

DIAGNÓSTICO PARA LA RESTAURACIÓN DE BOSQUES EN LA REGIÓN DE SUMAPAZ CUNDINAMARCA
MEDIANTE LA UTILIZACIÓN DE ART Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

Cristian Duván Vanegas Mora, Joan Sebastián Muñoz Mosquera



Ingeniería Civil, Facultad de ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C

2025

**Diagnóstico para la restauración de bosques en la región de Sumapaz Cundinamarca mediante
la utilización de ART y sistemas de información geográfica (SIG)**

Cristian Duván Vanegas Mora, Joan Sebastián Muñoz Mosquera

Trabajo de Grado presentado como requisito para optar al título de ingeniería civil

Director Diana María Jurado Gordo



UNIVERSIDAD
La Gran Colombia

Vigilada MINEDUCACIÓN

Ingeniería Civil, Facultad de ingenierías

Universidad La Gran Colombia

Bogotá D.C

2025

Agradecimientos (opcional)

Debemos mencionar de manera especial y sincera a la profesora Diana Jurado por realizar el acompañamiento constante en el desarrollo del presente proyecto debido que bajo su dirección se lograron cumplir los objetivos y alcances inicialmente planteados. Su apoyo y confianza nos dieron ánimo y lucidez para continuar avanzando en la estructuración del documento, y no solo en el proyecto de grado sino como docente para nosotros como estudiantes.

Le expresamos un sincero agradecimiento por habernos facilitado bases de información, complementar nuestras ideas en búsqueda de generar un documento que sea de provecho para nuevas generaciones y base de consulta de nuevas investigaciones. Gracias por el acompañamiento y contribución en nuestra formación como ingenieros civiles.

Tabla de contenido

GLOSARIO	12
RESUMEN	13
ABSTRACT	14
INTRODUCCIÓN	15
ANTECEDENTES	16
INVESTIGACIONES PREVIAS	17
ESTADO DEL PÁRAMO	18
PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	19
PREGUNTA PROBLEMA	19
OBJETIVOS	20
OBJETIVO GENERAL	20
OBJETIVOS ESPECÍFICOS	20
JUSTIFICACIÓN	20
MARCOS REFERENCIALES	22
MARCO GEOGRÁFICO	22
ÁREA DE ESTUDIO DEL PROYECTO	33
MARCO CONCEPTUAL	47
MARCO TEÓRICO	50
Drones con Método Fukuoka (Dispersión de Nendo Dango)	52
Aspersión con Drones	52
MARCO NORMATIVO	55
DISEÑO METODOLÓGICO	57

DIAGNÓSTICO PARA LA RESTAURACIÓN DE BOSQUES EN LA REGIÓN DE SUMAPAZ MEDIANTE LA

UTILIZACIÓN DE ART Y SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA (SIG)

6

FASE 1: INVESTIGACIÓN Y DIAGNÓSTICO	57
FASE 2: DISEÑO Y CÁLCULO.....	59
FASE 3: MODELAMIENTO DE PROPUESTA.....	59
FASE 4: EVALUACIÓN Y AJUSTES.....	60
DESARROLLO DE LA PROPUESTA	61
FASE I: DIAGNÓSTICO TÉCNICO E INVESTIGACIÓN	61
<i>ANÁLISIS MULTITEMPORAL</i>	<i>64</i>
FASE II DISEÑO Y CÁLCULO Y LA INTERPRETACIÓN INFORMACIÓN SIG	70
FASE III ANÁLISIS DEFORESTACIÓN ÁREA DE ESTUDIO Y MODELAMIENTO PROPUESTA	87
<i>ALTERNATIVA SELECCIONADA</i>	<i>110</i>
FASE IV. EVALUACIÓN Y AJUSTE: EFECTIVIDAD Y ALCANCE DE LOS DRONES	112
ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	115
CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	130
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	133

Lista de Figuras

Figura 1	<i>Comparativa de geoespacial Sumapaz 2022 vs 2015</i>	23
Figura 2	<i>Diferencia terreno natural Sumapaz 2022 vs 2015</i>	24
Figura 3	<i>Ubicación del área de estudio región del Sumapaz</i>	25
Figura 4	<i>Delimitación de áreas declaradas protegidas</i>	28
Figura 5	<i>Atributos de la delimitación de áreas declaradas protegidas</i>	29
Figura 6	<i>Páramos de Sumapaz y Cruz Verde</i>	30
Figura 7	<i>Delimitación de Páramos de Sumapaz y Cruz Verde</i>	31
Figura 8	<i>Atributos vacíos Páramos de Sumapaz y Cruz Verde</i>	32
Figura 9	<i>Alimentación atributos Páramos de Sumapaz y Cruz Verde</i>	32
Figura 10	<i>Encuestas área de estudio</i>	34
Figura 11	<i>Zonificación Páramos de Sumapaz y Cruz Verde</i>	35
Figura 12	<i>Susceptibilidad de incendios cobertura vegetal Cundinamarca</i>	37
Figura 13	<i>Frontera agropecuaria Páramos de Sumapaz y Cruz Verde</i>	38
Figura 14	<i>Imagen satelital planificación territorial 2024</i>	40
Figura 15	<i>Frontera agrícola área de estudio geovisor SIPRA</i>	41
Figura 16	<i>Aptitud carne bovina mediante pastoreo</i>	43
Figura 17	<i>Cuenca hidrográfica Páramos de Sumapaz</i>	44
Figura 18	<i>Laguna de Chisacá en la zona rural de Bogotá</i>	45
Figura 19	<i>Cuerpo de agua Quebrada Cabrera</i>	46
Figura 20	<i>Quebrada Taquegrande Páramo Sumapaz</i>	46

Figura 21 <i>Mapa conceptual Restauración ecosistema páramo Sumapaz</i>	47
Figura 22 <i>Análisis información SIG existente</i> Nota. La figura representa tratamiento de información SIG. Elaboración propia.	58
Figura 23 <i>Paisaje vegetal páramo de Sumapaz.</i>	62
Figura 24 <i>Placa Instituto Geográfico Chisacá</i>	63
Figura 25 <i>Análisis multitemporal área estudio</i>	65
Figura 26 <i>Referencia ubicación páramo de Sumapaz</i>	71
Figura 27 <i>Punto de control militar</i>	72
Figura 28 <i>Casa N°1 zona de Betania encuestada.</i>	73
Figura 29 <i>Casa N°2 zona de Betania encuestada</i>	73
Figura 30 <i>Casa N°3 zona de Betania encuestada</i>	74
Figura 31 <i>Casa N°4 zona de Betania encuestada</i>	74
Figura 32 <i>Cultivo N°1 zona de Santa Rosa personal encuestado</i>	75
Figura 33 <i>Cultivo N°2 zona de Santa Rosa personal encuestado</i>	76
Figura 34 <i>Cultivo N°3 zona de Nazareth personal encuestado</i>	76
Figura 35 <i>Cultivo N°4 zona de Nazareth personal encuestado</i>	77
Figura 36 <i>Ganadería existente paramo Sumapaz zona de Caicedo personal encuestado</i>	78
Figura 37 <i>Limites deforestación ganadera</i>	79
Figura 38 <i>Pruebas iniciales de funcionamiento</i>	80
Figura 39 <i>Sobrevuelo inicial área de intervención</i>	81
Figura 40 <i>Área con leve afectación levantamiento dron</i>	81
Figura 41 <i>Especies nativas afectadas levantamiento</i>	82

Figura 42 <i>Imagen ortogonal sobrevuelo dron N°1.....</i>	82
Figura 43 <i>Imagen ortogonal sobrevuelo dron N°2.....</i>	83
Figura 44 <i>Casa N°5 zona de Nazareth personal encuestado</i>	83
Figura 45 <i>Hostal Santa Rosa zona de Nazareth personal encuestado</i>	84
Figura 46 <i>Recorrido carretera principal páramo Sumapaz personal encuestado</i>	85
Figura 47 <i>Casa N°6 zona de Nazareth personal encuestado</i>	85
Figura 48 <i>Casa N°7 zona de Nazareth personal encuestado</i>	86
Figura 49 <i>Deforestación área de estudio Páramo de Sumapaz</i>	87
Figura 50 <i>Ubicación en tiempo real en Survey 123.....</i>	90
Figura 51 <i>Registro actual del área de ubicación</i>	91
Figura 52 <i>Nivel de deforestación observada.....</i>	92
Figura 53 <i>Selección especies a sembrar</i>	93
Figura 54 <i>Información soporte adicional de encuesta Survey 123</i>	94
Figura 55 <i>Información obtenida de encuestas Survey 123</i>	96
Figura 56 <i>Información soporte adicional encuesta Survey 123</i>	97
Figura 57 <i>Polígono conformado por coordenadas recolectadas de la ubicación Survey 123.....</i>	98
Figura 58 <i>Tipos de formatos a exportar la información de Survey 123</i>	99
Figura 59 <i>Puntos obtenidos coordenadas en Google Earth.....</i>	101
Figura 60 <i>Vista satelital aproximada del área de estudio</i>	102
Figura 61 <i>Inicio simulación dron ruta asignada.....</i>	103
Figura 62 <i>Imagen aérea N°1 sobrevuelo dron área deforestación</i>	104
Figura 63 <i>Imagen aérea N°2 sobrevuelo dron área deforestación</i>	105

Figura 64 <i>Imagen aérea N°3 sobrevuelo dron área deforestación</i>	105
Figura 65 <i>Imagen aérea N°4 sobrevuelo dron área deforestación</i>	106
Figura 66 <i>Imagen aérea N°5 sobrevuelo dron área deforestación</i>	106
Figura 67 <i>Imagen aérea N°6 sobrevuelo dron área deforestación</i>	107
Figura 68 <i>Imagen aérea N°7 sobrevuelo dron área deforestación</i>	107
Figura 69 <i>Imagen aérea N°8 sobrevuelo dron área deforestación</i>	108
Figura 70 <i>Imagen aérea N°9 sobrevuelo dron área deforestación</i>	108
Figura 71 <i>Imagen aérea N°10 sobrevuelo dron área deforestación</i>	109
Figura 72 <i>Imagen aérea N°11 sobrevuelo dron área deforestación delimitados</i>	110
Figura 73 <i>Cronograma del proyecto</i>	113
Figura 74 <i>Presupuesto del proyecto</i>	114
Figura 75 <i>Estado del área de estudio Sumapaz</i>	116
Figura 76 <i>Nivel deforestación área de estudio</i>	117
Figura 77 <i>Porcentaje deforestación área estudio Sumapaz</i>	118
Figura 78 <i>Datos reforestación Sumapaz IDEAM año 2023</i>	122
Figura 79 <i>Deforestación actual paramo Sumapaz</i>	123
Figura 80 <i>Proyección Reforestación año 2030</i>	124
Figura 81 <i>Cantidad proyectada de deforestación 2030</i>	126
Figura 82 <i>Proyección cantidad de especies para reforestación 2030</i>	128

Lista de tablas

Tabla 1	<i>Valores aptitud ganadera</i>	42
Tabla 2	<i>Selección de especies para reforestación en el Sumapaz.....</i>	50
Tabla 3	<i>Cuadro comparativo de alternativas evaluadas</i>	53
Tabla 4	<i>Comparativo económico entre métodos</i>	54
Tabla 5	<i>Valores totales en área de estudio.....</i>	54
Tabla 6	<i>Procesos observados área de estudio</i>	115
Tabla 7	<i>Análisis periodos de deforestación Sumapaz</i>	121

GLOSARIO

Agricultura: conjunto de técnicas y conocimientos para el cultivo y uso de la tierra, e incluye todos los trabajos relacionados con el tratamiento del suelo y el cultivo de diferentes productos.

Deforestación: Consiste en eliminar la cobertura arbórea para la agricultura, minería, expansión urbana.

Bosques: ecosistema natural, complejo de seres vivos, flora, fauna y microorganismos que se influyen y relacionan al mismo tiempo con los bosques.

Imágenes satelitales: es una representación visual de los datos reflejados en la superficie de la tierra, que son capturados por sensores montados en satélites artificiales.

ART: Aeronaves remotamente tripuladas implica la programación y coordinación de múltiples drones para crear sobrevuelos guiados por un usuario.

ArcGIS: es un sistema que permite organizar, recopilar, administrar, compartir información geográfica, así también, permite elaborar mapas.

