



# **Modelo de detección de alertas de deforestación asociados a cultivos de café en Chinchiná, Caldas en Google Earth Engine con datos Ideam y Hansen**

Clara Inés Araujo Culma

Jessica Norela Castaño

David Quintero Guevara

Trabajo de grado presentado como requisito parcial para optar al título de Especialista en  
Sistemas de Información Geográfica

Asesora: Karen Castañeda Peláez

Bióloga, Especialista en Sistemas de Información Geográfica SIG

Claudia Marcela Cerón Rubio Asesora Centro de Escritura Elvia Lucía Sánchez García

Universidad de Manizales  
Facultad de Ciencias e Ingeniería  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica  
Manizales, Caldas, Colombia

2025

<b>Cita</b>	(Araujo et al., 2025)
<b>Referencia</b>	Araujo Culma C. I; Noreña Castaño J.; Quintero Guevara D. (2025). Modelo de detección de alertas de deforestación en Google Earth Engine con datos Ideam y Hansen en Chinchiná, Caldas [Trabajo de grado especialización]. Universidad de Manizales. RIDUM: Repositorio Institucional Universidad de Manizales.
<b>Estilo APA 7 (2020)</b>	



Seleccione posgrado UManizales (A-Z), XXXI

**Declaración de inteligencia artificial:** el o los autores de este trabajo de grado declaran que han utilizado herramientas de inteligencia artificial (IA), tales como [mencionar herramientas utilizadas, por ejemplo, ChatGPT, Grammarly, Turnitin, Copilot, Gemini, entre otras], de manera ética y responsable, tal como se establece en el Acuerdo UManizales 002 (julio 26 de 2023) sobre propiedad intelectual e IA. Estas herramientas son empleadas como apoyo en la redacción, revisión gramatical y generación de ideas, pero en ningún caso sustituyen el análisis crítico, la argumentación académica ni la originalidad del trabajo. Asimismo, cualquier contenido generado con asistencia de IA está citado y referenciado adecuadamente, garantizando la integridad académica y el cumplimiento de los principios éticos de la investigación.

**Biblioteca y Centro de Recursos:** <https://biblioteca.umanizales.edu.co/>

**Repositorio Institucional:** <http://ridum.umanizales.edu.co/>

**Universidad de Manizales:** [www.umanizales.edu.co](http://www.umanizales.edu.co)

**Revistas:** <http://revistasum.umanizales.edu.co/>

**Fondo Editorial:** <https://editorialum.umanizales.edu.co/>

El contenido de esta obra corresponde al derecho de expresión de los autores y no compromete el pensamiento institucional de la Universidad de Manizales ni desata su responsabilidad frente a terceros. Los autores asumen la responsabilidad por los derechos de autor y conexos.

## **Dedicatoria**

A Karen Castañeda Peláez, por su valiosa orientación, paciencia y generosidad al compartir su conocimiento. Su acompañamiento fue esencial, no solo por su experiencia, sino por su compromiso.

A nuestras familias, por su apoyo incondicional a lo largo de este proceso. Gracias por brindar siempre palabras de aliento, por su comprensión en los momentos de mayor exigencia, y por estar presentes, incluso en la distancia, con confianza, afecto y motivación.

## Tabla de contenido

Resumen .....	9
Abstract.....	11
Introducción.....	12
1. Planteamiento del problema .....	14
1.1 Descripción del área problemática .....	14
1.2 Formulación del problema.....	15
1.3 Antecedentes.....	16
2. Justificación.....	23
3. Objetivos .....	24
3.1 Objetivo general .....	24
3.2 Objetivos específicos.....	24
4. Marco teórico .....	25
4.1 Deforestación: causas, impactos y estrategias de monitoreo.....	25
4.2 Teledetección y Google Earth Engine (GEE) .....	25
4.3 Sistema de información geográfica (SIG y su uso en el monitoreo de la deforestación) .....	27
4.4 Metodología CORINE Land Cover y su adaptación en Colombia .....	28
4.5 Sistemas de Alertas tempranas de Deforestación; Hansen e IDEAM .....	30
4.6 Normativa internacional, nacional-marco legal.....	31
5. Metodología .....	33
5.1 Fase 1: Delimitación y categorización de predios rurales con vocación cafetera ....	35
5.1.1 Área de estudio.....	35
5.1.2 Fuentes de información.....	36
5.1.3 Filtrado de área de estudio e identificación de cultivos de café.....	36

5.1.4 Selección de predios objetivo.....	37
5.2 Fase 2: Procesamiento geoespacial de alertas de deforestación sobre cultivos de café .....	38
5.2.1 Preparación y estandarización de insumos raster.....	39
5.2.2 Filtrado espacial sobre áreas de café estimación de áreas afectadas y cálculo proporcional .....	39
5.3 Fase 3: Desarrollo de visor interactivo para análisis visual y exportación de resultados.....	40
5.3.1 Diseño general de la interfaz.....	40
5.4 Fase 4: Validación externa de resultados mediante SIG de escritorio .....	43
5.4.1 Integración de datos de alerta en entornos externos .....	43
5.4.2 Cruce espacial con cultivos de café .....	44
6. Resultados.....	46
7. Discusión .....	49
8. Conclusiones.....	50
9. Recomendaciones.....	51
Referencias .....	52

**Lista de tablas**

Tabla 1 Categorización de productores según FAO vs adaptación del estudio .....37

Tabla 2 Categorización de predios por área Categorización distintas escalas productivas .....38

Tabla 3 Resultados de la comparación de total de área deforestada en hectáreas entre GEE y ArcGis Pro.....47

## Índice de Figuras

Figura 1 <i>Visualización grafica del modelo.</i> .....	33
Figura 2 <i>Diseño esperado</i> .....	34
Figura 3 <i>Mapa de área de estudio</i> .....	35
Figura 4 <i>Mapa de Chinchiná con los predios seleccionados</i> .....	38
Figura 5 <i>Prueba visual de alerta en un predio. (Bosquejo vs prueba)</i> .....	40
Figura 6 <i>Prueba visual de alerta es un predio. (Bosquejo vs final)</i> .....	41
Figura 7 <i>Leyenda de alertas. (Bosquejo vs final)</i> .....	41
Figura 8 <i>Panel Resultados</i> .....	42
Figura 9 <i>Resultado final del visor.</i> .....	43
Figura 10 <i>Resultados comparación GEE Vs ArcGis Pro en predio pequeño 2</i> .....	44
Figura 11 <i>Resultados comparación GEE Vs ArcGis Pro en predio mediano 2</i> .....	45
Figura 12 <i>Resultados comparación GEE Vs ArcGis Pro en predio grande 4</i> .....	45

### **Siglas, acrónimos y abreviaturas**

<b>DANE.</b>	Departamento Administrativo Nacional de Estadística.
<b>UE.</b>	Unión Europea.
<b>EUDR.</b>	Reglamento de Deforestación de la Unión Europea (EUDR)
<b>FAO.</b>	Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura
<b>GEE.</b>	Google Earth Engine
<b>GFC.</b>	Global Forest Change
<b>GFW.</b>	Global Forest Watch
<b>IDEAM.</b>	Instituto de Hidrología, meteorología y estudios ambientales.
<b>IGAC.</b>	Instituto Geográfico Agustín Codazzi.
<b>NASA.</b>	La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio.
<b>ODS.</b>	Objetivos de Desarrollo Sostenible.
<b>ONU.</b>	Organización de las Naciones Unidas.
<b>SIG.</b>	Sistemas de Información Geográfica
<b>UManizales</b>	Universidad de Manizales
<b>USGS</b>	Servicio Geológico de los Estados Unidos

## Resumen

La deforestación a nivel mundial es considerada uno de los problemas más críticos a nivel mundial, que afecta el equilibrio ecológico y amenaza la biodiversidad. Con el fin de abordar esta problemática, es fundamental contar con herramientas de monitoreo que permitan generar estrategias de manejo y mitigación. Este proceso de investigación plantea la construcción de un modelo para la detección de alertas de deforestación asociados a predios cafeteros, ubicados en el municipio de Chinchiná, Caldas, realizado en la plataforma Google Earth Engine (GEE), utilizando el lenguaje de programación con JavaScript, y datos geoespaciales de alertas de deforestación a nivel nacional como la información proporcionada por el instituto de Hidrología Meteorología y estudios ambientales (IDEAM), como a nivel internacional como la proporcionada por el proyecto Global Forest Change desarrollada por Hansen y su grupo. La generación de datos geoespaciales ofrece oportunidades para el monitoreo y análisis ambiental, herramientas como las que ofrece (GEE) permite procesar volúmenes de información, facilitando, entre otras, la identificación de áreas afectadas por la deforestación en cultivos de café. Este modelo puede convertirse en información destacada e importante para los usuarios interesados en realizar análisis de deforestación o para aquellos que deben cumplir con normativas como la legislación EUDR (Reglamento de Deforestación de la Unión Europea), que exige políticas de cero (0) deforestaciones en la cadena de suministro. El desarrollo de este modelo dio como resultado un visor interactivo realizado en (GEE), que permite formular consultas por medio de filtros, analizar datos por periodos de tiempo, visualizar las capas temáticas, y generar alertas con gráficos estadísticos. El conjunto de datos analizados y los resultados obtenidos permitieron llegar a la conclusión que el uso de plataformas de teledetección y la integración de tecnologías, como Sistemas de Información Geográfica (SIG) y (GEE), son eficientes en procesos como el monitoreo

de deforestación, por ello, se recomienda realizar diferentes tipos de análisis en otras zonas cafeteras del país, con el fin de contrastar cómo varía el comportamiento de la deforestación en cada región.

**Palabras Clave:** *Deforestación, Google Earth Engine (GEE), alerta (Hansen e IDEAM), cultivos de café, Regulación Unión Europea (EUDR).*

### Abstract

Deforestation worldwide is considered one of the most critical environmental problems, as it affects ecological balance and threatens biodiversity. To address this issue, it is essential to develop monitoring tools that enable the creation of management and mitigation strategies. This research proposes the construction of a model for detecting deforestation alerts associated with coffee farms located in the municipality of Chinchiná, Caldas, developed on the Google Earth Engine (GEE) platform using the JavaScript programming language and geospatial deforestation alert data. The model integrates national data provided by the Institute of Hydrology, Meteorology and Environmental Studies (IDEAM) and international data from the Global Forest Change project developed by Hansen and his team. The generation of geospatial data offers valuable opportunities for environmental monitoring and analysis; tools such as GEE make it possible to process large volumes of information, facilitating, among other things, the identification of areas affected by deforestation in coffee plantations. This model can become a valuable resource for users interested in conducting deforestation analyses or for those who must comply with regulations such as the European Union Deforestation Regulation (EUDR), which requires zero-deforestation policies in supply chains. The development of this model resulted in an interactive viewer built in GEE that allows users to query data through filters, analyze information by time periods, visualize thematic layers, and generate alerts with statistical charts. The analyzed datasets and results led to the conclusion that remote sensing platforms and the integration of technologies such as Geographic Information Systems (GIS) and GEE are efficient tools for deforestation monitoring. Therefore, it is recommended to carry out similar analyses in other coffee-growing regions of the country to compare deforestation behavior across different areas.

**Keywords:** *Deforestation, Google Earth Engine (GEE), alerts (HANSEN & IDEAM), coffee crops, European Union (EUDR).*

## Introducción

En la actualidad, los productores agrícolas, tienen un desafío que pone en riesgo su economía, especialmente aquellos interesados en acceder a mercados internacionales, principalmente a la Unión Europea, quienes incorporaron el Reglamento de Deforestación (EUDR), que exige a los productores demostrar que en su cadena de suministro sus productos están libres de procesos de deforestación, a partir del 31 de diciembre de 2020, lo que trae consigo garantizar la trazabilidad de sus cultivos y la aplicación de normas ambientales rigurosas, de lo contrario, los productores corren el riesgo de ver limitado su acceso a estos mercados (Comisión Europea, 2023).

Dicha reglamentación surge debido a que la deforestación es considerada una de las problemáticas más abrumadoras en el mundo, gracias a los impactos ambientales y sociales asociados, los cuales llevan a la pérdida de biodiversidad, a su vez, generan cambios en el clima, provocando extremos fenómenos climáticos, que crean un desbalance en la naturaleza. Además, afecta a las comunidades que dependen del bosque para su supervivencia. (FAO, 2020).

En Colombia en general, la deforestación se ha convertido en un desafío ambiental y productivo, afectando directamente la población rural, sin ir muy lejos el departamento de Caldas, más precisamente en el municipio de Chinchiná, en donde, por ejemplo, se combina su tradición agrícola con el crecimiento de la población generando problemas ambientales; sin embargo, en los últimos años se ha implementado una serie de herramientas tecnológicas que permiten gestionar el uso del suelo de forma eficiente, y lo más importante sostenible. (Miniambiente, 2023).

Ante esta situación, los Acuerdos Cero Deforestación (ACD), impulsados desde 2017 como resultado de la Declaración Conjunta de Intención con Alemania, Noruega y Reino Unido, se consolidaron en Colombia como una estrategia multiactor que vincula al sector público, privado y la cooperación internacional para lograr cadenas productivas libres de deforestación, incluyendo sectores como palma, cacao, carne, leche, café, madera y aguacate Hass (Rojas-Salazar et al., 2023). Estos acuerdos han permitido generar compromisos colectivos, promover la gobernanza ambiental y establecer lineamientos de trazabilidad que buscan cumplir con los objetivos de sostenibilidad y las exigencias de los mercados internacionales.

De manera complementaria, el análisis de cadenas productivas realizado por World Wide Fund for Nature (WWF), (Fondo Mundial para la Naturaleza) evidencia que, aunque sectores como

palma, café y cacao no son los principales motores directos de deforestación en Colombia, sí pueden contribuir de forma positiva a la restauración de ecosistemas y al fortalecimiento de la conectividad ecológica, mientras que prácticas como la ganadería extensiva insostenible y la apropiación ilegal de tierras continúan siendo las causas más relevantes de deforestación, especialmente en la Amazonía (Espinosa-Camacho et al., 2023). De esta forma la tecnología se convierte en un aliado para cuidar el medio ambiente, herramientas como el Sistema de Información Geográfica (SIG), la teledetección, y plataformas de libre acceso como Google Earth Engine (GEE), facilita a productores, investigadores y entidades de control monitorear en tiempo casi real los cambios en la cobertura forestal, validar alertas y apoyar la toma de decisiones frente a la deforestación (Gorelick et al., 2017), es importante recalcar que estas plataformas ya no son exclusivamente para uso de especialistas, también desde hace un tiempo dan acceso a personas con el mismo interés común, en Colombia plataformas como el observatorio de la tierra y el territorio (OTT) del IGAC, y el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBYC) del IDEAM, complementan los esfuerzos nacionales y globales de monitoreo (IGAC, 2021; IDEAM, 2024), permite a cualquier ciudadano consultar imágenes satelitales, datos GIS y mapas interactivos, ofreciendo una mirada directa sobre paisajes y territorios.

