinamizada por la expansión de la infraestructura de transporte y la realización de quemas que durante determinadas épocas del año pueden derivar en incendios forestales.
2. **Expansión de la frontera agropecuaria por ganadería extensiva:** esta causa también implica el cambio de uso de la tierra de bosque natural a pastos, pero

en este caso el agente sí tiene como propósito el uso de las tierras para la expansión de prácticas ganaderas extensivas no sostenibles, por lo general a partir de lotes previamente transformados que agotan la baja capacidad productiva del suelo. Las condiciones de los suelos y la limitada accesibilidad dificultan la producción agrícola, por lo cual los agentes priorizan la producción pecuaria. Esta actividad es dinamizada por la expansión de la infraestructura de transporte, por la movilización y comercialización de ganado que se da incluso en áreas de especial protección, y por la realización de quemas que pueden derivar en incendios forestales.

3. Expansión de la infraestructura de transporte no planificada: el mayor impacto de esta causa es que, de forma indirecta, permite el acceso a nuevas áreas de transformación del bosque natural, lo cual dinamiza la acción de otros agentes y causas directas de la deforestación. La expansión de este tipo de infraestructura, sin el cumplimiento de los requisitos legales, también se presenta en algunas áreas protegidas y resguardos indígenas amazónicos.

4. Expansión de la frontera agropecuaria por cultivos de uso ilícito: se refiere al cambio de la cobertura de bosque para el establecimiento y la expansión de cultivos de coca, principalmente. De manera indirecta, la expansión de los cultivos de uso ilícito dinamiza a su alrededor el establecimiento de otras actividades agrícolas (lícitas) y pecuarias. En la región de la Amazonia, las mayores afectaciones se concentran en el occidente del depar-

tamento de Putumayo (especialmente en la zona de frontera internacional), en el centro-norte de Guaviare, occidente de Caquetá y sur del Meta (Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito [UNODC], 2025).

5. Extracción de madera (tala ilegal): se refiere a las actividades ilegales de extracción de madera que llevan a la pérdida del bosque natural. Estos procesos se pueden dar a pequeña escala con fines de uso local, o extracciones de mayor escala enfocadas en la comercialización regional y nacional de especies maderables de alto valor en el mercado.

6. Extracción ilícita de minerales: corresponde a la remoción de la cobertura de bosque natural para el establecimiento y la expansión de las áreas de extracción de oro de aluvión y otros minerales. En la Amazonia este proceso se da sobre el curso de algunos ríos con graves afectaciones del recurso hídrico; en algunas zonas se presenta cierta afectación de los bosques naturales, principalmente en la Reserva Nacional Natural Puinawai y en los Parques Nacionales Naturales Río Puré, Yaigojé-Apaporis y Cahuinarí (UNODC, 2022).

7. Factores biofísicos: fenómenos naturales que en determinadas zonas y épocas del año generan deforestación, específicamente por chagras de viento¹ y remociones en masa (deslizamientos). Estos fenómenos son cada vez más frecuentes en las áreas de bosque denso amazónico que presentan bajos niveles de deforestación por actividades antrópicas. Generalmente, y por las con-

¹ Corresponde al volcamiento o derribamiento masivo de árboles por efecto de vientos de alta intensidad que pueden provocar grandes parches de deforestación (Ideam y MADS, 2023).

diciones de conservación de las áreas afectadas, el ecosistema se recupera del disturbio ocasionado.

De acuerdo con la anterior clasificación de las causas directas, en la tabla 1 se definen y describen los principales agentes de la deforestación que operan en la Amazonia colombiana.

Tabla 1. Descripción de los principales agentes de la deforestación en la región natural de la Amazonia, según las causas directas asociadas

Causa directa asociada	Denominación de los principales agentes	Descripción general
Praderización para acaparamiento de tierras.	Praderizador.	Son actores que fomentan la expansión y consolidación de grandes zonas de pastos. Tienden a ser unos inversionistas ausentes de las zonas intervenidas, que usan su capital para invertir en la transformación del bosque mediante acuerdos de “avalúo” establecidos con productores locales. El interés económico fundamental de estos agentes no es la producción primaria, sino la acumulación de tierras a través de la titulación de predios previamente deforestados.
Expansión de la frontera agropecuaria por ganadería extensiva.	Productor pecuario de gran escala.	Corresponden generalmente a agentes privados que se dedican a la producción ganadera como principal actividad económica. Esta se desarrolla usualmente en sistemas extensivos, con bajos componentes tecnológicos y tamaños de predio variables. En este modelo de producción los animales pastorean libremente en áreas de gran tamaño, que, en la mayoría de los casos, se establecen sobre coberturas boscosas y otras áreas naturales.
Expansión de la infraestructura de transporte no planificada.	Constructor informal de infraestructura de transporte.	Corresponden a personas u organizaciones informales que se dedican a la creación o el mejoramiento de accesos terrestres no oficiales en las áreas rurales (carreteables, trochas). Las motivaciones para construir un acceso informal van desde mejorar las condiciones socioeconómicas de una comunidad o un privado, hasta la movilización de bienes o personal según diversos intereses.

Causa directa asociada	Denominación de los principales agentes	Descripción general
Expansión de la frontera agropecuaria por cultivos de uso ilícito.	Productor agrícola de coca.	Para estos agentes los bosques son considerados como estratégicos al ser una cobertura que camufla la actividad ilícita; sin embargo, al establecer el cultivo, los productores suelen remover la cobertura boscosa, creando parches dispersos que perforan y eventualmente fragmentan los bosques, lo cual permite la expansión de la frontera agropecuaria y presionan el desplazamiento de la actividad a zonas menos intervenidas.
Extracción de madera (tala ilegal).	Extractor ilícito de madera en diferentes escalas.	Son actores que se dedican a la extracción de productos maderables para la venta, sin contar con los permisos necesarios para la actividad extractiva. Los ingresos económicos aportan ya sea al sostenimiento del núcleo familiar del agente o a la acumulación de riqueza producto de la venta de la madera en mercados regionales, nacionales o internacionales.
Extracción ilícita de minerales.	Extractor ilícito de minerales.	Estos agentes tienen como fuente principal de ingresos económicos la extracción de distintos recursos minerales no renovables, principalmente oro, en áreas aisladas del oriente de la Amazonia. Usualmente son de pequeña o mediana escala y utilizan maquinaria para la extracción, lo que aumenta su impacto sobre los recursos hídricos y los bosques.
Factores biofísicos.	N/A	N/A

Fuente: adaptado de González et al. (2018).

Modelación de la transformación del bosque en Colombia

Comprender cómo, dónde y por qué se transformarán los bosques colombianos —y en particular los amazónicos— es crucial para la planificación territorial, la mitigación del cambio climático y la conservación

de la biodiversidad. Desde comienzos de los años 2000, la investigación ha utilizado modelos de cambio de uso y cobertura del suelo (LUCC) que integran información satelital, variables biofísicas y socioeconómicas,

y técnicas estadísticas o de aprendizaje automático, con el fin de describir patrones históricos y proyectar con mayor precisión los escenarios futuros.

Las primeras aplicaciones globales se basaron en métodos como la regresión logística, los pesos de evidencia y las cadenas de Markov acopladas con autómatas celulares. Estos métodos tradicionales sentaron las bases para las primeras aplicaciones de modelación en Colombia. A escala nacional, un punto de inflexión lo marcaron los trabajos de Etter *et al.* (2006), quienes demostraron mediante regresiones logísticas estratificadas y árboles de decisión que la accesibilidad (distancia a carreteras y centros poblados) explica buena parte del riesgo de deforestación y que esa relación varía sustancialmente entre regiones. Ese mismo año, Armenteras *et al.* (2006) caracterizaron la deforestación amazónica, señalaron los cultivos ilícitos y la ganadería extensiva como motores dominantes, y subrayaron que la tala no se limita a la red vial formal, sino que sigue patrones de colonización a lo largo de ríos y veredas.

Durante la década siguiente, el Ideam y distintos grupos académicos consolidaron la modelación espacial en el país. En 2011, González *et al.* (2011) presentaron el primer balance nacional que combinó modelos logísticos y pesos de evidencia para cuantificar la influencia de la accesibilidad, la expansión agropecuaria, la minería ilegal y los cultivos ilícitos, al tiempo que revelaron el papel de la estructura de tenencia y la debilidad institucional.

Por su parte, Armenteras *et al.* (2013) profundizaron las diferencias regionales y confirmaron que los determinantes de la deforestación no son homogéneos entre

Amazonia, Andes y Orinoquia. En 2017, González *et al.* (2017) aplicaron en el bioma amazónico la plataforma Dinamica EGO que integra cadenas de Markov con redes neuronales y produjeron los primeros mapas de riesgo que priorizan Caquetá, Putumayo, Guaviare y Meta, enfatizando la urgencia de mantener la conectividad Andes-Amazonia. Ese mismo año, Gómez Ossa y Botero Fernández (2017) usaron redes neuronales para evaluar el impacto potencial de dos carreteras proyectadas en Antioquia y mostraron cómo la infraestructura vial puede detonar nuevos frentes de tala.

La firma del acuerdo de paz entre el Gobierno y las FARC en 2016 abrió un nuevo capítulo. Estudios de Clerici *et al.* (2018; 2020) reportaron un aumento abrupto de la deforestación en parques nacionales y corredores ecológicos inmediatamente después del cese del conflicto, mientras que Murillo Sandoval *et al.* (2021) emplearon un modelo empírico de diferencia en diferencia (DiD) para analizar cómo los eventos del conflicto afectaron la cobertura forestal, los bosques secundarios y la agricultura.

Ganzenmüller *et al.* (2022) utilizaron XGBoost y clústeres temporales para clasificar los municipios según su dinámica de deforestación antes y después de la firma del acuerdo de paz, destacando el cultivo de coca, la ganadería y el tamaño municipal como los impulsores más constantes. En paralelo, Camacho Peña (2022) proyectó tres escenarios al 2030 para el Guaviare mediante regresión logística y simulación “soft”, lo cual confirmó que la cercanía a vías y la expansión ganadera seguirán configurando la pérdida de bosque.

Recientemente, estos enfoques clásicos se han enriquecido con Modelos Aditivos Generalizados y redes neuronales profun-

das, herramientas que tienen el potencial de mejorar la precisión espaciotemporal de las proyecciones (Jamshed *et al.*, 2022; Sales *et al.*, 2023) y que están empezando a integrarse a estudios nacionales. Los ejercicios prospectivos recientes han extendido el horizonte temporal.

A escala nacional, González-González *et al.* (2021) proyectaron hasta 2050 escenarios que van desde la tendencia actual hasta uno de gobernanza forestal fortalecida, al tanto que Agudelo *et al.* (2023) anticiparon para la Amazonia que, en un escenario extractivista, podrían perderse hasta 4,3 millones de hectáreas de bosque antes de 2040. En la cuenca amazónica, la Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG, 2022) alertó sobre la posibilidad de perder 23,7 millones de hectáreas en 2025 si continúan las tendencias de ganadería extensiva y economías ilegales.

A nivel institucional, el Ideam, a través de la operación del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono, hace actualizaciones periódicas del mapa de riesgo de deforestación de la Amazonia colombiana y avanza en la modelación del riesgo en otras regionales

naturales del país. En conjunto, la literatura colombiana muestra una evolución desde modelos estadísticos básicos hasta técnicas de aprendizaje automático y simulaciones espaciales complejas. La accesibilidad se mantiene como el detonante espacial más consistente, mientras que factores socioeconómicos —ganadería extensiva, cultivos ilícitos y especulación de tierras— ganan peso en el escenario sociopolítico actual.

No obstante, muchos de los ejercicios de modelación disponibles carecen de procesos de validación explícitos que permitan evaluar su precisión o comparabilidad, y no siempre presentan sus resultados en formatos accesibles para los tomadores de decisiones. En este contexto, el presente estudio no solo actualiza el mapa de riesgo de deforestación en la Amazonia colombiana, con validación explícita y enfoque subregional, sino que además incorpora una primera aproximación a un índice de riesgo agregado, orientado a facilitar la priorización territorial mediante escalafones comparables entre unidades político-administrativas y zonas estratégicas de conservación.

3. Marco Conceptual



¿Qué es el riesgo de deforestación?

Desde una perspectiva técnica, el riesgo de deforestación se refiere a la probabilidad, espacialmente explícita, de que áreas específicas de un territorio pierdan su cobertura original de bosque debido a cambios hacia otros usos del suelo, como agricultura, ganadería o actividades mineras. Este riesgo está condicionado por diversas variables explicativas, también denominadas *drivers*, tales como la accesibilidad (por ejemplo, proximidad a vías o áreas previamente intervenidas), la ocurrencia histórica de deforestación y otras condiciones socioeconómicas, culturales, tecnológicas y ambientales (Romero, 2014).

Los mapas de riesgo de deforestación son herramientas predictivas generadas mediante técnicas de modelación espacial como por ejemplo la regresión logística, las redes neuronales o autómatas celulares. Estos mapas identifican y priorizan áreas donde existe una alta probabilidad de transformación del bosque, lo cual facilita la focalización estratégica de acciones preventivas y de control (Camacho Peña, 2022).

Técnicas y enfoques de modelación espacial

La modelación espacial del riesgo de deforestación es una metodología clave para entender cómo y por qué ocurren cambios en el territorio. Permite analizar la relación entre la deforestación y un conjunto amplio de variables espaciales, biofísicas, sociales y económicas, identificando patrones y dinámicas que explican el fenómeno. La incorporación de datos geográficos y técnicas estadísticas o computacionales facilita la proyección de escenarios futuros y orienta acciones concretas en materia de planificación territorial y conservación (Lopez et al., 2019).

Entre las principales técnicas utilizadas en el mundo destacan:

- **Análisis de regresión logística (LRA)** La regresión logística es ampliamente utilizada por su capacidad para identificar la relación estadística entre variables explicativas (como tipo de cobertura, distancia a vías o factores socioeconómi-

cos) y la ocurrencia de la deforestación, representada como una variable binaria (ocurre o no ocurre). Este método genera mapas probabilísticos que visualizan claramente las zonas más vulnerables. Es en especial efectivo cuando se dispone de variables espaciales estables y datos con buena resolución, aunque puede presentar limitaciones cuando la información es escasa o demasiado agregada (Camacho Peña, 2022).

- **Autómatas celulares (CA)** Son algoritmos espaciales que simulan cambios en el territorio a lo largo del tiempo, basándose en patrones espaciales específicos y reglas predefinidas. Herramientas como TerrSet y Dinamica EGO permiten aplicar estos algoritmos para modelar dinámicas como la expansión continua de áreas deforestadas. Esta técnica es particularmente útil para simular procesos espaciales en los cuales el cambio se

produce adyacente a áreas previamente afectadas, lo que facilita la predicción espacial detallada del fenómeno (Leija et al., 2021).

- **Pesos de evidencia (weights of evidence)** Este método permite cuantificar la influencia de distintas variables sobre los cambios en el uso del suelo, específicamente en procesos como la deforestación. Integrado en plataformas como Dinamica EGO y TerrSet, analiza estadísticamente eventos históricos para asignar pesos relativos positivos o negativos a cada factor analizado. Su aplicación complementa y mejora la precisión de otros modelos predictivos, lo cual optimiza la asignación espacial de cambios (Silva et al., 2017).

- **Redes neuronales artificiales (ANN)**

Son técnicas computacionales avanzadas que posibilitan modelar relaciones complejas y no lineales entre la deforestación y múltiples variables explicativas. Se basan en el aprendizaje automático (*machine learning*) y se destacan por su capacidad para generalizar patrones espaciales complejos mediante la identificación automática de interacciones y asociaciones entre múltiples factores. Su flexibilidad y potencia predictiva las hacen especialmente adecuadas cuando se dispone de grandes volúmenes de datos espaciales y temporales; sin embargo, requieren considerables recursos computacionales y datos robustos para obtener resultados óptimos (Gómez y Botero, 2014).

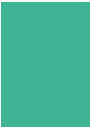
El rol de los modelos de cambio en el uso y la cobertura del suelo (LUCC)

Los modelos de cambio en el uso y la cobertura del suelo (LUCC, por sus siglas en inglés) desempeñan un papel crucial en la identificación y gestión del riesgo de deforestación. Estos modelos proporcionan información clave para las decisiones de planificación territorial y ambiental, especialmente en contextos de incertidumbre respecto a los impactos futuros de las intervenciones humanas y las políticas adoptadas.

A escala global, la modelación LUCC se reconoce por su capacidad para representar explícitamente la transformación de ecosistemas naturales, integrando variables biofísicas y socioeconómicas (Achard y House, 2015; Lambin et al., 2003). En Colombia, donde la deforestación es un fenómeno multifactorial asociado con presiones socioeconómicas,

cambios en la gobernanza territorial y patrones históricos de ocupación, los avances metodológicos en la modelación espacial proporcionan herramientas esenciales para predecir escenarios futuros y diseñar estrategias de mitigación adaptadas a condiciones específicas locales.