Bosque estable: se refiere a áreas de bosque que se consideran **mantenidas o conservadas de manera natural**

Bosque no estable: Se refiere a áreas forestales que están siendo modificadas o degradadas o gestionada

RESUMEN

La deforestación y la degradación ambiental han reducido significativamente la cobertura forestal en Colombia, afectando la biodiversidad y el equilibrio de los ecosistemas. En la región de Sumapaz, estos impactos han sido especialmente severos debido a la expansión agrícola y la extracción de recursos. El objetivo de este trabajo es aplicar Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Método Fukuoka como estrategias para la restauración forestal mediante ART.

Se plantea el uso de drones para la dispersión de semillas, implementando la técnica nendodango, que encapsula semillas en bolas de arcilla para mejorar su germinación. Los SIG permitirán identificar áreas prioritarias y monitorear la recuperación del ecosistema mientras que el enfoque metodológico es mixto debido que combina análisis cuantitativos y cualitativos, se espera que la aplicación de estas herramientas optimice los procesos de reforestación y contribuya a la conservación ambiental en la región del Sumapaz.

Palabras clave: Restauración forestal, SIG, Método Fukuoka, drones, Sumapaz, reforestación.

ABSTRACT

Deforestation and environmental degradation have significantly reduced forest cover in Colombia, affecting biodiversity and ecosystem balance. In the Sumapaz region, these impacts have been particularly severe due to agricultural expansion and resource extraction. The objective of this work is to apply Geographic Information Systems (GIS) and the Fukuoka Method as strategies for forest restoration through ART.

The use of drones for seed dispersal is proposed, implementing the nendo dango technique, which encapsulates seeds in clay balls to improve their germination. GIS will allow for the identification of priority areas and monitoring of ecosystem recovery, while the methodological approach is mixed, combining quantitative and qualitative analysis. It is expected that the application of these tools will optimize reforestation processes and contribute to environmental conservation in the Sumapaz region.

Keywords: *forest restoration, GIS, Fukuoka Method, drones, Sumapaz, reforestation.*

INTRODUCCIÓN

La deforestación y degradación ambiental son problemáticas críticas en Colombia, impulsadas principalmente por la expansión agrícola, la ganadería y la extracción de materias primas. Estas actividades han generado una reducción significativa de la cobertura forestal, afectando la biodiversidad y los servicios ecosistémicos. La región de Sumapaz, reconocida por su riqueza natural extendida en un área total de 1780 km², ha sido especialmente impactada por estos factores, lo que resalta la necesidad de estrategias eficaces para la restauración forestal. (IDEAM, 2021).

En este contexto, la presente investigación desarrolla una propuesta técnica para la implementación de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y el Método Fukuoka en procesos de reforestación. Como resultado, se elaborará un diagnóstico que servirá de guía para la planificación, ejecución y monitoreo de proyectos de restauración ecológica que integrará metodologías innovadoras que optimicen el uso de recursos y mejoren la eficiencia de la reforestación en áreas degradadas.

La propuesta se basa en el uso de drones (ART) para la dispersión de semillas, utilizando la técnica nendo dango, la cual encapsula semillas en bolas de arcilla para mejorar su tasa de germinación y reducir la intervención humana. A su vez, los SIG permitirán identificar zonas prioritarias para la restauración y monitorear el crecimiento de la vegetación. La combinación de estas herramientas busca potenciar la recuperación de los ecosistemas forestales con un enfoque eficiente, sostenible y de bajo impacto ambiental. La metodología del estudio sigue un enfoque mixto, combinando análisis cuantitativos y cualitativos para evaluar la efectividad de la propuesta en la región de Sumapaz. Se espera que este trabajo sienta las bases para futuras iniciativas de conservación y restauración ecológica, promoviendo el uso de tecnología en la gestión sostenible de los ecosistemas.

ANTECEDENTES

En Colombia la implementación de drones aún es una tecnología nueva y costosa que a pesar de las grandes cualidades para gran parte de la sociedad son poco convincentes para el desarrollo e implementación en el campo de la reforestación de bosques, es en este punto donde debe mencionarse que la deforestación en Colombia es un problema ambiental significativo, con una tasa de pérdida de bosques que ha aumentado en los últimos años. Según el Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el país ha perdido aproximadamente 1.7 millones de hectáreas de bosques en la última década, lo que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad (IDEAM, 2021).

Diversos estudios han explorado el uso de drones en la reforestación. Un claro ejemplo, Vargas-Ramírez et al. (2023) destacan que los drones son herramientas efectivas para la gestión y conservación del territorio, permitiendo un monitoreo más eficiente de las áreas reforestadas gracias a su versatilidad para ser controladas al ser aeronaves remotamente tripuladas (ART). Además, la tecnología de Sistemas de Información Geográfica (SIG) ha sido fundamental en la planificación de proyectos de reforestación, facilitando el análisis de datos geoespaciales y la toma de decisiones informadas (Echeverri Londoño et al., 2024).

INVESTIGACIONES PREVIAS

En el marco de las iniciativas de restauración ecológica en la Amazonía colombiana, se ha implementado un piloto experimental de dispersión asistida de semillas utilizando el método Fukuoka. Este enfoque consiste en encapsular semillas en esferas de arcilla, conocidas como pellets, que protegen las semillas de depredadores y facilitan su germinación durante la temporada de lluvias (Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas Sinchi, 2021).

Se llevó a cabo en la finca La Guajira, vereda Las Delicias, municipio de Morelia, Caquetá, abarcando cuatro hectáreas: dos de pasturas degradadas y dos de vegetación secundaria con antecedentes de uso ganadero. La dispersión aérea de 10.000 pellets, conteniendo 25.000 semillas de especies nativas, se realizó mediante un helicóptero del Ejército Nacional. Se espera una tasa de establecimiento del 50% al concluir los seis meses de evaluación previstos.

Este proyecto es resultado de la colaboración entre el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, Sinchi y el Ejército Nacional, integrando ciencia, comunidad e instituciones en pro de la restauración de áreas degradadas en la Amazonía colombiana (Sinchi, 2021).

Monitoreo y Seguimiento: Después de la siembra, los drones pueden ser utilizados para monitorear el crecimiento de los árboles y evaluar la efectividad del proyecto. Esto permite realizar ajustes en tiempo real y mejorar las tasas de supervivencia de las plantas (Cabrera, 2021).

El análisis técnico mediante SIG es un proceso de diseño, análisis y modelación que abordará tanto las necesidades técnicas como prácticas de la propuesta. Los resultados de esta investigación contribuirán a mejorar la biodiversidad y restaurar ecosistemas completos, beneficiando el medio ambiente, tal como lo mencionan los expertos en el área. A pesar de los beneficios, la implementación

de drones y SIG en la recuperación ecológica enfrenta desafíos. Uno de los principales obstáculos es la falta de capacitación y conocimientos técnicos en el uso de estas tecnologías por parte de las comunidades locales y los profesionales del medio ambiente (IDEAM, 2021).

ESTADO DEL PÁRAMO

Sumapaz, considerado el más grande del planeta, desempeña roles ecológicos esenciales para la región y la nación. En la actualidad, se encuentra en un estado crítico debido al uso intensivo de sus terrenos para actividades de agricultura y pecuaria, un modelo de ocupación territorial que no ha dado prioridad a su preservación.

"Actualmente hay alrededor de 10.000 animales pastando en zonas de reserva, lo cual genera compactación del suelo, alteración de la vegetación nativa y contaminación de las fuentes hídricas" (El Tiempo, 2024, párr. 15).

El caso del páramo de Sumapaz refleja una complejidad, donde la urgencia de proteger un ecosistema vital se enfrenta con las necesidades básicas de comunidades que han habitado el territorio por generaciones. Muchas de estas personas han vivido en condiciones de vulnerabilidad, sin el acompañamiento institucional necesario para desarrollar alternativas sostenibles

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

En Colombia, la falta de oportunidades laborales lleva a que la población con menos recursos recurra a actividades como la tala ilegal, ganadería, el cultivo de sustancias ilícitas y la minería ilegal y siembra alimentos las cuales tienen un impacto directo en la deforestación y el deterioro del medio ambiente. Aunque el gobierno ha implementado medidas y regulaciones para castigar estas actividades (antacoloma, L, 2024), es prácticamente imposible realizar un seguimiento exhaustivo en todo el territorio nacional.

Esto dificulta el control efectivo de la deforestación y el gobierno no logra mitigar adecuadamente el alcance del problema.

La deforestación en Colombia es un problema ambiental significativo, con una tasa de pérdida de bosques que ha aumentado en los últimos años. Según IDEAM, el país ha perdido aproximadamente 1.7 millones de hectáreas de bosques en la última década, lo que contribuye al cambio climático y a la pérdida de biodiversidad (IDEAM, 2021).

PREGUNTA PROBLEMA

¿Cómo pueden los drones y la tecnología SIG mejorar la eficiencia y efectividad de los programas de reforestación en áreas afectadas por la deforestación y la expansión de actividades como la agricultura y la construcción?

OBJETIVOS

Objetivo General

Realizar un diagnóstico técnico del estado de los bosques en la región de Sumapaz, Cundinamarca, con el fin de evaluar los procesos de reforestación mediante la aplicación de sistemas de información geográfica (SIG) y aeronaves remotamente tripuladas (ART).

Objetivos Específicos

- Evaluar la efectividad y el alcance de los drones en la dispersión de semillas en terrenos con geografía accidentada en la región de Sumapaz.
- Analizar el impacto de la tecnología SIG en la planificación y ejecución de programas de reforestación, incluyendo un análisis multitemporal de deforestación.
- Desarrollar un modelo de implementación que integre drones y SIG para proyectos de reforestación en Sumapaz, considerando alternativas de vuelo para dispersión y aspersión.

JUSTIFICACIÓN

La investigación es crucial porque aborda la urgente necesidad de restaurar los ecosistemas forestales en Colombia. La falta de oportunidades laborales impulsa a personas de bajos recursos a involucrarse en actividades como la tala ilegal, la minería ilegal y el cultivo de plantas ilícitas, todas ellas con un impacto significativo en la degradación del medio ambiente. Aunque las regulaciones para sancionar estas actividades se han intensificado (Antacoloma L, 2021), el monitoreo nacional sigue siendo insuficiente, lo que agrava la deforestación, que ha alcanzado niveles críticos.

La región de Sumapaz que actualmente cuenta con un área de 1780 km² ha experimentado una severa pérdida de cobertura forestal debido a la expansión de actividades agrícolas, ganaderas y actividades ilegales. Según IDEAM, Colombia ha perdido alrededor de 1.7 millones de hectáreas de bosques en la última década (IDEAM, 2021). Este proyecto propone analizar cómo los drones y la tecnología SIG pueden mejorar la eficiencia de los programas de reforestación en Sumapaz. Para ello, se llevará a cabo un estudio de caso en esta región, complementado con un análisis multitemporal de la deforestación para evaluar la evolución del problema y la efectividad de las intervenciones.

La implementación de drones y Sistemas de Información Geográfica (SIG) promete aumentar la eficacia de los esfuerzos de reforestación, además de reducir los costos y tiempos en comparación con los métodos tradicionales. Esta investigación también contribuirá al desarrollo de prácticas sostenibles en la gestión ambiental y la planificación de proyectos de construcción, promoviendo un enfoque más responsable y sostenible en Colombia (Perdomo, 2021).

En un proyecto de gran escala, donde se requiere cubrir grandes hectáreas, el uso de drones puede resultar poco eficiente debido a su limitada capacidad de carga y autonomía de vuelo. Para estos casos, la dispersión aérea mediante helicópteros o aviones permite lanzar grandes volúmenes de semillas en un corto período de tiempo, facilitando la cobertura de extensas áreas degradadas. Sin embargo, este método presenta una menor precisión, ya que las semillas pueden caer en zonas inadecuadas o ser arrastradas por el viento, esto conlleva a un incremento de la pérdida y reduce la efectividad de la restauración. Por tal motivo, su uso se recomienda en escenarios donde la prioridad sea la rapidez en la cobertura y no la precisión a la hora de dispersar las semillas como se muestra en la tabla N°2.

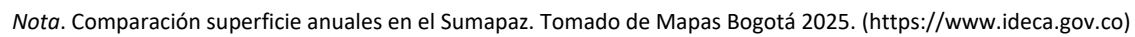
MARCOS REFERENCIALES

MARCO GEOGRÁFICO

La imagen satelital (Figura 1) presenta el área de estudio seleccionada, la cual comprende una extensión de **61,92 km²**, delimitada con base en criterios técnicos derivados del análisis de información espacial mediante SIG, así como resultados preliminares obtenidos a partir de encuestas aplicadas en campo. La delimitación se precisará a lo largo del documento, conforme se expliquen las metodologías empleadas.