El presente estudio propone la construcción de un modelo de detección de alertas de deforestación en la plataforma GEE, aplicado en predios de vocación cafetalera en el municipio de Chinchiná. Este modelo permitirá clasificar las alertas, en niveles de riesgo (bajo, medio y alto), brindar visualizaciones interactivas y, a la vez, apoyar a los agricultores en el cumplimiento de regulaciones como el EUDR, contribuyendo a cadenas de valor más sostenibles. Con ello, se busca alinear la producción agrícola con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), particularmente el ODS 15 (vida de ecosistemas terrestres), ODS 13 (acción por el clima) y ODS 2 (hambre cero), demostrando que la integración de tecnologías accesibles y de código abierto puede fortalecer la gestión ambiental y productiva, garantizando la conservación de los recursos naturales y la sostenibilidad de las cadenas agrícolas en Colombia.

## 1. Planteamiento del problema

### 1.1 Descripción del área problemática

Cuando se habla de deforestación, se menciona una problemática sumamente alarmante, cuyas consecuencias para la diversidad son graves, al destruir los hábitats de especies; aumento de emisiones de carbono, cambio climático y la alteración del ciclo del agua. Además, incrementa la frecuencia de desastres naturales como inundaciones y deslizamientos, (FAO, 2020).

De acuerdo con la Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO, 2020). Entre los años 1990 y 2020 se han perdido a nivel mundial aproximadamente cuatrocientos veinte (420) millones de hectáreas de bosque, afectando la regulación climática y la estabilidad de los ecosistemas.

FAO (2020) indica que en América Latina este fenómeno ambiental es crítico, por causa de la expansión agrícola y la explotación forestal, quienes han ocasionado la pérdida de cerca de dos (2) millones de hectáreas de bosques al año. Generando problemas en los ecosistemas, así como la degradación y pérdida de las características del suelo para la agricultura y los recursos hídricos.

Igual de preocupante es la situación en Colombia, de acuerdo con estudios del IDEAM (2022) en el país se pierden un promedio de ciento cincuenta mil (150) hectáreas de bosques al año, aunque los mayores focos de deforestación en Colombia se concentran en regiones como la amazonia y el pacífico, también se evidencian afectaciones agrícolas en la región Andina, el departamento de Caldas registró una reducción del 1.3% de la cobertura forestal en los últimos diez años (Global Forest Watch, 2022).

Frente a este panorama, cobra mayor importancia la postura que debemos adquirir para hacerle frente a las regulaciones internacionales, que velan por que, en la cadena de suministros de materias primas, los productos estén libres de deforestación, por este motivo los agricultores deben demostrar que sus prácticas son sostenibles, por tanto, se deben implementar modelos, como el de la presente propuesta, que permitan detectar y visualizar alertas sobre deforestación, respondiendo de esta forma a los actuales retos a nivel agrícola y ambiental. (Comisión Europea, 2023).

En este orden de ideas, la falta de modelos de monitoreo accesibles y confiables termina siendo un riesgo, ya que limita la capacidad de demostrar el cumplimiento de dichas regulaciones y

por ende se pone en juego su participación en estos mercados, afectando su competitividad y economía.

## 1.2 Formulación del problema

La normativa europea contra la deforestación se ha convertido en un desafío para los productores agrícolas en Colombia. Para algunos de ellos no se trata únicamente del cumplimiento burocrático, está en juego su participación en los mercados internacionales, de no hacerlo, estaría en juego su estabilidad económica, lo que perjudicaría enormemente su calidad de vida y la de su familia. Chinchiná, Caldas de vocación cafetera, es una región donde la expansión de cultivos y otras actividades agrícolas ejerce presión sobre los ecosistemas forestales poniéndolos en riesgo. Algunos productores, principalmente los pequeños, tienen dificultades para demostrar que sus cosechas están alineadas con dichas exigencias. A pesar de que existen políticas ambientales nacionales (Botero, 2018; IDEAM, 2024), la falta de control por parte del Estado y las limitadas herramientas tecnológicas disponibles para los productores hacen que cumplir con estas exigencias sea cada vez más complejo, poniendo en riesgo su competitividad y estabilidad económica.

A raíz de lo anterior se genera la necesidad de contar con herramientas tecnológicas que ayuden a los agricultores, es por eso que (GEE), puede contribuir en esto, ya que es una plataforma de uso gratuito, y que usando equipo tradicional permite procesar grandes volúmenes de información, ofreciendo información actualizada, gran capacidad de almacenamiento y algoritmos de análisis avanzados (Perilla y Mas 2020).

Esta tecnología abre la puerta a que no solo expertos ambientales, sino también productores locales, puedan monitorear en tiempo real lo que sucede con la cobertura forestal de sus territorios y tomar decisiones más informadas y responsables. Ya existen experiencias que muestran cómo este tipo de herramientas pueden marcar la diferencia. Por ejemplo, León (2023) aplicó técnicas de aprendizaje automático en GEE para analizar la dinámica de la deforestación en la Amazonía colombiana, logrando identificar patrones de pérdida de bosque y zonas de mayor vulnerabilidad. Este tipo de estudios no solo aportan conocimiento, sino que se convierten en un respaldo para la formulación de políticas de conservación más efectivas.

En consecuencia, con lo expuesto anteriormente, surge la siguiente pregunta central de investigación que guía esta propuesta: ¿Puede un modelo de detección y alerta de deforestación en

Google Earth Engine (GEE) contribuir con los agricultores de Chinchiná Caldas, con la gestión de prácticas agrícolas de manera sostenible, cumplir con las regulaciones ambientales europeas y mitigar el impacto económico de la deforestación en cultivos de café, desde un contexto caracterizado por la ausencia de tecnologías y decisiones basadas en información limitada?

Este interrogante permite explorar la viabilidad y utilidad de un modelo de detección de alertas de deforestación en (GEE), como herramienta de apoyo tanto para los productores como para las autoridades ambientales. A los productores en su día a día, permitiéndoles proteger sus tierras, cumplir con las normativas internacionales para estar presente en sus mercados, contribuyendo con la conservación del medio ambiente, a las autoridades les permite complementar sus análisis y así comprender la dinámica entre la productividad y sostenibilidad. Finalmente les debe permitir ser más competitivos sin dejar de lado la responsabilidad del cuidado de los recursos naturales.

### **1.3 Antecedentes**

Diversos autores han encaminado esfuerzos para monitorear los cambios de uso del suelo, desarrollando investigaciones que permitan comprender la magnitud y dinámica de la deforestación en diferentes escalas, desde análisis globales hasta estudios regionales y locales en Colombia. Estos antecedentes no solo han aportado bases metodológicas para el monitoreo de los cambios en la cobertura boscosa, sino que también han evidenciado la necesidad de contar con herramientas de análisis espacial más precisas y actualizadas y de fácil acceso, lo que da sustento a trabajos como el presente, orientados a fortalecer la gestión ambiental y la toma de decisiones informadas.

En primer lugar, Curtis et al. (2018), agruparon la pérdida forestal, denominado la expansión de los cultivos agrícolas como la principal causa de deforestación global. En su estudio analizaron la pérdida de bosques, en el periodo 2001 y 2015 para distinguir entre el cambio del uso del suelo irreversible, y el de pérdidas temporales. Utilizando imágenes satelitales Landsat, desarrollaron un modelo que atribuye la pérdida forestal a 5 causas principales: Commodities-driven deforestation, Deforestación asociada a producción de materias primas (27%), manejo forestal (26%), agricultura itinerante (24%) y expansión urbana (6%), mientras Pasquarella et al. (2018) usando imágenes satelitales Landsat entre 1985 y 2015, realizaron una clasificación forestal en el noreste de Estado Unidos a través de características espectrales y temporales, trabajadas en un modelo Random Forest, lograron identificar con detalle las diferentes etapas forestales,

distinguir tipos de bosques y reconocer los cambios graduales del paisaje. Demostrando que el uso de series temporales y espectrales aumenta la precisión del mapeo y también facilita conocer los procesos de transformación de los bosques que avanzan lentamente.

En paralelo, la FAO (2020), en su evaluación de Recursos Forestales Mundiales (FRA), reportó una pérdida de 420 millones de hectáreas de bosques entre 1990 y 2020. Esta información fue obtenida a través de la integración de datos oficiales suministrados por países, imágenes satelitales, entre otros, que permite medir la extensión de los bosques cada cinco años. Los datos obtenidos arrojan que los mayores focos de deforestación se concentran en América del Sur, África y parte de Asia, en contraste, Europa logró aumentar la superficie forestal, gracias a programas de reforestación.

Más adelante, Vancutsem et al. (2021) estudiaron los trópicos húmedos desde 1990-2019, detectando las pérdidas regionales de bosques, en la cuenca del Congo, en el sudeste asiático y la Amazonia, en este último, determinaron que los bosques húmedos fueron degradados o deforestados en un 17% en ese periodo de tiempo, este trabajo proceso imágenes satelitales anuales a escala global, lo que permitió diferenciar entre pérdida total de bosques y degradación parcial, mientras que Global Forest Watch (2022) se une a las iniciativas globales, permitiendo la visualización de alertas GLAD en tiempo casi real, fáciles de usar, favoreciendo el reconocimiento tempranamente de zonas con deforestación, lo que permite la toma de decisiones y el mejoramiento de políticas ambientales. Estos antecedentes globales favorecen contextualizar los avances y retos metodológicos, dando paso a una mirada hacia América Latina, donde la problemática de la deforestación presenta sus propias dinámicas.

En Latinoamérica, la deforestación responde principalmente a la expansión agropecuaria. Desde una perspectiva regional. Souza et al. (2020) estudiaron los cambios en biomas brasileños por 30 años, empleando imágenes Landsat procesadas en (GEE), aplicando algoritmos en Random Forest para clasificar uso y cobertura del suelo, generando una base de datos temporal y espacial llamada MapBiomias, permitiendo conocer los cambios en cada año y en todo el territorio brasileño desde 1985. Arrojó información de la pérdida de cobertura entre 1985 y 2017 de 71 millones de hectáreas, el bioma más afectado la Amazonia, asociados a la expansión agropecuaria, así mismo la sabana del Cerrado, sufrió transformación hacia pastizales y agricultura. Con este trabajo se resalta la importancia del uso de plataformas como (GEE), en integración con las imágenes satelitales, como herramientas de gran utilidad en las evaluaciones históricas del suelo.

Por otro lado, Vivala et al. (2024) analizaron la problemática de la deforestación en Perú, entre 2000 – 2020, en su análisis determinaron una pérdida aproximada de 3,4 millones de hectáreas de bosques, destacando que la deforestación fue más rápida en las regiones de bosques no inundados, comparado con las áreas protegidas donde la deforestación fue menor. Esta deforestación está asociada a la expansión de la infraestructura vial, expansión agrícola y eventos generados por los cambios climáticos, comprobando que las áreas protegidas han contribuido, para mitigar la pérdida de cobertura, sin embargo sigue habiendo desafíos en algunas regiones como en la zona andina del país. La conclusión principal de los autores es la necesidad de implementar políticas de monitoreo y gestión ambiental, de manera particular para cada región y así ponerle freno a este problema y trabajar de manera sostenible.

Estos estudios regionales facilitan dar un paso en el caso de Colombia, donde los procesos de deforestación presentan sus propias dinámicas, las cuales han sido estudiadas.

En Colombia, muchas investigaciones se han enfocado en la dinámica de la deforestación, algunos estudiosos como Santos et al. (2021), investigaron sobre la relación entre cultivos ilícitos y deforestación en Colombia, evidenciando que los puntos más críticos de pérdida de cobertura de bosques están en regiones al sur del país, donde hay la mayor expansión de cultivos de coca, reflejando la relación que existe entre las dos problemáticas. Se realizó un trabajo con enfoque analítico y de políticas públicas, revisando datos oficiales y estudios previos de cultivos de coca y deforestación en Colombia. Concluyendo que las estrategias de erradicación resultan insuficientes, así como la necesidad de alinear las políticas antidrogas con políticas ambientales.

En esa misma línea, el IDEAM (2022) desarrolló un sistema nacional que monitorea bosques y carbono (SMBByC), integrando imágenes satelitales y datos de campo para monitorear anualmente la cobertura. Gracias a este sistema emitiendo alertas anuales, trimestrales, de la pérdida de bosques, donde la región más afectada es la Amazonia, con un valor de 60% de la pérdida total de bosques del país, de manera complementaria, la Red Amazónica de Información socioambiental georreferenciada (RAISG. 2022) desarrollaron series temporales de cobertura del suelo desde 1985, donde evidenciaron que Colombia, perdió más de 1.8 millones de hectáreas de bosque amazónico en el periodo de tiempo entre 2000 y 2022, los cuales han sido importantes para definir estrategias, conservar y monitorear los bosques en la amazonia colombiana.

Posteriormente investigaciones, como las de León (2023), quien modeló la deforestación en la Amazonía colombiana usando aprendizaje automático en (GEE), identificando los principales

municipios que sufrieron este fenómeno, con un total de área deforestada de 1.944 km<sup>2</sup>, evidenciando el buen desempeño de los modelos de aprendizaje automático, para el análisis del comportamiento de la deforestación en esta zona, a través de la información disponible en la plataforma (GEE). Entendiendo como este tipo proyecto, ofrece un acercamiento desde los datos para que proporcionen herramientas de análisis, para los diferentes fines.

En otro caso, Caicedo et al. (2023) implementaron el uso de Random Forest en la plataforma (GEE), con el fin de analizar los cambios de la cobertura forestal en el departamento del Tolima, alcanza una precisión superior al 90% en los cambios forestales entre los años 2017 a 2021, registrando una disminución de bosques del 53.7% a 49% y el incremento de zonas intervenidas por el ser humano de un 42.6% a 45% , a su vez recalcan la importancia para este tipo de trabajo de las herramientas tecnológica que permiten la recolección, interpretación y análisis.

Un estudio reciente del IDEAM (2024), ha reportado la disminución del 38% de la deforestación en la Amazonia Colombiana, lo anterior, gracias a las política y acuerdos ambientales y a la implementación de tecnologías satelitales para monitorear los bosques. Estos cambios muestran acciones contundentes frente a la tala ilegal y facilita el cumplimiento de los objetivos de desarrollo sostenible (ODS 13 y 15), demostrando como el monitoreo geoespacial contribuye de manera efectiva en la protección de los bosques.

