

Metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia^{*}

Methodology for Definition of Territories at Deforestation Risk in Colombia

Andres Felipe Cely¹ 
Lina Paola Arévalo² 
Miguel Serrano López³ 
Camilo Andrés Albarracín⁴ 
Adriana María Vargas⁵ 

Resumen

En las últimas décadas, la deforestación se ha posicionado como una de las preocupaciones ambientales más relevantes, puesto que implica la pérdida de bosques naturales, los cuales son estratégicos para la conservación de la biodiversidad y la amortiguación de los efectos del cambio climático (WWF, 2024). En este sentido y ante la necesidad de contar con datos relevantes que aporten a la lucha contra la deforestación, se planteó una metodología de valoración de territorios en riesgo de deforestación a escala municipal, que incluyó una consulta interinstitucional de variables, búsqueda de información secundaria, y tratamiento estadístico de los datos para la construcción de subíndices de amenaza y vulnerabilidad. La valoración del riesgo se realizó mediante la combinación de una medición de amenaza, que tiene en cuenta la concentración y tendencia de la deforestación, y de una medición de vulnerabilidad bajo cinco categorías. Los principales hallazgos indicaron que las zonas de riesgo alto y muy alto se concentran en la región de transición Orinoquía-Amazonía. El desarrollo de esta metodología permitió integrar indicadores de amenaza y vulnerabilidad para generar un índice de riesgo de deforestación compuesto que permitió tener una visión simultánea de los municipios en los que la intensidad de la deforestación se combina con debilidades/ fragilidades del territorio ya sea en el ámbito social, económico, institucional o de seguridad.

Palabras clave:

amenaza, bosques, deforestación, riesgo, vulnerabilidad.

Cómo citar

Cely, A. F., Arévalo, L. P., Serrano López, M., Albarracín, C. A. y Vargas, A. M. (2024). Metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia. *Análisis Geográficos*, 57(1), 54 - 68.

^{*} Artículo desarrollado en el marco del Programa Territorios Forestales Sostenibles (TEFOS), Convenio de Cooperación entre el Reino Unido, el gobierno de Colombia y la Oficina de las Naciones Unidas Contra la droga y el Delito (UNODC) 2023. Las opiniones expresadas son responsabilidad del autor, y no constituyen reconocimiento o aceptación por parte de la Organización de Naciones Unidas.

1 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). andres.celygonzalez@un.org. ORCID:

2 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). lina.arevalo@un.org. ORCID:

3 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). miguelserrano2002@yahoo.com. ORCID:

4 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). camilo091948@gmail.com. ORCID:

5 Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC). adrianavargas@un.org. ORCID:

Abstract

In recent decades, deforestation has become one of the most relevant environmental problems, due to the loss of strategic areas for biodiversity conservation and climate change effects mitigation (WWF, 2024). Because of this and the necessity to have relevant data that contributes the oppose against this phenomenon, a methodology for assessing territories at risk of deforestation at a municipal scale was proposed. This methodology included an inter-institutional consultation of variables, secondary information searching, and data statistical treatment to create deforestation threat and vulnerability sub-indices. The risk assessment was made by combining the threat and vulnerability sub-indices that indicate, on one hand, the concentration and trends of deforestation, and on the other, five categories that describe vulnerability conditions. The main findings indicated that high and very high-risk areas were concentrated in the Orinoquía-Amazon transition region. This methodology allowed the integration of threat and vulnerability components to generate a composite deforestation risk index that granted a simultaneous vision of municipalities where deforestation phenomena are more intense, in response to territorial weaknesses/fragilities like social, economic, institutional, or security conditions.

Keyword:

threat, forests, deforestation, risk, vulnerability.

Introducción

La deforestación se entiende como la conversión directa o inducida de la cobertura de bosque a otro tipo de cobertura de la tierra en un periodo de tiempo determinado (González Arenas et al., 2018a). En las últimas décadas, la deforestación ha emergido como uno de los conflictos ambientales más recurrentes y complejos a nivel global, dado que implica la pérdida de uno de los ecosistemas más vitales para la vida humana y la amortiguación de los efectos del cambio climático (World Wildlife Fund [WWF], 2024). Este fenómeno ha sido muy activo en países de la Amazonía, cuya cobertura arbórea se ha reducido en áreas de expansión agrícola y ganadera (Crespo Garay, 2020).

En este sentido, uno de los principales retos, tanto de las autoridades competentes como de los sectores académicos e institucionales relacionados con el monitoreo de bosques, es el de identificar las condiciones de riesgo frente a la deforestación a las que se encuentra expuesto un determinado territorio. Es decir, a la conjunción de situaciones que incrementen o no la probabilidad de que allí se presente una pérdida masiva de bosque. Diversos estudios han trabajado en el tema, entre los que se destacan la caracterización de causas y agentes de transformación del bosque (González Arenas et al., 2018b) y la modelación espacial de la deforestación para las regiones Orinoquía y Amazonía colombiana realizada por el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), en donde se predicen escenarios futuros de deforestación (González Arenas et al., 2018c).

No obstante, un abordaje desde el punto de vista de la gestión de riesgo implica el reconocimiento de sus dos principales componentes: los factores externos que impulsan el fenómeno, reconocidos como las condiciones de amenaza, así como las condiciones propias del territorio que favorecen su existencia, es decir, la vulnerabilidad (Turner et al., 2003).

La comprensión de estos dos aspectos es clave para explicar el comportamiento del fenómeno, así como para poder definir lineamientos de acción institucional y política pública para la atención de las situaciones que favorecen la deforestación.

En este contexto, y en el marco del proyecto de fortalecimiento de la capacidad institucional en la lucha contra la deforestación en Colombia, apoyado y financiado por el Programa Territorios Forestales Sostenibles (TEFOS) del Reino Unido en cooperación con la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC) en Colombia, se desarrolló una metodología para la definición de los territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia⁶, para la que se calcularon índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de deforestación a escala municipal.

Materiales y Métodos

La metodología para la definición de territorios en riesgo a ser deforestados en Colombia abarcó las etapas de exploración de variables, recolección de información, análisis de correlación y componentes principales, y determinación de índices de amenaza y vulnerabilidad. A continuación, se expone cada una de estas etapas mencionadas.

Exploración de variables y recolección de información secundaria

Esta etapa inició con un formulario semiestructurado de consulta interinstitucional⁷ que permitió identificar de manera exploratoria las variables asociadas con la deforestación. Los hallazgos se sistematizaron y clasificaron en variables de

6. La metodología planteó incluir variables asociadas al acaparamiento de tierras y las malas prácticas extensivas ganaderas; sin embargo, no fue posible encontrar datos anualizados y con base en métodos estandarizados que permitieran realizar un análisis estadístico y de causalidad adecuados para nutrir un índice de amenaza sólido. Como esto no desconoce que estas actividades puedan aportar en las tendencias de deforestación en el país, fue desarrollado un análisis de trayectorias de las áreas deforestadas para conocer a qué tipo de cobertura del suelo fueron reemplazadas.

7. El formulario fue respondido por doce entidades: Superintendencia de Notariado y Registro (SNR) – Notarías, Corporación Autónoma CDA, Corporación Autónoma Cormacarena, Corporación Autónoma Corpoamazonia, Alcaldía de San Vicente del Caguán, Parques Nacionales Naturales (PNN), Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas (SINCHI), Unidad de Planificación Rural Agropecuaria (UPRA), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS), Unidad de Restitución de Tierras (URT), UNODC-SIMCI. Aunque estas entidades se consultaron en la primera fase de la investigación, no hacen parte del desarrollo de esta.

vulnerabilidad y amenaza. Adicionalmente, se realizó un taller interinstitucional con entidades públicas y privadas del sector ambiente para socializar y ajustar los hallazgos, de esta forma se refinaron las variables a utilizar para calcular los índices de los componentes asociados al riesgo de deforestación.

Con las variables identificadas, se procedió a la recolección de información secundaria para cada una de ellas. Para el componente de vulnerabilidad se consolidó una base de datos con veintidós variables (138 subvariables) distribuidas en cinco categorías: social, económica, institucional, de seguridad y territorial (Tabla 1). Para el componente de amenaza, y ante la falta de información estandarizada e histórica de las variables identificadas anteriormente (actividades agropecuarias, cultivos ilícitos, extracción de minerales, etc.), se construyó un índice autorreferido, es decir, que permitiera valorar la amenaza a partir del comportamiento de la deforestación en distintos periodos de tiempo.

Tabla 1 - Variables por categoría, componente de vulnerabilidad

Categoría	Variable	Periodo	Fuente
Social	Nivel de escolaridad	2005 y 2018	Departamento Administrativo Nacional de Estadística (DANE).
	Analfabetismo	2006 y 2018	DANE
	Desplazamiento - ocurrencia	1990-2021	Unidad para las víctimas
	Desplazamiento - llegada	1990-2021	Unidad para las víctimas
	Desplazamiento - eventos	1990-2021	Unidad para las víctimas
Económica	Mercado laboral: ocupación formal	2010-2016	Departamento Nacional de Planeación (DNP)-Terridata.
	Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector.	2016-2019	DNP-Terridata
	Valor agregado municipal	2011-2020	DANE
	Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	2005 y 2018	DANE
	Índice de pobreza multidimensional (IPM)	2018	DANE
	Índice de desempeño fiscal (IDF)	2015-2021	DNP
	Porcentaje de las unidades de producción agropecuaria por tamaño.	2014	DNP
Institucional	Presencia de sedes de Parques Nacionales Naturales (PNN).	2022	PNN
	Número de sedes de PNN	2022	PNN
	Presencia de sedes fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación) ⁸ .	2022	Fiscalía General de la Nación (FGN)
	Número de sedes de fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación).	2022	FGN
	Presencia de las sedes de las Corporaciones Autónomas Regionales (CAR).	2022	Asociación de Corporaciones Autónomas Regionales y de Desarrollo Sostenible (ASOCARS).
	Índice de complejidad municipal para actualización catastral (ICMAC).	2022	DNP
	Medición Desempeño Municipal (MDM)	2016-2020	DNP
	Presencia de Grupos Armados Ilegales	2021	Instituto de Estudios para el Desarrollo y la Paz (In-depaz).
Seguridad	Riesgo de violencia electoral	2007, 2010, 2011, 2014-2018, 2022	Misión de Observación Electoral (MOE)
	Municipios priorizados por el conflicto armado (Programas de Desarrollo con Enfoque Territorial [PDET], Programa Nacional Integral de Sustitución de Cultivos Ilícitos [PNIS]).		Agencia para la Renovación del Territorio (ART)

8 A 2022, las sedes de fiscalía relacionadas con delitos de deforestación son: Dirección de Derechos Humanos eje Ambiental, delegada para las finanzas criminales, Cuerpo Técnico de Investigaciones (CTI), y desde el nivel territorial las direcciones seccionales. Esta información puede cambiar ya que para esa fecha la fiscalía se encontraba en procesos de reestructuración interna.