En esta área, ubicada en la región de Sumapaz, se observa un aumento significativo en los niveles de aridez entre los años 2015 y 2022, evidenciado a través de imágenes satelitales comparativas. Este fenómeno, que no era visible en años anteriores, refleja una transformación del paisaje influenciada tanto por procesos naturales como por actividades antrópicas, particularmente la deforestación y los esfuerzos de reforestación. (IDEAM, 2023).

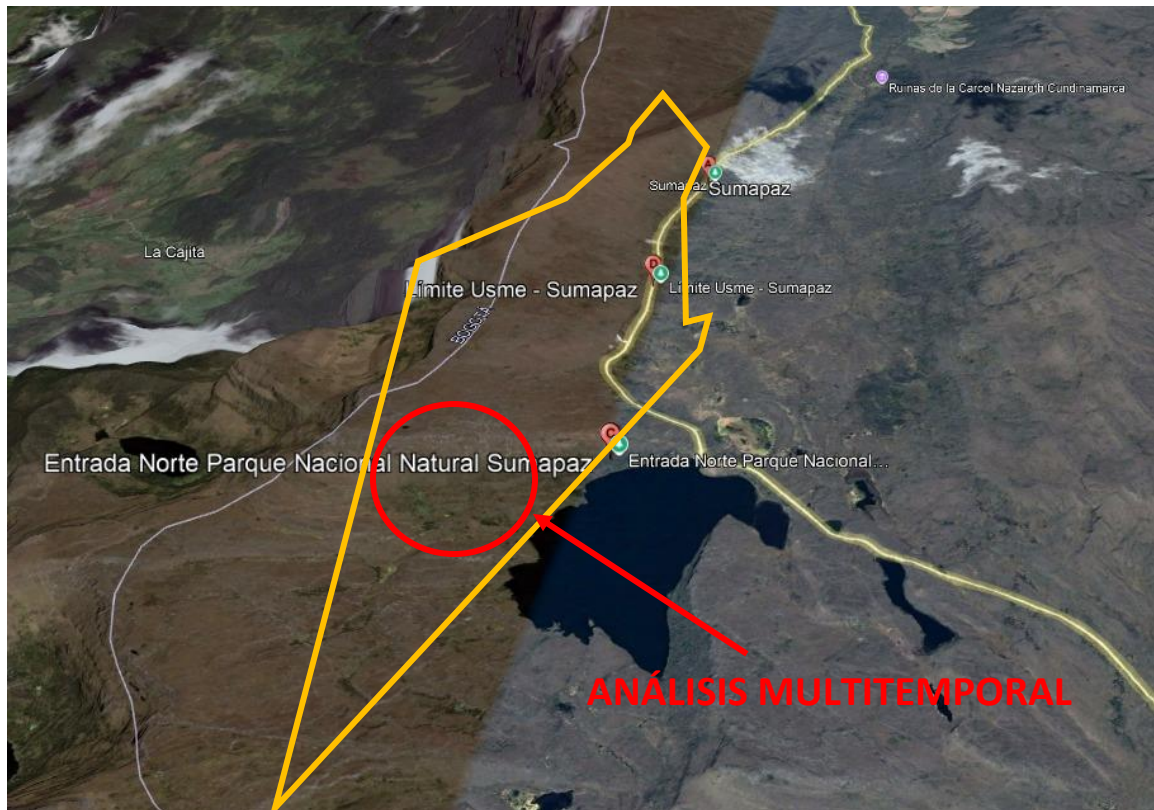
Comparativa de geoespacial Sumapaz 2022 vs 2015



A pesar de que el Sumapaz cuenta con diversas fuentes hídricas, como pequeños cauces y quebradas, las zonas áridas no han logrado una recuperación efectiva. Como se evidencia en la comparativa presentada a continuación:

Figura 2

Diferencia terreno natural Sumapaz 2022 vs 2015

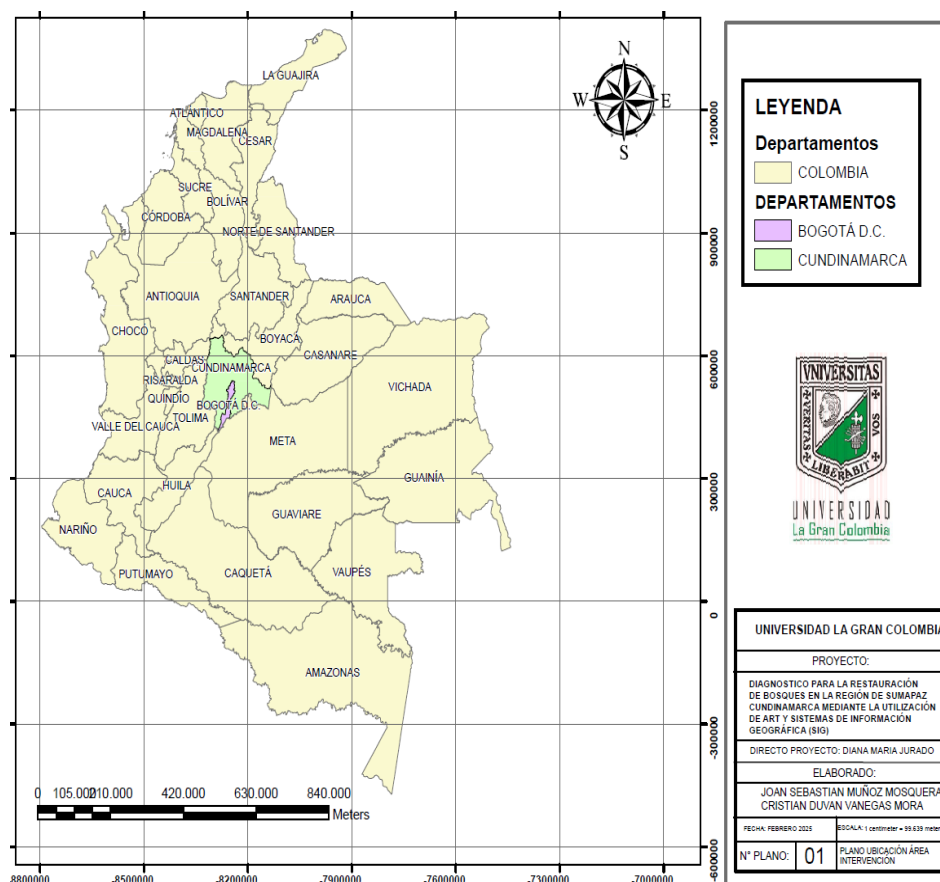


Nota. Contraste entre superficies de terreno del Sumapaz. Adaptado de Mapas Bogotá 2025.

(<https://www.ideca.gov.co>)

Figura 3

Ubicación del área de estudio región del Sumapaz.



Nota. La figura representa la ubicación política. Elaborado en Argis. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023”.

EL siguiente paso consistió en la identificación de las áreas protegidas y la búsqueda de información en formato tipo “.shp” (Shape) que contará con la información pertinente en la tabla de atributos de la capa donde se evidenciaron los páramos protegidos por las CAR (Corporaciones autónomas regionales medioambientales y de desarrollo sostenible en Colombia) y que son supervisadas por el ministerio de ambiente según la ley 1930 de 2018 la cual delimita los páramos y establece las actividades prohibidas a realizar en dichos ecosistemas, siendo los principales explotación

minera, agrícola y expansiones urbanas. Para el desarrollo del diagnóstico y la elaboración de los planos que se presentan a continuación, se emplearon los siguientes parámetros de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y especificaciones técnicas:

Software utilizado: ArcGIS Pro 3.1 y QGIS 3.34 Prizren, aplicados de manera complementaria para la generación del análisis espacial.

Sistema de referencia espacial: MAGNA-SIRGAS / Colombia Bogotá (EPSG:3116), de acuerdo con la normatividad cartográfica nacional (IGAC).

Escala cartográfica: 1:750.000 para la proyección general de reforestación, con base en la cartografía oficial disponible y los insumos generados por el sobrevuelo con dron.

Precisión de datos: Cartografía base (IGAC, áreas protegidas y límites departamentales): escala 1:100.000.

Datos obtenidos por dron: Ortomosaicos con una resolución espacial de 5 cm/píxel, con precisión planimétrica ± 3 cm y altimétrica ± 5 cm mediante GPS diferencial. El dron DJI Air 2S ADS-B, el cual se destaca por su sensor de 1 pulgada, que permite la captura de video en resolución 5.4K a 30 fps y fotografías de 20 megapíxeles. Con un peso de 595 gramos y dimensiones plegadas de 180 × 97 × 77 mm

Procesos de geoprocесamiento:

tolerancia de snapping configurada en 0.001 m.

Resolución espacial de imágenes:

Ortofotos derivadas del dron: 5 cm/píxel.

Imágenes satelitales de referencia:

10 m/píxel (Sentinel-2) y 30 m/píxel (Landsat 8) para análisis multitemporal.

Error RMS (Root Mean Square):

Proceso de ortorrectificación de imágenes de dron: $\text{RMS} \leq 0.25 \text{ m}$, lo cual garantiza la precisión planimétrica.

Validación de puntos de control en campo (GCPs): error promedio de $\pm 0.18 \text{ m}$.

Métricas de precisión:

Precisión planimétrica: $\pm 3 \text{ cm}$.

Precisión altimétrica: $\pm 5 \text{ cm}$.

Criterios de clasificación de coberturas:

Bosques nativos: coberturas densas y continuas, identificadas por índice ≥ 0.6 .

Áreas degradadas por zonificación, susceptibilidad incendios: suelos desnudos o con escasa vegetación, ≤ 0.2 .

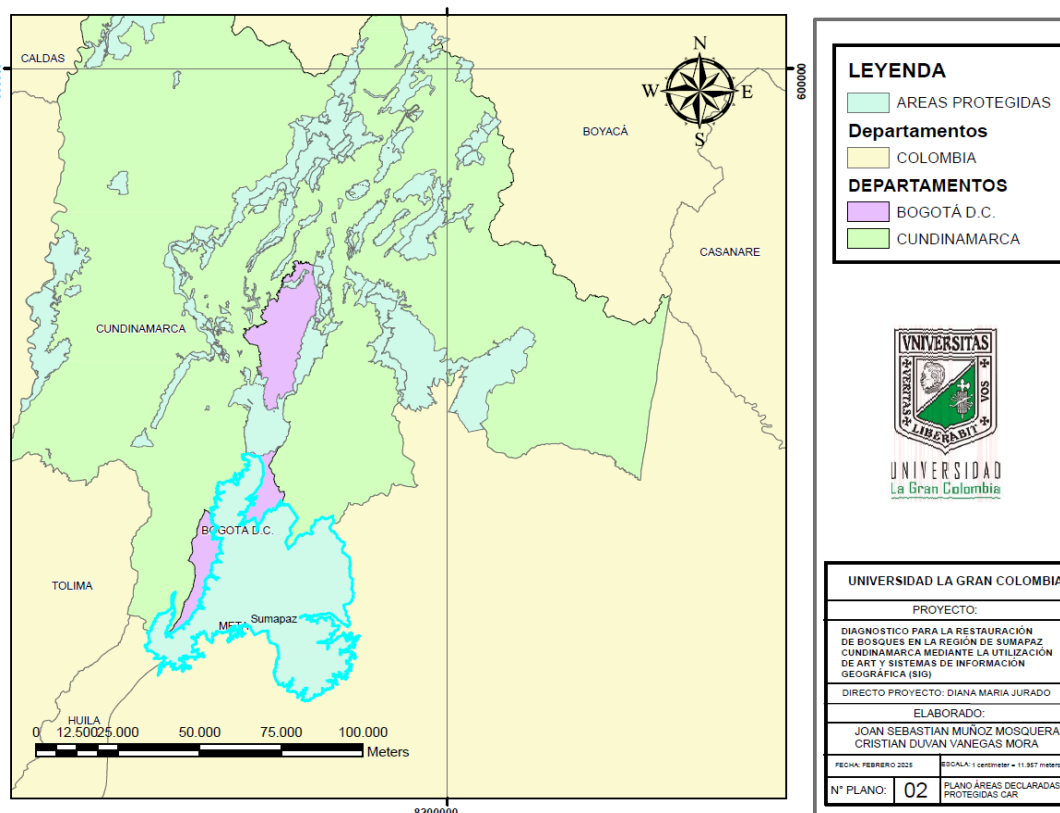
Coberturas agrícolas: áreas con patrones de cultivo y reflectancia intermedia ($0.2 - 0.4$).