Finalmente, estos esfuerzos se complementan con el visor interactivo del IDEAM (2025), el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), entidad con la responsabilidad de dirigir el Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono desde el año 2021, siendo la entidad responsable de dar a conocer de manera oficial la información de la pérdida de cobertura forestal, cuentan con un visor interactivo, donde se pueden hacer consultas de deforestación temprana, así mismo permite conocer cómo han sido los cambios en un periodo de tiempo (IDEAM, 2025).

Este visor constituye un referente en la gestión ambiental del país, permite integrar datos de teledetección, análisis espaciales y asociar políticas ambientales y cumplir con los diferentes acuerdos internacionales pactados en pro de la conservación ambiental. Sin embargo, se presentan algunas limitaciones principalmente de carácter tecnológico, como resolución espacial, recurrencia de actualización, entre otros. Estas limitaciones han servido para dar un paso en la búsqueda de nuevas técnicas de procesamiento de imágenes y el uso de plataformas de procesamiento remoto o en entornos virtuales, como (GEE). Estos antecedentes nacionales destacan la importancia de

comprender la dinámica espacial, también de fortalecer las herramientas tecnológicas que apoyan el monitoreo ambiental.

En los últimos años, se han realizado diferentes estudios enfocados en el uso de tecnologías como (SIG) y (GEE). Gorelick et al. (2017) explican el potencial de la plataforma GEE en el análisis geoespacial en servidores remotos, lo que permite procesar volúmenes de información de manera rápida y hacer más eficientes, otros contextos internacionales como el realizado por Iandolo et al. (2023), quienes investigaron la expansión urbana en El Cairo utilizando (GEE), empleando imágenes satelitales y aprendizaje automático, detectando un crecimiento urbano superior al 25% en el periodo de tiempo de 20 años y destacando la utilidad de (GEE) como herramienta eficiente y estable para análisis multitemporales urbanos. Razzano et al. (2023) integraron datos Sentinel-1 y 2 con clasificación automática en (GEE) para estudios multifuente, encontrando en sus resultados un 90% de precisión en la detección de cobertura del suelo. Además, esta integración permitió mejor detección de cuerpos de agua, mejor definición de límites urbanos y reducción de errores en zonas pequeñas.

Por su parte, Selka et al. (2024), en su estudio en la región de Argelia, encontraron la relación del aumento de temperatura superficial con el cambio del uso del suelo, empleando NDVI y NDBI, registrando incrementos térmicos de hasta 3 °C en zonas con disminución de NDVI y aumento de NDBI, empleando imágenes satelitales en la plataforma (GEE).

Entre los estudio más recientes tenemos el realizo por He et al. (2024) implementaron la base de datos GFBS (Global Forest Burn Severity), la cual brinda información de la intensidad de los daños de incendios forestales empleando imágenes satelitales Lansdsat con resolución 30 x 30, en el periodo de tiempo de 2003 a 2016. Para identificar la ocurrencia temporal y espacial de incendios, emplearon datos de Global Fire para calcular los índices pre y post evento, como dNBR (differenced Normalized Burn Ratio) y RdNBR (relative dNBR). Validado el GFBS, al compararlo con CanLaBS (Canadá) y MOSEV (producto mundial basado en MODIS), dando como resultado que el GFBS, se correlaciona mejor con los datos de campo, por ejemplo un  $r \approx 0.63$  frente a  $r \approx 0.28$  para MOSEV en la correlación con el índice CBI (Composite Burn Index) en EE. UU. Demostrando que el GFBS presenta una mejor capacidad para diferenciar las clases de daños, alta, moderada y baja. En conclusión se determina que los incendios forestales globales se caracterizan mejor con esta resolución final, mejorando la caracterización de los efectos ecológicos, las emisiones de carbono y la mejora en las medidas de gestión de incendios . Finalmente los autores

reconocen la importancia de este producto como una herramienta para investigaciones en el tiempo y aportes en las políticas ambientales, sin embargo manifiestan la necesidad de ampliar la temporalidad más allá de 2016 y aumentar la validación en regiones poco representadas.

Gibbs et al. (2025) exponen un nuevo enfoque a los modelos geoespaciales para el monitoreo de los flujos de carbono forestal a nivel global en un periodo de 22 años en el tiempo comprendido entre 2001 y 2023, donde emplean observaciones satelitales y datos terrestre con una resolución de pixel más detallada de 30\*30. Dando a conocer información referente a la pérdida y ganancia de cobertura boscosa, biomasas y emisión de gases de efecto invernadero, mejorando la precisión y disminuyendo el umbral de incertidumbre, reconociendo que los bosques continúan siendo un captador de CO<sub>2</sub>, y que los boques ubicados en zona tropicales y templadas son los responsables de la absorción de carbono a nivel global, demostrando una vez más la importancia de la integración de la información geoespacial, teledetección y los SIG, para aportar información efectiva que respalda políticas ambientales.

En Colombia, investigadores como Coca-Castro et al. (2021) analizaron algoritmos de clasificación en la plataforma (GEE) para identificar cambios entre dos fechas, empleando imágenes de alta resolución en zonas urbanas y periurbanas en los departamentos de Antioquia y Cesar. Estos algoritmos validaron su funcionalidad con valores mayores al 85% de precisión en la identificación de construcciones (Recuperación y F1-score), haciéndolo útil y replicable a otras regiones. Adicional a esto, se han realizado estudios recientes, como el de Calderón y Córdoba (2023) combinaron el uso de (GEE) con datos radar y ópticos para identificar deforestación en la cuenca de la quebrada Nocaimani; este estudio permitió establecer la identificación del momento de la afectación y la cuantificación del área afectada entre septiembre de 2020 y agosto de 2021. También demuestra cómo algunos softwares libres, como en nuestro caso (GEE), permiten hacer análisis geoespacial para el manejo de volúmenes de información como es el caso de los provenientes de los sensores remotos.

Resulta de gran importancia hacer referencia al trabajo del investigador Juan Sandino, quien ha empleado (GEE) para realizar análisis de la deforestación en nuestro territorio, empleando imágenes satelitales y diferentes fuentes para sus estudios, usando infraestructura remota; construyendo visualizadores interactivos que facilitan la visualización de la deforestación en el territorio (Sandino, 2023).

Estos trabajos, además de brindar información, también permiten contrastarla y complementarla con la información generada por fuentes oficiales. Lo anterior muestra la versatilidad de plataformas como (GEE) y su uso en aplicaciones científicas, así como trabajos de interés público, generando metodologías que pueden replicarse para proyectos de monitoreo ambiental.

Finalmente, dentro del sector productivo se han desarrollado iniciativas orientadas a la sostenibilidad, como AgroDiligence, impulsada por Solidaridad Colombia, entidad de cooperación internacional con amplia trayectoria en el acompañamiento al campo en nuestro país. Esta herramienta tecnológica, basada en Google Earth Engine (GEE), surge con el propósito de apoyar a los productores en la gestión sostenible del territorio, integrando datos de diferentes fuentes para evaluar riesgos de deforestación y aspectos legales asociados a la producción de café. Su implementación ha permitido fortalecer la productividad vinculada a la sostenibilidad y promover el cumplimiento de nuevas regulaciones internacionales, particularmente las exigidas por la Unión Europea. Al igual que el presente trabajo, AgroDiligence representa un esfuerzo pionero en Colombia para articular la información geoespacial con la toma de decisiones en sistemas productivos, contribuyendo así a la gestión ambiental y a la competitividad del sector.

El marco referencial consolidado subraya la importancia crítica de la integración de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), las tecnologías geoespaciales y la teledetección para el monitoreo ambiental y la gestión territorial sostenible. Plataformas como Google Earth Engine (GEE) y Google Forest Change (GFC) se presentan como herramientas esenciales para evaluar los cambios forestales y la sostenibilidad del territorio. Estos antecedentes técnicos no solo motivan el presente trabajo, sino que también resaltan el valor del procesamiento satelital y la automatización en el estudio de los cambios en la superficie terrestre. De esta manera, el modelo propuesto proporcionará a los predios cafeteros una herramienta clave para monitorear de forma proactiva sus alertas de cambio de cobertura y agilizar el proceso de certificación.

## 2. Justificación

En general el campo en Colombia, es un sector que se encuentra olvidado y carece del apoyo y las bondades que ofrecen las tecnologías de información geográfica, en la actualidad aún se siguen trabajando de manera artesanal en la gestión de sus predios, y la entrada en curso del Reglamento (EUDR), representa un desafío para los productores agrícolas en Colombia; el eje cafetero no se escapa de él, ya que algunos de los caficultores tienen ligada su producción a los mercados internacionales y esta regulación les exige demostrar que sus productos provienen de zonas libres de deforestación después del 31 de diciembre de 2020. El obstáculo más grande para los productores, radica en la dificultad para demostrar que sus productos cumplen con los estándares exigidos, ya que la falta de herramientas tecnológicas, sistemas de verificación que respalden que sus cultivos son trabajados de manera sostenible, así como la dificultad de acceder a seguimiento basado en datos de teledetección y georreferenciación, incrementa la posibilidad de ser excluidos de los mercados internacionales, principalmente la Unión Europea, por lo tanto el riesgo de su estabilidad económica, seguirá latente; donde los pequeños y medianos productores, serán los más afectados.

Por las razones anteriormente expuestas, el uso de tecnologías y plataformas como (GEE), de la mano con entidades encargadas de monitorear y alertar sobre la deforestación (GFW e IDEAM), además de servir como insumos para reforzar el cuidado ambiental a los productores, brindará información útil, como las alertas de deforestación que servirá para tomar las medidas necesarias por parte de caficultores, así como de entidades ambientales.

Este modelo de detección en GEE, será útil, no solo para el cuidado del medio ambiente, también les ofrece a los productores, principalmente a pequeños y medianos, una herramienta que demuestre el cumplimiento con las regulaciones y así los acerque a estos mercados.

El estudio desarrollado se realizó bajo un enfoque técnico y territorial; sin embargo es importante recalcar que está acorde con los compromisos globales de desarrollo sostenible, (ODS), en especial con el ODS 15, que busca proteger los bosques y toda la vida que lo habita, contribuyendo a la fertilidad de la tierra, de igual forma está relacionada con el ODS 13, buscando acciones que mitiguen las consecuencias y reduzcan el cambio climático detectándolo y frenando los procesos de deforestación, también vincula el ODS 2, que pretende disminuir el hambre en el mundo por medio de una agricultura sostenible.

### 3. Objetivos

#### 3.1 Objetivo general

Construir un modelo de detección de alertas de deforestación en Google Earth Engine, con datos de IDEAM y Hansen, enfocados en zonas con cultivo de café en Chinchiná Caldas.

#### 3.2 Objetivos específicos

- Desarrollar un modelo de detección de alertas de deforestación en Google Earth Engine, aplicando técnicas de geoprocésamiento para reconocer, identificar y clasificar las áreas de deforestación HANSESN e IDEAM dentro de los polígonos de los predios con cultivos de café.
- Validar el desempeño del modelo desarrollado en Google Earth Engine mediante su comparación con resultados obtenidos en un Sistema de Información Geográfica (SIG).
- Diseñar una interfaz interactiva en Google Earth Engine, que permita a usuarios sin experiencia en Sistemas de Información Geográfica, seleccionar predios y visualizar estadísticas en tiempo casi real.

## **4. Marco teórico**

Integrar tecnologías avanzadas en aplicaciones geoespaciales ha mostrado ser de gran utilidad a la hora de abordar momentos complejos de Información Geográfica (SIG), por ejemplo, se usó un mapa en el que los usuarios puede emplear el aprendizaje automático geoespacial, para encuentran una solución a diversas dificultades de aplicación de los SIG, tales como agrupación geográfica, regresión y clasificación espacial (Sahana et al., 2022).

De esta manera se evidencia la importancia que existe en las aplicaciones geoespaciales, ya que estas facilitan el acceso a información eficiente, permitiendo implementar soluciones a las diferentes problemáticas por medio del uso de nuevas tecnologías.

### **4.1 Deforestación: causas, impactos y estrategias de monitoreo**

La deforestación es un proceso que involucra la reducción o eliminación de la cobertura boscosa natural por acción directa o indirecta del hombre, afectando gravemente la diversidad biológica y el funcionamiento del medio ambiente (ONU, 1992). Este fenómeno genera consecuencias desfavorables a nivel mundial, contribuyendo al aumento de emisiones de gases de efecto invernadero, modificando las condiciones climáticas y reduciendo la diversidad biológica (FAO, 2020).

Los principales agentes que causan los cambios de los bosques a nivel global se encuentran: La expansión agrícola, los cultivos ilícitos, la minería ilegal y la urbanización descontrolada (Armenteras y Rodríguez, 2014). En Colombia, además de los anteriores actores, se le asocian factores como el conflicto armado, la tenencia irregular de tierras y la falta de alternativas sostenibles de desarrollo (IDEAM, 2022). Sumado a los efectos desfavorables para el medio ambiente, el proceso de deforestación hace que se incumplan los compromisos internacionales.

### **4.2 Teledetección y Google Earth Engine (GEE)**

Ante esta situación, implementar tecnologías de observación como la teledetección, sensores remotos, sistemas de información geográfica (SIG) y plataformas de análisis con infraestructura de servidores remotos se afianza como una estrategia fundamental. La teledetección

es importante a la hora de entender los cambios en los ecosistemas, además de ser una técnica que permite observar la superficie terrestre sin contacto físico con ella (USGS, 2024), mediante sensores o aeronaves que capturan la energía liberada para interpretar fenómenos ambientales (NASA, 2025), permitiendo observar los cambios ocurridos, evaluar su impacto, también permite apoyar a investigadores en la comprensión de dichos fenómenos y a expertos en la toma de decisiones frente a estos cambios convirtiéndose en un herramienta importante en el monitoreo de algunos casos como, monitoreo de incendios forestales, cambios en cuerpos de agua y cambios en la cobertura del suelo, (Boschetti et al., 2015; Donchyts et al., 2016; Hansen et al., 2022). Para Colombia, Ruiz et al. (2011), demostraron como las imágenes satelitales son una herramienta valiosa para entender como cambian los bosques a lo largo del tiempo. Analizó durante 14 años, la evolución del paisaje amazónico. A través de este estudio se demostró, que este tipo de tecnología además de permitir la observación, recalca la importancia del monitoreo remoto, de una manera efectiva para el cuidado de nuestros bosques.