Los modelos LUCC generalmente siguen una secuencia de seis pasos fundamentales: (1) estimar la cantidad total de territorio que cambiará, (2) identificar y mapear los procesos involucrados en los cambios, (3) generar mapas probabilísticos de estos cambios, (4) asignar espacialmente las transformaciones esperadas, (5) validar la precisión de la simulación y (6) construir escenarios futuros posibles (De Freitas et al., 2018).



Importancia de la modelación espacial para la gestión de la deforestación en Colombia

La modelación espacial y sus mapas resultantes son fundamentales para orientar estratégicamente acciones concretas de conservación, restauración y control de la deforestación, especialmente en regiones prioritarias como la Amazonia colombiana. Este enfoque permite considerar dinámicas históricas y proyectar vulnerabilidades futuras, así como aportar información valiosa y transparente para la planificación territorial y la toma de decisiones ambientales.

En el ámbito institucional, disponer de información actualizada y precisa facilita el monitoreo, mejora la gestión pública y fortalece la transparencia y participación comunitaria, lo que impulsa capacidades locales y favorece la corresponsabilidad social en la conservación de los bosques del país.

4. Metodología



Área de estudio

Corresponde a la región de la Amazonia colombiana, que abarca una extensa zona del sur y sureste del país, cubriendo departamentos clave como Caquetá, Guaviare, Putumayo, Guainía, Vaupés y Amazonas, con límites que se extienden hasta las fronteras internacionales con Ecuador, Perú, Brasil y Venezuela. Para el propósito de este estudio, se subdividió en dos subregiones².

La subregión Alta incluye principalmente los departamentos de Caquetá, Putumayo y Guaviare, caracterizados por ser zonas de transición entre la Amazonia y la región Andina, con una alta presión por actividades agropecuarias y procesos de deforestación activa; la subregión Baja comprende los departamentos de Amazonas, Vaupés y Guainía, territorios dominados por selva húmeda tropical, baja densidad poblacional y una presencia significativa de comunidades indígenas y áreas de conservación.

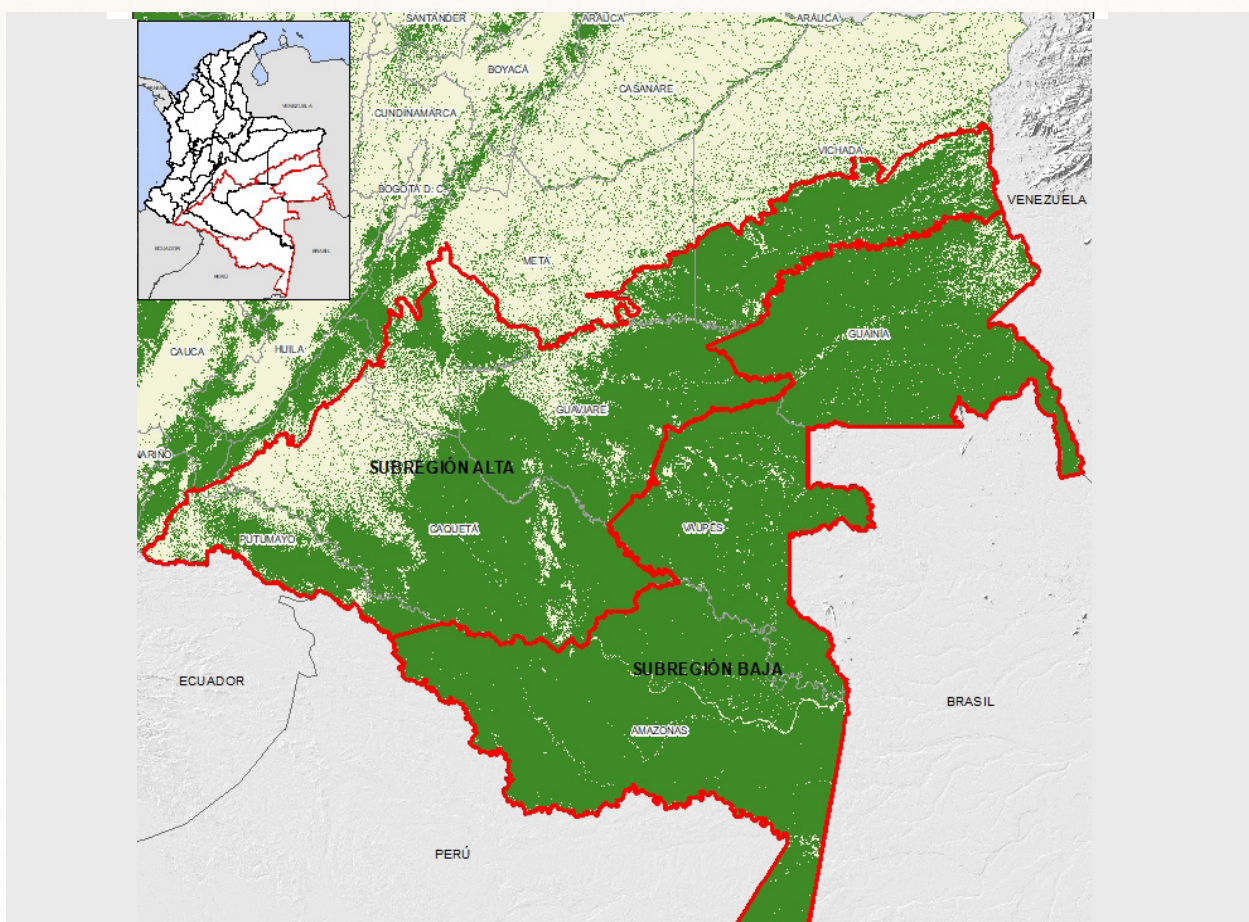


Figura 5. Área de modelación: subregiones Alta y Baja de la Amazonia colombiana. **Fuente:** Ideam.

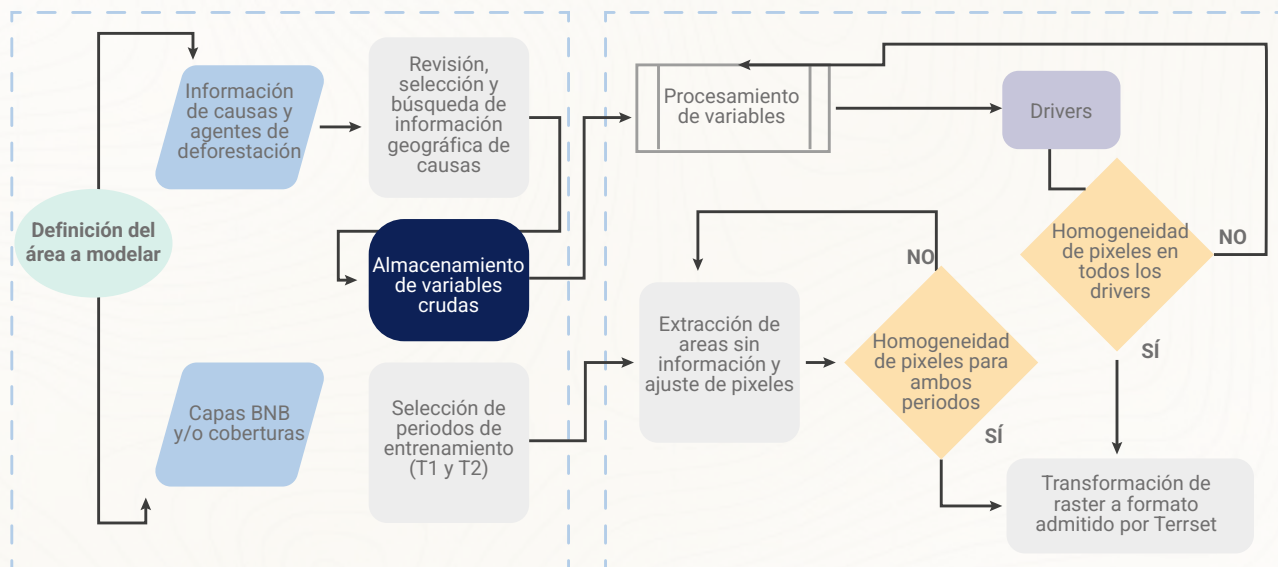
² A cada subregión se aplicó un buffer de 40 kilómetros con el objetivo de capturar las dinámicas de deforestación más allá de su límite.

Etapas de la modelación

El proceso metodológico utilizado en las pruebas de modelación para identificar el riesgo de deforestación se basa en un enfoque iterativo y adaptativo, en el cual múltiples escenarios se evalúan variando datos de entrenamiento, selección de variables, ajustes de valores de Markov y tipos de modelos predictivos. El propósito final es obtener el modelo que mejor representa las tendencias y dinámicas del cambio del territorio, validado con información real de

periodos conocidos. Este flujo de trabajo se replica de forma independiente para la región natural completa (modelo regional completo) y para las dos subregiones que conforman el área de estudio (Alta y Baja).

La figura 6 muestra de manera esquemática el proceso metodológico seguido en cada una de las pruebas realizadas utilizando TerrSet y Dinamica EGO.



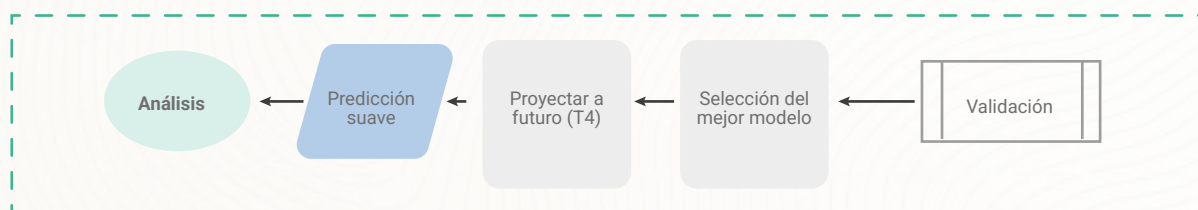


Figura 6. Esquema metodológico para la modelación del riesgo de deforestación. Fuente: Ideam.

La secuencia detallada de pasos en este proceso incluye:

- 1. Selección de periodos de entrenamiento:** se utilizan datos históricos del Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC-Ideam), disponibles anualmente desde 2012, clasificados en capas ráster de “Bosque” y “No Bosque” con resolución espacial original de 30 metros. Para cada prueba se definen dos cortes de entrenamiento (T1 y T2) y un tercer corte (T3) reservado exclusivamente para la validación independiente del modelo.
- 2. Ajuste y homogenización de datos:** las capas originales del Ideam incluyen categorías de Bosque (B), No Bosque (NB) y Áreas sin Información (SI). Estas últimas se eliminan de todos los periodos de entrenamiento y validación del modelo para evitar sesgos. Los píxeles originales (30 x 30 metros) se agregan a 90 x 90 metros para facilitar la modelación y asegurar compatibilidad entre capas.
- 3. Identificación y revisión de causas y agentes:** se identifican y priorizan factores clave relacionados con la deforestación (*drivers* directos e indirectos), incluidos aspectos naturales, antrópicos, sociales y económicos.
- 4. Búsqueda y recopilación de información geográfica:** se recolecta información específica de fuentes oficiales y geoportales públicos (IGAC, SIAC e Ideam, entre otros), lo cual garantiza que los datos sean confiables y actualizados.
- 5. Almacenamiento organizado de variables:** se crea una base de datos geográfica organizada con las variables recolectadas, ajustadas al sistema de coordenadas UTM para homogeneidad y facilidad en el procesamiento.
- 6. Procesamiento de variables:** incluye la generación y el análisis de dos tipos principales de variables:
- 7. Motores o drivers directos:** expansión agrícola, desarrollo de infraestructura y extracción de recursos.
- 8. Motores o drivers indirectos:** factores socioeconómicos, institucionales y políticos.
- 9. Validación de homogeneidad y formatos de datos:** se verifica que todas las variables procesadas tengan compatibilidad espacial (filas, columnas y resolución). Los archivos se exportan desde ArcGIS al formato .img (ERDAS) y luego al formato .rst admitido por TerrSet.
- 10. Análisis de cambio y definición de transiciones:** se analizan los cambios observados entre periodos seleccionados (T1 y T2), priorizando la pérdida de bosque. Se genera un mapa de transición y se

calcula la distancia euclidiana a las áreas de cambio, fundamental para la predicción espacial.

11. Integración y ponderación de variables (SimWeight): se seleccionan variables según su relevancia predictiva, utilizando el modelo SimWeight para asignarles un peso (0-1) en función de su relación con el cambio de cobertura observado.

12. Generación y validación del modelo final: con las variables ponderadas se ejecuta el submodelo y se generan mapas ráster con la probabilidad de cambio futuro. La validación se realiza

comparando la simulación del periodo T3 contra la cobertura observada real, y mediante el método de similaridad difusa (Dinamica EGO), evaluando la precisión del modelo frente a datos reales por medio de funciones de decaimiento constante y exponencial (Soares-Filho et al., 2011).

Este proceso se repite y ajusta continuamente hasta obtener un modelo que refleje de modo adecuado las dinámicas locales y regionales del riesgo de deforestación, además de proporcionar información confiable y pertinente para apoyar decisiones de conservación y planificación territorial.

Construcción de índices integrados de riesgo

Con el fin de jerarquizar unidades territoriales según su nivel de riesgo de deforestación, se calcularon dos métricas complementarias que combinan la exposición al riesgo (en términos de proporción y superficie) con un sistema de pesos ordinales asignados a las clases de riesgo predicho por el modelo (alto, medio, bajo). Ambos índices se usan de forma complementaria: el IEP para identificar intensidad crítica y el área ponderada para estimar magnitud operativa. Su visualización conjunta permite clasificar los territorios en cuadrantes de priorización.

Índice de Exposición Ponderada (IEP)

Resume la intensidad relativa del riesgo en el bosque de cada unidad territorial. Se calcula como:

$$IEP_u = \frac{3 \cdot P_{alto} + 2 \cdot P_{medio} + 1 \cdot P_{bajo}}{100}$$

En la cual:

- ***Palto*, *Pmedio*, *Pbajo*** son los porcentajes de bosque de la unidad territorial clasificados en cada clase de riesgo, reescalados al total del bosque existente, incluido el riesgo nulo.
- Los pesos (3, 2, 1) reflejan la mayor urgencia asociada al riesgo alto.

El IEP varía entre 1 (todo el bosque en riesgo bajo) y 3 (todo en riesgo alto), y ayuda a identificar territorios con una alta concentración de riesgo, independientemente de su superficie.

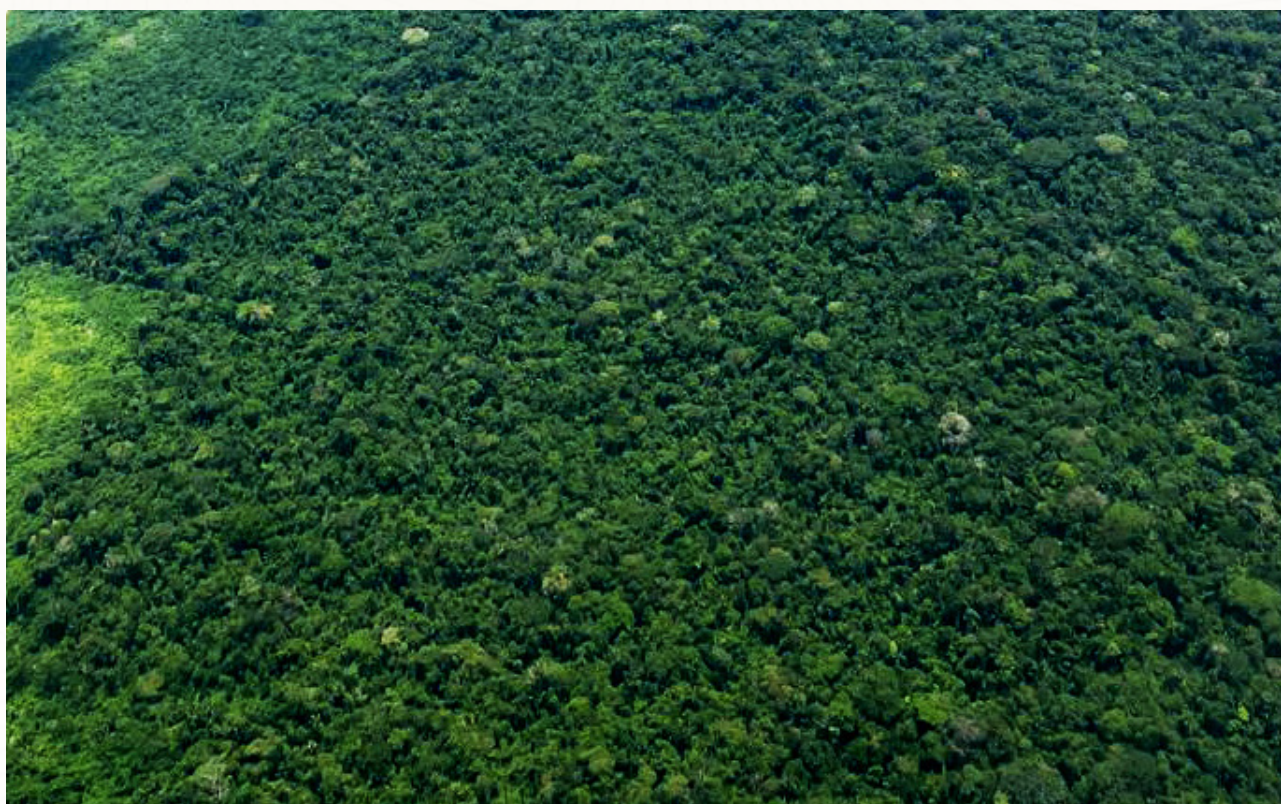
Área ponderada de riesgo

Esta métrica estima la magnitud absoluta del riesgo, incorporando tanto la proporción como la superficie total de bosque por unidad. Se calcula como:

$$\text{Área Ponderada}_u(\text{haEq}) = 3 \cdot A_{\text{alto}} + 2 \cdot A_{\text{medio}} + 1 \cdot A_{\text{bajo}}$$

En la que:

AClase corresponde al área de bosque (en hectáreas) de cada clase de riesgo. Esta fórmula permite estimar cuántas hectáreas requieren atención prioritaria según la intensidad del riesgo³.