Áreas de reforestación proyectada: polígonos definidos a partir de la superposición de zonas críticas de degradación, pendientes $< 35\%$ y cercanía a cuerpos de agua ($< 200 \text{ m}$).

A continuación, se anexa el plano con la información específica:

Figura 4

Delimitación de áreas declaradas protegidas



Nota. La figura representa la delimitación de áreas protegidas. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023”.

Cabe resaltar que en la figura N°3 se identifica específicamente la región de Sumapaz que cuenta con un área de 1780 km² de superficie la cual está dentro del alcance de la presente investigación, sin embargo, con el avance de la investigación se seleccionará un área específica para el desarrollo del presente diagnóstico, se clara que el análisis que se presentará podrá ser implementado en los demás páramos y áreas protegidas siendo este un base o guía de consulta para implementar nuevas investigaciones. En consecuencia, la tabla de atributos indica la siguiente información:

Figura 5

Atributos de la delimitación de áreas declaradas protegidas

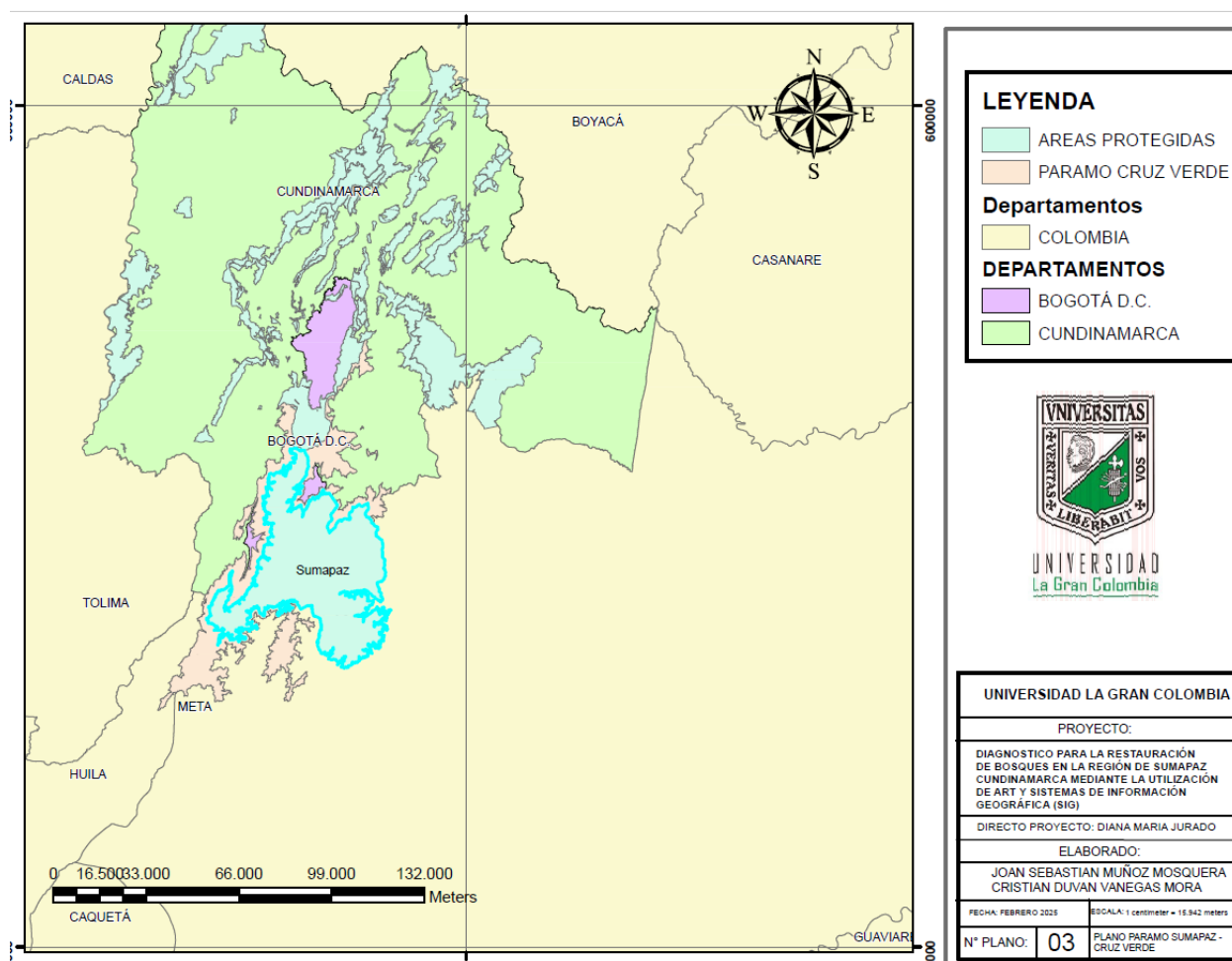
Table					
Zonificación Ambiental POMCA Río Sumapaz					
FID	Shape	T CAT ORD	T ZON USO	T SUBZON U	NOMENCLAT
0	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
1	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
2	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
3	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
4	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
5	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
6	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
7	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA
8	Polygon	Conservación y Protección Ambiental	Áreas de Protección	Áreas de importancia Ambiental	AIA

Nota. La figura representa la información del SHP que define si es un área protegida. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023”.

Es importante mencionar que el páramo de cruz verde está ubicado entre la ciudad de Bogotá D.C y el oriente del departamento de Cundinamarca, en consecuencia, hace parte del sistema del páramo de Sumapaz. Se realiza la aclaración producto que en el desarrollo del documento se menciona esta relación la cual puede generar confusión si no se comprende la gran magnitud del área que comprende el Sumapaz. A continuación, se anexa mapa generado para apreciar y dar claridad de la conexión entre los dos páramos.

Figura 6

Páramos de Sumapaz y Cruz Verde



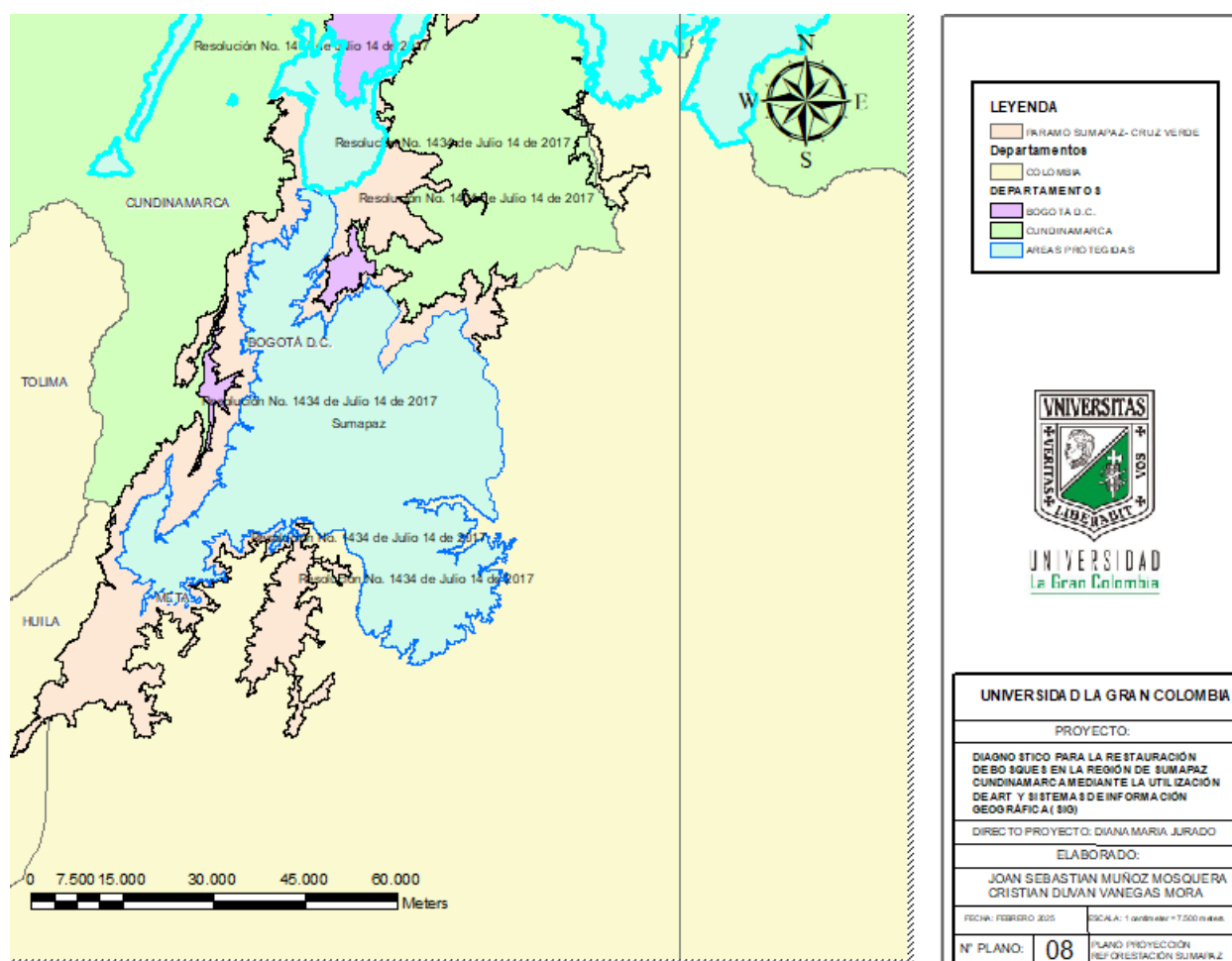
Nota. Área protegida paramo de Sumapaz y cruz verde. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023”.

Con base en lo anterior, se procede a generar un plano que permitiera establecer con claridad a la normativa de la cual se basó la delimitación de páramos en Colombia específicamente en el páramo de Sumapaz y el páramo cruz verde, por tanto, se identificó la resolución 1434 del 14 de julio de 2017

donde se realiza una ejemplificación de la fauna y flora colombiana en cuantos a los porcentaje, hidrología, manejo, conservación, control y vigilancia.

Figura 7

Delimitación de Páramos de Sumapaz y Cruz Verde



Nota. La figura representa la delimitación de páramos protegidos mediante la resolución N°1434 de julio de 2017.

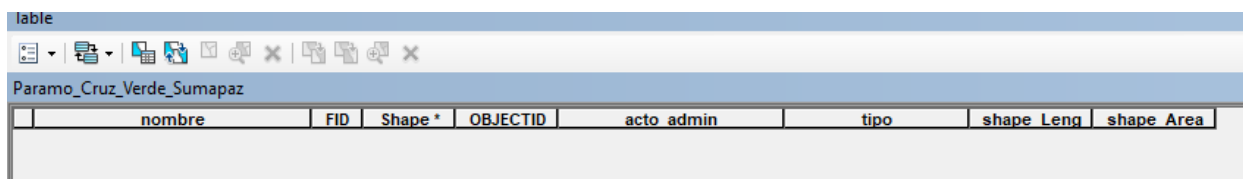
Adaptado de "Datos abiertos IGAC. 2023".

Durante el desarrollo de la investigación se evidenció la ausencia de información específica en los atributos de las capas utilizadas para el recorte y análisis. Por ello, fue necesario realizar un proceso

adicional de análisis y búsqueda de datos complementarios que brindaran mayores herramientas para consulta y soporte del diagnóstico que se realizó.

Figura 8

Atributos vacíos Páramos de Sumapaz y Cruz Verde



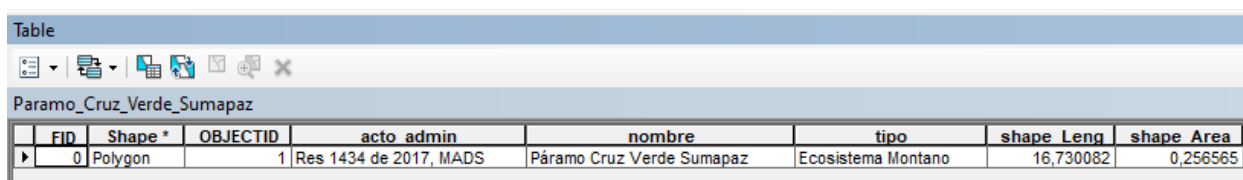
nombre	FID	Shape *	OBJECTID	acto admin	tipo	shape Leng	shape Area

Nota. La figura representa la información nula del atributo. Tomado de “Datos abiertos IGAC. 2022”.