Si vemos con atención, entendemos que las soluciones informáticas locales o de escritorio, resultan poco eficientes para procesar grandes volúmenes de información, y si se le agrega el componente espacial, resulta aún más deficiente, bajo estas condiciones, surge Google Earth Engine (GEE), que facilita el análisis de volúmenes de información a gran escala. Esta herramienta, desarrollada por Google, se apoya en su infraestructura de cómputo de manera remota para ofrecer acceso a numerosas colecciones de datos satelitales y herramientas analíticas especializadas (Google Developers, 2021). Esta herramienta, facilita a investigadores y a los responsables de la toma de decisiones desarrollar algoritmos, analizar fenómenos ambientales, entre otras y tener la información en tiempo casi real. Uno de los usos destacados de (GEE), es el trabajo de Selka et al. (2024), quienes a través de datos de imágenes Landsat, evaluaron el resultado sobre la temperatura en una zona semiárida de Argelia, debido al cambio del uso del suelo, durante un periodo de 30 años. Empleando índices como NDVI y NDBI, como resultado, el incremento en la temperatura está asociada con los cambios en la cobertura terrestre. Por otro lado Razzano et al. (2023), integraron en la plataforma (GEE) datos ópticos (Sentinel-2) y de radar (Sentinel-1), para clasificar coberturas de la tierra mediante algoritmos de aprendizaje autónomo, dándole valor a los análisis de múltiples fuentes y el procesamiento automatizado. En nuestro territorio la implementación de (GEE), también se destaca, como el caso de Coca-Castro et al. (2021), quienes implementaron en la plataforma algoritmos de clasificación supervisada y no supervisada, para

detectar cambios en zonas construidas, empleando imágenes de alta resolución, con ello se obtuvo información valiosa para la zona estudiada (construcciones ilegales, actualización de registros catastrales, entre otros), también destaca la posibilidad de replirlo en otras regiones del país, demostrando así la versatilidad de la herramienta en el monitoreo geoespacial. Otro caso relevante, el estudio realizado por Caicedo et al. (2023), procesaron en (GEE) datos multiespectrales (Sentinel-2, NICFI) y radar (SRTM) aplicándoles Random Forest, para mapear en el departamento del Tolima entre 2017 y 2021 los cambios de cobertura, alcanzando altos índices de precisión (93 % en 2017, 91 % en 2021) y reveló que el 27 % del territorio presentó cambios en el uso del suelo.

Estos referentes, demuestran la capacidad en el monitoreo de la deforestación, y apoyado por plataformas que procesan información en servidores de alta capacidad, pueden ser de gran ventaja, abriendo puertas en el monitoreo y cuidado de nuestros recursos, brindando oportunidades para fortalecer la gestión sostenible de los recursos naturales, especialmente en regiones vulnerables.

#### **4.3 Sistema de información geográfica (SIG y su uso en el monitoreo de la deforestación)**

El uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha facilitado tareas como el monitoreo y la detección de cambios, la evaluación de factores de presión sobre los ecosistemas forestales, la predicción del riesgo de deforestación y el soporte a la planificación territorial y las políticas de conservación. Según Gorelick et al. (2017), gracias a plataformas como Google Earth Engine (GEE), se ha potenciado la capacidad de procesamiento y análisis en servidores remotos, permitiendo trabajar con grandes volúmenes de datos geoespaciales en tiempo real.

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) han revolucionado el estudio de diferentes temas socioambientales, para este caso específicamente la deforestación, dado que facilita la integración de técnicas de análisis espaciales (SIG) con información proveniente de sensores que captan distintas porciones del espectro electromagnético, todo esto ofrece información sobre los cambios ocurridos en los bosques, sin importar la escala global, regional y local, ofreciendo información útil y oportuna para hacerle frente a esta situación. Se siguen presentando desafíos como la accesibilidad y costos de datos, sin embargo es una herramienta poderosa y juega un papel clave en el monitoreo de fenómenos complejos (Yun, 2024). Otro análisis reciente, es el realizado por Tasci (2024), quien denota que el monitoreo preciso y eficiente de la deforestación, ha sido

impulsado por los avances en la teledetección y técnicas SIG, la primera acompañada con algoritmos de aprendizaje automatizado, que favorecen la precisión de la clase o categoría de la cobertura, la segunda, favorecen la integración de datos espaciales. La combinación de estas se convierte en una herramienta para ayudar en la conservación de los sistemas forestales. A futuro la evolución de estas tecnologías, serán fundamentales en el monitoreo y cuidado del medio ambiente, así como de otras problemáticas.

En el contexto latinoamericano, diversos estudios han empleado los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para cuantificar la pérdida de cobertura boscosa, evaluar el impacto de las políticas de uso del suelo y analizar su relación con actividades económicas como la agricultura extensiva (Eco Ciencia, 2025).

En Colombia, el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) adaptados a las condiciones locales se ha fortalecido a través de iniciativas institucionales como las del IDEAM, que cada año publica cifras de deforestación basadas en imágenes satelitales. Este sistema ha sido clave para el diseño y seguimiento de estrategias nacionales orientadas a combatir la pérdida de bosque (Min Ambiente, 2023). Además, investigaciones como la de Miranda Castro et al. (2022) muestran cómo el análisis multitemporal con imágenes Landsat ha permitido evaluar la pérdida de cobertura forestal en el Santuario de Flora y Fauna El Corchal “El Mono Hernández”, aportando así, información valiosa para una gestión ambiental más informada y efectiva.

El monitoreo de la deforestación, impulsado por Sistemas de Información Geográfica (SIG), además de ser un tema tecnológico; es una herramienta que permite conectar avances científicos con decisiones prácticas y políticas que afectan la vida cotidiana de las personas y los ecosistemas. Para el futuro, es esencial que esta colaboración entre ciencia, tecnología y gestión territorial se convierta en un puente que no solo proteja nuestros bosques, sino que también fortalezca a las comunidades locales y promueva un desarrollo sostenible. En pocas palabras, se trata de trabajar juntos para cuidar la casa que todos compartimos, el planeta.

#### **4.4 Metodología CORINE Land Cover y su adaptación en Colombia**

Según la Comisión Europea (1994), este proyecto surge en Europa en 1995, como parte del programa Coordination of Information on the Environment, y como una estrategia para mapear la cobertura de la tierra, de una manera estandarizada en los países que la conforman, sus principales

objetivos eran la creación de una base de datos geográfica sobre el uso del suelo que facilitara la toma de decisiones ambientales y política pública. Este proyecto se realizó mediante el uso de imágenes satelitales, fotointerpretación asistida por computación, digitalización en sistemas (SIG) y la validación estadística de datos. Se definió una escala de trabajo de 1:100.000 y una unidad mínima de análisis de 25 hectáreas, donde se adaptó una clasificación jerárquica en 3 niveles, que describirán a continuación, para ser aplicado en el monitoreo de la deforestación, urbanización, degradación ambiental, evaluación de riesgos ecológicos y apoyo a políticas alineadas con los ODS.

- Nivel 1: 5 categorías generales (Urbano, agrícola, forestal, humedales, agua).
- Nivel 2: 15 subcategorías.
- Nivel 3: 44 clases detalladas.

Para el año 2010, el IDEAM, ajustó y adoptó esta metodología, con el propósito de realizar un inventario estándar de la cobertura de superficie de la tierra, utilizando las mismas herramientas y fuentes que en Europa y así generar una base de datos geográfica. La construcción de la leyenda nacional de coberturas de la tierra y la caracterización de las unidades propuestas tomaron como base la leyenda desarrollada para la cuenca Cauca-Magdalena. Este trabajo estuvo a cargo de un grupo técnico interdisciplinario conformado por entidades expertas en gestión ambiental, investigación científica y ordenamiento territorial, quienes finalmente definieron el conjunto de unidades que representan el territorio nacional.

Para la construcción de esta leyenda, se establecieron los siguientes criterios:

- La unidad mínima cartografiable para la escala 1:100.000 es de 25 hectáreas, excepto para los territorios artificiales, donde la unidad mínima es de 5 hectáreas.
- La identificación y delimitación de la unidad de cobertura de la tierra corresponderá a la fecha de toma de la imagen de satélite.
- Los niveles 1 y 2 de la leyenda permanecen iguales a los de la leyenda CORINE Land Cover de Europa.
- Las unidades para la escala 1:100.000 varían desde el nivel 3 hasta el 6 en los diferentes grupos de coberturas, variación que depende del tipo de cobertura.

En resumidas cuentas, se proponen unidades de coberturas adaptadas a escala 1:100.000, dependiendo de la resolución de las imágenes a trabajar, las condiciones ambientales y los objetivos del usuario, se mantiene en construcción dinámica, que dependerá de avances en teledetección,

datos de campo y aportes técnicos. La leyenda quedo organizada en cinco categorías CORINE: áreas artificiales, áreas agrícolas, áreas de bosques y seminaturales, zonas húmedas y cuerpos de agua. Se espera que la leyenda evolucione con el uso y la retroalimentación de investigadores.

#### **4.5 Sistemas de Alertas tempranas de Deforestación; Hansen e IDEAM**

A nivel global, el sistema Global Forest Change (GFC) liderado por Mathew Hansen proporciona productos como Loss Year a través de Global Forest Watch y GEE, lo que facilita el análisis y monitoreo de la deforestación en casi tiempo real.

El IDEAM ha logrado fortalecer su sistema nacional de monitoreo forestal, actualizando anualmente las cifras, mediante el uso del SIG e imágenes satelitales. Este trabajo además de fortalecer la labor ambiental también permite la generación de alertas tempranas Esta labor no solo ha fortalecido la gestión ambiental, sino que ha permitido generar alertas tempranas con una resolución espacial de 250 metros y temporalidad trimestral desde 2016, lo que ha facilitado la identificación de núcleos activos de deforestación (Minambiente, 2023).

El Sistema de Monitoreo de Bosques y Carbono (SMBByC) del IDEAM, con su componente de alertas tempranas (AT-D), es esencial para detectar cambios recientes y brindar información oportuna a los tomadores de decisiones (IDEAM & Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2023). Aunque Hansen y el IDEAM tienen enfoques distintos, su articulación permite una comprensión más precisa de los patrones de pérdida forestal tanto a nivel internacional como local. Me puedes apoyar en esta observación realizada por el evaluador.

La elaboración de este modelo se realiza teniendo como base la referencia metodológica, presentada en el modelo de Hansen et al. (2013), la cual constituye la detección de cambios de coberturas resultante del análisis de imágenes satelitales y algoritmos de clasificación, si bien este modelo no arroja resultados de clasificación de usos del suelo, si detecta perdida y/o ganancia de cobertura forestal. Facilitando interpretar la deforestación en el sentido estricto de la palabra, pues determina zonas con cobertura natural de zonas con uso antrópico, permitiendo conocer la dinámica agrícola en una zona determinada. Este estudio toma como base esta metodología haciendo uso de los datos originales (Hansen), donde el pixel que respersenta la perdida de cobertura arborea, Tree cover loss se le adigna el valor 1 y sin pérdida valor 0 y datos (IDEAM), donde los pixeles correspónientes al nivel 2, son catalogados como deforestación. Dos dataset ya existentes y de uso

libre, que determinan la pérdida de cobertura forestal, cada una de ellas realizadas a diferentes escalas, una de ellas a escala global y la otra a escala local, permitiendo asociarlas a los predios de café estudiados, que finalmente nos dará información acerca de la afectación de cada predio y permitirá conocer si este productor podrá o no acceder a mercados internacionales, como es el caso de la Unión Europea.

#### **4.6 Normativa internacional, nacional-marco legal**

Anteriormente la conciencia ambiental estaba ausente, se presentaron algunas iniciativas de regulación internacional ambiental, que no prosperaron. La historia actual se puede dividir en tres etapas, dos de ellas, conferencias de alta importancia celebrada hasta ahora: La primera hace referencia a la conferencia de Estocolmo (1972) y la Cumbre de Rio de Janeiro (1992), y en 2016. En la primera, se produce el primer documento internacional que estableció el comienzo para la preservación del medio ambiente (Derecho Internacional Ambiental, historia e hitos (AIDA), 2020).

Posteriormente el acuerdo de Paris (2015), que resalta las consecuencias del calentamiento global, reconociendo la importancia de la protección de los bosques, para mitigar sus impactos (Naciones Unidas, 1992; 2015). Lo que atañe a este estudio principalmente es el Reglamento (UE) 2023/1115 exige a los países exportadores garantizar que productos como el café no provengan de zonas deforestadas después del 31 de diciembre de 2020 (Parlamento Europeo y del Consejo, 2023).

En Colombia, desde la formación de la república se vinieron implementando la formulación de leyes y la creación de entidades para la prevención y sanciones en el tema referido a los bosques. Pero es solo hasta la década de los años 80, donde se avanza realmente en la legislación ambiental y su conservación, dándose como un avance significativo la expedición de la ley 23 de 1973, cuyo principal objetivo es prevenir y controlar la contaminación del medio ambiente, así como buscar el mejoramiento, conservación de los recursos naturales renovables, para defender la salud y bienestar de todos los habitantes de la nación.

Posterior a eso, el medio ambiente es visto de otra manera en la constitución de 1991, en donde la afinidad con las preocupaciones a nivel mundial por la protección y defensa de los ecosistemas. Esto le dio al medio ambiente el carácter constitucional, allí, se encuentra la

normatividad que garantice un medio ambiente propicio para el desarrollo de los seres vivos (Palacio, 2019). Posterior a la Constitución Política de 1991, se observa como el medio ambiente se convierte en protagonista, este protagonismo hace que el marco legal se fortalece, así como la creación de entidades que garanticen su cuidado, para ello se crea el Ministerio de Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la Gestión y conservación del medio ambiente (SINA) a través de la Ley 99 de 1993.

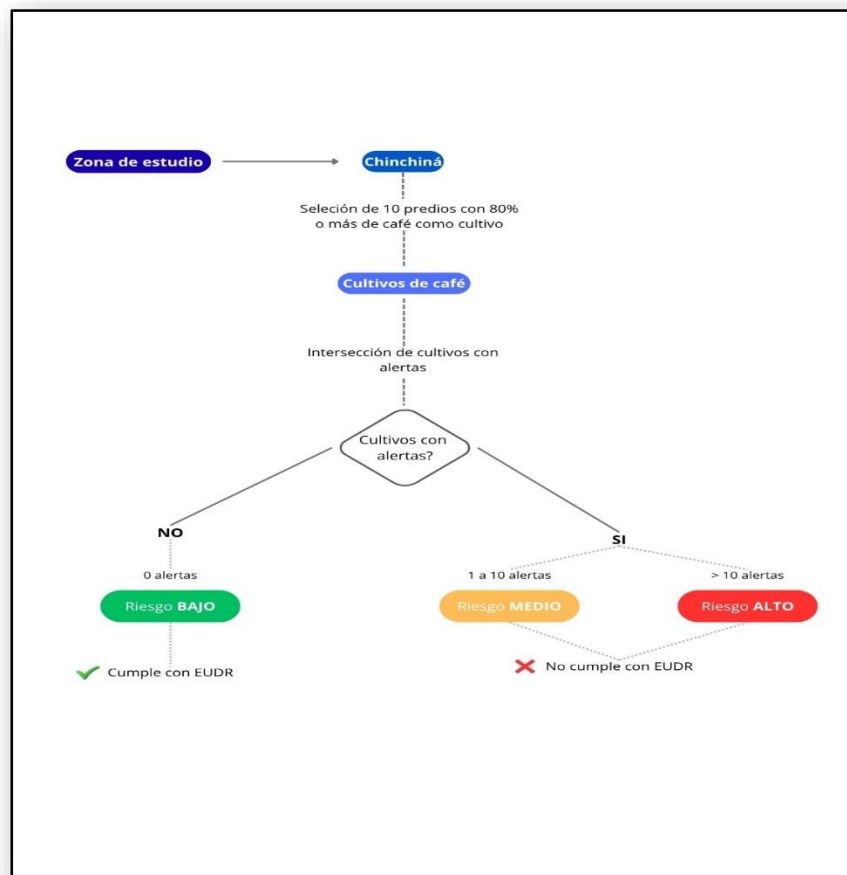
En este sentido, el monitoreo tecnológico no solo contribuye a la conservación ambiental, sino que también es una herramienta clave para cumplir con los Objetivos de Desarrollo Sostenible (ODS), especialmente el ODS 13 sobre acción por el clima, el ODS 15 sobre vida de ecosistemas terrestres y el ODS 2 sobre hambre cero, en tanto que promueve una agricultura respetuosa de los ecosistemas. Así, se integran enfoques técnicos y territoriales con compromisos globales de sostenibilidad.