³ Las hectáreas equivalentes (haEq) son una métrica que combina tanto el área real afectada por distintas categorías de riesgo de deforestación (alto, medio, bajo) como la intensidad o severidad de ese riesgo.

5. Resultados y discusión



Diagnóstico de variables

Se llevó a cabo un diagnóstico detallado y riguroso para la identificación y selección de variables, sustentado en una revisión crítica y exhaustiva de documentos técnicos previamente desarrollados por el equipo especializado en causas y agentes de deforestación. Este proceso incluyó análisis profundos sobre tendencias históricas, patrones espaciales, escenarios prospectivos y métodos avanzados de modelación espacial del proceso de deforestación, utilizando datos oficiales actualizados de entidades como Ideam, IGAC, ANM, ANH, DANE, UPRA, UNODC y PNN (tabla 2).

El diagnóstico permitió identificar un conjunto robusto de 43 variables, seleccionadas con base en su relevancia temática, disponibilidad geoespacial y pertinencia técnica para representar procesos asociados a la transformación del bosque natural

de la Amazonia. El 58 % (25 variables) correspondió a factores de accesibilidad y presión espacial, incluidas distancias a coberturas (bosque y pastos), infraestructuras (vías, puertos, aeropuertos y centros de comercialización) y elementos territoriales sensibles (resguardos indígenas, áreas protegidas, puntos de calor, uso ilícito). El 21 % (9 variables) correspondió a factores biofísicos, como pendientes, elevación, temperatura, precipitación, humedad relativa y tipos de suelo, esenciales para representar restricciones naturales al cambio de uso del suelo. El 21 % restante (9 variables) incluyó variables socioeconómicas, institucionales y de conflicto, tales como densidad poblacional, migración, pobreza, desempeño fiscal, formalización de tierras, indicadores de conflicto y presencia de actividades legales e ilegales como minería, agricultura intensiva y cultivos ilícitos.

Tabla 2. Listado de variables geoespaciales evaluadas en el diagnóstico inicial para la modelación del riesgo de deforestación

Variable	Insumo fuente	Fuente
Área de frontera agrícola departamental	Capa de frontera agrícola 2018	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA)
Densidad poblacional por municipio	Base de datos con información municipal	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
Distancia a aeropuertos	Cartografía base 1:100000 año 2024	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Distancia a áreas deforestadas	Capas de cambio de cobertura forestal serie histórica	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) - SMByC

Variable	Insumo fuente	Fuente
Distancia a áreas protegidas	Capa RUNAP 2023	Registro único de áreas protegidas - Parques Nacionales Naturales
Distancia a borde de bosque	Capa de bosque no bosque años 2016 y 2015	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Distancia a centroides de bosque	Capa de bosque no bosque	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Distancia a centros de comercialización	Cartografía base 1:100000 año 2023	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Distancia a pozos hidrocarburo	Capa de pozo hidrocarburo	Agencia Nacional de Hidrocarburos (ANH)
Distancia a predios privados	Base de datos geográfica catastral 2018	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Distancia a predios públicos	Base de datos geográfica catastral 2018	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Distancia a principales rutas marítimas y fluviales	Cartografía base 1:100000 año 2023	Observatorio de Drogas de Colombia
Distancia a puntos de calor identificados en el periodo de entrenamiento	Capa de punto de calor periodos 2015-2020 y 2016-2020	NASA-Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Distancia a resguardos	Capa de resguardos indígenas 2023	Agencia Nacional de Tierras (ANT)
Distancia asentamientos	Capa de centros poblados 2018	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
Distancia euclidiana a accesos terrestres pavimentados y no pavimentados	Capa de accesos terrestres 2017	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Variable	Insumo fuente	Fuente
Distancia euclidiana a áreas de mayor densidad de uso ilícito	Grilla de densidad de cultivos de uso ilícito 2018	Sistema Integrado de Monitoreo de Cultivos Ilícitos (SIMCI)
Distancia euclidiana a áreas deforestadas entre el periodo de entrenamiento	Capa de bosque no bosque años: 2015, 2016, 2020, 2023	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Distancia euclidiana a asentamientos	Cartografía base 1:100000 año 2023	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
Distancia euclidiana a drenajes dobles	Cartografía base 1:100000 año 2023	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Distancia euclidiana a pastos para el periodo de entrenamiento	Coberturas de la tierra 100K año 2020	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Distancia euclidiana a puertos	Cartografía base 1:100000 año 2023	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Distancia euclidiana a títulos mineros	Capa de títulos mineros 2014	Agencia Nacional de Minería (ANM)
Modelo digital de elevación DEM	Modelo digital de elevación. SRTM 30 metros. Colombia. Año 2011	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Ráster categórico de clima	Capa de clasificación climática Caldas-Lang 2014	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Ráster categórico con datos de temperatura	Capa de tendencia de la temperatura media periodo 1971-2000, año 2010	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)

Variable	Insumo fuente	Fuente
Ráster categórico de EVOA	Datos municipales de la evidencia de explotación de oro de aluvión en Colombia 2021	Oficina de Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC)
Ráster categórico de Índice de desempeño fiscal-municipal	Índice de Desempeño Fiscal (IDF) de la vigencia 2023	Departamento Nacional de Planeación (DNP)
Ráster categórico de índice de pobreza multidimensional	Índice de pobreza multidimensional por departamento	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
Ráster categórico de tipo de suelos	Capa de clasificación de las tierras por su vocación de uso a escala 1:100.000, 2013	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Ráster categórico víctimas del conflicto armado	Víctimas del conflicto armado	Unidad para las Víctimas
Ráster con información. Permisos de aprovechamiento por departamento	Datos de aprovechamiento forestal por departamento	Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (ASOCARS)
Ráster de pendientes	Modelo digital de elevación. SRTM 30 metros. Colombia. Año 2011	Elaboración propia a partir de Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)
Ráster de tipos de bosque	Coberturas de la tierra 100K Año 2020	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Ráster departamental de migración interna	Tasa de migración departamental 2014	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE)
Ráster departamental tamaño de predios	Distribución de la tierra en Colombia a escala departamental 2018	Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC)

Variable	Insumo fuente	Fuente
Ráster regional datos de precipitación	Capa de precipitación total anual, promedio multianual 1970-2000, año 2010	Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam)
Ráster unidades físicas homogéneas	Unidades físicas homogéneas en Colombia para el cálculo de la Unidad Agrícola Familiar 2023	Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA)

Fuente: elaboración propia.

Parametrización de los modelos

Modelo regional completo

Se exploraron inicialmente múltiples configuraciones del modelo regional completo, probando distintos pares temporales de entrenamiento (T1-T2) entre 2015 y 2021, y validaciones proyectadas a 2022 y 2023. Estas pruebas emplearon diversas combinaciones de entradas, pero presentaron limitaciones críticas en términos de desempeño: los tiempos de procesamiento resultaron excesivos y los niveles de precisión, medidos mediante similaridad difusa, se mantuvieron por debajo del umbral de aceptabilidad técnica (< 45 %). Dado el bajo ajuste predictivo observado, y considerando además la alta heterogeneidad espacial de los procesos de transformación en el bioma amazónico, se descartó esta aproximación

y se optó por una estrategia de modelación regionalizada basada en subregiones.

Modelos subregionales

Considerando la heterogeneidad en los procesos de transformación del territorio en el bioma amazónico, se definió una regionalización funcional del área de estudio en dos grandes zonas: subregión Alta y subregión Baja. Esta división permitió optimizar la calibración del modelo y capturar de manera diferenciada las dinámicas espaciales de deforestación.

La tabla 3 resume los principales parámetros técnicos utilizados para la configuración de los modelos definitivos en cada subregión, así como las variables explicativas con mayor peso en la predicción del cambio de cobertura.

Tabla 3. Parámetros técnicos de configuración y variables explicativas seleccionadas para los modelos subregionales de riesgo de deforestación

Parámetros	Subregión Alta	Subregión Baja
Periodo de entrenamiento (T1-T2)	2015-2020	2016-2020
Tamaño de píxel	90 x 90	90 x 90

Parámetros	Subregión Alta	Subregión Baja
Markov ajustado	0,9882	0,9986
Variables con mayor peso o poder explicativo	Distancia al cambio (1,0), costo distancia 2015 (0,81), distancia a fuegos (0,70), distancia a áreas de no bosque (0,68), distancia euclidiana a deforestación histórica (0,74)	Distancia al cambio (1,0), costo distancia 2015 (0,79), distancia a áreas de no bosque (0,76)
Año con el cual se validó (T3)	2023	2023
Modelo utilizado	SimWeight	SimWeight

Fuente: elaboración propia.

En ambos casos, se empleó una resolución espacial de 90 x 90 metros y el algoritmo SimWeight para el modelamiento probabilístico. Los periodos de entrenamiento (T1-T2) difirieron ligeramente entre subregiones, y fue 2015-2020 para la subregión Alta, y 2016-2020 para la Baja. El desempeño del modelo se validó frente al 2023 (T3) mediante la técnica de similaridad difusa.

Las variables con mayor poder explicativo fueron identificadas por medio del análisis de sensibilidad, excluyendo iterativamente variables y evaluando la respuesta del modelo. En las dos subregiones, la variable “distancia al cambio histórico” (peso = 1,0) mostró la

mayor contribución explicativa, seguida por la variable “costo distancia”, cuyo peso varió entre 0,79 y 0,81 dependiendo de la zona.

La construcción de la variable “costo distancia” se llevó a cabo mediante un análisis espacial multicriterio, utilizando la herramienta Cost Distance del módulo Spatial Analyst en ArcGIS 10.7. Esta variable integra una matriz de fricción compuesta por la suma ponderada de distancias euclidianas a los accesos terrestres, asentamientos humanos y ríos navegables. La ponderación de los factores fue a través de combinaciones iterativas con el fin de maximizar la capacidad predictiva del modelo en las pruebas de calibración.

Desempeño de los modelos

Durante el proceso de modelación se llevaron a cabo un total de 46 pruebas con diferentes parámetros técnicos, y se destacaron inicialmente intentos con píxeles de 30 x 30 metros para la región completa; sin embargo, estos fueron descartados debido a los

tiempos de procesamiento excesivamente largos (que podían tardar días) y la falta de respuesta adecuada del programa (figura 7). Posteriormente, se realizaron pruebas con píxeles de 90 x 90 metros, mejorando ligeramente los tiempos, aunque los resultados

de validación se mantuvieron insatisfactorios, sin alcanzar el 45 % de similaridad difusa. En consecuencia, se optó por dividir el análisis en dos subregiones diferenciadas (Alta y Baja), y se obtuvieron valores finales de similaridad del 63 % para la Alta y del 55 % para la Baja.

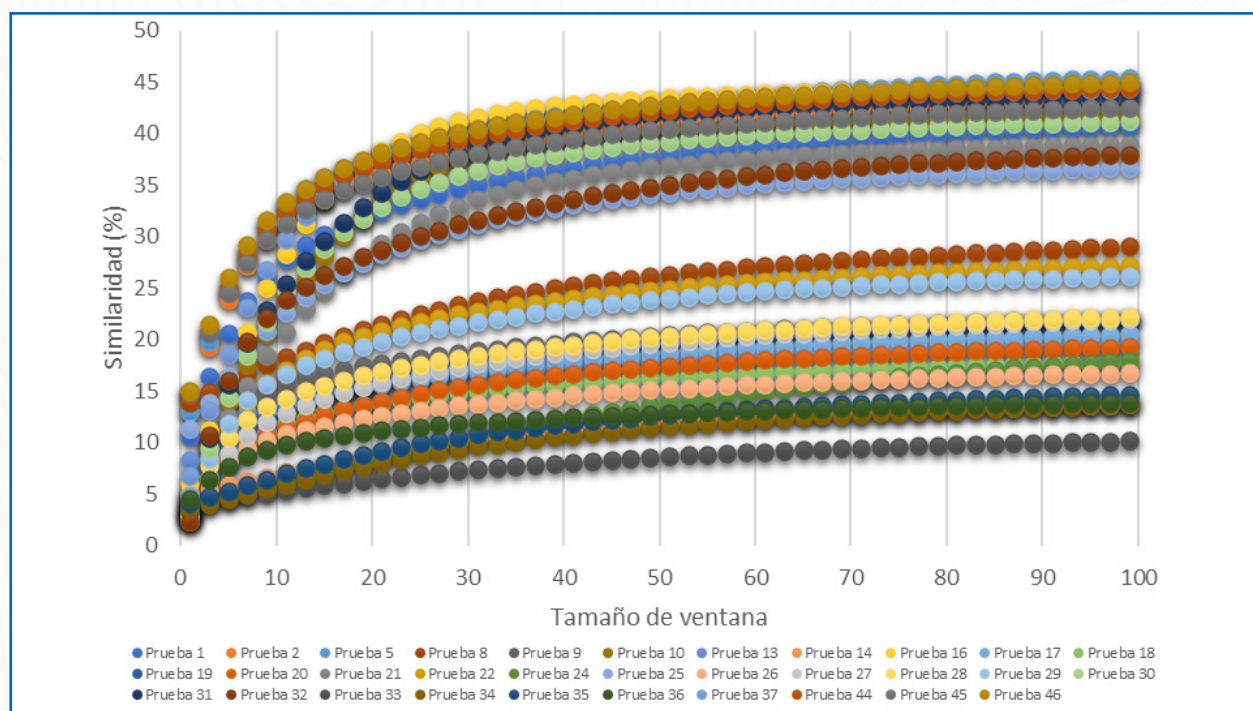


Figura 7. Validaciones modelo regional completo. Métrica de similaridad difusa (Dinamica EGO).

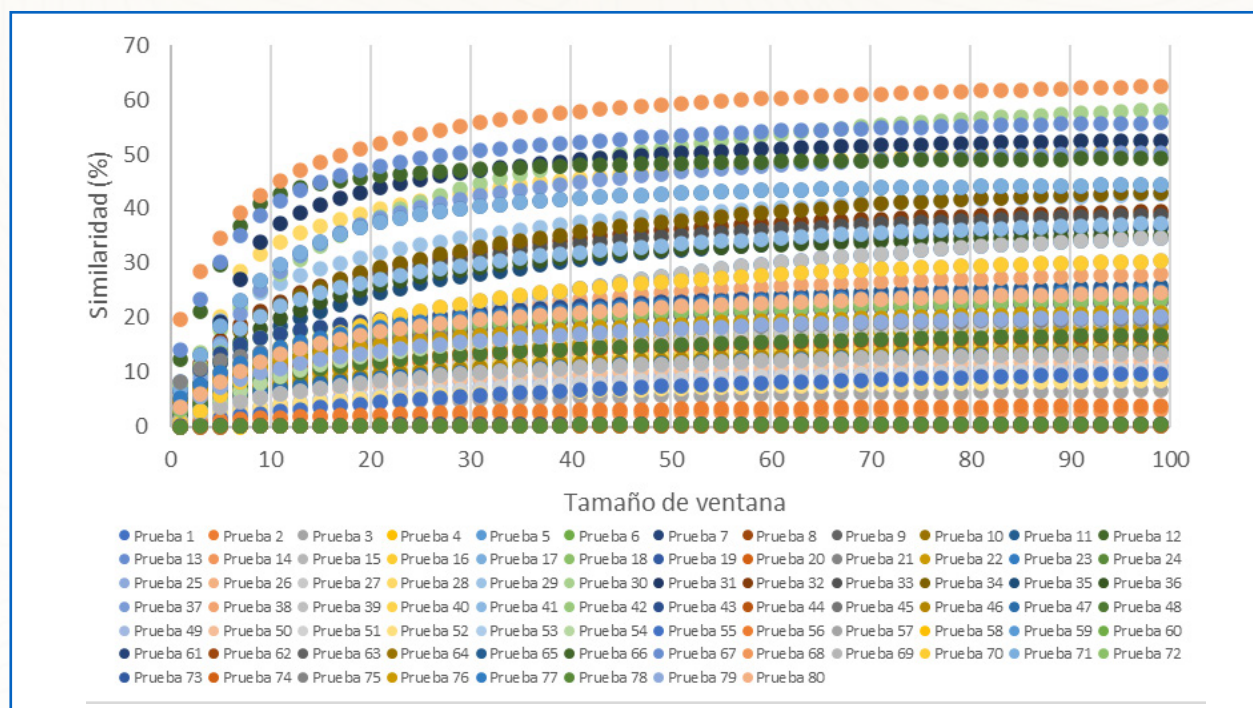


Figura 8. Validaciones subregión Alta. Métrica de similaridad difusa (Dinamica EGO).