Definición de los índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo de deforestación

A partir de la información disponible se consolidó una base de datos para los 1.121 municipios del país, intentando asociar para cada una de las variables una medición oficial (o una aproximación de ella) que respondiera a las hipótesis planteadas en los talleres acerca de su relación con la deforestación (capacidad y presencia institucional, mercado laboral, necesidades básicas insatisfechas, actividades económicas extractivas, condiciones de seguridad y accesibilidad, etc.). En esta base de datos se integraron un total de 139 variables relacionadas con los distintos componentes de la vulnerabilidad y la amenaza. Algunos municipios no tenían la totalidad de los datos, por lo que se les imputó la mediana de los valores de otros con la misma categoría municipal.

Análisis de correlación

La refinación de las variables a utilizar para la construcción de los índices, de acuerdo con su relación con la vulnerabilidad y la amenaza de deforestación, se realizó mediante dos tipos de análisis: correlación y componentes principales.

En primer lugar, se estimó la correlación entre todas las variables y la deforestación, para conocer estadísticamente cuáles podrían asociarse a este fenómeno. Este análisis se realizó utilizando el coeficiente de correlación de Spearman (Restrepo y González, 2007)⁹, mediante el cual se determinó cuáles variables tenían una correlación significativa¹⁰ y consistente¹¹ con la deforestación para cada uno de los años.

En este ejercicio solo se sacaron las correlaciones de la deforestación con las variables que estuvieran disponibles para el mismo año o el año anterior. Por ejemplo, no se calculó la correlación entre el índice de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI) de 2018 con la deforestación de 2010, toda vez que, bajo un marco de causalidad, la pobreza del futuro no tendría por qué ser un factor de riesgo de la deforestación del pasado.

Una vez realizado el análisis de correlación, se descartaron las variables que no mostraron una correlación significativa y consistente con la deforestación, y se procedió a realizar el análisis de componentes principales.

Análisis de Componentes Principales

Luego del análisis de correlación, se realizó un Análisis de Componentes Principales (ACP) como segundo nivel de refinamiento. El objetivo de este análisis fue reducir la dimensionalidad del conjunto de datos y, por ende, simplificar su complejidad, manteniendo la información más relevante para el fenómeno en estudio: la deforestación y la vulnerabilidad asociada. Adicionalmente, el ACP estableció un mecanismo para asignar la ponderación de cada variable dentro de su categoría para el índice de vulnerabilidad, conforme a la metodología descrita por Carmona Sánchez et al. (2015).

9 El coeficiente de correlación de Spearman se eligió porque es menos sensible a outliers y no asume una relación lineal entre las variables, lo que lo hace más apropiado en este caso. Se optó por este método sobre Pearson debido a que no se pudieron comprobar los supuestos necesarios para utilizar el más conocido coeficiente de correlación de Pearson.

10 Se calcularon los *p*-valores del coeficiente de correlación de Spearman mediante *Bootstrap* para determinar la significancia de la asociación (si estadísticamente era distinta de 0). *Bootstrap* es un método estadístico utilizado para estimar la distribución de un estadístico mediante la repetición de muestreos con reemplazo.

11 Consistente implicaba que no solo todos los coeficientes de correlación fueran significativos para la variable analizada y la deforestación, sino que también el signo de esta correlación (positivo o negativo) fuera el mismo en la mayoría de los casos.

Para llevar a cabo el ACP, se estandarizaron las variables para evitar cualquier problema que pudiera surgir debido a las diferencias en las escalas de las variables¹². Los componentes principales resultantes capturaron la mayor parte de la variabilidad presente en los datos originales, permitiendo asignar pesos específicos a cada variable de manera más efectiva.

Para asegurar la robustez del análisis, se retuvieron suficientes componentes principales como para explicar, al menos el 75% de la variabilidad total en los datos. Esta estrategia permitió tanto simplificar la estructura del conjunto de datos como capturar la máxima cantidad de información relevante.

Determinación de variables de amenaza

Tomando como referente las limitaciones para incluir variables de amenaza, el enfoque para la construcción de este índice fue ajustado mediante una propuesta de aproximación al fenómeno que solo dependiera de la propia deforestación (un índice autorreferido). Por este motivo, el índice de amenaza por deforestación se construyó a partir de dos subcomponentes: *Concentración y Tendencia* del fenómeno. El índice se expresó como una adición de los dos subcomponentes de la siguiente forma:

$$IA_{it} = F2_{it} * (1 + \tilde{F3}_{it}) \quad (1)$$

Donde: IA_{it} es el índice de Amenaza para el municipio i en el año t ; $F2_{it}$ es el subcomponente de Concentración para el municipio i en el año t ; y, $F3_{it}$ es el subcomponente de Tendencia para el municipio i en el año t .

A su vez, el subcomponente de Concentración se construyó como:

$$F2_{it} = \frac{MADef_{it}}{\max_{i=1, \dots, n} (MADef_{it})} \quad (2)$$

Donde: $MADef_{it} = \frac{Def_{it} + Def_{it-1} + Def_{it-2}}{3}$, es el promedio de la deforestación de los últimos tres años para el municipio i en el año t .

Y el subcomponente de Tendencia se construyó como

$$F3_{it} = \frac{\Delta MADef_{it}}{\max_{i=1, \dots, n} (|\Delta MADef_{it}|)} \quad (3)$$

Donde: $\Delta MADef_{it} = MADef_{it} - MADef_{it-1}$, es la diferencia entre el promedio móvil de la deforestación de los últimos tres años para el municipio en los años t y $t-1$.

Con base en lo anterior, el cálculo de este índice generó valores de *amenaza residual* en los municipios que, aunque tuvieron deforestación en los últimos tres años, no reportaron deforestación en el último año evaluado (2020-2021).

Determinación de variables de vulnerabilidad

Durante la construcción del panel de datos, se identificó que las variables disponibles para el índice de vulnerabilidad se presentaban en tres formas: (i) dato censal, (ii) dato anual, (iii) dato único. En el caso de datos censales, los valores fueron im-

putados desde el período inicial hasta el año anterior a la nueva medición. Para los datos anuales, se emplearon tal como fueron reportados por las instituciones pertinentes. Los datos únicos se usaron de manera homogénea para imputar el valor en los períodos anteriores y posteriores.

Posterior a este proceso de imputación, se surtieron los análisis de correlación y ACP descritos anteriormente. Como resultado del análisis de correlación se determinó que, del total de variables iniciales, 47 cumplieron con el criterio de evaluación, lo que originó un nuevo conjunto de variables correlacionadas entre sí, para posteriormente realizar el ACP.

Para construir un índice sintético de vulnerabilidad basado en datos numéricos y continuos significativamente correlacionados con la deforestación, la metodología propuesta abordó el análisis por categorías: social, institucional, seguridad, económico y territorial. Como referente se consultaron dos ejercicios donde se establecieron las bases para el cálculo de un índice sintético, el primero orientado a la tipificación de categorías municipales (Carmona et al., 2015) y el segundo propuesto para la definición de la vulnerabilidad municipal ante el establecimiento de cultivos de coca (Lombana, 2020).

El primer paso en la preparación de las variables fue asegurarse que todas estuvieran alineadas en la misma dirección. En otras palabras, un aumento en el valor de una variable debía corresponder a un aumento en la vulnerabilidad y viceversa.

Una vez identificadas las variables significativas y consistentes y después de realizar el ACP para cada categoría, la contribución de cada variable al subíndice de cada categoría se calculó a partir de las cargas factoriales. Estas cargas fueron elevadas al cuadrado y sumadas para obtener la comunalidad¹³ de cada variable. En este análisis, las ponderaciones o proporciones de cada variable en el índice sintético final se determinaron en función de estas comunalidades.

Por último, estas variables sintéticas fueron agregadas para formar el índice sintético final. Para ello, todas las variables sintéticas fueron reescaladas a valores entre 0 y 1, para asegurar la igualdad de peso entre las categorías. El índice sintético final se calculó como un promedio simple de estas variables reescaladas.

El proceso detallado anteriormente aseguró que el índice sintético de vulnerabilidad representaba adecuadamente la información contenida en todas las variables y categorías. Al mismo tiempo, se mantuvo la coherencia y la interpretación intuitiva del índice, alineado con la dirección de las variables y ponderado de acuerdo con su relevancia, medida por su comunalidad.

Una vez se determinaron y calcularon los subíndices para cada una de las cinco categorías, el índice final de vulnerabilidad se construyó como una medida compuesta de estas. Así, la vulnerabilidad se entendió como la sumatoria de las distintas categorías que la componen.

Formalmente, el índice de vulnerabilidad para el municipio i en el período t se expresó matemáticamente como:

$$\begin{aligned} Vulnerabilidad_{it} &= W_1 Social + W_2 Económica + W_3 Institucional \\ &+ W_4 Seguridad + W_5 Territorial \end{aligned} \quad (4)$$

¹³ La comunalidad es una medida de la varianza total de una variable explicada por los componentes principales. De esta forma, las variables con mayor comunalidad en los primeros componentes seleccionados, iba a tener una ponderación mayor, pues describen relativamente mejor la categoría de análisis o, en otros términos, condensan de una mejor forma el fenómeno.

¹² La estandarización es un proceso común en análisis multivariados que busca poner todas las variables en una misma escala para permitir comparaciones justas.

En donde W representa el peso asignado a cada categoría. En el contexto de esta metodología, se asumió un peso igual para todas las categorías, implicando que cada subíndice contribuye equitativamente al índice final de vulnerabilidad. Por lo tanto, el índice de vulnerabilidad también puede ser expresado como el promedio de los subíndices, es decir:

$$IV_{it} = \frac{\sum_{k=1}^5 Subíndice_{itk}}{5} \quad (5)$$

Esto reflejó que la medida final de vulnerabilidad es la media aritmética de los subíndices de las cinco categorías. Es importante destacar que, aunque los subíndices son ponderados igualmente, las variables dentro de cada subíndice no lo son necesariamente, ya que su contribución se determinó a través de su comunalidad en el análisis de componentes principales.