## 5. Metodología

En la figura No. 1, se presenta el modelo, a través del cual se estructuró la metodología

**Figura 1**

*Visualización gráfica del modelo.*



*Nota:* Elaboración Propia.

La metodología se estructuró en cuatro fases con el propósito de desarrollar un modelo de detección de alertas de deforestación sobre cultivos de café. El modelo integró información espacial proveniente de fuentes nacionales (CLC, DANE, IDEAM) e internacionales (Hansen), procesadas en Google Earth Engine (GEE) y posteriormente verificadas en ArcGIS Pro para garantizar consistencia y robustez en los resultados.

Las fases metodológicas fueron las siguientes:

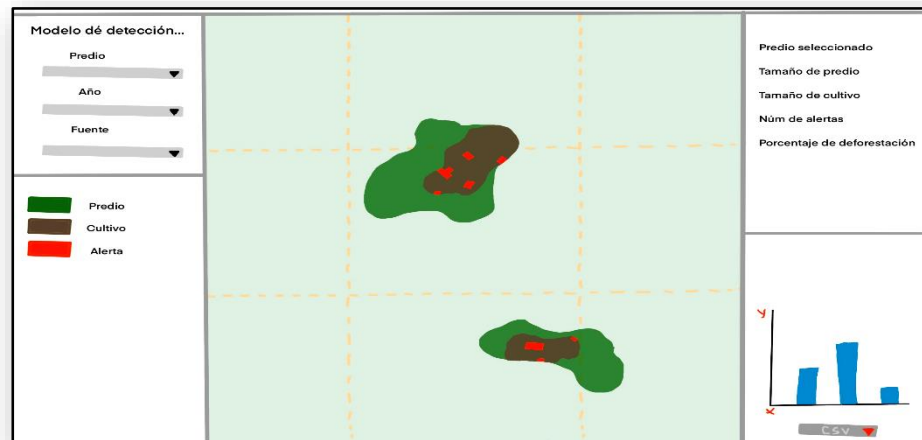
1. Delimitación y categorización de predios rurales con vocación cafetera, a escala 1:100.000
2. Procesamiento geoespacial de alertas de deforestación sobre cultivos de café.
3. Desarrollo de un visor interactivo para análisis visual y exportación de resultados en GEE.
4. Validación externa de resultados mediante SIG de escritorio.

El diseño esperado del visor corresponde a una interfaz interactiva que se organiza en dos paneles principales: como se ve en la figura 2.

- Un panel de control, subdividido en opciones de selección de predio, intervalo temporal, fuente de alertas y leyenda gráfica de la visualización.
- Un panel de resultados, que presenta las estadísticas principales del predio analizado y una gráfica comparativa de la pérdida de cobertura forestal.

## Figura 2

*Diseño esperado*



*Nota:* Elaboración Propia. diseño inicial (bosquejo – mock up). Este esquema busca que el usuario pueda navegar de forma intuitiva entre filtros de análisis y resultados cuantitativos, facilitando la interpretación de la información espacial y su potencial aplicación en la toma de decisiones.

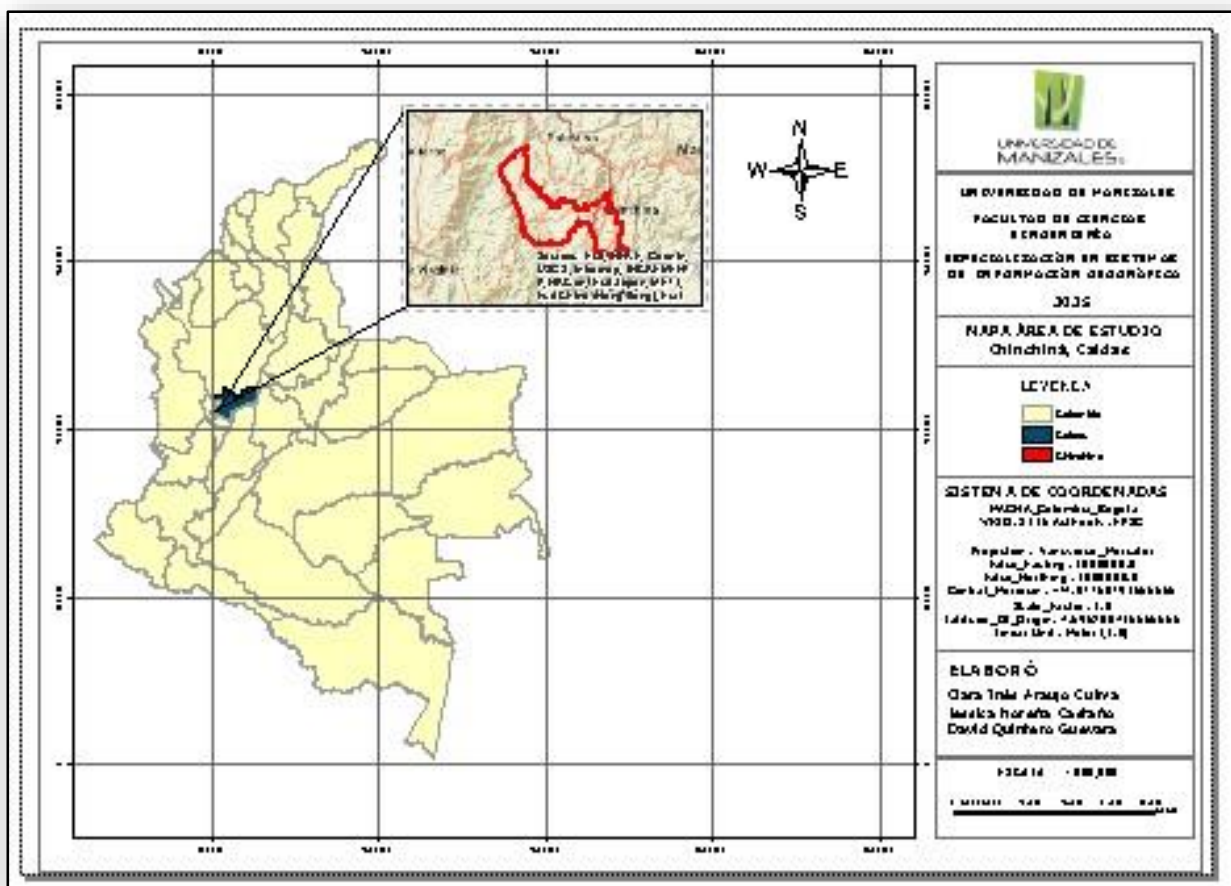
## 5.1 Fase 1: Delimitación y categorización de predios rurales con vocación cafetera

### 5.1.1 Área de estudio

El presente estudio se desarrolló en el municipio de Chinchiná, Caldas, Colombia, (Ver figura 3), la cual es una zona reconocida por su vocación y extensión agrícola. El objetivo fue identificar los predios rurales que contarán con cultivos de café dentro de su extensión, y así generar el insumo espacial con el cual se realizó el análisis de alertas de deforestación.

**Figura 3**

*Mapa de área de estudio*



*Nota:* Elaboración propia

### ***5.1.2 Fuentes de información***

Con el fin de simular polígonos reales correspondientes a predios rurales que dentro de su extensión tengan cultivos de café, se utilizaron tres capas de información geográfica para filtrar y seleccionar los predios, estas capas son:

- Capa de Cobertura de la Tierra (Metodología CORINE Land Cover Adaptada para Colombia Periodo – 2020), escala 1:100.000: Esta adaptación de la metodología Corine Land Cover realizada para Colombia, contiene diferentes niveles temáticos, los cuales facilitan identificar con precisión áreas específicas, como en este caso Café.
- Municipios – (DANE): Esta capa contiene los límites oficiales de los municipios en Colombia en este caso para delimitar espacialmente a Chinchiná a escala 1:100.000.
- Capa catastral de terrenos rurales (IGAC) a escala 1:100.000: Esta capa oficial contiene polígonos asociados a predios rurales en Colombia, con información asociada como área, tipo de uso, y código catastral.

Cada capa de información elegida se utilizó ya que cuenta con una validez respaldada por instituciones gubernamentales lo cual nos permite hacer un análisis real de predios y su preprocesamiento se realizó en ArcGIS Pro.

### ***5.1.3 Filtrado de área de estudio e identificación de cultivos de café***

Se procesó la capa de cobertura de la tierra, basada en la metodología Corine Land Cover, buscando filtrar específicamente los polígonos que estuvieran dentro de la clasificación del nivel 2222, que corresponden a cultivos de café según la leyenda oficial. Esta selección permitió aislar las áreas dentro del municipio que tienen vocación cafetera, con el fin de superponerlas posteriormente con los polígonos de los predios rurales, y así obtener las áreas correspondientes a vocación cafetera en esta zona de estudio.

Una vez con las capas espaciales correspondientes a cultivos de café y a predios rurales, se llevó a cabo una intersección espacial con el método Select by Location en ArcGIS Pro, buscando identificar exclusivamente aquellos predios que dentro de sus límites tuvieran alguna superficie cubierta por café. Por último, se aplicó un Join espacial con el fin de asociar los atributos de los

polígonos de café a los polígonos de área rural, logrando así calcular el área de cultivo de café contenida en cada predio rural y conocer el porcentaje de superficie de café con respecto al área total del predio.

#### **5.1.4 Selección de predios objetivo**

Con base en el análisis realizado anteriormente, se busca aplicar un filtro final para seleccionar los predios que contengan una cobertura de café mayor o igual a 80% del total de la extensión de su predio, buscando así tener predios donde su vocación principal sea la producción agrícola cafetera.

Con el fin de tener una muestra donde estuvieran representados las escalas productivas, desde pequeños a grandes productores, adoptamos la clasificación utilizada por la FAO, respecto al tamaño de la tierra para Food and Agriculture Organization, esta clasificación varía a lo largo de zonas geográficas y de producción, clasificándolas según la extensión de la superficie productiva en pequeños, medianos y grandes productores, como se muestra en la tabla 1. Esta clasificación continúa siendo vigente para temas de propiedad y ordenamiento territorial (Asobancaria, 2021). Con base en esta clasificación, se seleccionaron 10 predios, distribuidos en las tres categorías de tamaño productivo (Pequeño, mediano y grande), en este caso, la asociación se basó en la extensión de las áreas cultivadas con café, dentro de un predio, como se indica en la tabla 1. Dado que los polígonos utilizados en esta investigación presentan tamaños significativamente mayores a los propuestos en la clasificación original de la FAO, realizamos una adaptación, que consistió en mantener las dimensiones reales de los predios simulados en el área de estudio conservando la lógica de escalas relativas entre pequeño, mediano y grandes productores empleada por la FAO.

**Tabla 1**

*Categorización de productores según FAO vs adaptación del estudio*

<b>Entidad/Referencia</b>	<b>Pequeño Productor (Ha)</b>	<b>Mediano Productor (Ha)</b>	<b>Gran Productor (Ha)</b>
<b>FAO (2012)</b>	< a 1	1 - 10	> a 10
<b>Adaptación del Estudio</b>	0 - 5	5 - 20	> a 20

*Nota:* Elaboración propia

Esta categorización ajustada permite mantener un enfoque comparativo entre las distintas escalas productivas. Nuestra selección de predios facilitó el estudio de la pérdida de la cobertura forestal teniendo en cuenta la extensión pequeña, mediana y grande de cada uno de los predios, como se muestra en la tabla 2 y en la figura 4.

**Tabla 2**

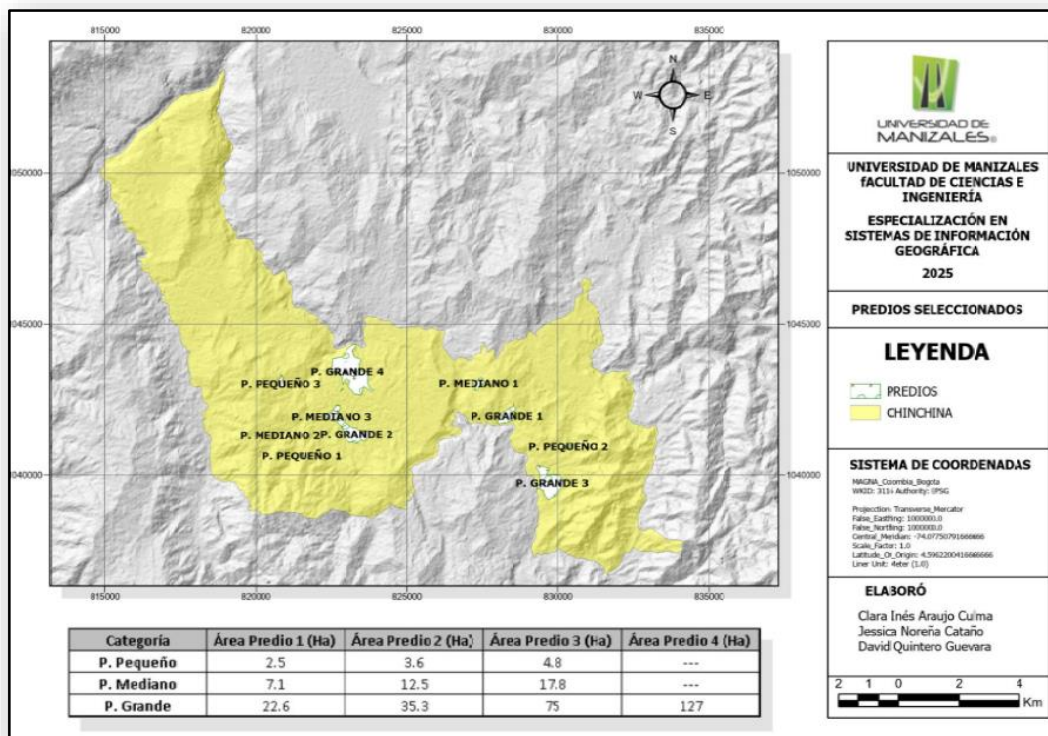
*Categorización de predios por área Categorización distintas escalas productivas*

Categoría	Predio 1 Área (Ha)	Predio 2 Área (Ha)	Predio 3 Área (Ha)	Predio 4 Área (Ha)
<b>P. Pequeño</b>	2.5	3.6	4.8	---
<b>P. Mediano</b>	7.1	12.5	17.8	---
<b>P. Grande</b>	22.6	35.3	75	127

Nota: Elaboración propia

**Figura 4**

*Mapa de Chinchiná con los predios seleccionados*



Nota: Elaboración propia

## 5.2 Fase 2: Procesamiento geoespacial de alertas de deforestación sobre cultivos de café

Esta etapa se trabajó el procesamiento con dos fuentes de datos satelitales que reportan alertas, en el contexto nacional se trabajaron en las alertas IDEAM y en el contexto internacional las alertas Hansen.