Se procedió a realizar el ajuste de los “atributos” previamente investigados los cuales nos indicaron la siguiente información:

Figura 9

Alimentación atributos Páramos de Sumapaz y Cruz Verde



FID	Shape *	OBJECTID	acto admin	nombre	tipo	shape Leng	shape Area
0	Polygon	1	Res 1434 de 2017, MADS	Páramo Cruz Verde Sumapaz	Ecosistema Montano	16,730082	0,256565

Nota. La figura representa alimentación de atributos según la resolución 1324 de 2027. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023”.

En línea en el avance de la documentación para obtener las bases de la información adicional o complementaria que permita nutrir el análisis de resultados del presente documento se procede a generar aspectos relevantes y que se encuentran presentes en el área de estudio, en este caso específicamente se validó la susceptibilidad de incendios forestales los cuales generan una afectación

importante a la fauna y flora del ecosistema. Se debe recordar que el páramo de Sumapaz es el ecosistema más grande del mundo. Los incendios que se generan en los páramos dejan una huella importante en el medio ambiente el cual no se subsana de formas inmediata con siembra de árboles y plantas sin control de medidas analizando las especies y el impacto que tendrán. Los esfuerzos aislados de plantar árboles y reforestar sin conocimiento pueden traer grandes problemas a largo plazo. ed Colombiana de Restauración Ecológica (Caicedo, 2024)

Se generó un mapa con la capa de susceptibilidad de incendio donde se observa detalladamente el alcance que tiene en el páramo de Sumapaz-cruz verde y su exposición a posibles eventos. En la figura 14 se logra evidenciar que las áreas aledañas cuatro (4) puntos se encuentran cerca a zonas urbanas que son las más susceptibles a ser alcanzadas por incendios provocados por malas prácticas y conductas ciudadanas, ahora bien, no pueden descartarse el fenómeno del niño el cual es un evento que produce temporadas largas de sequías que a su vez pueden llegar a desatar incendios de grandes magnitudes.

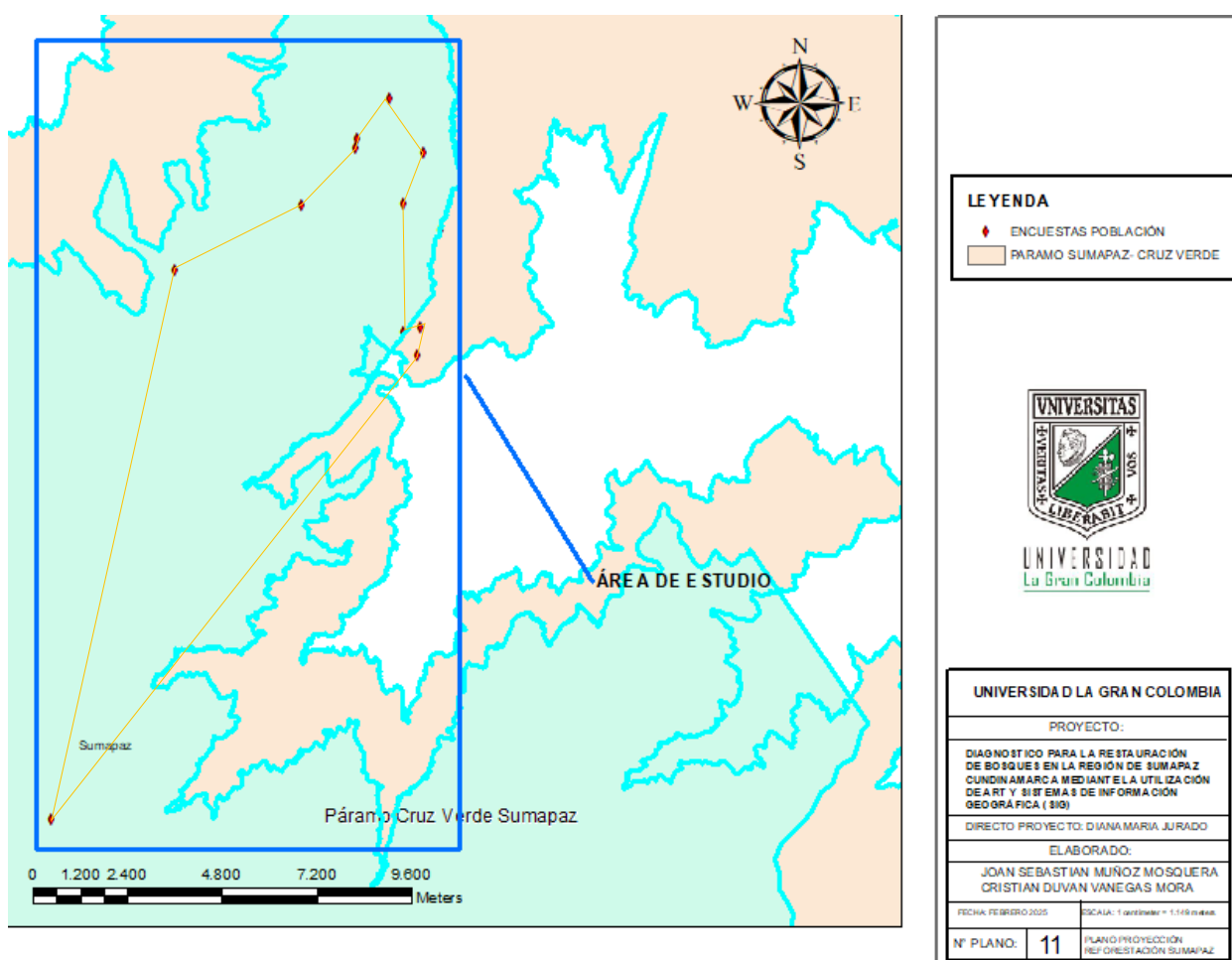
ÁREA DE ESTUDIO DEL PROYECTO

Para la presente investigación, en campo se realizaron dos visitas el día 18 de febrero de 2025 y el día 23 de febrero de 2023 donde se realizó la implementación de una encuesta mediante la herramienta creada por Esri denominada Survey 123 la cual almacenó la información mediante la implementación de coordenadas (latitud-longitud) que nos permitió descargar en formato ShapeFile (.SHP) lo cual fue fundamental dado que con la información recolectada al ingresarla en el programa de ArcGIS se observa un polígono que será nuestra área de estudio para el desarrollo del documento. Durante el desarrollo se explicará más a detalle el proceso realizado para obtener la información geográfica, se recomienda consultar la Fase II del presente documento.

A continuación, se muestra la información obtenida de las encuestas ubicada en las capas de terreno del Sumapaz, con los **16 puntos** encontrados se determinó un polígono para analizar a profundidad que comprende un área total de **61,92 km²**.

Figura 10

Encuestas área de estudio

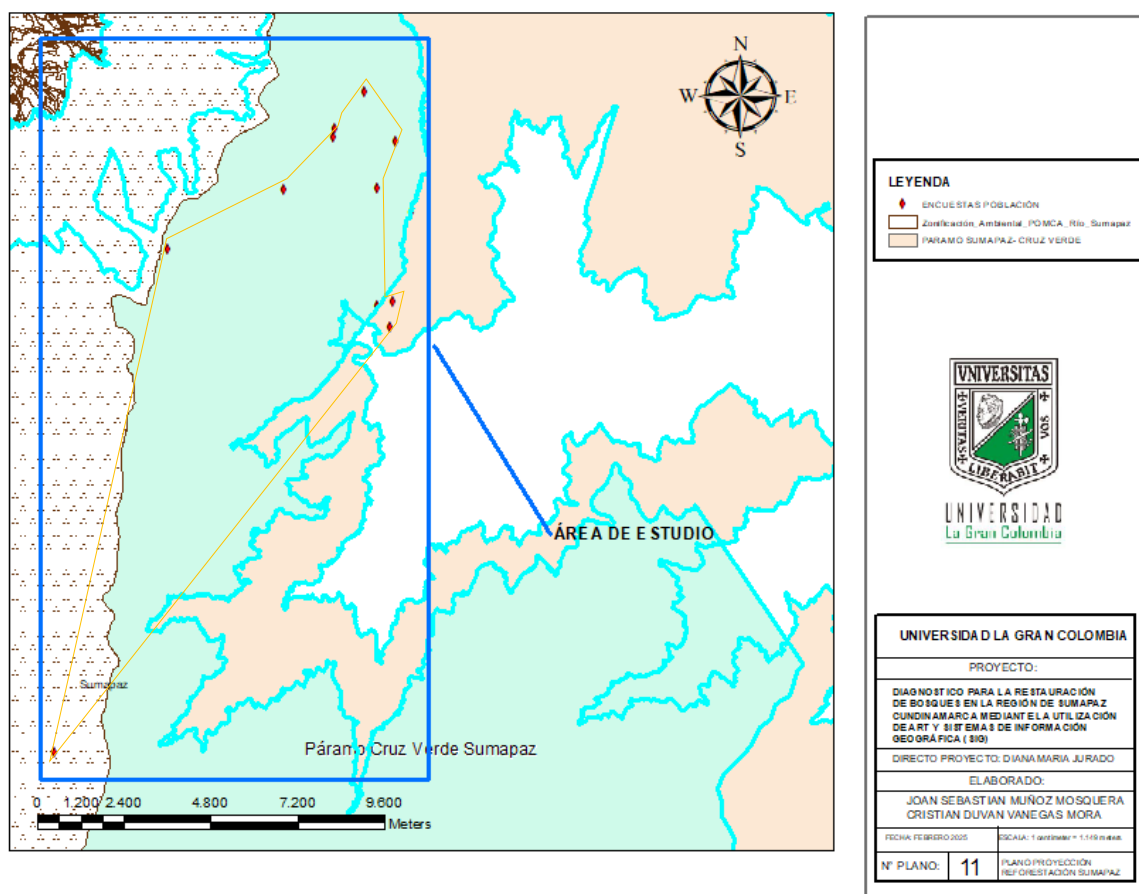


Nota. La figura representa el área de estudio determinada mediante coordenadas de Survey 123. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023” y “Encuesta reforestación y deforestación Sumapaz”.

En este punto, se realizó la zonificación con respecto a el área a estudio donde se pretende analizar la intervención directa del ser humano lo cual permite identificar puntos específicos de afectación que a futuro serán base del diagnóstico que contribuirá a generar planes piloto y pruebas físicas en el riego y aspersión de semillas mediante drones el cual es el objetivo principal de la investigación.

Figura 11

Zonificación Páramos de Sumapaz y Cruz Verde



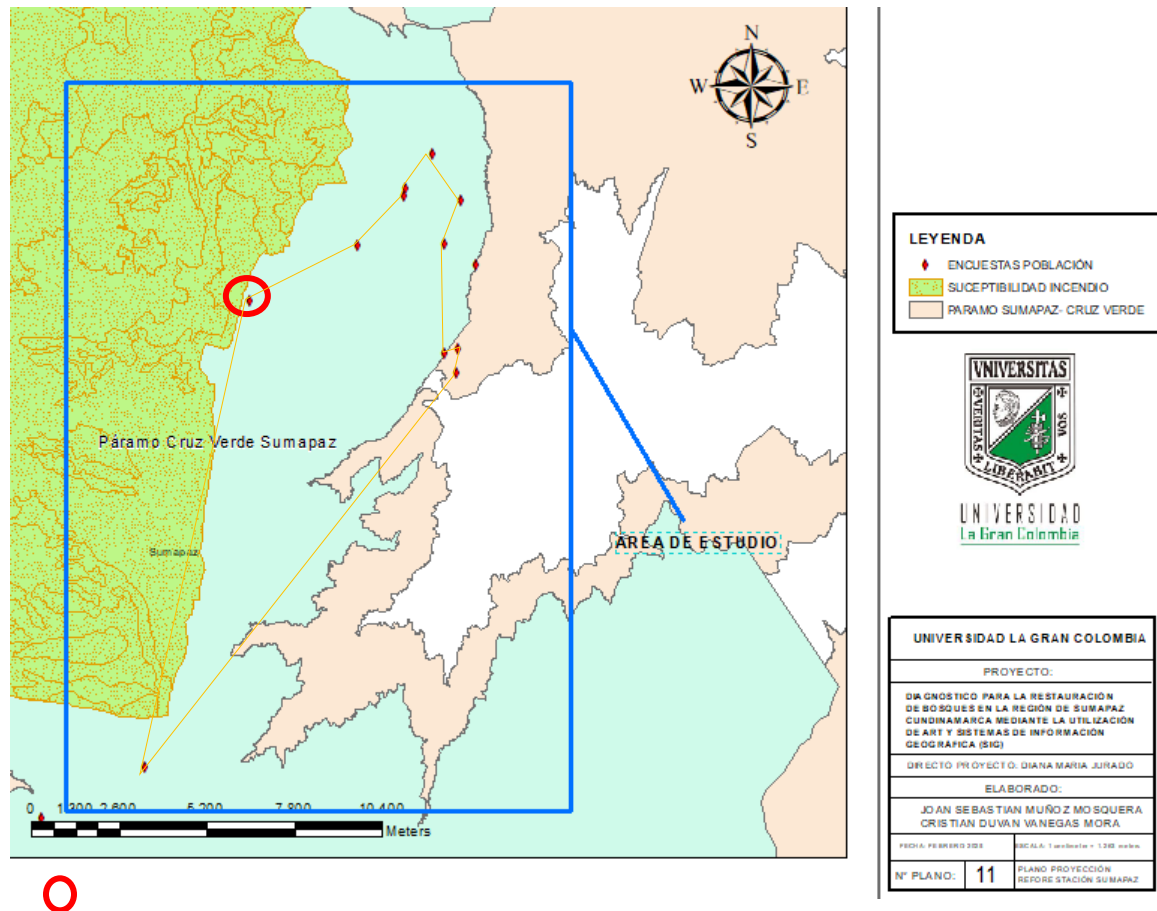
Nota. La figura indica la zonificación del área de Sumapaz evidenciadas además en las visitas en sitio realizadas. Adaptado de “Datos abiertos IGAC. 2023”.