Definición del índice de riesgo de deforestación

Una vez definidos los índices de amenaza y vulnerabilidad, y reconociendo que la materialización del riesgo es producto de la interacción entre sus variables, el cálculo del índice de riesgo se expresó matemáticamente de la siguiente manera:

$$IR_{it} = IA_{it} * IV_{it} \quad (6)$$

Donde IA_{it} representa el índice de amenaza de un municipio i para un año t e IV_{it} representa el índice de vulnerabilidad para el mismo municipio y año.

Reescalamiento de los índices

Para cada uno de los componentes del riesgo, amenaza y vulnerabilidad, así como para sus subcomponentes (amenaza: área municipal deforestada y tendencia; vulnerabilidad: social, institucional, seguridad, económico y territorial), se utilizó un proceso de reescalamiento que facilitó la comparación y el análisis. Por tanto, se aplicó un reescalado Min-Max para transformar los índices al rango de 0 a 1. El reescalado Min-Max¹⁴ es una técnica de normalización que transforma los datos a una escala común sin distorsionar las diferencias en los rangos de valores. Se realiza utilizando la fórmula:

$$X_{rescalado} = \frac{X - X_{min}}{X_{max} - X_{min}} \quad (7)$$

Donde X es el valor original, X_{min} es el valor mínimo en el conjunto de datos y X_{max} es el valor máximo. Al restar X_{min} del valor original y dividir por el rango de valores ($X_{max} - X_{min}$), se garantiza que los valores reescalados estarán entre 0 y 1.

Este proceso fue aplicado a los índices finales para asegurar que todos los índices estuvieran en la misma escala. Este reescalado facilitó las comparaciones directas entre los índices y permitió una interpretación más sencilla y clara de los resultados.

Una vez que los índices fueron reescalados, se procedió a definir intervalos armónicos dentro de este rango, lo que permitió agrupar y clasificar los municipios.

Construcción de los intervalos armónicos

Para el análisis intertemporal de los índices de amenaza, vulnerabilidad y riesgo, así como de sus subcomponentes, en el periodo

2014-2021, se utilizó el método de *Natural Breaks* (Jenks, 1967) para generar intervalos de clasificación. Este método es ampliamente reconocido en el análisis de datos espaciales y se utiliza para agrupar observaciones en categorías de manera que la varianza interna de los datos en cada grupo sea minimizada y la varianza entre grupos sea maximizada. En este caso, se generaron cuatro cortes a través de este método cada año, para cada uno de los índices que, junto con un mínimo (0) y máximo (1) predefinido por el método de reescalamiento, dio lugar a la formación de cinco grupos.

Luego, para cada año ($t=2014, \dots, 2021$) se definió un conjunto de puntos de corte ($k=1,2,3,4$) para definir 5 clases que, en conjunto, se puede definir como $C_{k,t}$, refiriéndonos al punto de corte k , en el año t .

En vista de que se requería un mecanismo que permitiera la comparabilidad de los datos a lo largo del tiempo, se optó por la construcción de intervalos armónicos. Esto implicó calcular el promedio de los puntos de corte generados por *Natural Breaks* para cada uno de los años, lo que resultó en un único punto de corte por cada intervalo, desde el primero hasta el cuarto. Este procedimiento se llevó a cabo para garantizar que las clases fueran constantes a lo largo del tiempo, lo que permitió una interpretación coherente y comparable a lo largo de los años estudiados. En la Tabla 2 se sintetiza la metodología descrita, donde se definieron los cortes de cada índice.

Tabla 2 - Construcción de intervalos armónicos

Año	Muy baja/o	Baja/o	Media/o	Alta/o	Muy alta/o
2014	0	$C_{1,2014}$	$C_{2,2014}$	$C_{3,2014}$	$C_{4,2014}$
2015	0	$C_{1,2015}$	$C_{2,2015}$	$C_{3,2015}$	$C_{4,2015}$
2016	0	$C_{1,2016}$	$C_{2,2016}$	$C_{3,2016}$	$C_{4,2016}$
2017	0	$C_{1,2017}$	$C_{2,2017}$	$C_{3,2017}$	$C_{4,2017}$
2018	0	$C_{1,2018}$	$C_{2,2018}$	$C_{3,2018}$	$C_{4,2018}$
2019	0	$C_{1,2019}$	$C_{2,2019}$	$C_{3,2019}$	$C_{4,2019}$
2020	0	$C_{1,2020}$	$C_{2,2020}$	$C_{3,2020}$	$C_{4,2020}$
2021	0	$C_{1,2021}$	$C_{2,2021}$	$C_{3,2021}$	$C_{4,2021}$
Intervalo armónico	0	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{1t}}{8}$	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{2t}}{8}$	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{3t}}{8}$	$\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{4t}}{8}$

Para cada año, se aplica individualmente la metodología de *Natural Breaks*, obteniendo los cuatro cortes (más o y 1). Por ejemplo, para el 2014, se obtendría el conjunto de cortes $\{0, C_{1,2014}, C_{2,2014}, C_{3,2014}, C_{4,2014}, 1\}$, los cuales definirían las cinco clases.

Sin embargo, con la intención de presentar mapas que sean comparables entre sí, se requiere un único conjunto de cortes, y es este el que se define como los intervalos armónicos, definidos en la última fila de la Tabla 2. Este conjunto define los cortes como el promedio, para cada corte, de los resultados obtenidos individualmente en cada año. Por ejemplo, el $C_{1,1}$ del intervalo armónico estará definido por el promedio de los $C_{1,t}$ de todos los años, es decir, como $\sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{1t}}{8}$.

Finalmente, el conjunto de cortes armonizados para presentar los mapas de uno de los indicadores será el definido por $\{0, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{1t}}{8}, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{2t}}{8}, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{3t}}{8}, \sum_{t=2014}^{2021} \frac{C_{4t}}{8}, 1\}$.

En general, esta metodología es apropiada para asegurar la comparabilidad temporal de los datos. Al utilizar promedios de puntos de corte a lo largo de varios años, se logró una mayor estabilidad en la clasificación de los datos, mitigando las fluctuaciones anuales y permitiendo un análisis más coherente.

14 Ver Scikit-learn (versión estable). (n.d.). MinMaxScaler. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.MinMaxScaler.html>

Resultados del índice de riesgo de deforestación municipal

A continuación, se presentan los resultados del análisis de riesgo de deforestación a escala municipal, que incluyen, en primer lugar, la valoración discriminada de sus componentes de amenaza y vulnerabilidad, y, en segundo lugar, el riesgo resultante de la combinación de estos componentes.

Amenaza de deforestación por municipio

El cálculo de un índice para establecer el grado de amenaza a la deforestación debería poder incluir componentes asociados a los principales motores de deforestación como la ganadería y la agricultura, los cultivos ilícitos, la minería, el desarrollo de infraestructura, entre otras variables¹⁵. No obstante, al no existir información lo suficientemente detallada, rigurosa y periódica que permitiera su inclusión en un índice nacional de amenaza por deforestación, se decidió cuantificar la amenaza mediante un índice autorreferido, esto es, explicado por el comportamiento del fenómeno en sí mismo, en donde las variables se relacionaron con la concentración y la tendencia de la deforestación en un territorio particular, que para este caso fue el municipio. Así mismo, y de manera paralela, se realizó un análisis de trayectorias de los lotes deforestados, con el ánimo de buscar indicios sobre la incidencia de actividades antrópicas en el proceso de deforestación, tales como cultivos ilícitos y minería, así como su comportamiento y distribución geográfica a lo largo del tiempo. Dicho análisis no se incluyó dentro del índice, pero fue útil a la luz de la discusión y análisis de los resultados y se explica más adelante en este documento.

La valoración del índice de amenaza a partir de la concentración y tendencia de la deforestación presentó una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores cercanos a uno indicaron mayor nivel de amenaza, mientras que los que se aproximan a cero indicaron menor nivel (Tabla 3).

Tabla 3 - Rangos de valoración del índice de amenaza de deforestación

Amenaza	Índice (rango)
Muy baja	0,00 - 0,03
Baja	0,03 - 0,12
Media	0,12 - 0,30
Alta	0,30 - 0,59
Muy alta	0,59 - 1,00

Para 2021, 706 municipios presentaron algún nivel de amenaza, lo que corresponde a 64 municipios menos que en 2020. Los municipios con mayores índices de amenaza fueron en su orden: Cartagena del Chairá, Mapiripán, San Vicente del Caguán, Tibú, San José del Guaviare y La Macarena, todos con valores muy altos (Tabla 4).

Tabla 4 - Top quince de municipios con mayor índice de amenaza de deforestación, 2021

Departamento	Municipio	Índice amenaza 2021	Rango amenaza 2021	Posición 2021	Índice amenaza 2020	Rango amenaza 2020	Posición 2020
Caquetá	Cartagena del Chairá	1,00	Muy alta	1	0,69	Muy alta	4
Meta	Mapiripán	0,94	Muy alta	2	0,70	Muy alta	3

15 En el proceso de definición de la metodología del índice de riesgo de deforestación, se realizaron análisis espaciales con el fin de tener una aproximación de la relación entre deforestación y coberturas de la tierra, cultivos de coca y explotación de oro de aluvión.