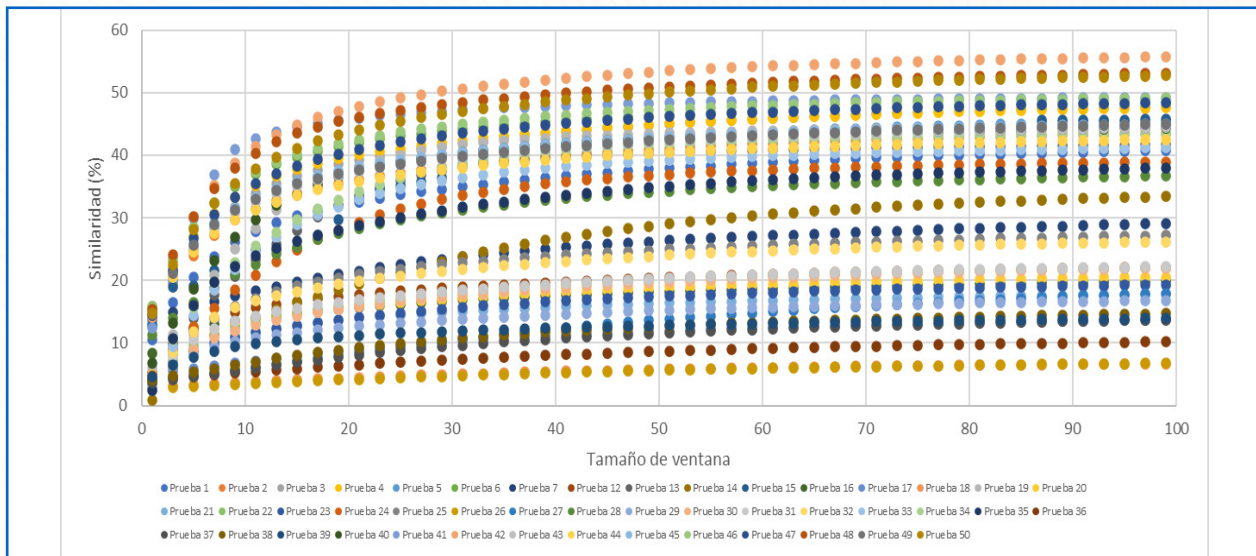


Figura 9. Validaciones subregión Baja. Métrica de similaridad difusa (Dinamica EGO).

A partir de estos resultados de validación, se definió el uso de los modelos subregionales como base técnica para la construcción del mapa actualizado de riesgo de deforestación, dada su mayor capacidad para capturar las variaciones espaciales en la dinámica de transformación del bosque natural en la Amazonia colombiana.



Riesgo de deforestación actualizado para la Amazonia

La figura 10 presenta el mapa de riesgo de deforestación para la Amazonia colombiana. La probabilidad espacial de conversión de bosque natural ha sido clasificada en cuatro categorías ordinales: nulo o casi nulo, bajo, medio y alto. Esta representación facilita la identificación de gradientes de riesgo a lo largo del bioma, destacando zonas con alta susceptibilidad a la transformación, corredores bajo presión creciente, así como áreas con menor nivel de riesgo relativo, cuya cobertura forestal permanece menos expuesta a procesos de cambio.

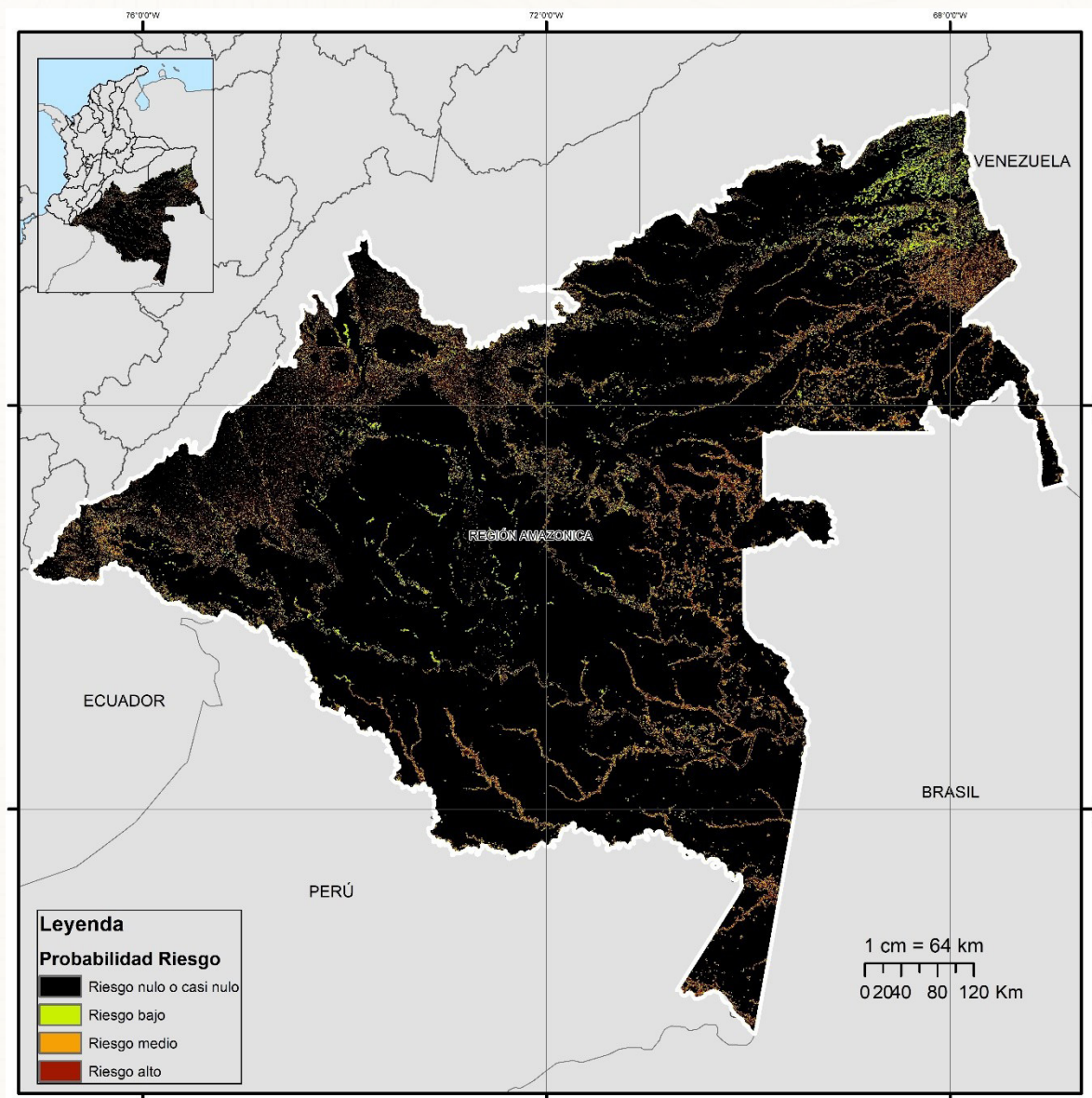


Figura 10. Distribución del riesgo de deforestación de la Amazonia

A continuación, se presentan las estimaciones de riesgo de deforestación para distintas unidades territoriales estratégicas. Nótese que los porcentajes de cada categoría de riesgo se calcularon sobre la superficie de bosque natural registrada en T2, es decir, el último año del periodo de entrenamiento⁴.

Análisis territorial

Departamentos

Se cuantificaron los niveles de riesgo de deforestación en los departamentos de la región amazónica colombiana. Para cada departamento se estimó la proporción de bosque natural registrado en T2, que el modelo clasificó en las categorías de riesgo alto, medio y bajo (tabla 4).

⁴ El periodo T2 se utiliza como referencia porque representa el estado más reciente del bosque en el periodo de entrenamiento, sobre el cual se calcula la probabilidad espacial de conversión.

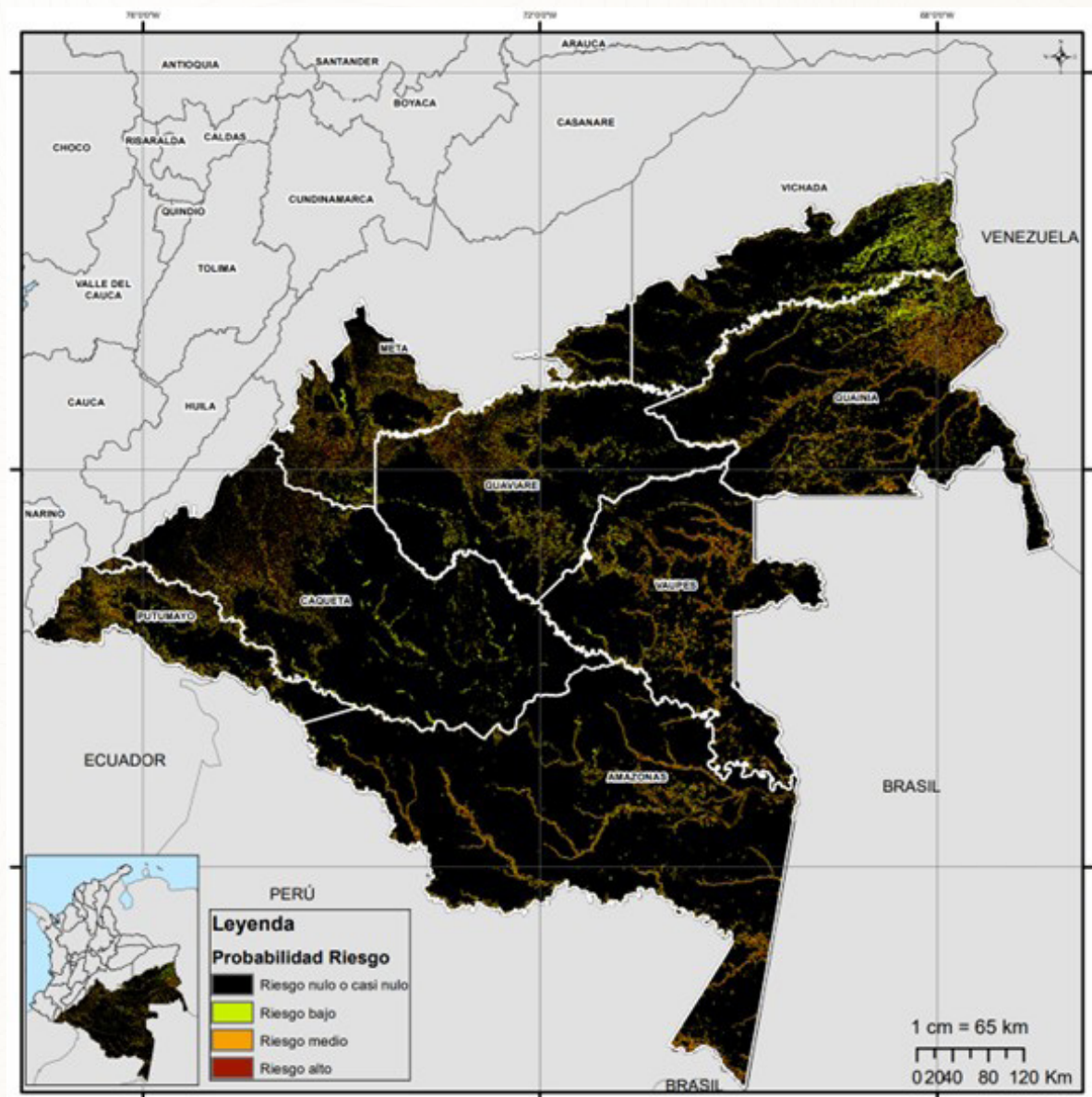


Figura 11. Distribución del riesgo de deforestación por departamento

Departamentos como Caquetá, Meta y Putumayo presentan las proporciones más significativas de riesgo alto y medio, al sumar entre el 28 % y el 31 %, lo cual indica una alta vulnerabilidad en sus bosques. Guainía también muestra una condición preocupante con el 23 % en riesgo alto y el 21 % en riesgo medio, lo que destaca la necesidad urgente de intervención. En contraste, departamentos como Vaupés y Vichada exhiben condiciones mayormente favorables, con grandes extensiones con riesgo bajo, lo que refleja oportunidades importantes para la conservación.

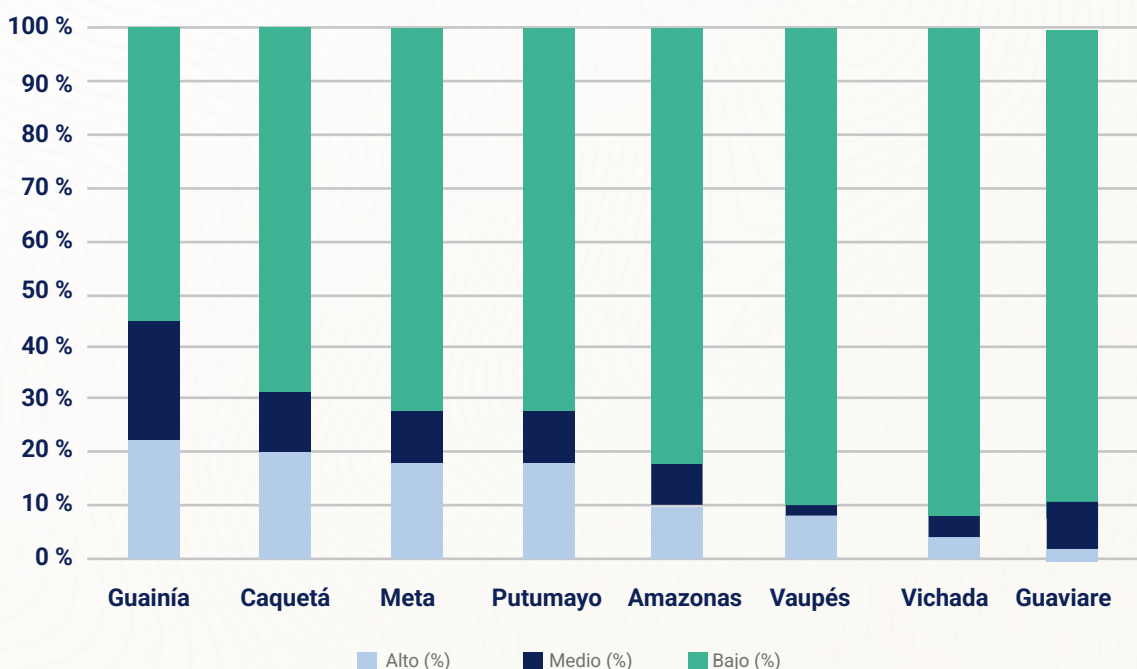


Figura 12. Porcentaje de distribución del riesgo de deforestación por departamento. **Fuente:** elaboración propia.

Al considerar el Índice de Exposición Ponderada (IEP) y el área ponderada de riesgo (tabla 4, figura 12), el departamento del Meta sobresale notablemente con un IEP de 0,518, lo cual indica un riesgo proporcionalmente alto respecto a la superficie evaluada, seguido de cerca por Putumayo con un IEP de 0,513. Caquetá, aunque con un IEP relativamente menor (0,247), tiene el valor absoluto más alto en términos de hectáreas equivalentes (1 585 520 haEq), lo que refleja una alta magnitud operativa para la intervención. Guaviare y Vichada también presentan valores significativos, ya que superan el millón de hectáreas equivalentes en riesgo, mientras que Amazonas y Guainía, aunque con áreas extensas en riesgo, muestran un menor IEP, lo cual significa una proporción más baja de bosque expuesto al riesgo alto o medio.

Tabla 4. Índices integrados del riesgo de deforestación por departamento

Departamento	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Caquetá	0,247	1 585 520
Meta	0,518	1 553 539
Amazonas	0,110	1 161 631
Guaviare	0,230	1 079 084

Departamento	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Vichada	0,245	1 006 204
Vaupés	0,186	959 554
Putumayo	0,513	904 305
Guainía	0,114	754 147

Fuente: elaboración propia.