Se puede observar en la figura 13, como la zonificación del territorio ha permitido la intervención parcial de los páramos y que con el paso del tiempo afectará una mayor área de vegetación producto de los asentamientos humanos, por lo cual, analizar el área de estudio permitirá centrar los esfuerzos para la correcta planeación de planes de implementación que sean capaces de generar un impacto positivo en la reforestación de la región. El plano anterior es fundamental para comprender los límites de la presente investigación y hacia que punto estará dirigida los análisis y estudios que se presentarán en el transcurso del documento.

A continuación, se evidencia la proximidad de los incendios que han generado afectación contigua al área de estudio lo cual es un factor fundamental que nos permite identificar que la zonificación representada en la figura 13 es la clara representación de la intervención del ser humano en el páramo de Sumapaz.

Figura 12

Susceptibilidad de incendios cobertura vegetal Cundinamarca

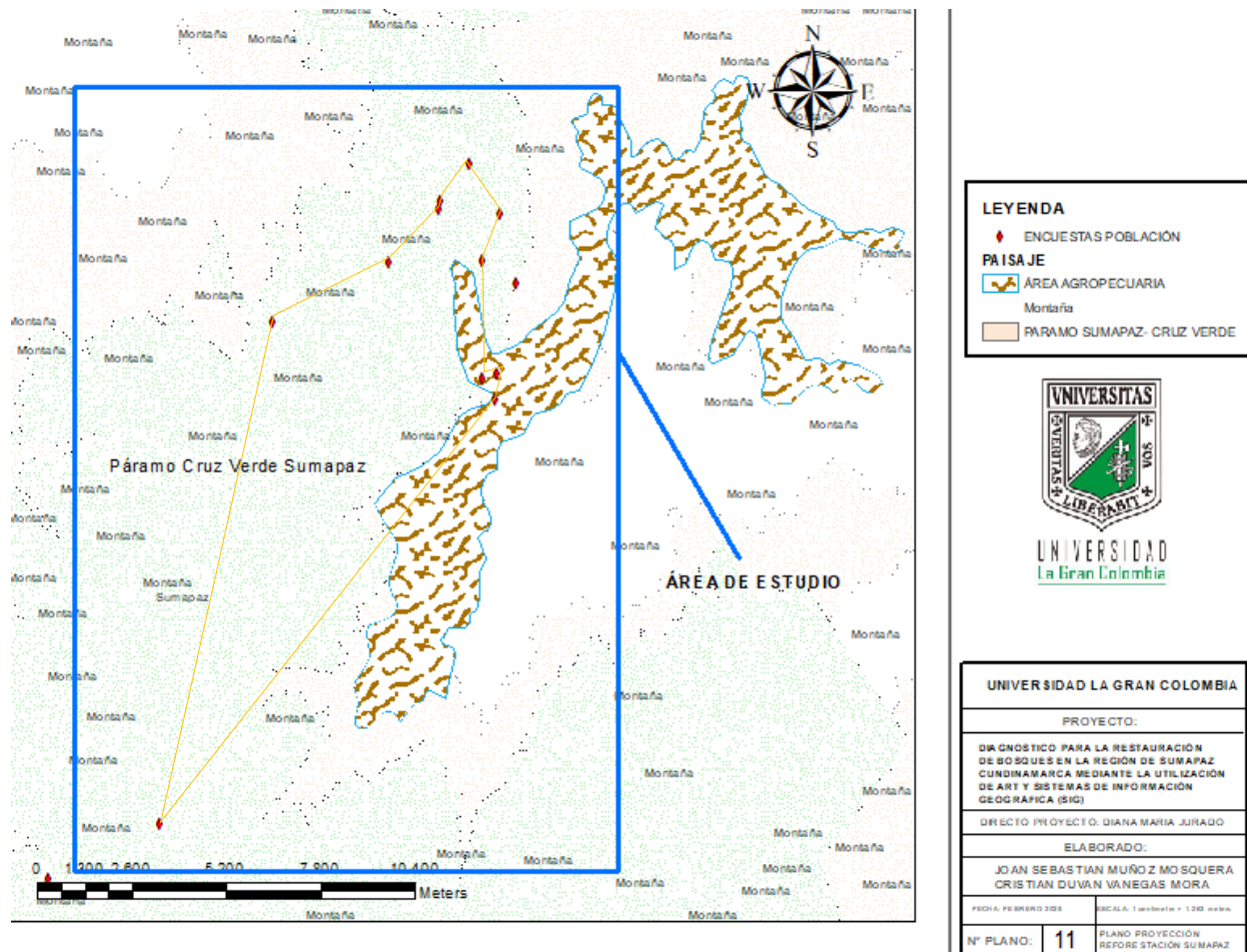


Nota. La figura representa las áreas más susceptibles a presentar incendios forestales. Adaptado de "Datos abiertos IGAC. 2023".

Por otra parte, un aspecto mencionado en la introducción del presente documento son la agricultura y la ganadería las cuales son principales actividades en los campos de Colombia y que lamentablemente involucra la reforestación por parte de campesinos para la siembra de productos agrícolas y cultivo de pasto para zonas ganaderas. Se evidencia a continuación el siguiente plano:

Figura 13

Frontera agropecuaria Páramos de Sumapaz y Cruz Verde



Nota. La figura representa el avance de la frontera agropecuaria que afecta el Páramo de Sumapaz. Adaptado de “Mapas Bogotá. 2023”.

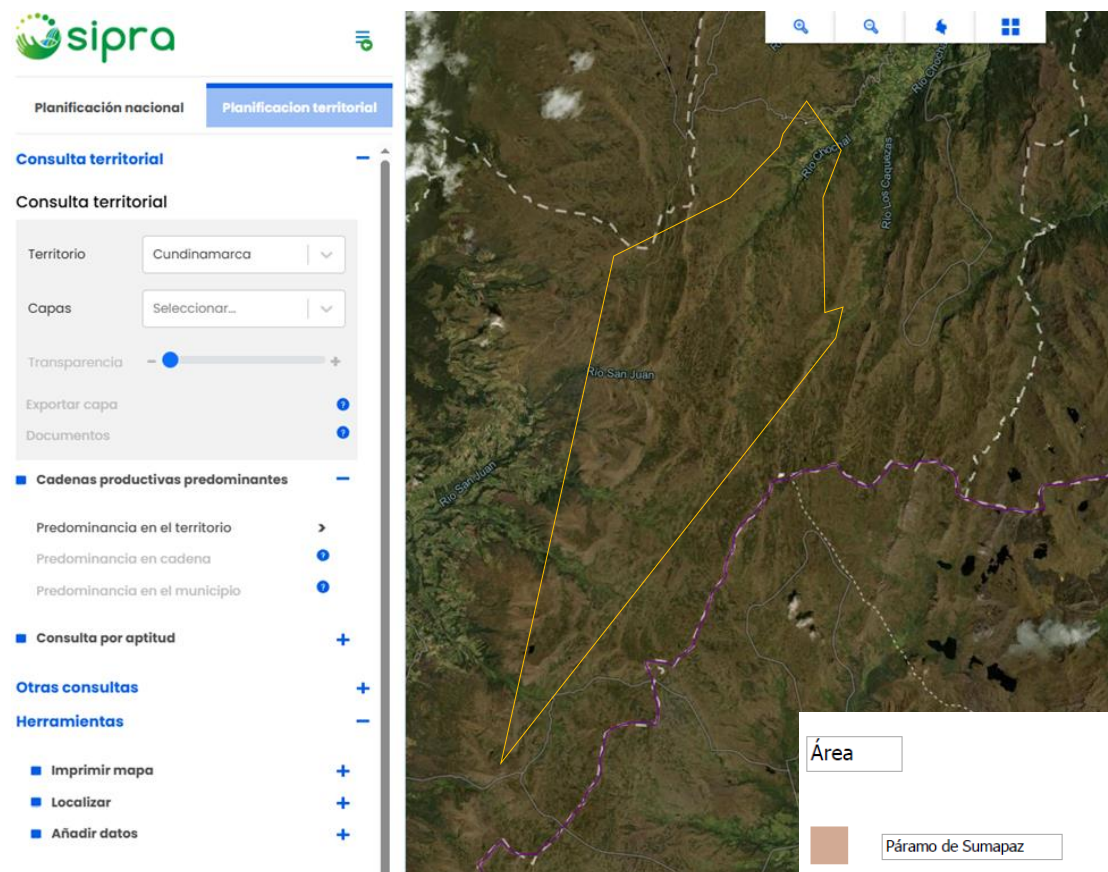
El plano anterior permite analizar la siguiente información debido a la demanda agrícola y ganadera producto de las grandes masas de habitantes como Bogotá obliga al campesino a deforestar terreno que le permita suplir la necesidad de abastecimiento. Dicho lo anterior, se puede observar en la figura N°15 que el área de estudio se encuentra seccionada por un área agropecuaria. Dicho lo anterior,

es importante que la información presentada sea tenida en cuenta y se realice un seguimiento dado que el alcance agropecuario puede llegar a generar afectación importante en el área de estudio y en dado caso que se lograra implementar este proyecto no tendría la capacidad de contrarrestar este tipo de deforestación producto de que es un modelo de implementación que aún se encuentra en sus fases iniciales de estudio para que a futuro sea base para la implementación.

Se realizó una validación adicional de la información anterior se procede a consultar en el geo visor SIPRA el área de estudio determinada donde se logra constatar la influencia de la intervención agropecuaria la cual corresponde con la información mostrada en la figura 15, se anexa imagen soporte donde se analiza el contorno de la zona de estudio seleccionada para la presente investigación. Se realiza una aproximación con el área seleccionada que permite establecer la figura 16 con una similitud cercana y coherente a lo que muestra el archivo ShapeFile del IDEAM.

Figura 14

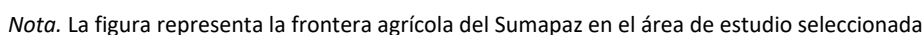
Imagen satelital planificación territorial 2024



Nota. Imagen satelital visor planificación territorial del Sumapaz. Adaptado de Sipra 2025.