Departamento	Municipio	Índice amenaza 2021	Rango amenaza 2021	Posición 2021	Índice amenaza 2020	Rango amenaza 2020	Posición 2020
Caquetá	San Vicente del Caguán	0,84	Muy alta	3	0,66	Muy alta	5
Norte de Santander	Tibú	0,70	Muy alta	4	0,51	Alta	6
Guaviare	San José del Guaviare	0,70	Muy alta	5	0,71	Muy alta	2
Meta	La Macarena	0,60	Muy alta	6	1,00	Muy alta	1
Guaviare	El Retorno	0,41	Alta	7	0,48	Alta	7
Caquetá	Solano	0,38	Alta	8	0,36	Alta	11
Guaviare	Calamar	0,38	Alta	9	0,47	Alta	8
Putumayo	Puerto Guzmán	0,33	Alta	10	0,41	Alta	9
Meta	La Uribe	0,33	Alta	11	0,30	Alta	12
Meta	Vista Hermosa	0,31	Alta	12	0,25	Media	15
Vichada	Cumaribo	0,30	Alta	13	0,39	Alta	10
Choco	Riosucio	0,29	Media	14	0,27	Media	13
Putumayo	Puerto Leguizamó	0,25	Media	15	0,22	Media	16

Al realizar una comparación con respecto al índice de amenaza en 2020, se evidenció que los municipios de Cartagena del Chairá, Mapiripán, San Vicente del Caguán, San José del Guaviare y La Macarena mantuvieron su nivel de amenaza en muy alta. Por otra parte, 46 municipios cambiaron de categoría de amenaza, tres municipios bajaron su nivel al pasar de categoría baja a muy baja (Puerto Rico y La Montañita en Caquetá, y Cacahual en Guainía). En contraste, nueve municipios aumentaron su nivel de amenaza, destacándose Tibú en Norte de Santander, que pasó de amenaza alta a muy alta; Vista Hermosa en Meta que pasó de media a alta, y, finalmente, Miraflores en Guaviare que pasó de baja a media. Adicionalmente, 34 municipios sin amenaza en 2020 fueron categorizados con amenaza muy baja en 2021¹⁶. Por otra parte, 99 municipios con amenaza muy baja en 2020 pasaron a no tener amenaza en 2021¹⁷.

La distribución espacial del índice señaló un núcleo principal en el área de transición amazónica como aquella de mayor amenaza. De hecho, los municipios de Cartagena del Chairá, Mapiripán, La Macarena, San Vicente del Caguán y San José del Guaviare fueron los de mayor grado de amenaza en el país, seguidos por los municipios amazónicos circundantes. Estos territorios se caracterizan por su diversidad biológica y cultural con presencia de Parques Nacionales Naturales como la Serranía de Chiribiquete, Sierra de la Macarena, Tinigua, Cordillera de los Picachos y Nukak, y diversos resguardos indígenas como Barranco Colorado, Caño Jabón, Morichal Viejo, Santa Rosa, Cerro Cucuy, Santa Cruz, Caño Danta, Nukak-Maku, Laguna Araguato y Barranco Ceiba, Cachivera de Nare, Llanos del Yari - Yaguará II, El Itilla, Caño Negro, La Sal, Caño Ovejas (Betania Corocito), La Asunción, Macuare, La Fuga, Naexal Lajt del Pueblo Jiw, entre otros. Se debe mencionar que en estas zonas interactúan una serie de situaciones que favorecen el fenómeno de la deforestación: colonización, expansión ganadera, presencia de actividades ilícitas, presencia histórica de grupos armados ilegales o falta de información catastral. Así mismo, convergen con áreas de manejo y reglamentación especial como Parques Nacionales Naturales, Antiguos Espacios Territoriales de Capacitación y Reincorporación y resguardos indígenas.

Por otra parte, Tibú en Norte de Santander registró una amenaza

16 Los 34 municipios hacen referencia a aquellos que para 2020 llevaban tres años consecutivos o más sin reportes de área deforestada y en 2021 reportaron nuevamente deforestación.

17 Los 99 municipios hacen referencia a aquellos que en 2021 completaron tres años consecutivos sin reportes de deforestación.

muy alta de deforestación. Este municipio incrementó su nivel de amenaza en los últimos tres años, lo que podría generar una alerta para la creación de estrategias de contención del fenómeno. De hecho, según el análisis de trayectorias realizado sobre los lotes deforestados, fue el municipio con la más alta relación de deforestación por cultivos de coca. Igualmente, llamó la atención Riosucio en Chocó, con una amenaza media que se mantuvo constante durante los últimos años.

Como complemento del análisis anterior, al revisar el comportamiento de la amenaza durante los últimos cinco años se observó como en San Vicente del Caguán, Cartagena del Chairá y San José del Guaviare se mantuvo el grado de amenaza en muy alta, mientras que en los municipios circundantes a ellos la amenaza se iba incrementando con los años. Por otra parte, se evidenció como la región del Magdalena Medio entre Antioquia, Santander y Bolívar, así como el departamento de Arauca y el sur de la región Pacífica, con menores concentraciones de amenaza, fueron presentando incremento en este periodo. En contraste, algunos municipios cordilleranos de Nariño, Cauca, Cundinamarca, Boyacá y aquellos ubicados en las sabanas de Córdoba fueron liberándose de la amenaza al tener mínimo tres años consecutivos sin reporte de deforestación (Figura 1).

Trayectorias de lotes deforestados¹⁸

El análisis de trayectorias de áreas deforestadas buscó brindar una aproximación general de los procesos que han tenido los lotes deforestados a través del tiempo y las coberturas de la tierra en las que se han convertido. Si bien fue un ejercicio exploratorio con resultados sujetos a limitaciones relacionadas con diferencias metodológicas y temporales en la captura de la información analizada¹⁹, este permitió complementar el análisis de amenaza y esbozar algunas conclusiones sobre el comportamiento geográfico y multiescalar de las áreas deforestadas a lo largo del tiempo.

En general, a escala nacional las áreas deforestadas fueron convertidas principalmente en pastos, seguido de áreas agrícolas heterogéneas, con un 29% y 25% en promedio, respectivamente. No obstante, estos cambios no fueron inmediatos, sino que se fueron dando de forma transitoria en periodos de hasta 10 o 20 años. Así mismo, la transformación a otro tipo de coberturas cambió según el periodo de tiempo y la localización de los lotes. Por ejemplo, mientras que la transformación a pastos de los lotes deforestados entre 1990 y 2000 se concentró en las llanuras de la región Caribe (departamentos de Córdoba, Sucre, Bolívar y Magdalena) para el año 2002, en 2018 esta se localizaba principalmente en la región de los Llanos del Yaré, entre los departamentos de Meta y Caquetá.

18 Debido a la dificultad de obtener unas variables medibles de forma recurrente para la definición de un índice de amenaza no autorreferido, se realizó un análisis de las trayectorias de los lotes deforestados, utilizando información de cobertura de uso del suelo, localización de cultivos ilícitos y áreas de explotación minera. De esta manera, se quiso probar la incidencia directa de actividades económicas del sector primario en los procesos de deforestación. Para ello se utilizaron capas georreferenciadas y técnicas de análisis espacial (superposición).

19 Las metodologías espaciales y temporales por las cuales se genera la información cruzada espacialmente para el análisis de trayectorias de lotes deforestados son muy distintas, aún si se trata de la misma fuente, generando una limitación en la comparabilidad de los datos. Por ejemplo, si bien la información espacial sobre deforestación y coberturas de la tierra es producida por el IDEAM mediante el uso y tratamiento de imágenes satelitales y sensores remotos, las metodologías de captura y producción, así como la escala y los periodos de análisis son distintos, lo que puede generar algunos tipos de brechas. Esto explica el por qué, al identificar la trazabilidad de un área deforestada, los periodos siguientes puedan marcar que esta siga siendo bosque.

Ahora bien, al realizar este análisis a escalas más detalladas, la relevancia del tipo de cobertura en la que se convirtieron las áreas deforestadas varía. Por ejemplo, para el periodo 2011-2018, mientras que los pastos representaron entre el 40% y 60% de la deforestación en los departamentos de Arauca, Caquetá, Meta, Guaviare y Santander; en Risaralda, Nariño, Norte de Santander, Córdoba y Magdalena la cobertura predominante de las áreas deforestadas fueron las áreas agrícolas heterogéneas, con valores entre el 40% y 50%.

Por otra parte, con el fin de tener una aproximación de la relación entre deforestación y cultivos de coca, se realizó el cruce espacial de los lotes deforestados con los lotes de cultivos de coca interpretados por el SIMCI²⁰. Los resultados indicaron que la participación de los cultivos de coca en la deforestación nacional fue de máximo 2,4% para un solo año (2019), y de 6,8% acumulado para el periodo comprendido entre 2015 y 2020. Así mismo, el dato nacional es de 4,4% de la deforestación acumulada entre 2013 y 2021 (53.278 ha de coca sobre 1.310.372 ha deforestadas).

Al realizar el mismo ejercicio en escala departamental, en Norte de Santander se evidenció la mayor relación entre coca y deforestación, con un 27% acumulado entre 2013 y 2020 (17.410 ha de coca sobre 64.324 ha deforestadas durante el periodo), fenómeno que se concentró en los municipios de la región del Catatumbo. Para este mismo periodo, le siguieron Nariño con 22% (concentrados en los municipios de la región pacífica), Putumayo con 8%, Antioquia con 3% (particularmente sobre la región del Bajo Cauca) y Guaviare con 2%. A su vez, en la escala municipal la relación deforestación-cultivos de coca aumentó sustancialmente en casos específicos como el de Tumaco, donde el 42% del área total deforestada en el municipio en 2013 (616 ha) se transformó en coca entre ese año y el 2021, o el de Tibú, donde fue transformada en este cultivo el 48% de la deforestación de 2015 entre ese año y el 2021.

En cuanto a la relación entre la deforestación y la explotación de oro de aluvión (EVOA), el análisis espacial indicó que esta actividad representó el 1% de los bosques perdidos en el país entre 2014 y 2020 (13.328 ha de EVOA sobre 1.189.574 ha deforestadas), con una mayor representatividad a escala departamental (11% de la deforestación en el Chocó, y 4% en los departamentos de Bolívar y Cauca) y municipal (83% de las 464 ha deforestadas en Unión Panamericana en 2014 y 82% de las 401 ha deforestadas en río Quito en 2016).