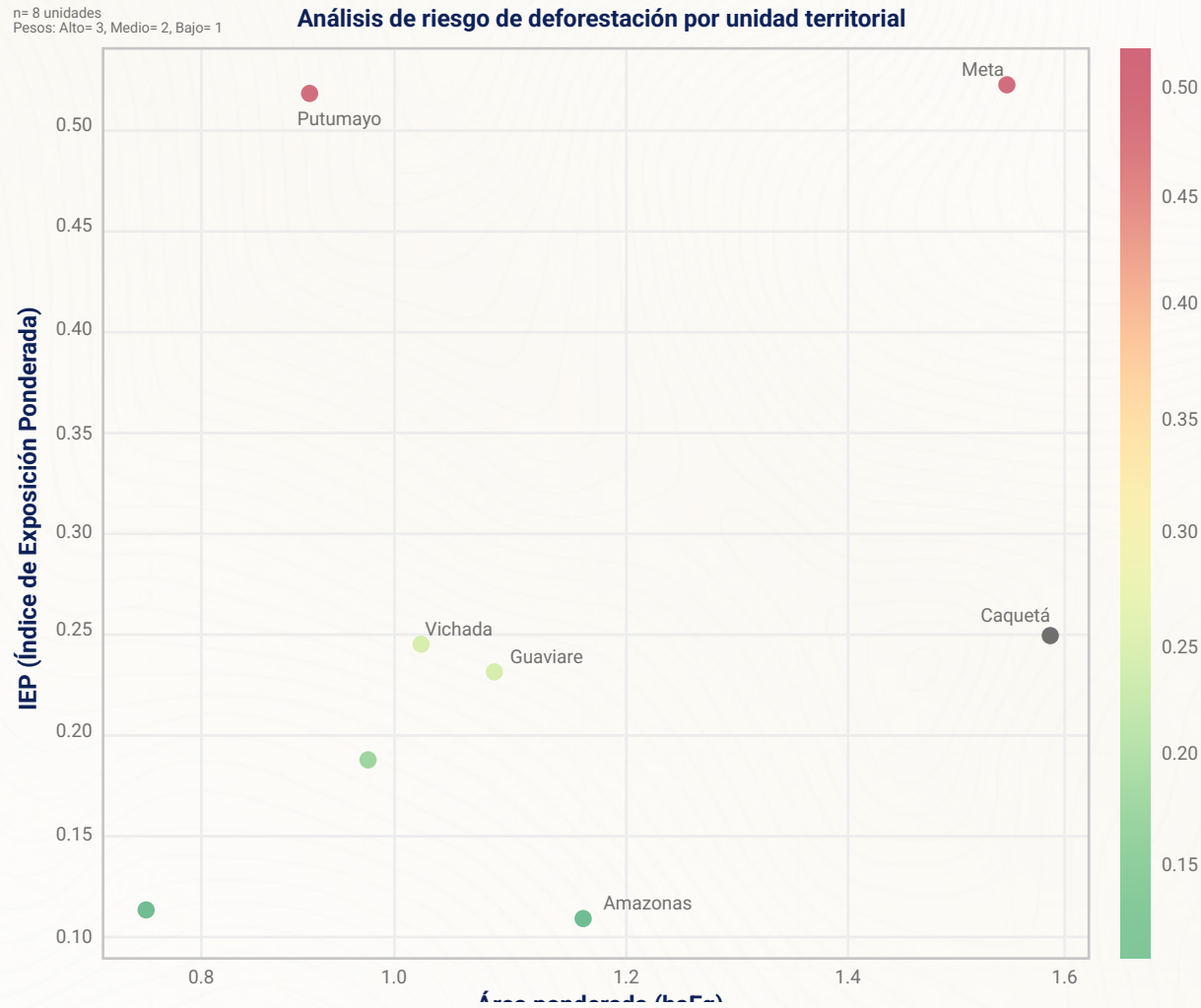


Figura 13. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre el Índice de Exposición Ponderada (IEP) y el área ponderada de riesgo para departamentos de la región amazónica colombiana.

Los resultados cuantitativos obtenidos mediante el cálculo de los índices integrados confirman claramente las tendencias territoriales identificadas antes en el análisis espacial. El Meta emerge como una prioridad crítica, seguido por Putumayo y Caquetá, los cuales requieren intervenciones urgentes y robustas debido tanto a la magnitud del riesgo como a la proporción elevada del área en peligro. Amazonas y Guainía, aunque con valores absolutos importantes, requieren un enfoque más preventivo y de monitoreo continuo debido a su menor proporción relativa de bosque en riesgo alto.

Municipios

Se cuantificaron los niveles de riesgo de deforestación en los municipios de la región amazónica colombiana. Para cada municipio se estimó la proporción de bosque natural registrado en T2, que el modelo clasificó en las categorías de riesgo alto, medio y bajo (tabla 5).

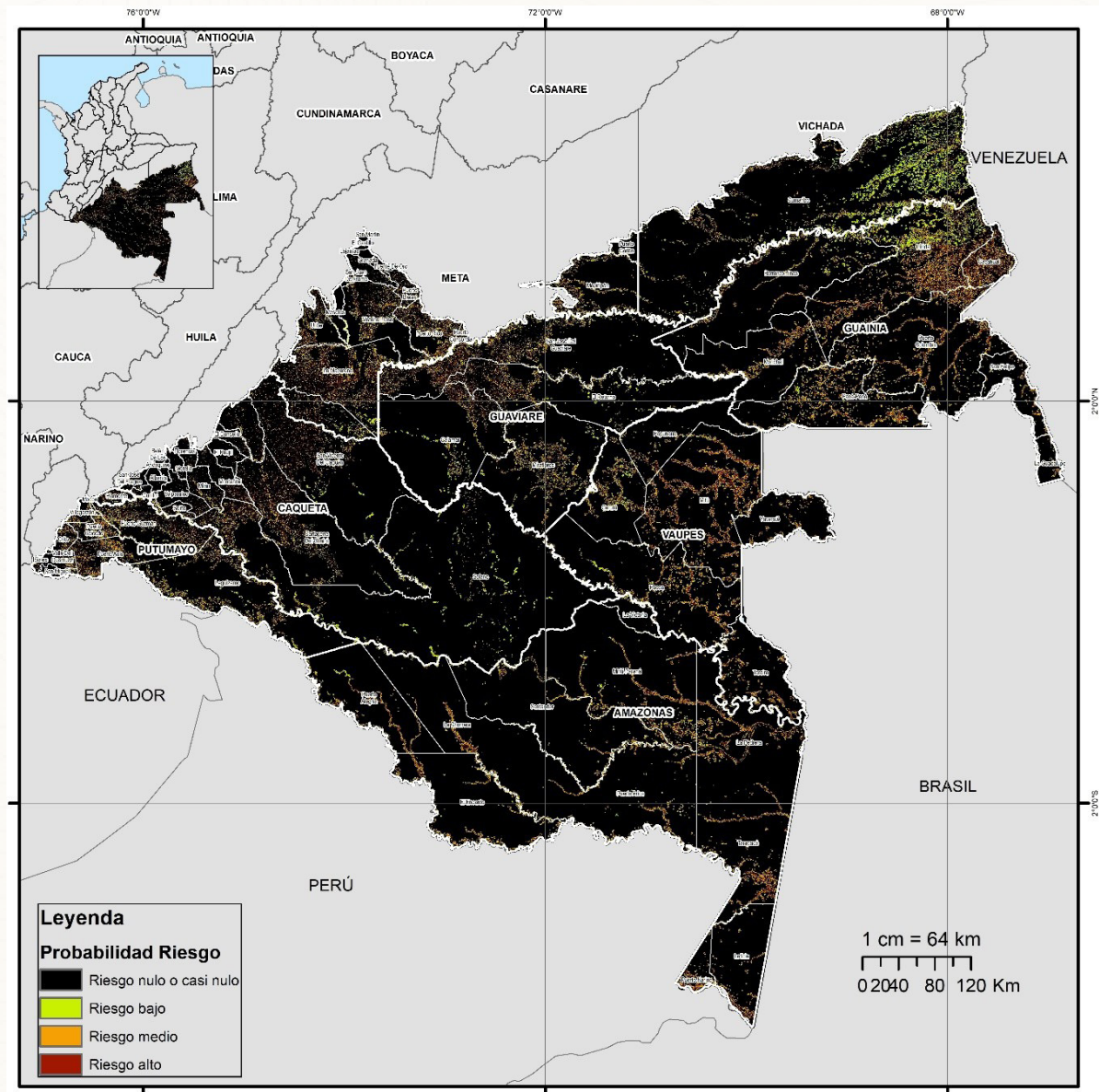


Figura 14. Distribución del riesgo de deforestación por municipio.

Solano (Caquetá) presenta el escenario más crítico, con el 54 % del territorio en riesgo alto. Por su parte, La Macarena (Meta) y Cartagena del Chairá (Caquetá) también enfrentan presiones considerables con niveles de riesgo alto del 25 % y el 24 %, respectivamente. En contraste, Cumaribo (Vichada), Inírida (Guainía) y Mitú (Vaupés) mantienen la mayoría de su territorio en riesgo bajo, lo que sugiere estrategias enfocadas en prevención y fortalecimiento comunitario.

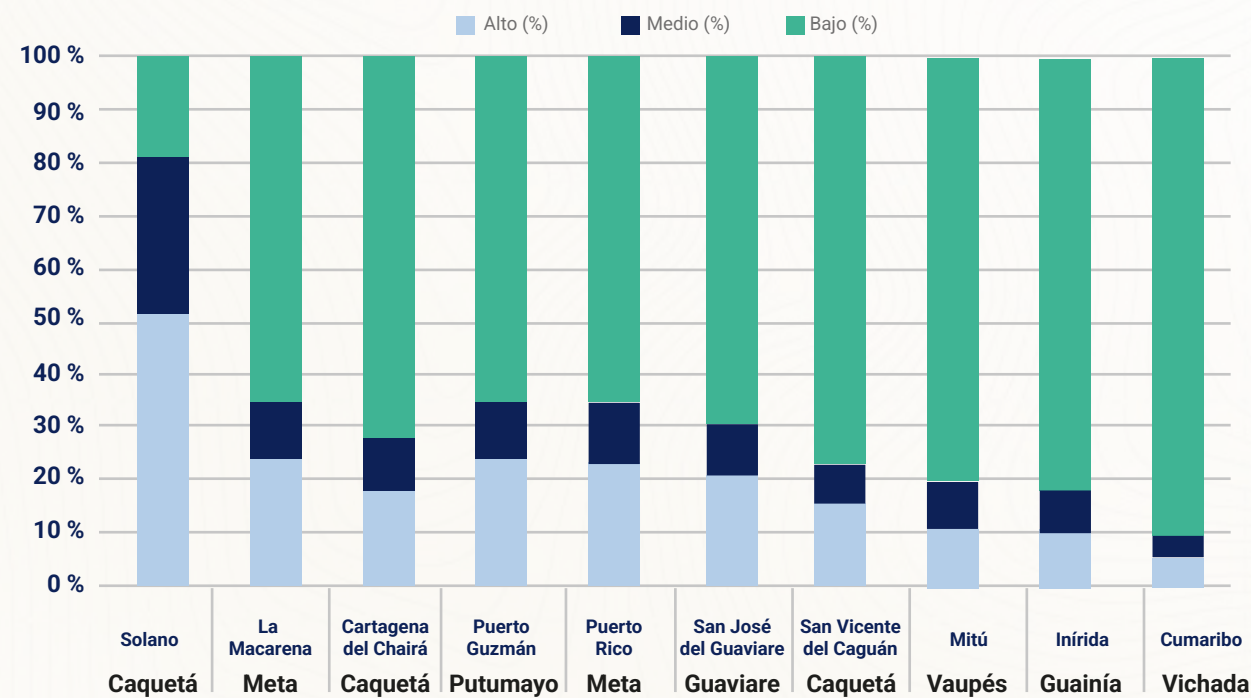


Figura 15. Porcentaje de distribución del riesgo de deforestación por municipio. Fuente: elaboración propia.

Al analizar el IEP y el área ponderada de riesgo para los municipios (tabla 5, figura 16), La Macarena (Meta) destaca significativamente con el mayor IEP (1,111), lo cual refleja una proporción muy elevada de su territorio en riesgo alto y medio, en comparación con su superficie total; sin embargo, Cumaribo (Vichada), pese a tener un IEP relativamente bajo (0,266), registra la mayor área ponderada absoluta (1 006 187 haEq),

lo que indica una extensa superficie que requiere atención. San Vicente del Caguán (Caquetá) y San José del Guaviare (Guaviare) también presentan escenarios críticos con valores altos tanto en IEP como en área ponderada. Además, Puerto Rico (Meta) y Puerto Guzmán (Putumayo) muestran una elevada proporción de riesgo respecto a su superficie, lo cual implica una prioridad para intervenciones inmediatas.

Tabla 5. Índices integrados del riesgo de deforestación por municipio

Municipio	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Cumaribo (Vichada)	0,266	1 006 187
Inírida (Guainía)	0,480	641 403

Municipio	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
San Vicente del Caguán (Caquetá)	0,558	625 089
San José del Guaviare (Guaviare)	0,401	515 022
La Macarena (Meta)	1,111	492 582
Mitú (Vaupés)	0,259	405 587
Cartagena del Chairá (Caquetá)	0,446	383 599
Puerto Rico (Meta)	0,766	283 158
Puerto Guzmán (Putumayo)	0,855	226 157
Solano (Caquetá)	0,042	162 640

Fuente: elaboración propia.

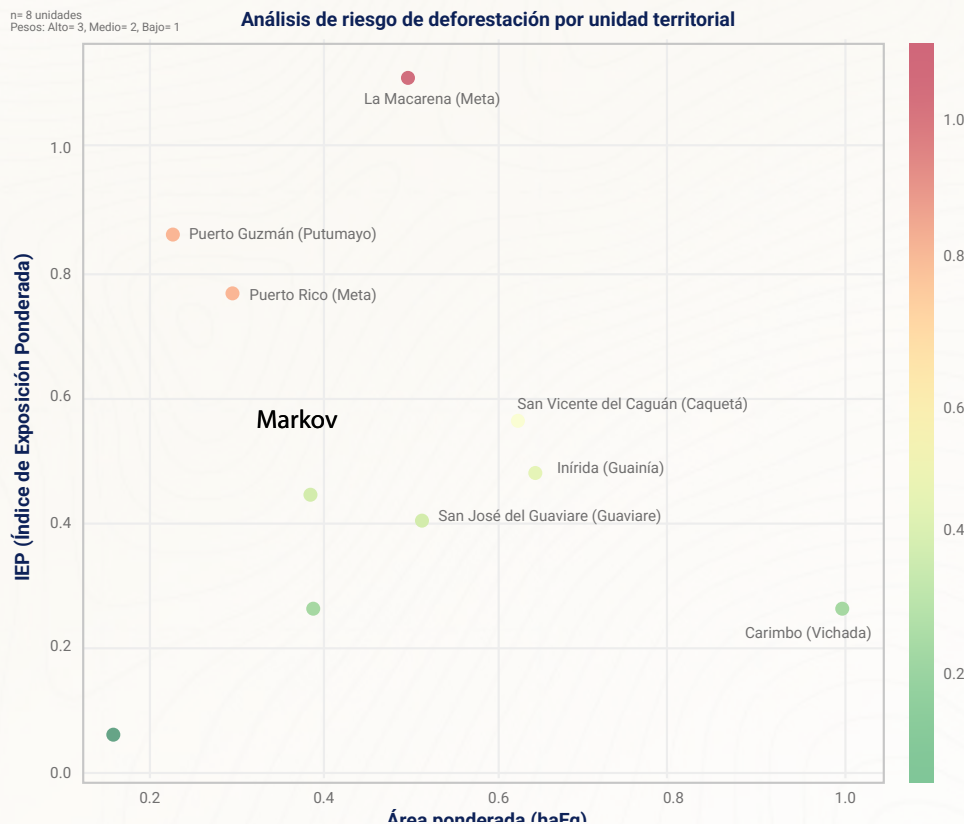


Figura 16. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre el Índice de Exposición Ponderada (IEP) y el área ponderada de riesgo para municipios de la región amazónica colombiana.

Los resultados cuantitativos derivados de los índices integrados a escala municipal permiten una priorización detallada y precisa para dirigir acciones estratégicas de mitigación. Destaca particularmente La Macarena por su altísimo IEP, lo cual refleja una urgencia crítica para acciones inmediatas. En contraste, Cumaribo, con una extensa área afectada, demanda esfuerzos considerables, pero de carácter más amplio y extensivo. Esta combinación de resultados evidencia claramente las diferentes estrategias que deben aplicarse según la naturaleza específica de cada municipio, desde la intervención directa y urgente hasta estrategias de monitoreo preventivo.

Núcleos de Alta Deforestación

Se cuantificaron los niveles de riesgo de deforestación en los Núcleos de Alta Deforestación (NAD) históricamente delimitados para la región amazónica colombiana. Para cada núcleo se estimó la proporción de bosque natural registrado en T2, que el modelo clasificó en las categorías de riesgo alto, medio y bajo (tabla 6).