(<https://sipra.upra.gov.co/nacional>)

Frontera agrícola área de estudio geovisor SIPRA



Adicionalmente, el estudio se realizó una verificación de la carne bovina por pastoreo con el fin de establecer si el área de estudio seleccionada se encontraba dentro del rango del geo visor Sipra el cual es un referente confiable de insumo para el desarrollo de la presente investigación debido a que se alimenta mediante datos generados por la unidad de planificación agropecuaria (UPRA) una entidad adscrita al ministerio de agricultura y desarrollo rural. En la página del geo visor SIPRA genero la siguiente información:

Tabla 1

Valores aptitud ganadera

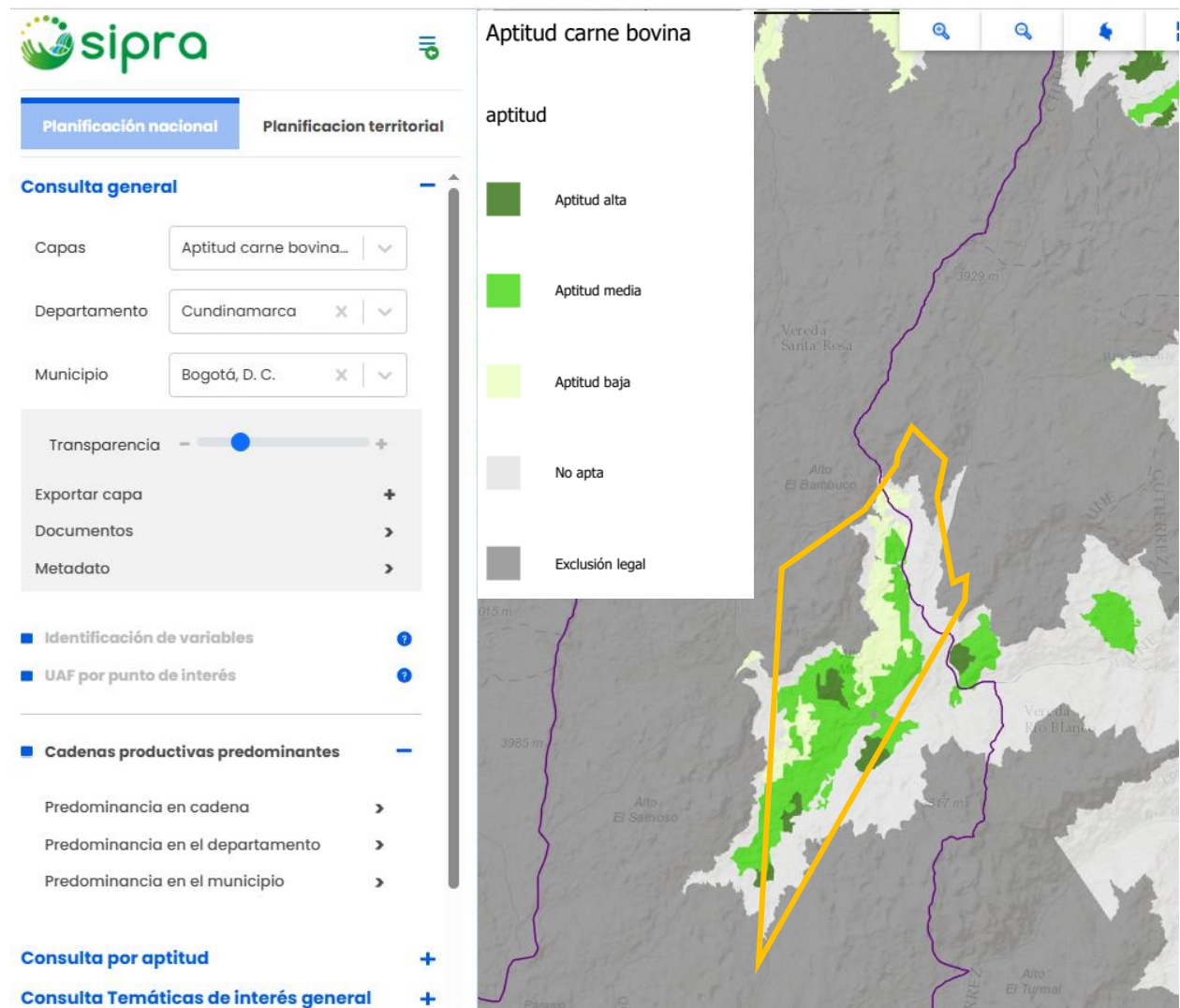
Aptitud	Hectáreas	Porcentaje
Aptitud alta	1.740	1.1%
Aptitud media	8.281	5.1%
Aptitud baja	3.426	2.1%
NO apta	8.592	5.3%
Exclusión legal	139.617	86.4%

Nota. La tabla contiene el porcentaje por hectáreas de aptitud de desarrollo para actividades ganaderas. Adaptado de SIPRA 2025. ((<https://sipra.upra.gov.co/nacional>))

La tabla N°1, nos indica que el 86,4 % del territorio es legalmente para la ganadería de carne en pastoreo en Cundinamarca. Se evidencia que solo una pequeña porción del territorio es realmente apta para la ejecución de esta actividad, lo cual permite entender que en el Sumapaz al ser un área protegida se encuentra dentro de la planificación rural, sin embargo, puede sufrir alteraciones debido a los porcentajes que contemplan posibles inversiones de ganadería que no permite un uso sostenible del suelo. A continuación, se ejemplifica el área de estudio correspondiente a la presente investigación:

Figura 16

Aptitud carne bovina mediante pastoreo

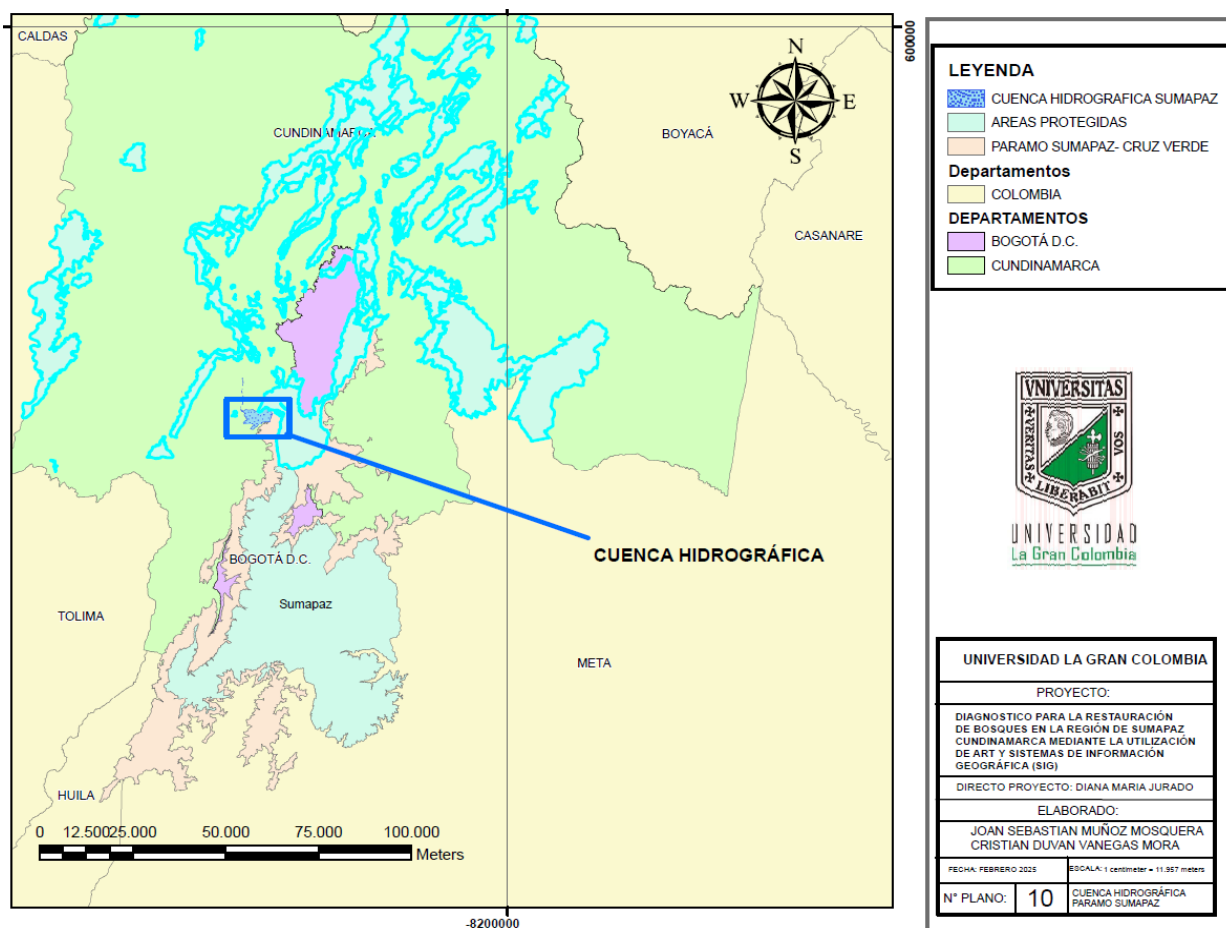


Nota. La figura representa la aptitud de carne bovina mediante pastoreo del Sumapaz en el área de estudio. Adaptado de SIPRA 2025. ((<https://sipra.upra.gov.co/nacional>))

Finalmente, se realizó la recolección de la información de la cuenca hidrográfica del Sumapaz, si bien es cierto, no hace parte de los objetivos de la investigación, es un aspecto relevante que debe tener en cuenta dado que el páramo es uno de los principales proveedores de suministro del agua potable de Bogotá y municipios de Cundinamarca. En consecuencia, la conservación de ríos y afluentes mediante el respaldo de la reforestación permitirá mantener el equilibrio del ecosistema.

Figura 17

Cuenca hidrográfica Páramos de Sumapaz



Nota. La figura representa la cuenca hidrográfica del páramo de Sumapaz. Adaptado de “Datos abiertos. 2023”.

Es importante mencionar que la investigación no está centrada en la cuenca hidrográfica del páramo de Sumapaz, sin embargo, es un aspecto que se debe tener en cuenta debido que al afectarse el recurso hídrico genera una descompensación en las especies animales, la fauna y flora. A continuación, se comparte unas breves imágenes de laguna y quebradas presentes en el área de estudio.

Figura 18

Laguna de Chisacá en la zona rural de Bogotá



Nota. La figura representa la laguna de Chisacá. Elaboración propia.

Figura 19

Cuerpo de agua Quebrada Cabrera



Nota. La figura representa cuerpos de agua presentes en el área de estudio. Elaboración propia.

Figura 20

Quebrada Taquegrande Páramo Sumapaz



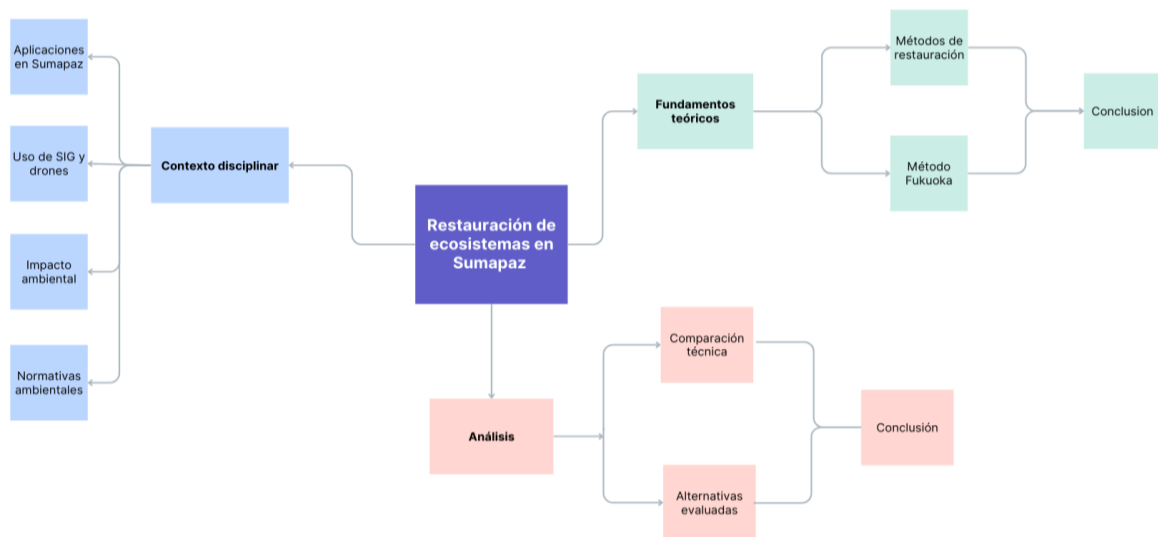
Nota. La figura representa el cuerpo de agua de la quebrada Taque grande. Elaboración propia.