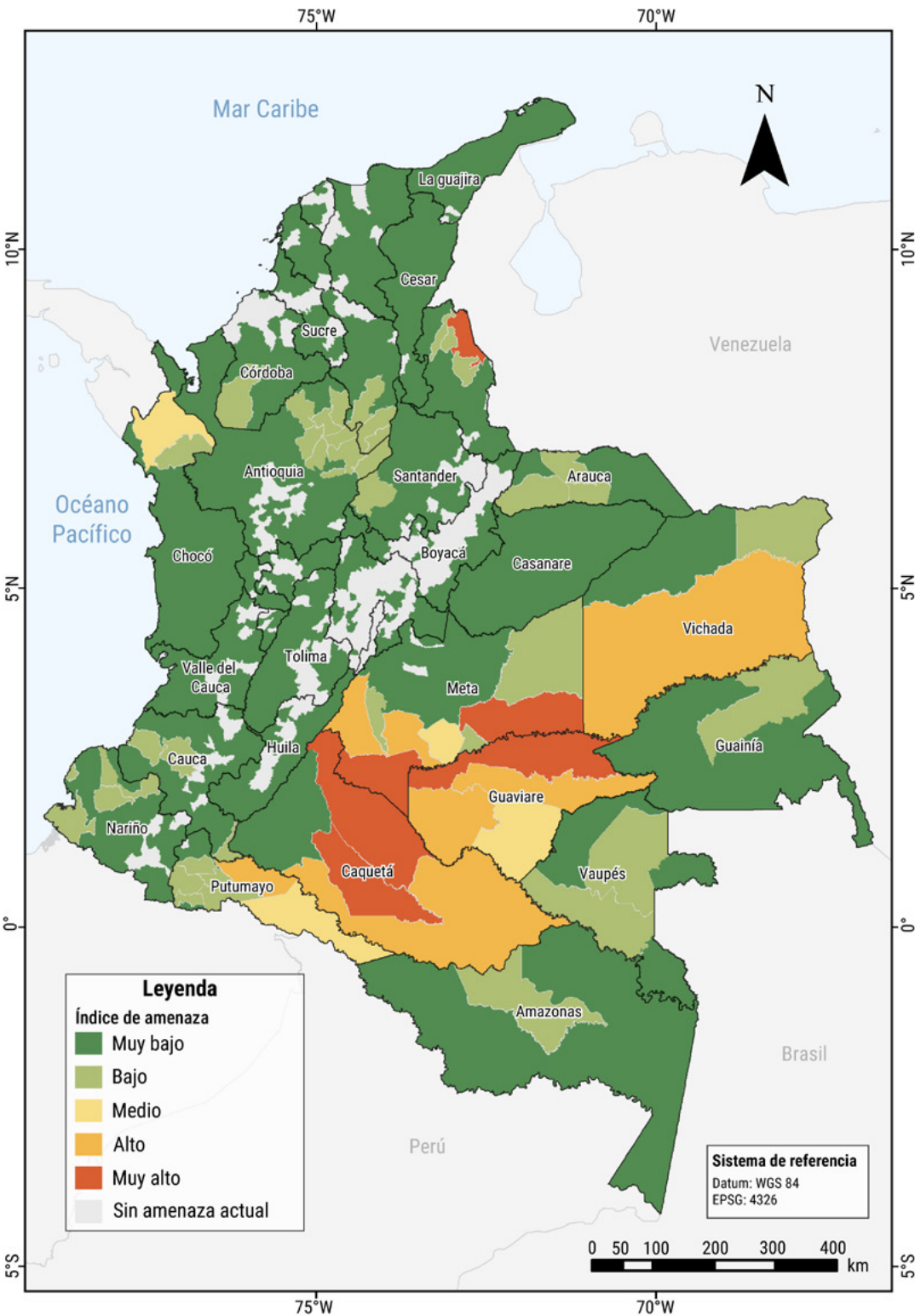
Finalmente, al hacer la relación de áreas deforestadas con zonas de explotación minera legalmente titulada, se pudo evidenciar que para el periodo 2013-2020 dicha actividad correspondió al 0,8% de la deforestación a nivel nacional. De estas, el 65% correspondió a la explotación de oro, plata y otros materiales asociados, el 21% a materiales de construcción, 9% a cobre y asociados, 3% a carbón y 2% otros materiales.

Vulnerabilidad municipal a la deforestación

La vulnerabilidad abarca los factores propios del territorio que influyen en que este sea más o menos susceptible de ser afectado por la deforestación, ya sea por cuestiones sociales, económicas, políticas, culturales, entre otras. Como parte del análisis de riesgo, y reconociendo los elementos aportados por los actores institucionales a cargo de la gestión sobre el fenómeno, la vulnerabilidad

20 Sistema de Monitoreo Integral de Cultivos Ilícitos de la Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito (UNODC).

Figura 1 - Mapa del índice de amenaza municipal de deforestación, 2021



a la deforestación fue evaluada desde veintinueve variables (47 subvariables) clasificadas en cinco categorías: social, económica, institucional, seguridad y territorial²¹ (ver Anexo 1).

En este sentido, para cada categoría se calculó un subíndice que posteriormente se promedió para obtener el índice de vulnerabilidad municipal a la deforestación. La valoración del índice presentó una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores cercanos a uno indicaron mayor nivel de vulnerabilidad y los aproximados a cero, menor nivel (Tabla 5).

Tabla 5 - Rangos de valoración del índice de vulnerabilidad de deforestación

Vulnerabilidad	Índice (rango)
Muy baja	0,00 - 0,04
Baja	0,04 - 0,13
Media	0,13 - 0,32
Alta	0,32 - 0,58
Muy alta	0,58 - 1,00

Para 2021, 147 municipios (incluyendo áreas no municipalizadas²²) presentaron un nivel muy alto de vulnerabilidad territorial a la deforestación y se localizaron principalmente en las regiones Amazónica, Pacífica, parte de la Orinoquía y algunos municipios hacia el Bajo Cauca antioqueño, sur de Bolívar y Catatumbo en Norte de Santander. En cuanto al nivel alto de vulnerabilidad, se presentó en 482 municipios localizados en la periferia de los de muy alta vulnerabilidad. La vulnerabilidad media tendió a concentrarse en la región Andina, especialmente en el centro del país: Boyacá, Cundinamarca, sur de Santander, sur de Norte de Santander y municipios cordilleranos de Nariño. En cuanto a los valores bajos, se presentaron en 46 municipios de Boyacá y Cundinamarca, principalmente. Por su parte, solo Busbanzá en Boyacá obtuvo una vulnerabilidad muy baja (Figura 2).

Los municipios con mayor vulnerabilidad para 2021, en orden de importancia fueron: Tumaco en Nariño, Puerto Asís en Putumayo, Cartagena del Chairá en Caquetá, El Retorno en Guaviare, y San Vicente del Caguán en Caquetá; para estos municipios el subíndice más crítico fue el que evaluó la categoría de seguridad (Tabla 6).

Tabla 6 - Top quince de municipios con mayor índice de vulnerabilidad a la deforestación, 2021

Posición 2021	Departamento	Municipio	Índice de vulnerabilidad 2021	Rango vulnerabilidad 2021	Rangos Categoría territorial	Rangos Categoría económica	Rangos Categoría social	Rangos Categoría seguridad	Rangos Categoría institucional
1	Nariño	Tumaco	1,00	Muy alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
2	Putumayo	Puerto Asís	0,92	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto

21 La categoría social está conformada por variables de analfabetismo y desplazamiento; la categoría económica, por variables de Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI), actividades económicas y porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño; la categoría institucional, por variables de Medición Desempeño Municipal, presencia y cantidad de sedes de Parques Nacionales Naturales, presencia y cantidad de sedes de Fiscalía, presencia de sedes CAR e índice de complejidad municipal para actualización catastral; la categoría de seguridad, por variables de municipios priorizados por el conflicto armado y riesgo de violencia electoral; y la categoría territorial, por variables de delimitación de territorios colectivos (resguardos indígenas, tierras de las comunidades negras y resguardos indígenas), distancia a centros poblados, distancia a vías y distancias a coberturas de la tierra (pastos, mosaicos, y cultivos)

22 Debido a la falta de información de las variables de vulnerabilidad para las áreas no municipalizadas presentes en los departamentos de Amazonas, Guainía y Vaupés, para cada categoría se realizó el promedio del valor departamental y se asignó a cada área no municipalizada.

Posición 2021	Departamento	Municipio	Índice de vulnerabilidad 2021	Rango vulnerabilidad 2021	Rangos Categoría territorial	Rangos Categoría económica	Rangos Categoría social	Rangos Categoría seguridad	Rangos Categoría institucional
3	Caquetá	Cartagena del Chairá	0,92	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Medio
4	Guaviare	El Retorno	0,90	Muy alto	Alto	Medio	Alto	Muy alto	Alto
5	Caquetá	San Vicente del Caguán	0,90	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Medio
6	Bolívar	San Pablo	0,88	Muy alto	Bajo	Alto	Muy alto	Muy alto	Alto
7	Arauca	Araucuita	0,88	Muy alto	Muy bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
8	Antioquia	Cáceres	0,87	Muy alto	Muy bajo	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
9	Córdoba	Puerto Libertador	0,87	Muy alto	Muy bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Medio
10	Córdoba	Tierralta	0,87	Muy alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Bajo
11	Guaviare	Miraflores	0,86	Muy alto	Medio	Alto	Muy alto	Muy alto	Muy alto
12	Córdoba	Montelíbano	0,86	Muy alto	Muy bajo	Muy alto	Muy alto	Muy alto	Alto
13	Choco	Riosucio	0,86	Muy alto	Medio	Muy alto	Muy alto	Alto	Bajo
14	Antioquia	Yondó	0,85	Muy alto	Muy alto	Alto	Muy alto	Medio	Alto
15	Nariño	Barbacoas	0,85	Muy alto	Bajo	Muy alto	Muy alto	Alto	Alto

Al revisar el comportamiento de la vulnerabilidad durante los últimos cinco años llamó la atención el incremento que se presentó de forma general en el país, pero principalmente en municipios de las regiones Pacífica, Amazónica, Bajo Cauca, Urabá y la Alta Guajira.

Riesgo de deforestación por municipio

Una vez obtenidos los índices de amenaza y vulnerabilidad, se calculó el índice de riesgo mediante su producto matemático. La valoración del índice se presentó en una escala normalizada de 0 a 1, donde los valores cercanos a uno indicaron un mayor nivel de riesgo y los próximos a cero, un menor nivel (Tabla 7).

Tabla 7 - Rangos de valoración del índice de riesgo de deforestación

Riesgo	Índice (rango)
Muy bajo	0,00 - 0,04
Bajo	0,04 - 0,13
Medio	0,13 - 0,32
Alto	0,32 - 0,58
Muy alto	0,58 - 1,00

Para 2021, cinco municipios alcanzaron un riesgo *muy alto* de deforestación; estos se encontraban localizados, principalmente, en el área de transición entre las regiones Orinoquía y Amazonia y son en su orden: Cartagena del Chairá en Caquetá, Mapiripán en Meta, San Vicente del Caguán en Caquetá y San José en el Guaviare. Así mismo, y de forma aislada, el municipio de Tibú en la región de Catatumbo en Norte de Santander.