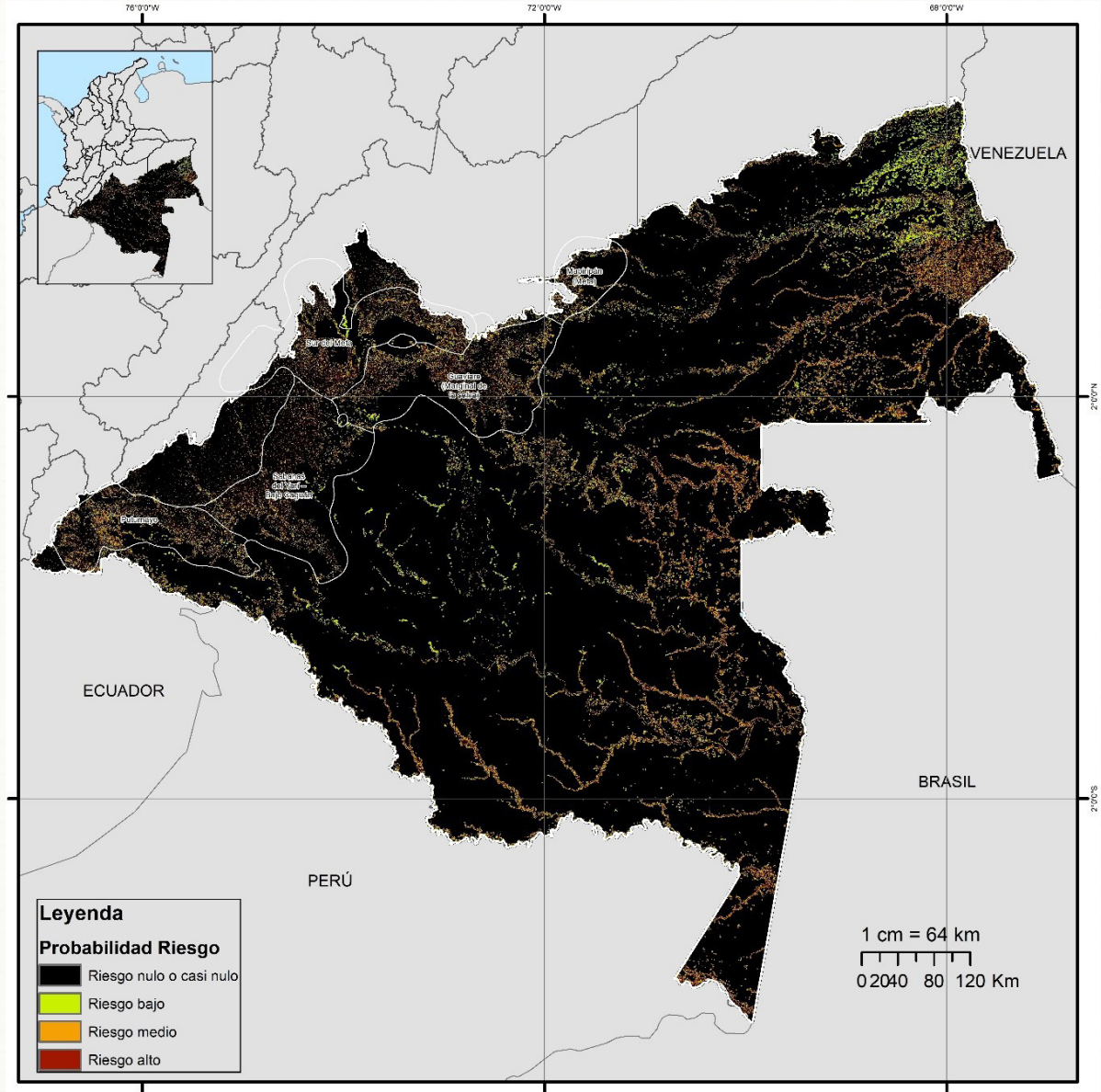


Figura 17. Distribución del riesgo de deforestación por Núcleos de Alta Deforestación.

Los resultados muestran una distribución heterogénea del riesgo. El núcleo de Sabanas del Yaré-Bajo Caguán concentra el mayor porcentaje de bosque en riesgo alto (28 %), seguido por Putumayo (25 %) y Sur del Meta (23 %). Guaviare (Marginal de la Selva) presenta el 22 % de su bosque en riesgo alto, mientras que Mapiripán (Meta), aunque con menor proporción (14 %), también evidencia condiciones críticas.

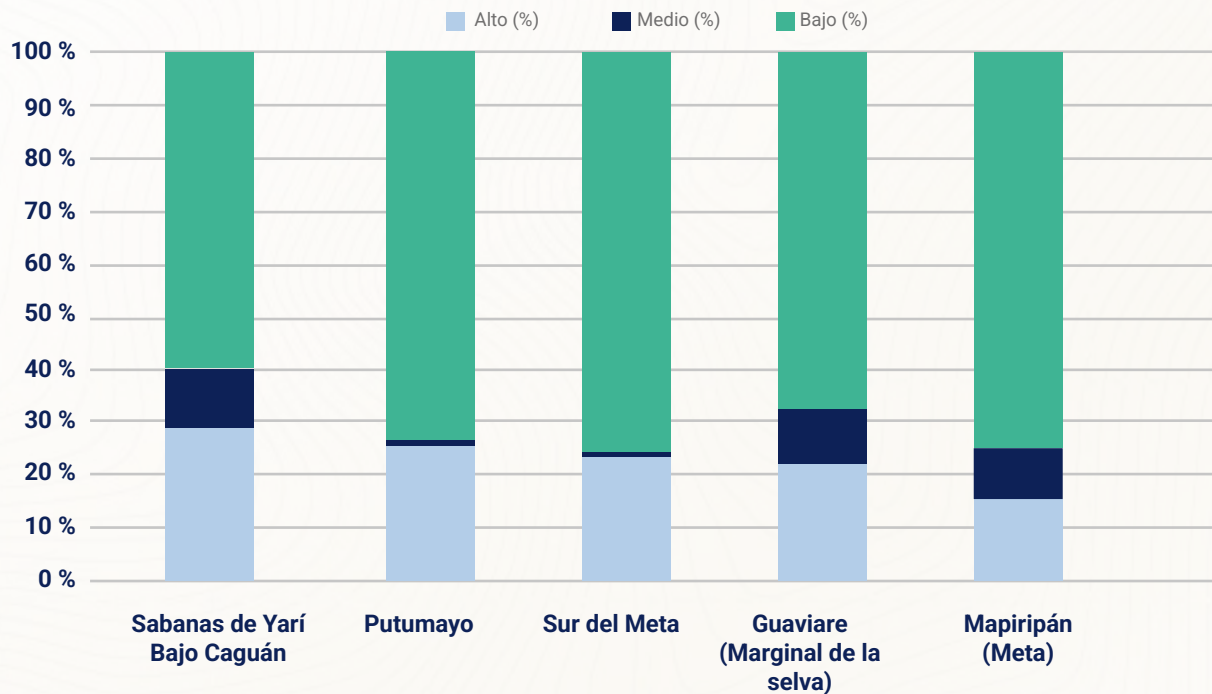


Figura 18. Porcentaje de distribución del riesgo de deforestación por Núcleos de Alta Deforestación.

Fuente: elaboración propia.

El análisis cuantitativo de los Núcleos de Alta Deforestación (tabla 6, figura 19) muestra claramente una alta concentración de riesgos, destacando en especial Sabanas del Yaré-Bajo Caguán con el Índice de Exposición Ponderada (IEP) más alto (0,925) y una superficie ponderada de 881 552 haEq, lo cual evidencia una situación particularmente crítica respecto al riesgo de pérdida forestal. Guaviare (Marginal de la Selva) y Sur del Meta registran valores altos similares, con áreas ponderadas superiores al millón de hectáreas equivalentes (1 020 866 haEq y 1 012 401 haEq, respectivamente),

lo que evidencia extensas superficies que requieren atención inmediata debido tanto a la magnitud como a la intensidad del riesgo identificado. Putumayo presenta también valores significativos, con un IEP elevado (0,861) y un área ponderada considerable (601 402 haEq), mientras que Mapiripán (Meta), aunque en menor escala, aún mantiene condiciones preocupantes con un área ponderada de 159 688 haEq y un IEP de 0,441, lo que indica necesidades puntuales de intervención.

Tabla 6. Índices integrados del riesgo de deforestación por municipio

Núcleo de Alta Deforestación	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Guaviare (Marginal de la Selva)	0,865	1 020 866
Sur del Meta	0,855	1 012 401
Sabanas del Yarí-Bajo Caguán	0,925	881 552
Putumayo	0,861	601 402
Mapiripán (Meta)	0,441	159 688

Fuente: elaboración propia.

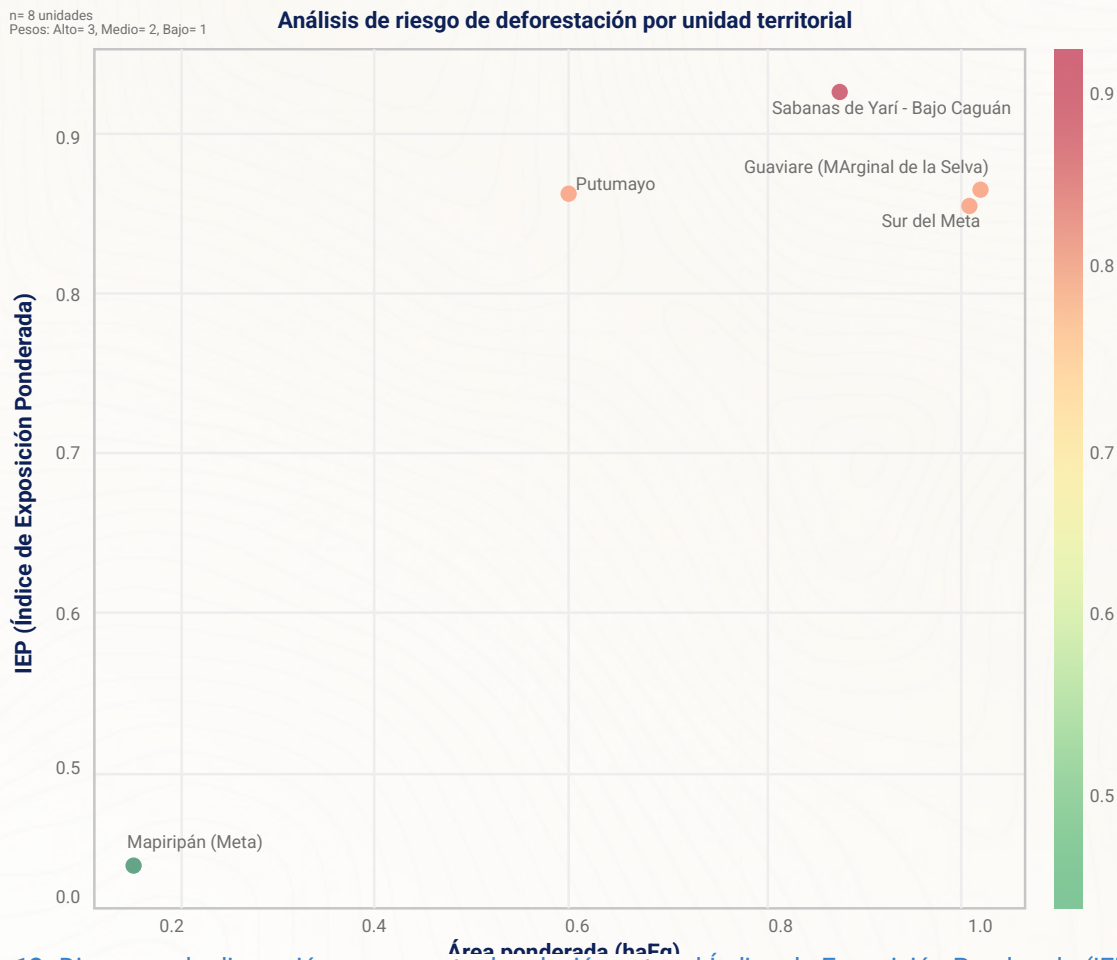


Figura 19. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre el Índice de Exposición Ponderada (IEP) y el área ponderada de riesgo para NAD de la región amazónica colombiana.

Estos resultados confirman que los Núcleos de Alta Deforestación continúan siendo puntos críticos de pérdida forestal, con dinámicas relacionadas directamente con la expansión ganadera, acaparamiento de tierras y vías informales. Por tanto, es imprescindible fortalecer y enfocar esfuerzos estratégicos de conservación, restauración ecológica y gobernanza territorial, especialmente en Sabanas del Yarí, Guaviare (Marginal de la Selva) y Sur del Meta, áreas prioritarias por la combinación de magnitud e intensidad del riesgo.

Resguardos indígenas

Se cuantificaron los niveles de riesgo de deforestación en los resguardos indígenas de la región amazónica colombiana. Para cada resguardo se estimó la proporción de bosque natural registrado en T2 que el modelo clasificó en las categorías de riesgo alto, medio y bajo (tabla 7).

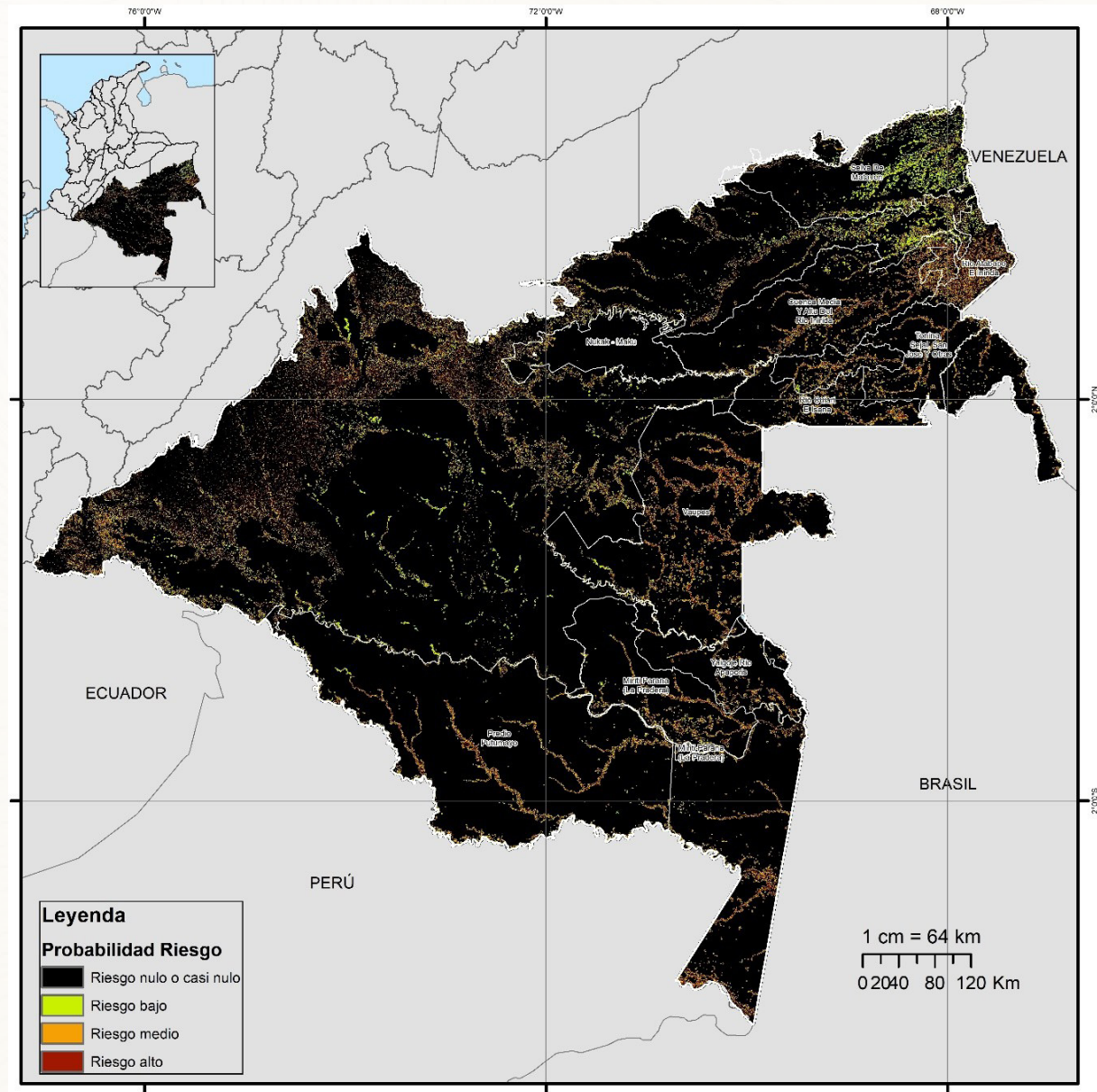


Figura 20. Distribución del riesgo de deforestación por resguardos.

La mayoría de los resguardos presentan predominancia en áreas de bajo riesgo, como Selva de Matavén y Mirití-Paraná (94 %, bajo riesgo); sin embargo, existen casos preocupantes como Río Atabapo e Inírida (12 %, riesgo alto) y Nukak Makú (11 %, riesgo alto), que requieren atención y medidas específicas para su protección efectiva.