### ***5.2.1 Preparación y estandarización de insumos raster***

Esta fase inició con la preparación de la información espacial ráster, vectorial, y su estandarización al sistema de referencia WGS 1984, con el fin de tener una consistencia a lo largo del procesamiento, ya que es el sistema en el que se maneja la información en la plataforma Google Earth Engine (GEE).

Se creó una cuenta de tipo académico en (GEE), donde se subieron las capas espaciales vectoriales correspondientes a predios rurales y cultivos de café; y, a su vez, se integraron las capas de información ráster de alertas de deforestación de ambas fuentes: Hansen (2021-2024), escala 1:100.000 e IDEAM (2021-2023), escala 1:100.000. Específicamente se seleccionaron los datos correspondientes a la pérdida de cobertura forestal anual y a los datos asignados a “deforestación” (Nivel 2).

A partir del resultado de estas capas, se aplicaron máscaras de filtrado para eliminar aquellos valores diferentes a los reportados como deforestación; y se definió la resolución espacial de 30 m, buscando tener una concordancia con las características del sensor utilizado en la fuente de origen.

### ***5.2.2 Filtrado espacial sobre áreas de café estimación de áreas afectadas y cálculo proporcional***

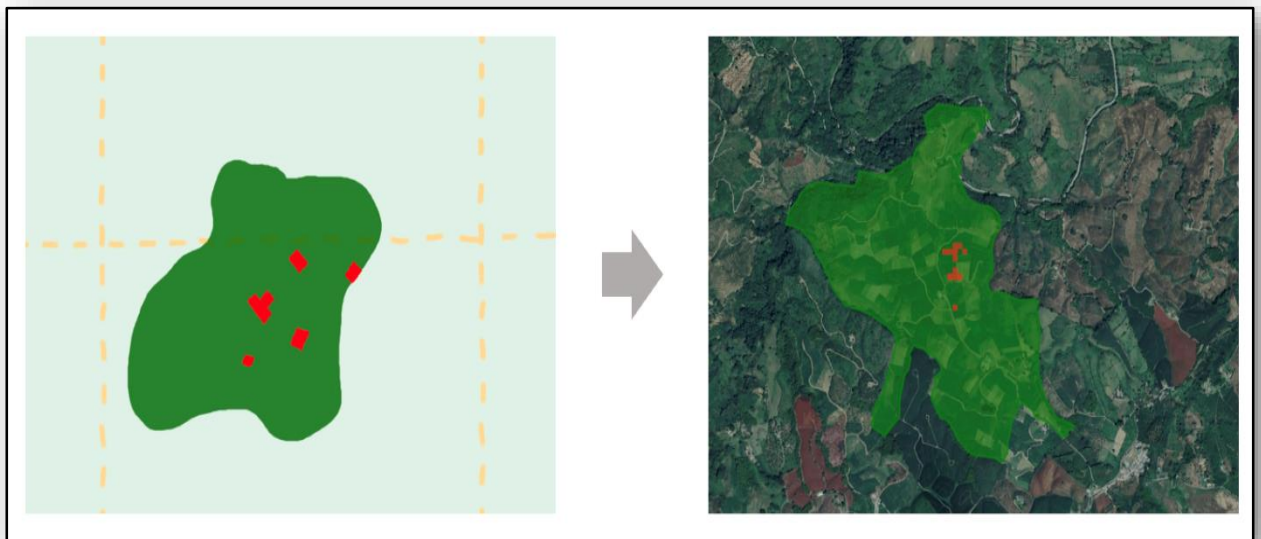
En esta se identificaron las alertas de deforestación que se interceptan con los cultivos de café; para ello, se realizó una conversión de los datos tipo ráster a formato vectorial, buscando optimizar el procesamiento en la plataforma; y se utilizaron funciones como `filterBounds()` buscando filtrar todas las geometrías deseadas en la zona de trabajo, `clip()` y `Reducer()` para realizar cálculos estadísticos dentro de los predios y que usadas en conjunto, permitieron realizar intersecciones directas en las capas.

Con estas operaciones, se delimitaron las áreas con café dentro de las zonas de estudio que están reportadas con deforestación para los períodos 2021–2024 por Hansen y 2021–2023 por IDEAM.

Una vez filtradas las zonas de intersección, se estimó cuánto fue esta pérdida de cobertura reportada en hectáreas en cada predio, cuantificando los píxeles superpuestos en cada cultivo; y se realizaron verificaciones visuales de manera preliminar a través de comandos de código como `ee.Image.pixelArea()` `Map.addLayer()` `Map.centerObject()` que permitieron realizar una conversión de pixel a área, una validación visual de la distribución y correcta ejecución de los comandos para la estimación de las alertas, como se observa en la figura 5.

### Figura 5

*Prueba visual de alerta en un predio. (Bosquejo vs prueba)*



*Nota:* Elaboración Propia.

## 5.3 Fase 3: Desarrollo de visor interactivo para análisis visual y exportación de resultados

### 5.3.1 Diseño general de la interfaz

En esta fase se desarrolló un visor interactivo que integró los resultados del análisis ejecutado en una interfaz gráfica funcional e intuitiva. El visor se construyó en el mismo motor visual y desarrollo de (GEE); haciendo uso de componentes clave como `ui.Panel`, `ui.Select`, `ui.Button`. Su estructura se diseñó a través de:

Panel de control, (Ver figura 6) subdividido en listas desplegables de selección de predio, intervalo temporal y la fuente de alertas a analizar; adicionalmente se integró un botón de ejecución de análisis que realizara el procesamiento a los rangos elegidos en los selectores.

### Figura 6

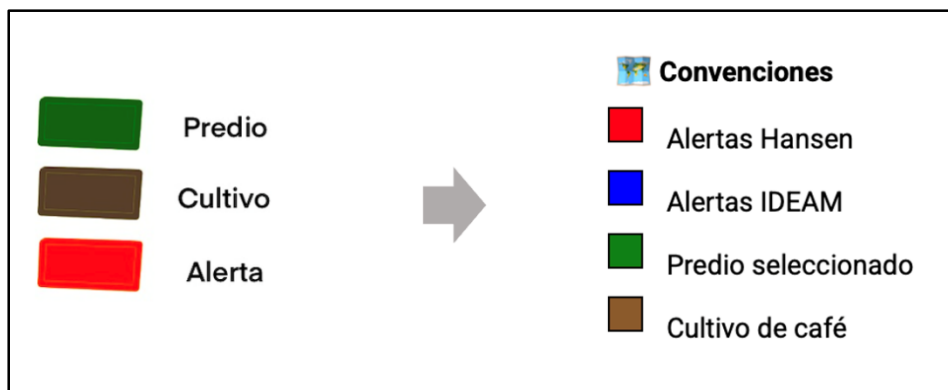
*Prueba visual de alerta es un predio. (Bosquejo vs final)*

*Nota:* Elaboración Propia

Además, este primer panel integra una leyenda gráfica correspondiente a las capas desplegadas en el visor (alertas Hansen, alertas IDEAM, predio seleccionado y cultivo de café). Ver figura 7.

### Figura 7

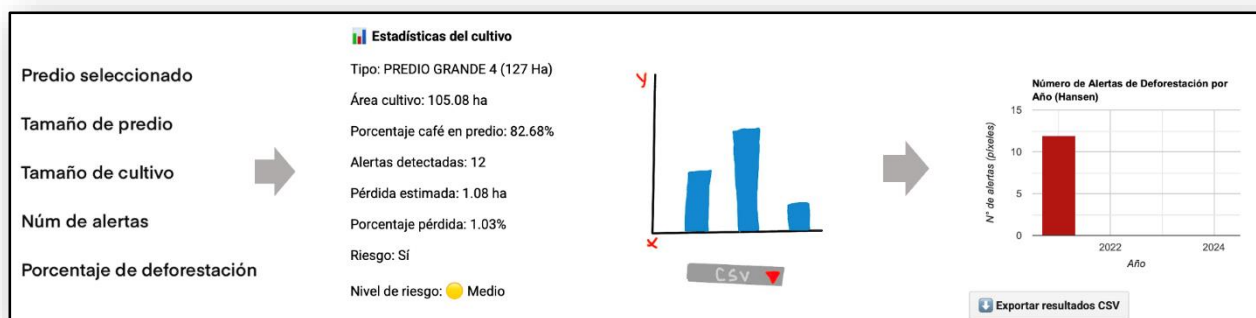
*Leyenda de alertas. (Bosquejo vs final)*



*Nota:* Elaboración Propia

El panel de resultados (ver figura 8) mostró métricas importantes como lo son el área de pérdida; el porcentaje de afectación de esa deforestación; y el nivel de riesgo; el cual fue clasificado mediante un sistema tipo semáforo definido de la siguiente manera: el riesgo bajo (0 alertas) se representan en color verde, el riesgo medio (1 - 10 alertas) en color amarillo y el riesgo alto (más de 10 alertas) en color rojo. Esta categorización se diseñó considerando el número de repetición de alertas que presenta el cultivo durante el periodo evaluado, este sistema busca facilitar la identificación rápida de cultivos con mayor necesidad de verificación. Además, este panel contiene una gráfica generada con la función generar Grafica (), que muestra el reporte de alertas en el periodo analizados, y un botón final adicional para la exportación de resultados en formato CSV.

**Figura 8**  
*Panel Resultados*



*Nota:* Elaboración Propia

En la figura 9, se observa el visor final y se presenta la ejecución individual de cada fuente de alertas en un mismo predio. En la parte superior se observan las alertas Hansen y en la inferior la IDEAM y sus métricas correspondientes.

## Figura 9

*Resultado final del visor.*



*Nota:* Elaboración Propia. Se adjunta link de acceso a aplicativo abierto en Google Earth Engine:

<https://modelo-de-deteccion-de-alertas.projects.earthengine.app/view/mod>

## 5.4 Fase 4: Validación externa de resultados mediante SIG de escritorio

### 5.4.1 Integración de datos de alerta en entornos externos

Esta fase final buscó reconocer los resultados obtenidos en la (GEE), a través de replicar el proceso en un software SIG como ArcGIS Pro. Se utilizaron las mismas fuentes de información que fueron empleadas en la plataforma GEE: las alertas Hansen y las alertas IDEAM. Estos datos fueron descargados nuevamente desde las plataformas oficiales; para el caso de las alertas Hansen,

la información está presentada en un único ráster codificado por año, mientras que en IDEAM se descargaron las imágenes individuales para el año seleccionado.

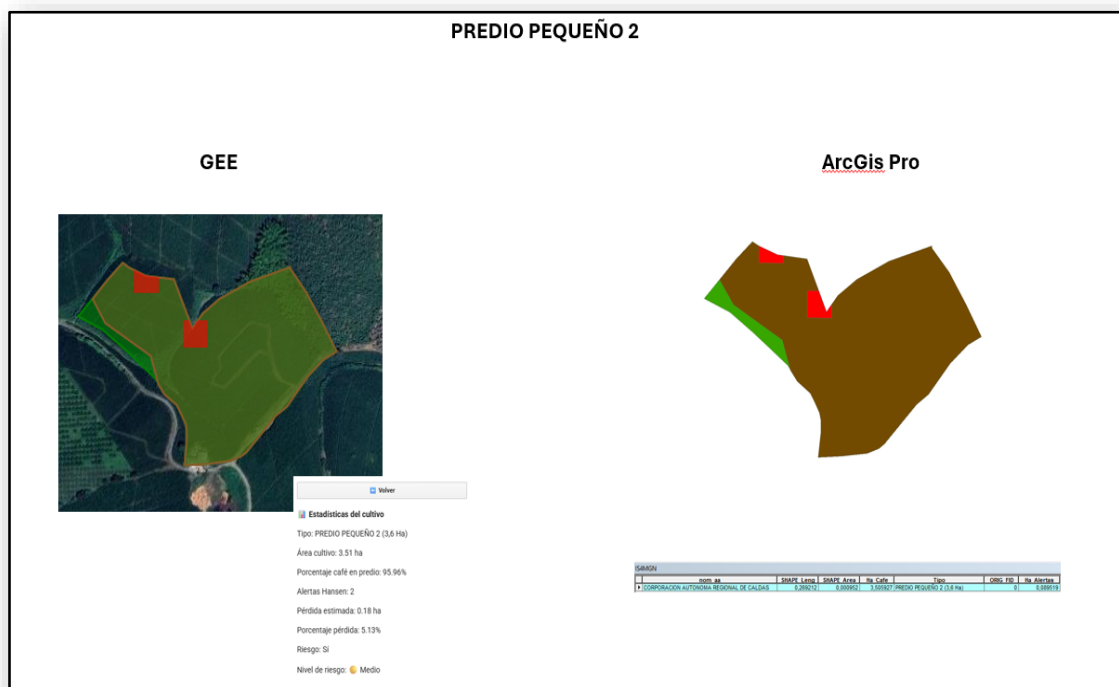
#### 5.4.2 Cruce espacial con cultivos de café

Una vez con la información de alertas ya sectorizada y filtrada, se realizaron intersecciones espaciales con la capa de cultivos que ya estaba definida. El objetivo de este cruce fue poder obtener datos sobre qué superficie de cultivo se encuentra afectada por alertas de deforestación y en qué año, y así poder contrastar con los datos obtenidos en el modelo. Este cruce de datos se hizo buscando detectar y conocer qué posibles diferencias se pueden atribuir a los métodos de procesamiento y plataformas empleadas.