Por su parte, tres municipios alcanzaron un riesgo *alto*, La Macarena en Meta, El Retorno y Calamar en Guaviare, localizados de forma contigua a los municipios con mayor riesgo y a aquellos categorizados con riesgo *medio*, tales como Cumaribo en Vichada, La Uribe, Vista Hermosa y Puerto Rico en el Meta, Miraflores en Guaviare, Solano en Caquetá, y Puerto Leguizamo y Puerto Guzmán en Putumayo. A estos se sumó Riosucio en el departamento de Chocó, para un total de nueve municipios con este nivel de riesgo (Figura 3). En Tibú se registró la expansión del riesgo hacia el sur, en el municipio de Sardinata; lo mismo ocurrió en Riosucio donde el riesgo se expandió hacia el municipio de Carmen del Darién.

Figura 2 - Mapa del índice de vulnerabilidad municipal por deforestación, 2021

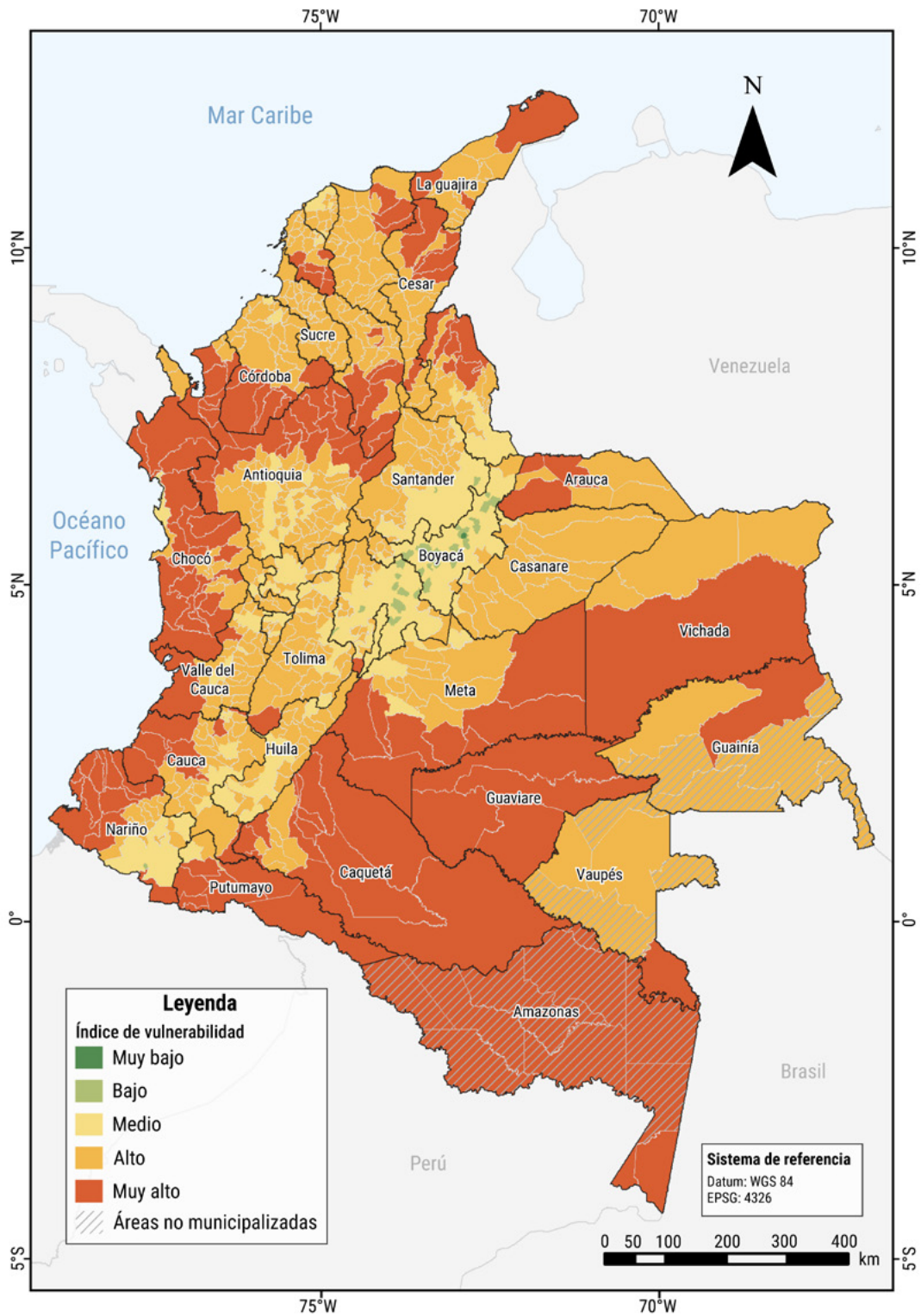
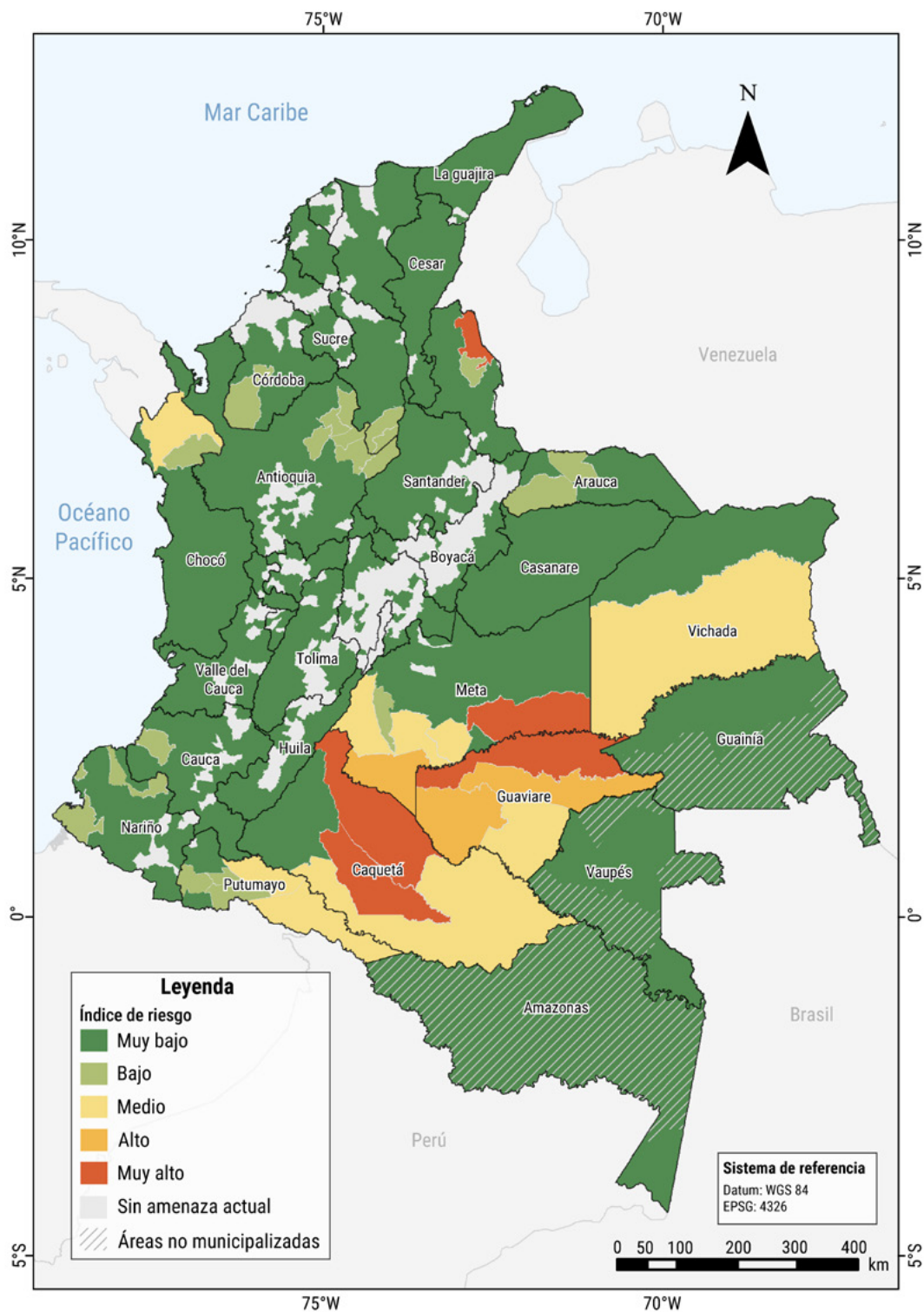


Figura 3 - Mapa del índice de riesgo municipal por deforestación, 2021



El comportamiento geográfico del riesgo de deforestación permitió identificar un corredor entre Cumaribo (Vichada) y Puerto Leguízamo (Putumayo) que mantuvo una condición de riesgo *medio-alto* durante los últimos años y constituyó la zona de máxima afectación por deforestación. Adicionalmente, se observaron algunas áreas de riesgo *bajo* en los departamentos de Arauca, Nariño y Córdoba, así como la región del bajo Cauca y el Magdalena Medio en los departamentos de Antioquia y Bolívar. El resto del país se encontró en riesgo *muy bajo* o *sin riesgo*, situación dada en los municipios sin valores de amenaza por deforestación²³.

Ahora bien, teniendo en cuenta el comportamiento del riesgo en los últimos cinco años (Tabla 8), se observó que la concentración se mantuvo en los mismos municipios, con calificaciones cambiantes entre riesgos *medio*, *alto* y *muy alto*, pero con un evidente aumento significativo en Tibú, que año a año fue escalando entre los quince municipios con mayor índice de riesgo del país. Así mismo, en los últimos cinco años, el riesgo se mantuvo en la categoría de *muy alto* en San José de Guaviare, Cartagena del Chairá y San Vicente del Caguán. Adicionalmente algunos territorios en riesgo *bajo* presentaron dinámicas de expansión, particularmente en las regiones del Bajo Cauca antioqueño y el Magdalena Medio, así como los departamentos de Nariño y Arauca.