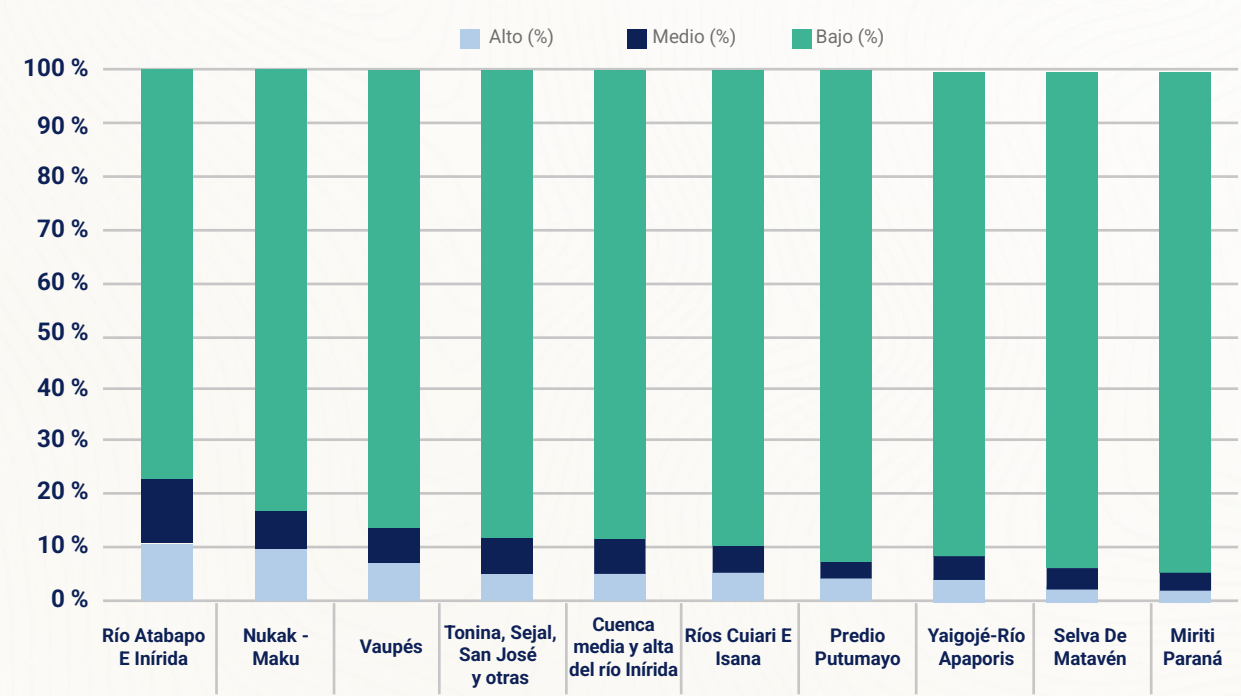


Figura 21. Distribución del riesgo de deforestación por resguardos indígenas. Fuente: elaboración propia.

Al analizar los índices integrados del riesgo de deforestación en resguardos indígenas (tabla 7, figura 22), el resguardo Río Atabapo e Inírida sobresale claramente con el Índice de Exposición Ponderada (IEP) más alto (0,987), lo cual indica que prácticamente la totalidad del área evaluada está expuesta a riesgos significativos, por lo cual es urgente

una acción inmediata. Por otra parte, aunque Predio Putumayo tiene un IEP relativamente bajo (0,175), posee la mayor área ponderada en términos absolutos (1 002 583 haEq), lo que representa una extensa superficie en situación vulnerable. Mirití-Paraná también presenta valores notables con un IEP intermedio y un alta área ponderada.

Tabla 7. Índices integrados del riesgo de deforestación por resguardo indígena

Resguardo indígena	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Predio Putumayo	0,175	1 002 583
Vaupés	0,212	801 479
Mirití-Paraná	0,341	536 937
Río Atabapo e Inírida	0,987	301 656

Resguardo indígena	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Yaigojé-Apaporis	0,214	216 969
Ríos Cuiari e Isana	0,233	208 975
Nukak Makú	0,127	115 769
Selva de Matavén	0,0004	672
Cuenca Media y Alta del Río Inírida	0,0002	447
Tonina, Sejal, San José y otras	0,0002	177

Fuente: elaboración propia.

n= 8 unidades
Pesos: Alto= 3, Medio= 2, Bajo= 1

Análisis de riesgo de deforestación por unidad territorial

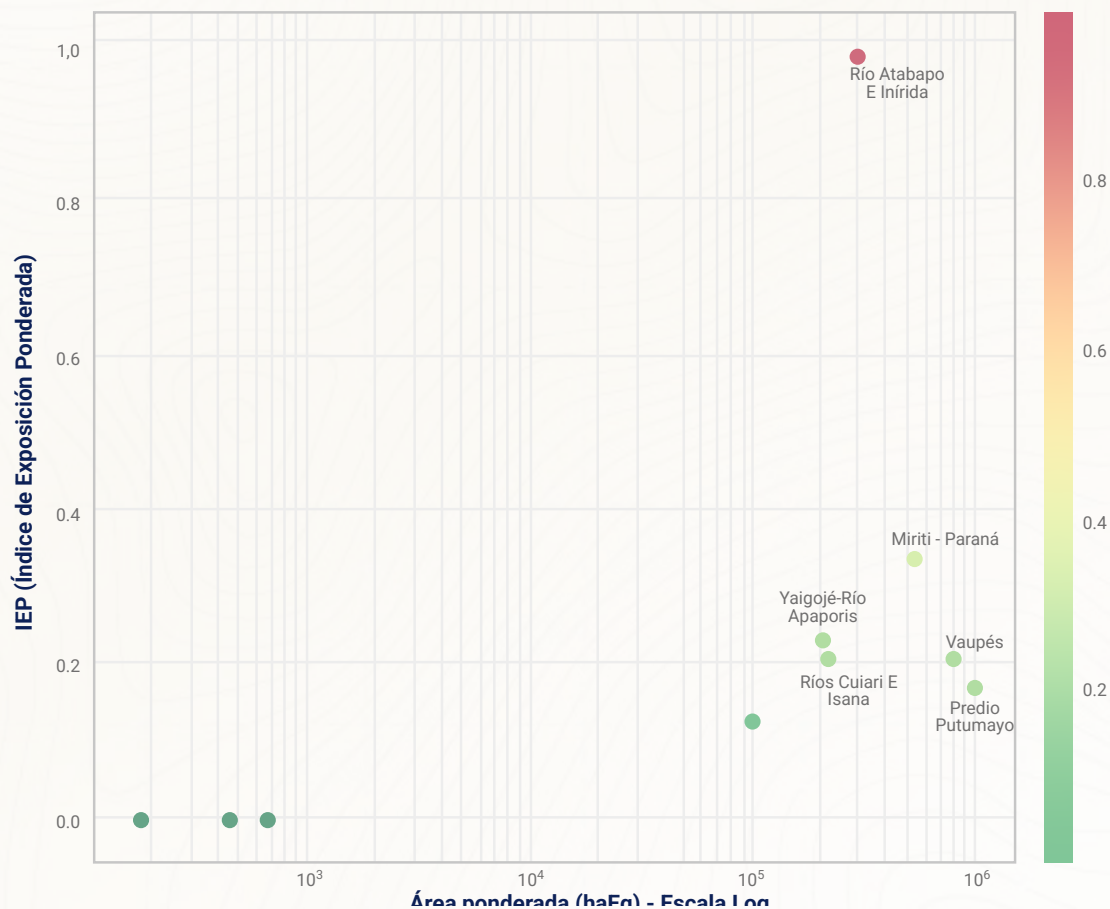


Figura 22. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre el Índice de Exposición Ponderada (IEP) y el área ponderada de riesgo para resguardos indígenas de la región amazónica colombiana.

Estos resultados cuantitativos destacan claramente la variabilidad en la vulnerabilidad de los resguardos indígenas amazónicos. La alta exposición relativa del resguardo Río Atabapo e Inírida requiere intervenciones prioritarias inmediatas, mientras que la considerable magnitud del riesgo en Predio Putumayo, Vaupés y Mirití-Paraná sugiere implementar medidas amplias de conservación y monitoreo activo. En contraste, resguardos como Selva de Matavén y Cuenca Media y Alta del Río Inírida, con valores mínimos, representan importantes oportunidades para estrategias preventivas y fortalecimiento comunitario.

Parques Nacionales Naturales

Se cuantificaron los niveles de riesgo de deforestación en los Parques Nacionales Naturales de la región amazónica colombiana. Para cada Parque se estimó la proporción de bosque natural registrado en T2, que el modelo clasificó en las categorías de riesgo alto, medio y bajo (tabla 8).

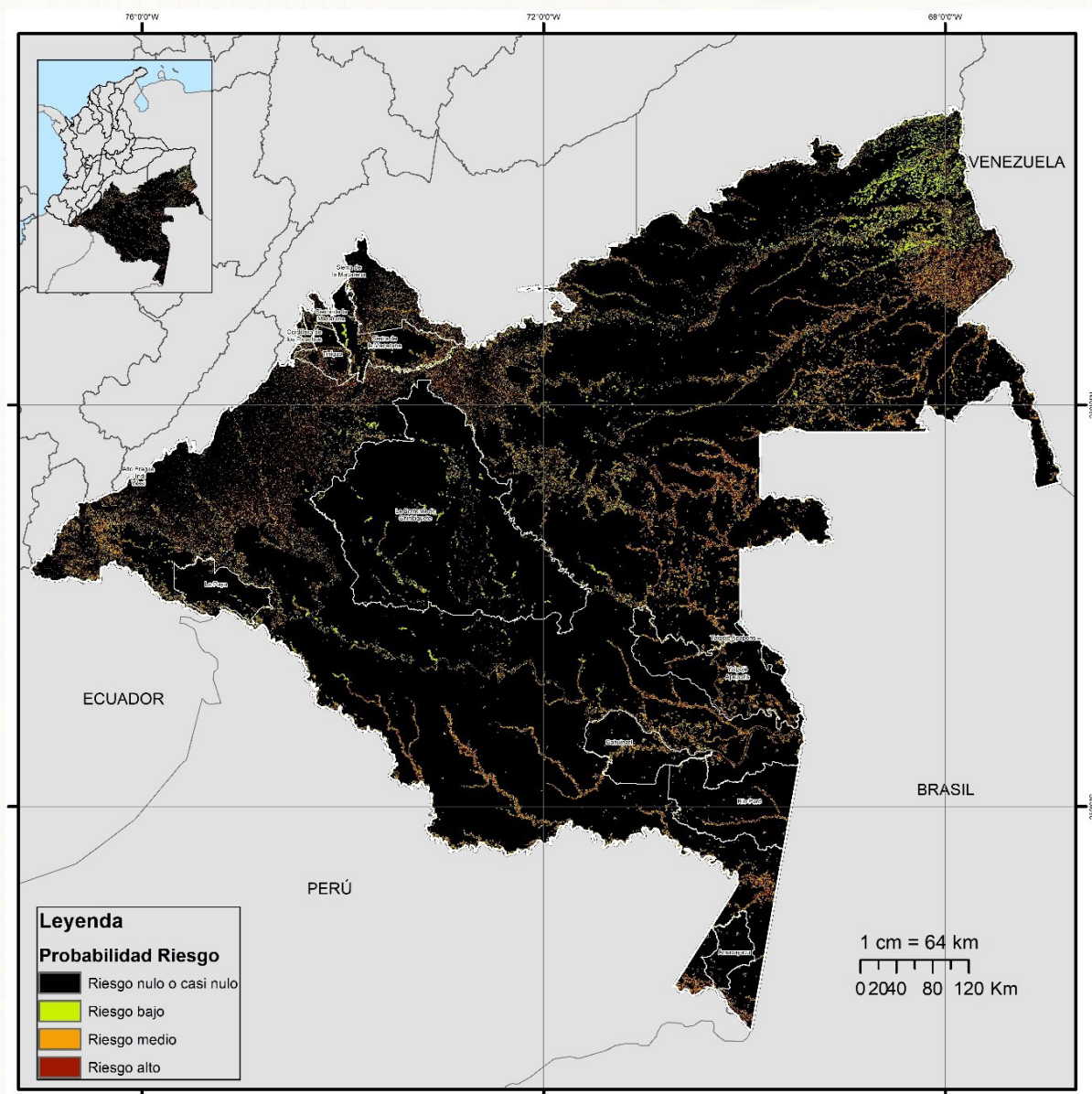


Figura 23. Distribución del riesgo de deforestación por Parques Nacionales Naturales

Los parques con mayor presión son Yai-
gojé-Apaporis (29 %, alto riesgo), Tinigua
(25 %, alto riesgo) y Sierra de La Macarena
(16 %, alto riesgo). En contraste, parques
como Serranía de Chiribiquete presentan
condiciones ideales, con el 99 % del área
en riesgo bajo. Esto subraya la importancia
de diferenciar las estrategias de manejo y
conservación según la situación específica
de cada parque.

Este análisis territorial detallado ofrece
información clave para el desarrollo de polí-
ticas públicas específicas y adaptadas a las
condiciones particulares de cada territorio,
priorizando acciones inmediatas de con-
tención en áreas críticas y de prevención en
regiones conservadas.

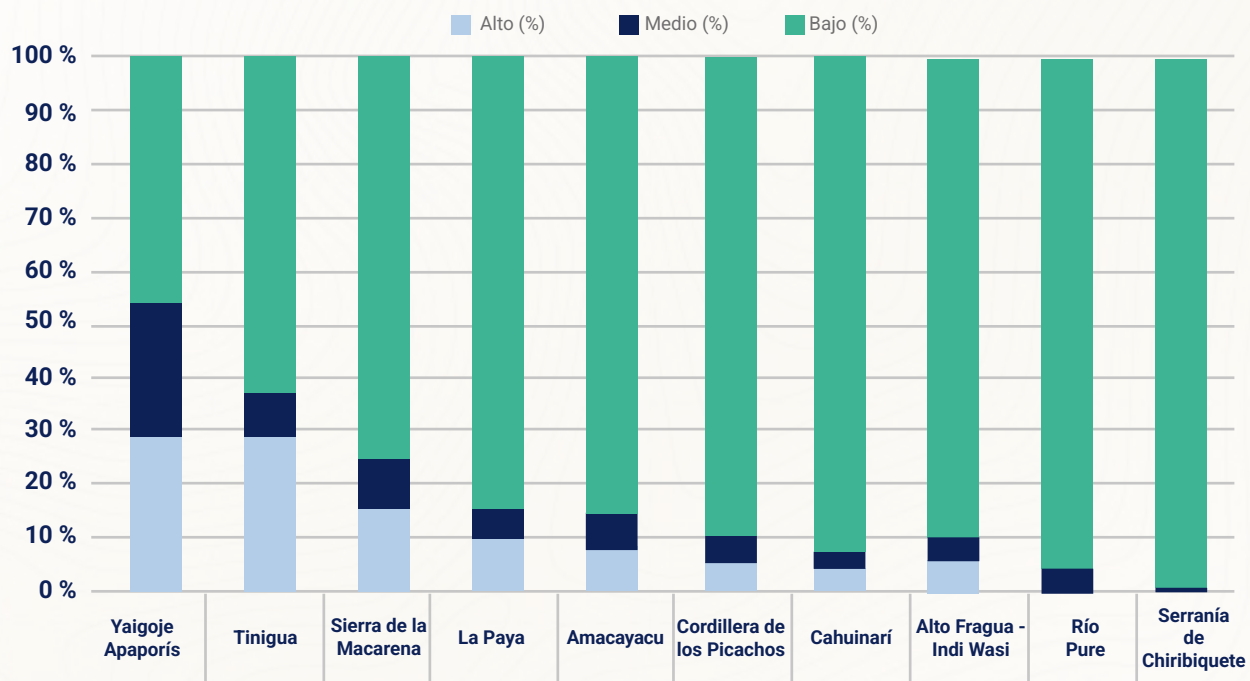


Figura 24. Distribución del riesgo de deforestación por Parques Nacionales Naturales. **Fuente:** elaboración propia.

Entre los Parques Nacionales Naturales (tabla 8, figura 24), la Serranía de Chiribiquete presenta la mayor área ponderada absoluta (1 025 639 haEq), aunque su Índice de Exposición Ponderada (IEP) es relativamente bajo (0,252), lo que indica una extensa superficie expuesta principalmente a riesgos

de baja intensidad. En contraste, el PNN Tinigua tiene el IEP más alto (0,746), lo cual muestra una alta proporción de superficie en riesgo crítico, seguido por Cordillera de Los Picachos y Sierra de La Macarena, ambos con índices moderados, pero significativos y áreas que requieren atención prioritaria.

Tabla 8. Índices integrados del riesgo de deforestación por Parques Nacionales Naturales

Parque Nacional Natural	Índice de Exposición Ponderada (IEP)	Área ponderada de riesgo (haEq)
Serranía de Chiribiquete	0,252	1 025 639
Sierra de La Macarena	0,448	237 579
Cordillera de Los Picachos	0,457	120 920
Cahuinari	0,200	108 354
Tinigua	0,746	108 109
Río Puré	0,090	87 115
La Paya	0,203	85 188
Yaigojé-Apaporis	0,065	66 182
Alto Fragua-Indi Wasi	0,297	21 596
Amacayacu	0,077	20 520

Fuente: elaboración propia.



n= 8 unidades
Pesos: Alto= 3, Medio= 2, Bajo= 1

Análisis de riesgo de deforestación por unidad territorial



Figura 25. Diagrama de dispersión que muestra la relación entre el Índice de Exposición Ponderada (IEP) y el área ponderada de riesgo para Parques Nacionales Naturales de la región amazónica colombiana.