A continuación, se adjuntan las imágenes de algunos predios procesados en GEE Vs ArcGis Pro (Ver figura 10, 11, y 12)

### Figura 10

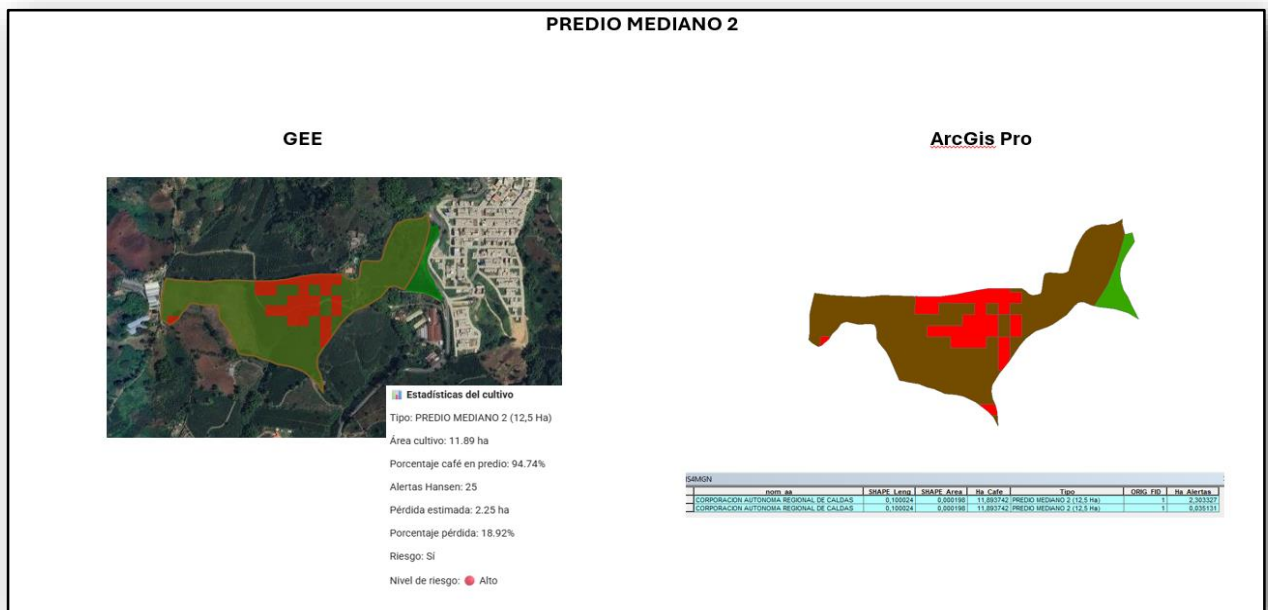
*Resultados comparación GEE Vs ArcGis Pro en predio pequeño 2*



*Nota:* Elaboración Propia

**Figura 11**

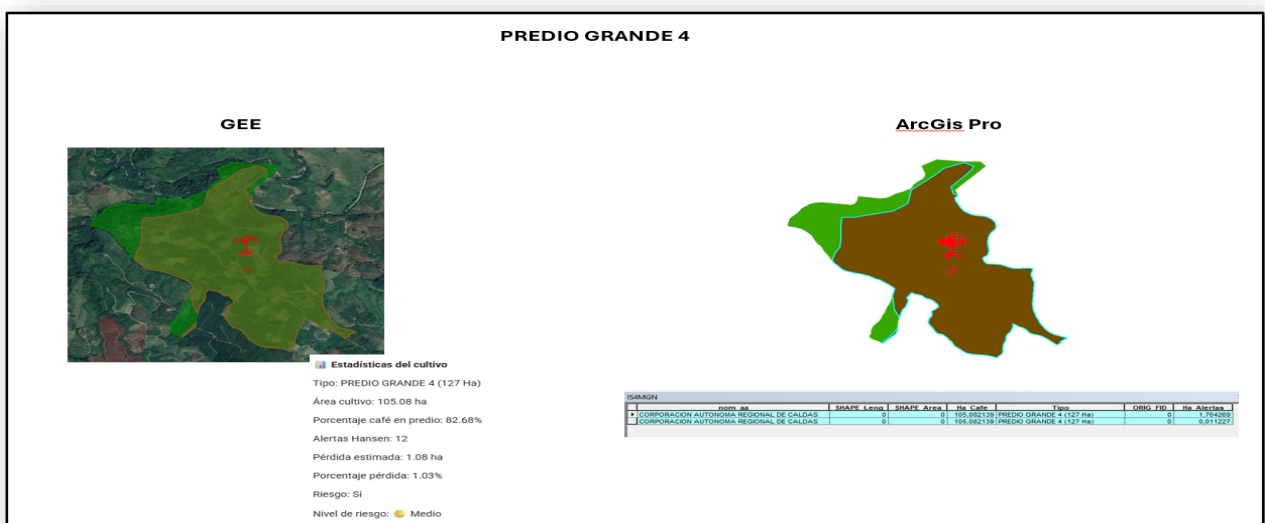
*Resultados comparación GEE Vs ArcGis Pro en predio mediano 2.*



*Nota: Elaboración Propia*

**Figura 12**

*Resultados comparación GEE Vs ArcGis Pro en predio grande 4*



*Nota: Elaboración Propia*

## 6. Resultados

El visor interactivo realizado en GEE fue un resultado relevante dentro del proceso al permitir realizar consultas de una manera sencilla a través de filtros, intervalos de tiempo, visualización de capas temáticas y sus respectivas alertas, haciendo posible analizar datos de manera amigable y conocer la evolución a través del tiempo en cada predio analizado.

Ahora bien, los resultados obtenidos, arrojaron información sobre la pérdida de cobertura, los valores obtenidos en (GEE y ArcGIS Pro), son valores similares, aunque no idénticos; estas mínimas variaciones se pueden explicar por el método de proceso y análisis de píxeles que utilizan cada uno de los sistemas empleados. Estas variaciones se pueden observar con más detalle en la tabla 3.

Al realizar la comparación de la deforestación, entre Google Earth Engine (GEE) y ArcGIS Pro, los valores obtenidos muestran conciencia en la mayoría de los predios, observando diferencias mínimas, en un rango inferior a 0,1 ha. Esto sugiere que, sin importar las diferencias de cada sistema, los resultados son coherentes entre sí y corroboran la veracidad de los análisis. Facilitando la verificación de las regulaciones internacionales y poder seguir participando de sus mercados.

En síntesis, los valores comparativos muestran que tanto GEE como ArcGIS Pro permiten detectar patrones similares de deforestación, lo cual refuerza la validez de los resultados y demuestra que ambas herramientas son complementarias para el monitoreo territorial. Estos hallazgos se presentan de manera detallada en la Tabla 3.

Los análisis realizados fueron claves para identificar alertas de pérdida de cobertura forestal año a año en los cultivos de café; con base en el análisis de ambas fuentes de información. En cuanto a los resultados, hay diferencias entre los métodos; mientras que para las alertas del IDEAM no se evidencian interacciones en los años estudiados, tal vez por el umbral de detección de estas áreas de cobertura por debajo de 1 ha; frente al análisis realizado por el método de Hansen, 0,09 ha por píxel.

**Tabla 3***Resultados de la comparación de total de área deforestada en hectáreas entre GEE y ArcGis Pro*

Predio	Area (Ha)	Área cultivos Café (Ha)	% Cultivo Café (Ha)	Año alerta	IDEAM		HANSEN		Total área GEE (Ha)	Total área ArrGis Pro (Ha)
					Alerta GEE (Ha)	Alerta ArrGis Pro (Ha)	Alerta GEE (Ha)	Alerta ArrGis Pro (Ha)		
P. Pequeño 1	2,5	2,07	82,8	2021	0	0	0	0	0	0
				2022	0	0	0	0		
				2023	0	0	0	0		
				2024	N/A	N/A	0	0		
P. Pequeño 2	3,6	3,5	95,9	2021	0	0	0	0	0,18	0,99
				2022	0	0	0,18	0,99		
				2023	0	0	0	0		
				2024	N/A	N/A	0	0		
P. Pequeño 3	4,8	4,3	90,7	2021	0	0	0	0	0	0
				2022	0	0	0	0		
				2023	0	0	0	0		
				2024	N/A	N/A	0	0		
P. Mediano 1	7,1	6,8	9,5	2021	0	0	0	0	0,18	0,15
				2022	0	0	0,18	0,15		
				2023	0	0	0	0		
				2024	N/A	N/A	0	0		
P. Mediano 2	12,5	11,8	94,7	2021	0	0	2,16	2,3	2,25	2,33
				2022	0	0	0	0		
				2023	0	0	0	0		
				2024	N/A	N/A	0,09	0,03		
P. Mediano 3	17,8	11,7	99,2	2021	0	0	0,99	0,97	1,44	1,34
				2022	0	0	0	0		

Predio	Area (Ha)	Área cultivos Café (Ha)	% Cultivo Café (Ha)	Año alerta	IDEAM		HANSEN		Total área GEE (Ha)	Total área ArrGis Pro (Ha)
					Alerta GEE (Ha)	Alerta ArrGis Pro (Ha)	Alerta GEE (Ha)	Alerta ArrGis Pro (Ha)		
P. Grande 1	22,6	17,7		2023	0	0	0	0	0	0
				2024	N/A	N/A	0,45	0,37		
				2021	0	0	0	0		
				2022	0	0	0	0		
				2023	0	0	0	0		
P. Grande 2	35,3	35	99	2024	N/A	N/A	0	0	1,35	1,3
				2021	0	0	0,63	0,69		
				2022	0	0	0	0		
				2023	0	0	0,72	0,61		
				2024	N/A	N/A	0	0		
P. Grande 3	75	64,9	86,4	2022	0	0	0	0	1,26	1,32
				2023	0	0	0	0		
				2024	N/A	N/A	1,26	1,32		
				2021	0	0	1,08	1,76		
				2022	0	0	0	0		
P. Grande 4	127	105	82,6	2023	0	0	0	0	1,08	1,76
				2024	N/A	N/A	0	0		
				2022	0	0	0	0		
				2023	0	0	0	0		

Nota: Elaboración Propia

## 7. Discusión

Los resultados obtenidos en la presente investigación muestran la eficacia del uso de plataformas de teledetección y la integración de nuevas tecnologías en el monitoreo de deforestación, además, se evidenció cómo algunas variables pueden identificar áreas afectadas por deforestación, proporcionando salidas visuales y estadísticas que permiten su análisis a nivel territorial y ambiental.

Uno de los principales hallazgos fue la ausencia de cruces con las alertas emitidas por el IDEAM; es decir, que no se evidencian pérdidas de cobertura en dicha base de datos, esto se pudo dar debido a las diferencias en la resolución espacial y los métodos de detección que realiza cada una de las fuentes de datos; ahora bien, mientras el IDEAM reporta una escala aproximadamente de 30 x 30 (0.09 ha) ArcGIS pro, reporta una escala 100 x 100 (1 ha).

Se pudieron observar algunas diferencias en los resultados procesados en un Software SIG convencional con los resultados obtenidos en GEE, los resultados de este último muestran coherencia y diferencias menores de cálculo de áreas forestadas, reafirmando que las plataformas como GEE son fiables para realizar análisis de datos y tomar decisiones basadas en dicha información; no obstante, esta herramienta tiene algunas limitaciones en su versión gratuita, como restricciones de acuerdo al volumen de datos necesarios para procesar, al igual que sus tiempos y visualizaciones.

Estas interfaces no solo permiten la comprensión de fenómenos ambientales como la deforestación, sino que también se trata de una herramienta didáctica para usuarios que no cuentan con experiencia previa en sistemas de información geográfica, permitiéndoles seleccionar predios y visualizar estadísticas en tiempo casi real, lo cual representa un avance significativo en el acceso a la información espacial.

## 8. Conclusiones

La implementación del modelo de detección de arrojó como resultado la identificación exacta de áreas con deforestación en predios cafeteros, de esta forma se pudo delimitar y filtrar los cultivos de café con trazas de deforestación, de tal forma que aquellos predios que presentan alertas son sujetos a incumplimiento de la regulación de la Unión Europea EUDR.

Cabe resaltar que estos datos de alerta de deforestación también pueden estar asociados a otras actividades como la expansión agrícola, es importante tener en cuenta que los fenómenos climáticos también influyen en la pérdida de cobertura, como se pudo observar en los resultados obtenidos en el año 2023, se da un aumento en las alertas de deforestación específicamente en el predio 2 Grande, que puede relacionarse con el fenómeno del niño presentado en Chinchiná a mediados del 2023 de acuerdo con el IDEAM. El fenómeno del niño es conocido por presentar épocas de sequía intensa lo que ocasiona estrés hídrico por lo que dichas alertas pueden corresponder a condiciones del cambio climático.

Los resultados arrojados por la plataforma fueron coherentes con los obtenidos en el SIG lo que es un respaldo de viabilidad para implementar procesos de análisis en modelos basados en datos en la nube, sin la necesidad de ingresar los datos de forma manual, lo que es una ventaja en cuanto operabilidad.

Finalmente, desarrollar la interfaz interactiva mediante el lenguaje de código JavaScript permitió mostrar y representar los resultados de forma visual y estadística, lo cual fue fundamental y práctico para la implementación de los tres paneles de análisis. Esta interfaz logró generar una base sólida que integra los procesos de detección de alertas en un entorno funcional, facilitando el monitoreo de cultivos en el marco de la normativa EUDR de la Unión Europea, así como el uso de datos abiertos satelitales permitió identificar datos temporales relevantes sin la necesidad de incurrir en costos elevados o de verificación en campo.

## 9. Recomendaciones

Realizar diferentes análisis comparativos en zonas cafeteras de Colombia permitiría conocer cómo fluctúa el comportamiento de la deforestación en diferentes regiones. Esta estrategia enriquecería los resultados obtenidos y permitiría evaluar la efectividad del modelo en diferentes contextos

Adicionalmente, es recomendable utilizar otras fuentes de datos que puedan tener mayor resolución espacial y temporal, y que permitan detectar cambios en las coberturas con mayor precisión.

Incorporar procesos de validación, ya sea trabajo en campo o con imágenes de alta resolución, puede ayudar a verificar si estas alertas coinciden con condiciones reales en el territorio.

Finalmente, ya que el uso de la plataforma Google Earth Engine en su versión gratuita presenta limitaciones, como en la carga de datos y tiempo de procesamiento por bloque de datos, se recomienda emplear cuentas institucionales para tener mayor capacidad operativa y técnica.