Tabla 8 - Top quince de municipios con mayor índice de riesgo de deforestación, 2021

Departamento	Municipio	Índice de riesgo 2021	Rango riesgo 2021	Rango amenaza 2021	Rango vulnerabilidad 2021	Posición 2017	Posición 2018	Posición 2019	Posición 2020	Posición 2021
Caquetá	Cartagena del Chairá	1,00	Muy alto	Muy alto	Muy alto	2	2	1	2	1
Meta	Mapiripán	0,86	Muy alto	Muy alto	Muy alto	11	10	7	3	2
Caquetá	San Vicente del Caguán	0,82	Muy alto	Muy alto	Muy alto	1	1	2	4	3
Norte de Santander	Tibú	0,63	Muy alto	Muy alto	Muy alto	14	13	11	7	4
Guaviare	San José del Guaviare	0,61	Muy alto	Muy alto	Muy alto	3	4	4	5	5
Meta	La Macarena	0,52	Alto	Muy alto	Muy alto	4	3	3	1	6
Guaviare	El Retorno	0,40	Alto	Alto	Muy alto	6	6	6	6	7
Guaviare	Calamar	0,34	Alto	Alto	Muy alto	5	5	5	8	8
Caquetá	Solano	0,31	Medio	Alto	Muy alto	7	8	9	11	9
Meta	Vista Hermosa	0,28	Medio	Alto	Muy alto	16	16	12	14	10
Putumayo	Puerto Guzmán	0,28	Medio	Alto	Muy alto	9	7	10	9	11
Chocó	Riosucio	0,27	Medio	Medio	Muy alto	10	12	14	12	12
Vichada	Cumaribo	0,26	Medio	Alto	Muy alto	13	11	8	10	13
Meta	La Uribe	0,24	Medio	Alto	Muy alto	8	9	16	13	14
Putumayo	Puerto Leguízamo	0,22	Medio	Medio	Muy alto	12	15	15	16	15

Discusión

Los resultados de esta propuesta metodológica presentan convergencias y divergencias con estudios realizados por otros autores. Para efectos prácticos, la discusión se centrará a la luz de las investigaciones realizadas por el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) del IDEAM quienes producen las cifras oficiales de deforestación en el país y con quienes se socializaron los resultados de esta investigación.

²³ Un municipio se considera sin amenaza al completar mínimo tres años consecutivos sin reporte de deforestación.

Con base en los resultados presentados previamente, los municipios categorizados con amenaza *muy alta* coinciden con los núcleos de alta deforestación registrados por el SMBYC en su informe 2021 (IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible [Minambiente], 2022). Sin embargo, el índice de amenaza permitió identificar un corredor con valores medios a muy altos que se extiende desde el municipio de Cumaribo (Vichada) en zona de frontera con Venezuela hasta el municipio de Puerto Leguízamo (Putumayo) en frontera con Perú y Ecuador. Aunque en el informe de Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque 2021 no es visible este corredor, su identificación puede deberse a un tema de diferencias en la escala de los análisis. Asimismo, los resultados municipales de la amenaza permitieron identificar zonas de amenaza *baja* sobre las que debería prestarse atención temprana, ubicadas en la región pacífica de los departamentos de Nariño y Cauca, en Arauca, sur de Córdoba y la región del Magdalena Medio y Bajo Cauca en los departamentos de Antioquia, Bolívar y Santander. Es así como este análisis permitió localizar territorios en donde la deforestación aún no es crítica, pero se deben tener en cuenta de manera diferencial en la lucha contra la deforestación.

Pese a que no fue posible realizar el cálculo de un índice de amenaza consistente que incluyera los motores de deforestación (malas prácticas extensivas de ganadería, agricultura, cultivos ilícitos, minería, etc.) dada la fragilidad e inconsistencia de la información, el análisis de trayectorias realizado permitió una aproximación general para conocer los procesos que han tenido los lotes deforestados a través del tiempo y las coberturas de la tierra en las que se han convertido. De esta manera, se pudo afirmar que no existe una única actividad económica que fomente la deforestación, y menos de forma generalizada en la escala nacional. Si bien algunos autores describen los motores de deforestación, mencionando entre ellos la ganadería, la minería o los cultivos ilícitos (González Arenas et al., 2018b), la representatividad de cada una de estas actividades varía significativamente según la escala de análisis o el municipio específico en que ocurre el fenómeno. Asimismo, las transiciones de un tipo de cobertura a otra no son inmediatas, sino que son el resultado de diversos fenómenos y procesos que predominan sobre el territorio durante un tiempo específico.

Por tal motivo, fue posible afirmar que para comprender los causales de la deforestación se requiere un análisis espacial y multitemporal del comportamiento en la cobertura del suelo, que describa cómo se fue dando la pérdida de bosque y las coberturas que lo fueron reemplazando a lo largo del tiempo.

El análisis de trayectorias de áreas deforestadas permitió concluir que la coca no explica las dinámicas de deforestación a nivel nacional, puesto que solo ha representado el 4% del fenómeno en los últimos diez años, cifra cercana a la expuesta por la Oficina de las Naciones contra la Droga y el Delito en su estudio de caracterización y análisis de la dinámica de la deforestación y degradación del bosque por causa de los cultivos de coca en el Catatumbo y la Amazonía (UNODC, 2018). No obstante, a escala municipal, en lugares como Tumaco y Santa Bárbara (Nariño), El Tambo (Cauca), Tibú y El Tarra (Norte de Santander), la coca sí pareciera ser el principal motor de deforestación, dado que la relación entre ambos fenómenos puede alcanzar hasta el 42% para el área deforestada en un solo año. Lo mismo ocurrió

para el caso de la EVOA en algunos municipios del Chocó como Unión Panamericana, río Quito, Medio Atrato y El Cantón de San Pablo, donde la misma relación alcanzó hasta un 83%. Estos hallazgos coincidieron con las principales causas y agentes de la deforestación para los núcleos de alta deforestación Catatumbo, Pacífico Norte y Pacífico Sur descritos por el IDEAM en su reporte de monitoreo de la superficie de bosque de 2021 (IDEAM y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2022).

Respecto a la praderización de áreas que fueron bosque, los casos se concentraron en municipios y departamentos de fuerte actividad ganadera. Por ejemplo, en el caso específico de Caquetá, la conversión a pastos representó el 7,4% de la deforestación total del país en el periodo 1990-2000 y el 11,6% en el periodo 2011-2018. En el caso de Arauca, el 65% de las 30.857 ha que se deforestaron entre 2011 y 2018 se convirtieron en pastos.

Todo lo anterior indica que las acciones de prevención y mitigación de la deforestación deberán estar sectorizadas, escaladas y diferenciadas de acuerdo con el ámbito territorial en el que esta ocurre, respondiendo específicamente a dinámicas particulares del territorio, ya sean económicas, sociales o de seguridad. Esto representa un reto para la institucionalidad ambiental del país, y requiere una revisión de los enfoques que se han adelantado para combatir el fenómeno (Minambiente et al., 2017).

En cuanto al análisis de los resultados del índice de vulnerabilidad, la suposición subyacente es que la vulnerabilidad es un fenómeno multifacético que no puede ser capturado adecuadamente por una sola categoría. En este sentido, la metodología propuesta aportó en la integración de información de variables del orden social, económico, institucional, seguridad y territorial que ayudaran a entender las causas subyacentes a la deforestación (González Arenas et al., 2018b). En la revisión de estudios complementarios, no se encontraron hallazgos de datos a escala nacional que relacionaran variables de vulnerabilidad con deforestación.

Por lo anterior, es importante mencionar que los resultados permitieron evidenciar que dentro de la vulnerabilidad el factor impulsor más potente a nivel nacional fue la vulnerabilidad institucional, seguido por la vulnerabilidad social y la económica. La vulnerabilidad asociada a la seguridad tuvo un factor de menor impulso, excepto en algunos de los departamentos que registraron la mayor afectación (Guaviare, Putumayo, Caquetá y Cauca). En el caso del departamento del Amazonas, el principal factor de impulso se dio en la categoría territorial, que incluyó variables relacionadas como la presencia de territorios colectivos (resguardos indígenas, tierras de las comunidades negras y resguardos indígenas), distancia a centros poblados, distancia a vías y distancia a coberturas de la tierra (pastos, mosaicos, y cultivos).

De esta manera, al combinar los índices de amenaza y vulnerabilidad en un único índice de riesgo de deforestación, las zonas de riesgo *alto* y *muy alto* se encontraron concentradas en la región de transición Orinoquía-Amazonia, específicamente en los departamentos de Meta, Guaviare y Caquetá. De esta región, los municipios con la más *alta* condición de riesgo fueron San José del Guaviare, Mapiripán, Cartagena del Chairá y San Vicente del Caguán, seguidos por La Macarena, El Retorno y Calamar. Los resultados coinciden en alta proporción con los núcleos de deforestación identificados para ese año por el IDEAM y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022).

Por otra parte, se evidenció que es necesario prestar mayor atención sobre las áreas no municipalizadas al ser las áreas de mayor debilidad institucional, en las que el contexto puede favorecer la dispersión de acciones ilícitas que fomenten la deforestación. Adicionalmente, son aquellas áreas con gran disponibilidad de bosque a eliminar para la adecuación de tierras a otras actividades. En este sentido, si no hay un cambio en la trayectoria del comportamiento de la deforestación, dichas áreas incrementarán su riesgo, y se perderán espacios estratégicos para la conservación y prestación de servicios ecosistémicos en el país.

Finalmente, a manera de recomendación para fortalecer el índice de riesgo, se propone incluir la variable de área de bosque relativa en el municipio con el fin de contar con un mapa alternativo de riesgo de deforestación que permita focalizar acciones en los municipios que, aunque tienen poco bosque es inminente protegerlos.

Conclusiones

De la investigación realizada para la construcción de un índice de riesgo de deforestación a escala municipal para todo el país, se concluye que fue posible integrar indicadores de amenaza y vulnerabilidad para generar un índice compuesto que permitió tener una visión simultánea de los municipios en los que la intensidad de la deforestación se combina con debilidades/fragilidades del territorio, ya sea en el ámbito social, económico, institucional o de seguridad.