Estos resultados cuantitativos permiten una diferenciación clara de estrategias en los Parques Nacionales Naturales. Mientras Tinigua y Sierra de La Macarena demandan intervenciones rápidas y focalizadas debido a la alta intensidad del riesgo, la extensa área afectada en la Serranía de Chiribiquete requiere acciones amplias y sostenidas, aunque predominantemente preventivas y de vigilancia. Parques como Amacayacu y Yaigojé-Apaporis, con índices muy bajos, presentan escenarios oportunos para consolidar medidas de conservación y fortalecimiento institucional que eviten el incremento del riesgo.

6. Conclusiones y próximos pasos



El presente estudio actualizó el mapa de riesgo de deforestación para la Amazonia colombiana mediante modelos espaciales calibrados por subregiones y validados frente a datos observados. El resultado es una representación de alta resolución que clasifica el bosque natural según su probabilidad de transformación en cuatro categorías ordinales: nulo, bajo, medio y alto. Este mapa constituye una herramienta esencial para visualizar gradientes de riesgo, identificar corredores bajo presión creciente y distinguir áreas con bajo nivel de exposición relativa; no obstante, su utilidad práctica para la planificación requiere mecanismos adicionales que permitan comparar y jerarquizar unidades territoriales heterogéneas.

Con este objetivo, el estudio propone y aplica dos métricas complementarias: el Índice de Exposición Ponderada (IEP), que resume la intensidad del riesgo relativo en el bosque evaluado, y el área ponderada de riesgo (expresada en hectáreas equivalentes, haEq), que estima la magnitud operativa del riesgo en cada unidad. Estos índices, al sintetizar y normalizar la información contenida en el mapa, ofrecen una vía técnica para mejorar su aplicabilidad en la priorización territorial, lo cual facilita decisiones estratégicas en distintos niveles de gobernanza.

Los resultados revelan una marcada concentración del riesgo en los cinco principales Núcleos de Alta Deforestación (NAD) de la región. El NAD Sabanas del Yarí-Bajo Caguán presentó el mayor IEP (0,925) y un área ponderada de 881 552 haEq. Le siguen NAD Guaviare (Marginal de la Selva) y NAD Sur del Meta, ambos con más de un millón de hectáreas equivalentes (1 020 866 y 1 012 401 haEq, respectivamente), lo que confirma la persistencia de dinámicas estructurales como la expansión ganadera, el acaparamiento de tierras y la proliferación

de vías informales. Los NAD Putumayo y NAD Mapiripán completan el grupo, lo que consolida un patrón territorial de alta prioridad para acciones de contención.

A escala departamental, los territorios con mayor nivel de alerta son Meta (IEP 0,518; 1 553 539 haEq), Putumayo (IEP 0,513; 904 305 haEq) y Caquetá (IEP 0,247; 1 585 520 haEq), cuyas combinaciones de intensidad y magnitud de riesgo los posicionan como epicentros de transformación forestal. Por el contrario, Amazonas, Vaupés y Vichada muestran niveles más bajos de exposición relativa (IEP entre 0,109 y 0,186), lo cual no implica ausencia de riesgo, pero sí ofrece condiciones favorables para enfoques de prevención, monitoreo comunitario y gestión anticipada.

El análisis municipal refuerza esta heterogeneidad espacial. La Macarena (Meta) presenta el IEP más alto registrado (1,111), lo que indica una sobresaturación del riesgo en su bosque remanente. Solano (Caquetá) se aproxima a este nivel, con el 54 % del bosque en riesgo alto. En contraste, municipios como Cumaribo (Vichada) e Inírida (Guainía) conservan más del 90 % de su cobertura forestal en condiciones de bajo riesgo, lo cual configura escenarios adecuados para fortalecer esquemas de vigilancia social y consolidación de reservas comunitarias.

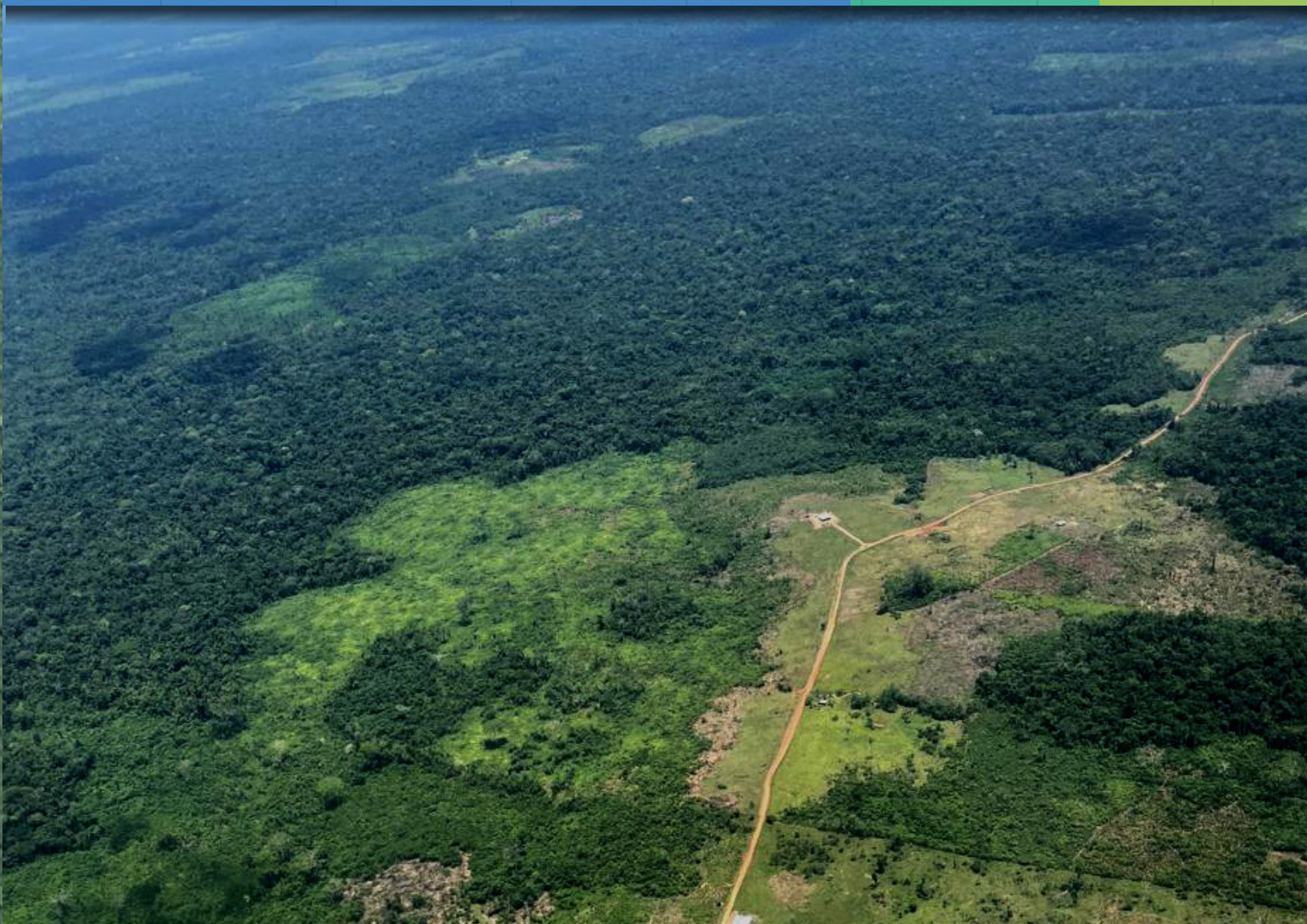
La situación de las áreas protegidas y los resguardos indígenas revela contrastes importantes. Entre los Parques Nacionales Naturales (PNN), Tinigua (IEP 0,746; 108 109 haEq) y Sierra de La Macarena (IEP 0,448; 237 579 haEq) requieren intervenciones urgentes para evitar su degradación progresiva. En cambio, la Serranía de Chiribiquete mantiene el 99 % de su bosque en riesgo bajo, lo que reafirma su rol como núcleo es-

tratégico de conservación. En cuanto a los resguardos, Río Atabapo e Inírida destaca por su IEP crítico (0,987), a pesar de su superficie más reducida, mientras que Predio Putumayo y Vaupés combinan áreas extensas con niveles relevantes de exposición, lo que exige estrategias coordinadas de gobernanza territorial y fortalecimiento de derechos colectivos.

En conjunto, el uso integrado del mapa de riesgo actualizado y los índices de priorización territorial propuestos constituyen una contribución metodológica significativa para mejorar la toma de decisiones. Las métricas permiten distinguir entre unidades con riesgo concentrado, pero de baja superficie, y aquellas con grandes áreas afectadas a menor intensidad, lo que facilita la articulación de políticas diferenciadas. Se recomienda utilizar estos indicadores para identificar territorios de contención urgente ($IEP > 0,8$ y $haEq > 500\,000$), establecer mecanismos de alerta temprana en zonas de riesgo emergente y consolidar procesos de gobernanza forestal en los cuales aún predominan condiciones favorables de conservación.

La periodicidad de actualización del mapa de riesgo, su integración con nuevas fuentes de datos, las mejoras en desempeño y su articulación con instrumentos de planificación como los Planes de Ordenamiento Territorial, esquemas de pago por servicios ecosistémicos, planes de vida de las comunidades y otras estrategias de manejo territorial serán fundamentales para potenciar su utilidad como herramienta de gestión y fortalecer su impacto en la protección efectiva de los bosques amazónicos de Colombia.

7. Referencias



- Achard, F. y House, J. I. (2015). Reporting carbon losses from tropical deforestation with Pan-tropical biomass maps. *Environmental Research Letters*, 10(10), 101002. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/10/10/101002>
- Agudelo, W. J., Murillo Sandoval, P. J. y Rodríguez Becerra, J. M. (2023). Scenarios of landuse and landcover change in the Colombian Amazon to 2040. *Scientific Reports*, 13, 29243.
- Armenteras, D., Cabrera, E., Rodríguez, N., Retana, J. y Navas, C. (2013). National and regional determinants of tropical deforestation in Colombia. *Regional Environmental Change*, 13(6), 1181-1193.
- Armenteras, D., Rudas, G., Rodríguez, N., Sua, S. y Romero, M. (2006). Patterns and causes of deforestation in the Colombian Amazon. *Ecological Indicators*, 6(2), 353-368. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2005.03.014>
- Camacho, P. (2022). Análisis de regresión logística aplicado al modelamiento espacial de las causas de deforestación en el departamento del Guaviare durante el periodo 2005-2020 y proyección de escenarios de deforestación a 2030. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 31(2), 255-280. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v31n2.98012>
- Camacho Peña, M. E. (2022). *Modelamiento espacial de factores determinantes de la deforestación y proyección de escenarios en el departamento del Guaviare al 2030* (Tesis de maestría, Universidad Nacional de Colombia). Repositorio Institucional UNAL.
- Clerici, N., Armenteras, D., Kareiva, P., Botero, R., Ramírez Delgado, J. P., Forero Medina, G., Ochoa, J., Pedraza, C., Schneider, L., Lora, C., Gómez, C., Linares, M., Hirashaki, C. y Biggs, D. (2020). Deforestation in Colombian protected areas increased during postconflict periods. *Scientific Reports*, 10, 4971. <https://doi.org/10.1038/s41598-020-61861-y>
- Clerici, N., Salazar, C., Pardo Díaz, C., Jiggins, C. D. y Kareiva, P. (2018). Peace in Colombia is a critical moment for Neotropical connectivity and conservation: save the Northern Andes-Amazon biodiversity bridge. *Conservation Letters*, 11(4), e12594. <https://doi.org/10.1111/conl.12594>
- De Freitas, M., Muñoz, P., Dos Santos, J. y Salas, D. (2018). Land use and cover change modelling and scenarios in the Upper Uruguay Basin (Brazil). *Ecological Modelling*, 384(C), 128-144. <https://doi.org/gd54sn>
- Etter, A., McAlpine, C., Wilson, K., Phinn, S. y Possingham, H. P. (2006). Regional patterns of agricultural landuse and deforestation in Colombia. *Agriculture, Ecosystems & Environment*, 114(24), 369-386. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2005.11.013>
- Ganzenmüller, R., Sylvester, J. y Castro-Núñez, A. (2022). What peace means for deforestation: an analysis of local deforestation dynamics in times of conflict and peace in Colombia. *Frontiers in Environmental Science*, 10, 803368. <https://doi.org/10.3389/fenvs.2022.803368>
- García Romero, H. (2014). *Deforestación en Colombia: retos y perspectivas*. Fedesarrollo. <https://www.repository.fedesarrollo.org.co/bitstream/handle/11445/337/>

[KAS%20SOPLA Deforestacion%20en%20Colombia%20retos%20y%20perspectivas.pdf?sequence=2&isAllowed=y](#)

- Gómez, F. y Botero, V. (2014). *Análisis comparativo de dos modelos de deforestación: redes neuronales artificiales y regresión logística*. Memorias. XVI Simposio Internacional Selper 2014. <https://selper.org.co/papers-XVI-Simposio/Conceptos-de-la-Ciencia-IG/TC1-Analisis-Comparativo-de-dos-Modelos-de-Deforestacion.pdf>
- Gómez Ossa, L. F. y Botero Fernández, V. (2017). Aplicación de redes neuronales artificiales en la modelación de la deforestación asociada a nuevos proyectos de infraestructura vial. *DYNA*, 84(201), 6873. <http://dx.doi.org/10.15446/dyna.v84n201.54310>
- González, J. J., Etter, A. y Sarmiento, A. (2011). *Análisis de tendencias y patrones espaciales de deforestación en Colombia* (Informe técnico). Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam).
- González, M., Martínez, M. y Álvarez, L. (2017). Modelación espacial de la deforestación en el bioma amazónico colombiano usando TerrSet y Dinamica EGO. *Ecología y Sociedad*, 22(4), 118.
- González-González, A., Villegas, J. C., Clerici, N. y Salazar, J. F. (2021). Spatial-temporal dynamics of deforestation and its drivers indicate need for locally-adapted environmental governance in Colombia. *Ecological Indicators*, 126, 107695. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2021.107695>
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam). (2018). *Mapa de riesgo de deforestación de la Amazonia colombiana* (Informe técnico). Ideam.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2019). *Propuesta de Niveles de Referencia de Emisiones Forestales (NREF) para la deforestación en Colombia*. Ideam y MADS.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (Ideam) y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2024). *Propuesta actualizada de NREF 2023-2027 para Colombia*. Ideam y MADS.
- Jamshed, M., Rana, S. y Hussain, M. (2022). Deep learning approaches for spatiotemporal prediction of tropical deforestation. *Remote Sensing of Environment*, 278, 113054.
- Lambin, E. F., Turner, B. L., Geist, H. J., Agbola, S. B., Angelsen, A., Bruce, J. W., Coomes, O. T., Dirzo, R., Fischer, G., Folke, C., George, P., Homewood, K., Imbernon, J., Leemans, R., Li, X., Moran, E., Mortimore, M., Ramakrishnan, P., Richards, J. ... y Xu, J. (2003). The causes of land-use and land-cover change: moving beyond the myths. *Global Environmental Change*, 11(4), 261-269. [https://doi.org/10.1016/S0959-3780\(01\)00007-3](https://doi.org/10.1016/S0959-3780(01)00007-3)
- Leija, E. G., Pavón, N. P., Sánchez-González, A., Rodríguez-Laguna, R. y Ángeles-Pérez, G. (2021). Dinámica espacio-temporal de uso, cambio de uso y cobertura de suelo en la región centro de la Sierra Madre Oriental: implicaciones para una estrategia REDD+ (Reducción de Emisiones por la Deforestación y Degradación). *Cartografía*, (102), 43-68. <https://doi.org/10.35424/rcarto.i102.832>

- López, A., Ríos, M. J., Flamenco Sandoval, A. y Farfán Gutiérrez, M. (2019). Análisis y modelación espacial de los patrones de deforestación (2005-2025) en la microcuenca La Unión del municipio de Chiapa de Corzo, Chiapas. *Sociedad y Ambiente*, 7(18), 117-143. <https://www.scielo.org.mx/pdf/sya/n18/2007-6576-sya-18-117.pdf>
- Murillo Sandoval, P. J., VanDexter, K., Van Beek, L. y Kok, K. (2021). Peace is much more than silence: deforestation after the Colombian peace agreement. *Global Environmental Change*, 66, 102200.
- Red Amazónica de Información Socioambiental Georreferenciada (RAISG). (2022). *Deforestación en la Amazonia al 2025* (Informe regional). RAISG.
- Sales, L. P., Monteiro, L., Rosa, M. y Loyola, R. (2023). Predicting tropical deforestation with generalized additive models. *Remote Sensing of Environment*, 286, 113331.
- Silva, E. A., Tramontina, J., Alba, E., de Godoy Goergen, L. C., Pedroso Finger, A. y Soares Pereira, R. (2017). Forest cover analysis through the weights of evidence method in the Campanha Ocidental region - RS (Brazil). *Revista Árvore*, 41(1), e410105. <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000100005>