## Referencias

- Alvarado, A. (2024). *Hubo presión de una alianza de países latinoamericanos” para postergar la Ley Cero Deforestación de la UE.* es.mongabay: <https://es.mongabay.com/2024/12/presion-alianza-paises-latinoamericanos-para-postergar-ley-cero-deforestacion-entrevista/>
- Armenteras, D., & Rodríguez, N. (2014). Dinámicas y causas de deforestación en bosques de latino américa: una revisión desde 1990. *Colombia Forestal*, 17(3), 233 - 246. 10.14483/udistrital.jour.colomb.for.2014.2.a07
- Asobancaria. (2021). *GCF Readiness Componente 4. Análisis Sectorial. Agropecuario.* UNEP.
- Boschetti, L., Roy, D., Justice, C., & Humber, M. (2015). MODIS–Landsat fusion for large area 30 m burned area mapping. *Remote Sensing of Environment*, 161, 27 - 42. 10.1016/j.rse.2015.01.022
- Burrough, P., & McDonnell, R. (1998). *Principle of Geographic Information Systems.* Oxford University Press, 15 - 34.
- Caicedo, L., Arango, S., & Pérez, U. (2023). Análisis multitemporal de coberturas de la tierra con Random Forest usando Google Earth Engine: caso de estudio departamento del Tolima (Colombia) en el periodo 2017-2021. En I. S. Sur., *Libro de resúmenes* (págs. 1 - 2). 10.13140/RG.2.2.11909.52964
- Coca-Castro, A., Zaraza-Aguilera, M., Benavides-Miranda, Y., Montilla-Montilla, Y., Posada-Fandiño, H., Avendaño-Gómez, A., . . . Franco-Prieto, C. (2021). Evaluación de algoritmos de clasificación en la plataforma Google Earth Engine para la identificación y detección de cambios de construcciones rurales y periurbanas a partir de imágenes de alta resolución. *Revista de teledetección* (58), 71 - 88. 10.4995/raet.2021.15026
- Córdoba, C., & Calderón, O. (2023). Análisis espacio temporal de la cobertura forestal empleando imágenes Sar y Ópticas a través de la plataforma Google Earth Engine. (*Tesis de maestría*). Universidad de Manizales, Manizales.
- Curtis, P., Slay, C., Harris, N., Tyukavina, A., & Hansen, M. (2018). Classifying drivers of global forest loss. *Science*, 361(6407), 1108-1111. 10.1126/science.aau3445
- Derecho Internacional Ambiental, historia e hitos (AIDA). (2020). *El Derecho Internacional Ambiental: historia e hitos.* San Francisco: AIDA. <https://aida-americas.org/es/blog/el-derecho-internacional-ambiental-historia-e-hitos>
- Donchyts, G., Baart, F., Winsemius, H., Gorelick, N., Kwadijk, J., & Giesen, N. v. (2016). Earth’s surface water change over the past 30 years. *Opinion & comment*, 16, 810 - 815. 10.1038/nclimate3111.
- Donchyts, G., Winsemius, H., Baart, F., & Gorelick, N. (2016). Earth's surface water change over the past 30 years. *Nature Climate Change*, 6(9), 810 - 813. 10.1038/nclimate3111
- El pueblo de Colombia. (1991). *Constitución Política.* Bogotá: Función Pública. <https://www.funcionpublica.gov.co/eva/gestornormativo/norma.php?i=4125>
- Espiago, J. (2017). *Cartografía Geográfica.* Madrid: Universidad Autónoma de Madrid.

- Espinosa-Camacho, L., Yépes, L., Quintero, A., & Cano, M. (2023). *Cadenas productivas y deforestación en Colombia*. WWF-Colombia: <https://www.wwf.org.co/>
- Fundación EcoCiencia. (2025). *Taller de capacitación y evaluación de monitoreo caso 1: deforestación en la carretera “Acceso Sharian -Tsapa – Yumisín – Mayaik- Tsuits – Chimius”*. Eociencia org: <https://ecociencia.org/taller-de-capacitacion-y-evaluacion-de-monitoreo-caso-1/>
- Gibbs, D., Rose, M., Grassi, G., Melo, J., Rossi, S., Heinrich, V., & Harris, N. (2025). Revised and updated geospatial monitoring of 21st century forest carbon fluxes. *Earth System Science Data*, 17(3), 1217–1243. 10.5194/essd-17-1217-2025
- Global Forest Watch. (2022). *Análisis de la pérdida de cobertura forestal en Caldas*. globalforestwatch: <https://www.globalforestwatch.org/dashboards/country/COL/7/9/?category=forest-change&dashboardPrompts=eyJzaG93UHJvbXB0cyI6dHJlZSwicHJvbXB0c1ZpZXdlZCI6WyJkb3dubG9hZERhc2hib2FyZFN0YXRzIl0sInNldHRpbmdzIjpb7InNob3dQcm9tcHRzIjpb0cnVILCJwcm9tcHRzVmllld2VkIjpbXSvic>
- Google Developers. (2021). *Google Earth Engine*. Developers: <https://developers.google.com/earth-engine?hl=es-419>
- Google Earth Engine (GEE). (2024). *Te damos la bienvenida a Google Earth Engine*. Developers Google: <https://developers.google.com/earth-engine?hl=es-419>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18 - 27. 10.1016/j.rse.2017.06.031
- Hansen, J., Mitchard, E., & King, S. (2022). *Detecting Deforestation from Sentinel-1 Data in the Absence of Reliable Reference Data*. arxiv: <https://arxiv.org/abs/2205.12131>
- Hansen, M., Potapov, P., Moore, R., Hancher, M., Turubanova, S., Tyukavina, A., . . . Townshend, J. (2013). High-Resolution Global Maps of 21st-Century Forest Cover Change. *Science*, 342(6160), 850 - 853. 10.1126/ciencia.1244693
- He, K., Shen, X., & Anagnostou, E. (2024). A global forest burn severity dataset from Landsat imagery (2003–2016). *Earth System Science Data*, 16(6), 3061–3081. 10.5194/essd-16-3061-2024
- Iandolo, M., Razzano, F., Zarro, C., Yogesh, G., & Ullo, S. (2023). Análisis multitemporal en Google Earth Engine para detectar cambios urbanos mediante datos ópticos y algoritmos de aprendizaje automático. *Cornell University*. 10.48550/arXiv.2308.11468
- Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2022). *Informe sobre deforestación en Colombia*. Ideam: <https://www.ideam.gov.co/web/siac/monitoreodesforestacion>
- La Administración Nacional de Aeronáutica y el Espacio (NASA). (2025). *Teledetección*. Earthdata.nasa.gov: <https://www.earthdata.nasa.gov/learn/earth-observation-data-basics/remote-sensing>
- León, P. (2023). Análisis de la deforestación en la amazonia colombiana usando técnicas de aprendizaje automático. (*Tesis de maestría*). Pontificia Universidad Javeriana, Cali.

- file:///C:/Users/andres/AppData/Local/Microsoft/Windows/INetCache/IE/KMUZAO5N/T  
rabajo%20de%20grado%20Paola%20Andrea%20Le%C3%B3n%20Acosta%20-  
%20MCD[1].pdf
- Lillesand, T., Kiefer, R., & Chipman, J. (2015). *Teledetección e interpretación de imágenes*, 7.<sup>a</sup> edición (Vol. 7° edición). Wiley.
- Ministerio de medio ambiente y desarrollo sostenible. (2023). *Monitoreo y seguimiento al fenómeno de la deforestación en Colombia*. Bogotá: Ministerio de medio ambiente y desarrollo. <http://www.ideam.gov.co/web/bosques/deforestacion-colombia>
- Ministerio del Medio Ambiente. (22 diciembre 1993). *Ley 99 de 1993*. Bogotá: Minambiente. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/08/ley-99-1993.pdf>
- Miranda-Castro, W., Acevedo-Barrios, R., Guerrero, M., Guzmán, K., & Gorostizaga, S. d. (2023). Assessing Forest Cover Loss Using Landsat Images and GIS: A Case Study in Colombian Protected Area. *Revista de silvicultura sostenible*, 42(8), 831-847. 10.1080/10549811.2022.2123356
- Montoya, C., Guillermo, O., Bravo, C., & Andrés, C. (2022). Análisis espacio temporal de la cobertura forestal empleando imágenes Sar y Ópticas a través de la plataforma Google Earth Engine. (*Tesis de especialización*). Universidad de Manizales, Manizales. [https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/6620/C%c3%b3rdo%c3%b3n\\_Calder%c3%b3n\\_2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y](https://ridum.umanizales.edu.co/xmlui/bitstream/handle/20.500.12746/6620/C%c3%b3rdo%c3%b3n_Calder%c3%b3n_2022.pdf?sequence=3&isAllowed=y)
- Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura (FAO). (2020). *Global Forest Resources Assessment*. Fao.org: <https://www.fao.org/interactive/forest-resources-assessment/2020/en/>
- Organización de las Naciones Unidas (ONU). (1992). *Conferencia de las Naciones Unidas sobre el Medio Humano, 5 a 16 de junio de 1972, Estocolmo*. un.org: [https://www.un.org/es/conferences/environment/stockholm1972?utm\\_source=chatgpt.com](https://www.un.org/es/conferences/environment/stockholm1972?utm_source=chatgpt.com)
- Palacio, A. (2019). Legislación ambiental en Colombia: ayer, hoy y desafíos. *Summa Iuris (revista Descontinuada)*, 7(1), 97–113. 10.21501/23394536.3277
- Palanisamy, H., Meyssignac, B., Cazenave, A., & Delcroix, T. (2015). Is anthropogenic sea level fingerprint already detectable in the Pacific Ocean? *Environ*, 1 - 14. 10.1088/1748-9326/10/8/084024
- Parlamento Europeo y del Consejo. (31/05/2023). *Reglamento (UE) 2023 / 1115*. Estrasburgo: Diario oficial del parlamento europeo. <https://eur-lex.europa.eu/>
- Pasquarella, V., Holden, C., & Woodcock, C. (2018). Improved mapping of forest type using spectral-temporal Landsat features. *Remote Sensing of Environment*, 210, 193 - 207. 10.1016/j.rse.2018.02.064
- Perilla, G., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones geográficas*, 1(101). 10.14350/rig.59929

- Rainforest Alliance. (2019). *Cómo la certificación Rainforest Alliance beneficiará a su empresa*. rainforest: <https://www.rainforest-alliance.org/es/business-es/certificacion/como-la-certificacion-rainforest-alliance-beneficiara-a-su-empresa/>
- Razzano, F., Iandolo, M., Zarro, C., Yogesh, G., & Ullo, S. (2023). Integration of Sentinel-1 and Sentinel-2 data for Earth surface classification using Machine Learning algorithms implemented on Google Earth Engine. *Coronell University*, 1- 4. 10.48550/arXiv.2308.11340
- Red Amazónica de información socioambiental georreferenciada (RAISG). (2023). *Cobertura y uso del suelo en la Amazonía 1985 - 2022*. Leticia: RAISG.
- Red Amazónica de Información socioambiental georreferenciada. (2022). *Documento Teórico Base de Algoritmos. RAISG - MapBiomias Amazonía - Colección 4*. Amazonas: Mapbiomas
- Rojas-Salazar, L. (2023). *Transformando cadenas de valor: el camino de los Acuerdos Cero Deforestación en Colombia*. Bogotá: El Bando Creativo.
- Ruiz, J., Cárdenas, W., & Baquero, C. (2011). Deforestación y dinámica del bosque secundario en la amazonia colombiana entre 1986 y 2000. *Revista académica colombiana de ciencias exactas, físicas y naturales*, 35(17), 12-22. 10.18257/issn.0370-3908
- Ruiz, J., W. C., & Baquero, C. (2011). Deforestación y dinámica del bosque secundario en la amazonia colombiana entre 1986 y 2000. *Rev. Acad. Colomb. Cien*, 35(137), 531-545. 10.18257/raccefyn.35(137).2011.2426
- Sahana, K., Karthik, C., Sree, M., Chaithra, M., Abhinandithe, S., Snehalatha, D., . . . Madhu, B. (2022). Inteligencia Artificial Geoespacial (GeoIA): Aplicaciones en la Atención Médica. *Revista Internacional de Salud y Ciencias Afines*, 11(4). 10.55691/2278-344X.1044 .
- Sala, O., Chapin, S., Armesto, J., Berlow, E., Bloomfield, J., Dirzo, R., . . . Wall, D. (2000). Global Biodiversity Scenarios for the Year 2100. *Science*, 287(5459), 1770-1774. 10.1126/science.287.5459.177
- Sandino, J. (2023). *Aplicaciones de monitoreo de deforestación en Google Earth Engine*. jcsandino: <https://jcsandino.users.earthengine.app/>
- Santos, H., Schmidt, A., & Wahl, S. (2021). Addressing Coca-Related Deforestation in Colombia: A Call for Aligning Drug and Environmental Policies for Sustainable Development. *Journal of Illicit Economies and Development*, 3(1), 10–21. 10.31389/jied.79
- Sarasua, J. (2021). *La deforestación en Colombia*. urosario: <https://urosario.edu.co/revista-divulgacion-cientifica/ambiente/deforestacion-en-colombia>
- Selka, I., A. M., Anissa, K., Bengusmia, D., KACEMI, M., & Djebbar, K. (2024). Assessing the Impact of Land Use and Land Cover Changes on Surface Temperature Dynamics Using Google Earth Engine: A Case Study of Tlemcen Municipality, Northwestern Algeria (1989–2019). *ISPRS Int*, 13(237), 1 - 24. 10.3390/ijgi13070237
- Servicio geológico de los Estados Unidos (USGS). (2024). *¿Qué es la teledetección y para qué se utiliza?* usgs.gov: <https://www.usgs.gov/faqs/what-remote-sensing-and-what-it-used>

- Souza, C., Shimbo, J., Rosa, M., Parente, L., Alencar, A., Rudorff, B., . . . Dinis..., C. (2020). Reconstructing Three Decades of Land Use and Land Cover Changes in Brazilian Biomes with Landsat Archive and Earth Engine. *Remote Sens*, 12(17), 27 - 35. 10.3390/rs12172735
- Tasci, E. (2024). Avances en el mapeo de la cobertura forestal mediante técnicas de teledetección y SIG. *Elif Tasci*, 13(3). 10.35248/2469-4134.24.13.357
- Unión Europea (UE). (2023). *Reglamento (UE) 2023/1115*. UE. <http://data.europa.eu/eli/reg/2023/1115/oj>
- Vancutsem, C., Achard, F., Pekel, J., Vieilledent, G., Carboni, S., Simonetti, D., . . . Nasi, R. (2021). Long-term (1990-2019) monitoring of forest cover changes in the humid tropics. *Sci Adv*, 7(10). 10.1126/sciadv.abe1603
- Vilela et al., E. J. (2024). Two decades of accelerated deforestation in Peruvian forests: A national and regional analysis. *Regional Environmental Change*. 10.1007/s10113-024-02189-5, 45-62.
- Yun, H. (2024). Evaluación de los patrones globales de deforestación mediante teledetección y SIG. *Perspectiva*, 13(3). 10.35248/2469-4134.24.13.352