El cálculo del índice de deforestación solo fue posible realizarlo a escala municipal, toda vez que es la única unidad territorial que cuenta con información recurrente y confiable que permitiera calcular la amenaza y la vulnerabilidad como componentes del riesgo. Análisis más detallados bajo este mismo enfoque solo podrán realizarse para determinados territorios sobre los que se pueda acceder a información. No obstante, estos territorios no coinciden necesariamente con aquellos más afectados por la deforestación en Colombia.

Aunque el fenómeno de deforestación no obedece a fronteras político-administrativas, se considera pertinente la unidad municipal para el diseño del índice, en tanto constituye la mínima unidad de planificación territorial y asignación presupuestal y, por tanto, es aquella sobre la que se genera información institucional de carácter oficial que permita el cálculo de los componentes de amenaza y vulnerabilidad.

Hasta el momento, no es posible realizar el cálculo de un índice de amenaza consistente que incluya los motores de deforestación como malas prácticas extensivas de ganadería, agricultura, cultivos ilícitos, etc., dada la fragilidad e inconsistencia de la información en lo concerniente a algunas de las variables relacionadas con la amenaza. Sin embargo, el desarrollo de análisis de trayectorias puede ser una alternativa de aproximación a la incidencia de actividades antrópicas en la deforestación, toda vez que describe a escalas detalladas el comportamiento multitemporal de las áreas cubiertas por bosque que fueron reemplazadas por otra actividad. De esta manera, podrán sacarse conclusiones más detalladas sobre la relación de determinados fenómenos con la deforestación.

Se considera pertinente la evaluación de la vulnerabilidad a partir de un índice compuesto, ya que permite integrar distintas dimensiones que condicionan el nivel de resistencia y la capacidad de afrontamiento de la deforestación a escala municipal. Por lo

general, los estudios consultados se basaron en el análisis de variables de amenaza como lo son los motores de deforestación. Sin embargo, el enfoque propuesto propone evaluar la vulnerabilidad a través de categorías que integren variables de orden social, económico, institucional y de seguridad que por lo general no son evaluados en los estudios de deforestación.

Referencias

- Carmona Sánchez, C., Supelano González, D. y Osejo Villamil, I. (2015). *Tipologías departamentales y municipales: una propuesta para comprender las entidades territoriales colombiana*. Departamento Nacional de Planeación. <https://colaboracion.dnp.gov.co/CDT/Estudios%20Economicos/2015may28%20Tipologias.pdf>
- Crespo Garay, C. (24 de junio de 2020). *La deforestación de Amazonas alcanza niveles históricos debido al consumo de carne*. Medio Ambiente, National Geographic. <https://www.nationalgeographic.es/medio-ambiente/2020/06/deforestacion-amazonas-alcanza-niveles-historicos-debido-consumo-carne>
- González Arenas, J. J., Cubillos Buitrago, A., Chadid Hernández, M. A., Cubillos González, A., Arias Patiño, M., Zúñiga Avirama, E., Joubert, F., Pérez Vizcaíno, I. R. y Berrio Meneses, V. (2018a). *Caracterización de las principales causas y agentes de la deforestación a nivel nacional período 2005-2015*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Minambiente), y Programa ONU-REDD. <https://www.undp.org/es/colombia/publicaciones/caracterizacion-de-las-principales-causas-y-agentes-de-la-deforestacion-nivel-nacional-periodo-2005-2015>
- González Arenas, J. J., Cubillos Buitrago, A., Chadid Hernández, M. A., Arias Patiño, M., Zúñiga Avirama, E., Joubert, F., Cubillos González, M. A. y Pérez Vizcaíno, I. R. (2018b). *Lineamientos conceptuales y metodológicos para la caracterización de causas y agentes de la deforestación en Colombia*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (Pre), y Programa ONU-REDD. <https://openknowledge.fao.org/server/api/core/bitstreams/95680a3d-3dac-46ac-b067-ee3bda540608/content>
- González Arenas, J. J., Pérez Vizcaíno, I. R., Cubillos González, A., Zúñiga Avirama, E., Cubillos Buitrago, A., Arias Patiño, M. y Chadid Hernández, M. A. (2018c). *Escenarios de deforestación para la toma de decisiones: propuesta metodológica y ámbito de aplicación*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM)- Programa ONU-REDD.
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales y Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2022). *Actualización de cifras de monitoreo de la superficie de bosque – Año 2021*. <https://www.wandi.com.co/uploads/583212846-Sistema-de-Monitoreo-de-Bosques-y-Carbonopdf>
- Jenks, G. F. (1967). The Data Model Concept in Statistical Mapping. *International Yearbook Cartography*, (7), 186-190.
- Lombana González, E. V. (2020). *Vulnerabilidad municipal al establecimiento de cultivos de coca en Colombia: Una aproximación desde la nueva geografía económica* [Tesis de maestría, Universidad Externado de Colombia]. Repositorio Institucional – Universidad del Externado.
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Programa de colaboración de las Naciones Unidas para la Reducción de Emisiones de la Deforestación y la Degradación de los bosques en los países en desarrollo, Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura, Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo, Cooperación Alemana GIZ, Forest Carbon, Banco Mundial y Fondo Acción. (2017). *Bosques. Territorios de vida. Estrategia Integral de Control a la Deforestación y Gestión de los Bosques*. https://redd.unfccc.int/media/eicdgh_bosques_territorios_de_vida_web.pdf
- Restrepo, L. F. y González, J. (2007). De Pearson a Spearman. *Revista Colombiana de Ciencias Pecuarias*, 20(2), 183-192.
- scikit-learn. (s.f) [Documentación de un lenguaje de programación]. MinMaxScaler. scikit-learn, Machine Learning in Python. <https://scikit-learn.org/stable/modules/generated/sklearn.preprocessing.MinMaxScaler.html>
- Turner, B. L. II, Kasperson, R. E., Matson, P. A., McCarthy, J. J., Corell, R. W., Christensen, L., Eckley, N., Kasperson, J. X., Luers, A., Martello, M. L., Polisky, C., Pulsipher, A. y Schiller, A. (2003). A Framework for Vulnerability Analysis in Sustainability Science. *Biological Sciences*, 100(14), 8074-8079. <https://doi.org/10.1073/pnas.1231335100>
- Oficina de las Naciones Unidas contra la Droga y el Delito. (2018). *Comunidad, bosque y coca: un camino para la acción*. Editorial Scripto.
- World Wildlife Fund. (12 de febrero de 2024). *Los devastadores impactos de la deforestación en Colombia*. World Wildlife Fund. <https://www.wwf.org.co/?386550/deforestacion-colombia-causas-consecuencias>

Anexo 1 - Variables incluidas en el ejercicio de construcción del índice de riesgo

Variables de vulnerabilidad				
No	Dimensión	Variable	Subvariable	Peso
1	Social	Analfabetismo	No informa lee y escribe	0,30
2		Analfabetismo	No lee y escribe	0,16
3		Desplazamiento - ocurrencia	Desplazamiento - ocurrencia	0,14
4		Desplazamiento - eventos	Desplazamiento - eventos	0,14
5		Analfabetismo	Si lee y escribe	0,14
6		Desplazamiento - llegada	Desplazamiento - llegada	0,12
7	Económica	Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI total	0,09
8		Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI cabecera	0,09
9		Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector	Actividades sector secundario	0,09
10		Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector	Actividades sector terciario	0,08
11		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria (UPA) por tamaño	Porcentaje UPA de 3 a 5 ha	0,08
12		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 5 a 10 ha	0,07
13		Necesidades Básicas Insatisfechas (NBI)	NBI resto	0,06
14		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 1 a 3 ha	0,06
15		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 0 a 1 ha	0,05
16		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 50 a 100 ha	0,05
17		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 10 a 15 ha	0,05
18		Actividades económicas - Porcentaje del valor agregado por sector	Actividades sector primario	0,05
19		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 20 a 50 ha	0,05
20		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA de 15 a 20 ha	0,04
21		Porcentaje de las Unidades de Producción Agropecuaria por tamaño	Porcentaje UPA mayor de 100 ha	0,04
22	Institucional	Índice de Desempeño Fiscal (IDF)	IDF	0,04
23		Medición Desempeño Municipal (MDM)	MDM resultados	0,16
24		Medición Desempeño Municipal (MDM)	MDM gestión	0,12
25		Medición Desempeño Municipal (MDM)	MDM puntaje	0,12
26		Número de sedes de PNN	Número de sedes de PNN	0,12
27		Presencia de sedes PNN	Presencia de sedes PNN	0,12
28		Presencia de sedes fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación)	Presencia de sedes fiscalía	0,11
29		Número de sedes de fiscalía (relacionadas con investigaciones en deforestación)	Número de sedes de fiscalía	0,11
30	Seguridad	Índice de complejidad municipal para actualización catastral (ICMAC)	ICMAC	0,08
31		Presencia sedes CAR	Presencia sedes CAR	0,06
32		Municipios priorizados por el conflicto armado	Municipios PNIS	0,43
33		Riesgo de violencia electoral	Riesgo de violencia electoral	0,39
34	Territorial	Municipios priorizados por el conflicto armado	Municipios PDET	0,39
35		Delimitación de zonas de reserva campesina	Presencia media de zonas de reserva campesina en el municipio	0,25
36		Delimitación de tierras de las comunidades negras	Presencia media de tierras de comunidades negras en el municipio	0,12
37		Distancia a centros poblados	Distancia media al centro poblado más cercano	0,09
38		Distancia a vías	Distancia media a la vía tipo más cercana	0,09
39		Distancia a mosaicos	Distancia media a mosaicos	0,08
40		Distancia a cultivos transitorios	Distancia media a cultivos transitorios	0,07
41		Distancia a cultivos permanentes	Distancia media a cultivos permanentes	0,06
42		Densidad vial por kilómetro cuadrado	Densidad media vial en el municipio	0,05
43		Límites de reservas de Ley 2 de 1959	Presencia media de zonas de ley 2 en el municipio	0,05
44		Distancia a vías	Distancia media a la vía tipo 5-6 más cercana	0,05
45		Distancia a pastos	Distancia media a pastos	0,03
46		Distancia a vías	Distancia media a la vía tipo 1-4 más cercana	0,03
47		Delimitación de resguardos indígenas	Presencia media de resguardos indígenas en el municipio	0,02

Variables de amenaza		
No	Dimensión	Variable
1	Deforestación	Concentración de la deforestación
2	Deforestación	Tendencia de la deforestación