MARCO CONCEPTUAL

La restauración forestal es una estrategia clave para mitigar los efectos de la deforestación y el cambio climático. En Colombia, los bosques cumplen un papel fundamental en la conservación de la biodiversidad y la regulación hídrica. La reforestación asistida con tecnología ofrece una solución eficiente para la recuperación de ecosistemas degradados. La restauración de bosques implica mucho más que plantar árboles se trata de la recuperación de un ecosistema que han sido desgastado a tal punto que se pierde su capacidad funcional, en el caso de Colombia, esta labor cobra una importancia particular, dado que los bosques representan un pilar esencial para la conservación de la biodiversidad, la regulación en el ciclo hídrico y la captura de carbono (Murcia et al., 2017).

Figura 21

Mapa conceptual Restauración ecosistema páramo Sumapaz



Nota. La figura representa el resumen del proceso de ejecución de la propuesta de investigación para la restauración de la región del Sumapaz. Elaboración propia. (<https://www.canva.com>)

La implementación de información SIG (sistemas de información geográfica) permite realizar análisis estadísticos y análisis del estado que involucra información mediante datos en una localización geográfica específica, es decir, es un sistema que cuenta con la distribución territorial o de recursos que permite generar planeación de proyectos, estudios, sociales, demográficos, científicos, entre otros.

Ahora bien, la información geográfica dependerá de la cantidad de datos con la cual se recolecte a la hora de generarla, y para ello es importante tener cuenta la fecha en la que se alimentó la información y la calidad de información obtenida. Con las bases de datos, es posible generar mapas que permitan establecer análisis estadísticos de una consulta generada. En consecuencia, con la información obtenida al ser una herramienta que cuenta con coordenadas puntuales, permite realizar investigaciones específicas basándose en la ubicación.

Para la interpretación de imágenes satelitales y la base de datos mencionada previamente, según Álvarez menciona:

Se inicia con la observación, que es un proceso activo y tiene que ver con lo que el intérprete espera ver o sea la expectativa. Es una actividad mental que está estimulada por los sentidos del hombre y depende del nivel de instrucción. De modo que puede ser acentuada con el entrenamiento. La observación es parte del proceso de percepción, que es a su vez, la primera fase de la interpretación de imágenes. Es una impresión recibida por la retina e interpretada por el cerebro (Serrato & Álvarez, 2018, p. 1).

Las imágenes satelitales son herramientas fundamentales geo temporales para análisis de áreas comparadas con respecto a el desarrollo de variables que clasifican las zonas de estudio, para este caso los procesos de deforestación y reforestación evidenciados con el paso del tiempo.

El método Nendo Dango también llamado método Fukuoka, es una forma de cultivar plantas que fue creada por Masanobu Fukuoka de Japón. Se trata de poner semillas en pequeñas bolas hechas de barro mezclado con abono y otras cosas orgánicas para protegerlas de animales que se las comen y climas difíciles hasta que salga la planta. Esta forma de trabajar se ha usado en varios planes para plantar árboles nuevos en Colombia. Por ejemplo, en el departamento de Caquetá, ha habido un proyecto con semillas asistidas usando el método Fukuoka, buscando mejorar zonas malas. Según Murcia et al. (2017), restaurar significa también reconstituir procesos ecológicos clave, como la dispersión de semillas, la interacción entre especies o el ciclo de nutrientes.

Dicho lo anterior, para un caso específico como es la reforestación la cual es un método activo que busca recuperar la cobertura de bosque en un sitio deforestado mediante la introducción de semillas se requiere determinar el área a reforestar la cual depende de la ubicación de las zonas afectadas, en consecuencia, las SIG son fundamentales en el suministro de coordenadas puntuales, no obstante, en sistemas montañosos o de difícil acceso se requiere procesos reforestar con ART.

La ventaja de la implementación de ART (Aeronaves remotamente tripuladas) consta en que se para reforestar alrededor de 10 millones de hectáreas (aproximadamente 25 millones de acres) de bosque perdido y degradado se requerirían entre 8 mil millones y 45 mil millones de semillas. Los bancos de semillas privados y públicos designados para la reforestación general tienen "entre tres y cinco años de semillas antes de que se agoten", afirma Aghai.

El uso de vehículos aéreos no tripulados permite involucrarse directamente en la gestión, monitoreo y evaluación de incendios forestales. Esto implica la necesidad de establecer una estrategia y mecanismos de planificación para abordar las etapas de prevención, control, extinción y restauración de las áreas afectadas de manera efectiva (Acosta, 2021).

Por lo tanto, esta capacidad proporciona un beneficio significativo al permitir una intervención más eficiente y efectiva en todas las etapas de gestión forestales. Como ejemplo, los vehículos aéreos no tripulados (UAV) equipados con cámaras térmicas pueden detectar y monitorear incendios forestales, permitiendo una respuesta más eficiente para el control y extinción del incendio, lo que es esencial en la prevención de la deforestación.

Tabla 2

Selección de especies para reforestación en el Sumapaz

ESPECIE	NOMBRE CIENTÍFICO	FAMILIA	CARACTERÍSTICAS ECOLÓGICAS	IMPORTANCIA
<i>Frailejón</i>	<i>Espeletia</i>	<i>Asteraceae</i>	<i>Endémica de páramos, con un crecimiento lento, almacena agua en sus hojas y raíces.</i>	<i>Regulación del agua, protección contra erosiones</i>
<i>Guaimaro</i>	<i>Brosimum alicastrum</i>	<i>Moraceae</i>	<i>El guáimaro se levanta para enfrentar el cambio climático y ser una alternativa de vida para las comunidades</i>	<i>Alimento para varios vertebrados, fijación de carbono, protección del suelo y la fijación de nutrientes.</i>
<i>Cucharo</i>	<i>Myrsine guianensis</i>	<i>Primulaceae</i>	<i>Árbol pequeño perennifolio de rápido crecimiento</i>	<i>Especie tolerante a suelos con baja fertilidad, atrae fauna, especie melífera, crece en zonas degradadas</i>

Nota. Adaptado de Humboldt (2016). Frailejones de Colombia. 2900 registros.

MARCO TEÓRICO

El marco teórico se fundamenta en la intersección de la tecnología, la ecología y la gestión ambiental. Los drones son herramientas versátiles que permiten la recolección de datos geoespaciales y la ejecución de tareas de siembra a gran escala (Torresan et al., 2016). Por otro lado, los SIG son sistemas que permiten analizar y visualizar datos geográficos, facilitando la toma de decisiones

informadas en proyectos de restauración (Villanueva, 2018). La combinación de estas tecnologías puede transformar la forma en que se llevan a cabo las iniciativas de recuperación ecológica, haciéndolas más eficientes y efectivas.

El uso de drones ha ganado popularidad en los últimos años debido a su capacidad para acceder a áreas de difícil acceso y recopilar datos geoespaciales de manera eficiente. Según un estudio de Cabrera (2021), estos dispositivos permiten un monitoreo preciso de los ecosistemas, lo que es esencial para la planificación de proyectos de recuperación. Pueden capturar imágenes de alta resolución y generar mapas que ayudan a identificar áreas que requieren intervención.

La tecnología SIG complementa la aplicación de drones al proporcionar herramientas para el análisis y visualización de datos geoespaciales. Los SIG permiten a los investigadores y planificadores evaluar las condiciones del terreno, la distribución de especies y otros factores críticos para la restauración (Villanueva, 2018). La sinergia entre estas tecnologías puede optimizar los esfuerzos de restauración, haciéndolos más efectivos y sostenibles. Los drones pueden ser utilizados en varias etapas: 3, 6 y 12 meses después de la siembra, tomando nota de variables como la diversidad de especies, el porcentaje de germinación, la supervivencia de las plántulas y la cobertura vegetal. Esta metodología posibilitará la recolección de datos empíricos que sustenten las conclusiones y comparaciones de eficiencia entre distintos métodos (Sinchi, 2021), el proceso de recuperación :

Evaluación del Terreno: Antes de iniciar un proyecto, es crucial evaluar el terreno. Los drones equipados con cámaras de alta resolución pueden capturar imágenes aéreas que permiten identificar áreas deforestadas y evaluar la salud de los ecosistemas existentes (González et al., 2015).

Dispersión de semillas: Una de las aplicaciones más innovadoras de los drones es la dispersión de semillas. Empresas como AirSeed Technology han desarrollado drones que pueden lanzar miles de semillas en áreas de difícil acceso, aumentando la eficiencia del proceso de restauración (Lozoya-Gómez, 2023). Este método no solo es rápido, sino que también reduce los costos asociados. A continuación, se describen las diferencias entre "Drones con Método Fukuoka" y "Aspersión con Drones:

Drones con Método Fukuoka (Dispersión de Nendo Dango)

- Se lanzan bolas de arcilla con semillas dentro, mezcladas con compost y otros nutrientes.
- La bola protege las semillas de depredadores y climas adversos, mejorando su tasa de germinación.
- Se requiere un trabajo previo en la preparación de las bolas de arcilla.
- Es un método más pasivo: una vez dispersadas, la naturaleza de la zona en su gran parte humedad activa la germinación.

Aspersión con Drones

- Aquí el dron no lanza semillas, sino que rocía líquidos como biofertilizantes, polímeros de retención de humedad o agua.
- Se usa después de una dispersión previa de semillas para mejorar su supervivencia.
- Es más efectivo cuando se quiere optimizar la germinación en suelos áridos o con poca humedad.

La información anteriormente presentada sobre las alternativas requiere un análisis comparativo entre las ventajas y desventajas que permitió seleccionar la más eficiente para desarrollarla en la presente investigación. En la tabla N°3 se presenta el cuadro con la evaluación correspondiente.

Tabla 3

Cuadro comparativo de alternativas evaluadas

ALTERNATIVA	DESCRIPCIÓN	VENTAJAS	DESVENTAJAS
Dispersión aérea con drones método Fukuoka	Uso de drones para la liberación de bolas de arcilla (nendo dango) que contienen semillas, compost y nutrientes. Este método protege las semillas y mejora la tasa de germinación.	-Protege las semillas	-Capacidad de carga limitada
		-Mayor tasa de germinación	-Dependencia climática
		-Acceso a áreas difíciles	-Preparación laboriosa
		-Reducción de intervención humana	
Aspersión con Drones	El uso de drones equipados con sistemas de pulverización para aplicar soluciones líquidas como biofertilizantes, polímeros de retención de humedad sobre áreas previamente sembradas o para preparar el terreno antes de la siembra.	-Aplicación precisa	-Mayor consumo energético
		-Mejora de condiciones del suelo	-Costos operativos elevados
		-Eficiencia en el uso de recursos	-Limitaciones climáticas
Dispersión Mecánica con Helicóptero o Avión	Liberación masiva de semillas desde aeronaves tripuladas, como helicópteros o aviones, para cubrir grandes extensiones de terreno en poco tiempo.	-Cobertura amplia y rápida	-Baja precisión
		-Costos reducidos por hectárea	-Mayor pérdida de semillas
			-Impacto ambiental negativo

Nota. Adaptado de Humboldt (2016). Frailejones de Colombia. 2900 registros.

Se informa que realizó una cotización para estimar los costos de reforestación en el área de estudio (61,92 km²) empleando tres métodos: método Fukuoka con dron, aspersión convencional y plantación manual. Las fuentes de precios incluyen cotizaciones directas a proveedores en Colombia y referencias de literatura técnica.

Tabla 4

Comparativo económico entre métodos

Proveedor	Método	Costo por ha (COP)	Fuente
AgroDrones SAS	Fukuoka-Dron	35000	Cotización directa, 2025
Terra Forest S.A.S.	Aspersión convencional	38000	Cotización estimada
ECOFLORA SAS	Plantación manual	42000	Cotización directa, 2025

Nota: Adaptado de AgroDrones SAS, Terra Forest S.A.S., ECOFLORA SAS (2024).

Para el área total de 61,92 km² (6.192 ha), los costos totales estimados son los siguientes:

Tabla 5

Valores totales en área de estudio

Método	Costo total (COP)
Fukuoka-Dron	216,720.000
Aspersión convencional	235,296.000
Plantación manual	260.064.000

Nota: Elaboración propia

La opción óptima en términos de costo-beneficio, basándonos en el área de estudio, es el método Fukuoka-Dron presenta ventajas en eficiencia de cobertura y menor impacto en zonas de difícil acceso.

MARCO NORMATIVO

El marco normativo y contextual de la restauración ecológica en la región de Sumapaz se fundamenta en diversas políticas y regulaciones nacionales que buscan la conservación y recuperación de los ecosistemas, con especial atención a áreas de alta importancia ecológica como los páramos.

En Colombia, la Resolución 1434 de 2017 del Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible delimitó el Área de Páramos Cruz Verde – Sumapaz, estableciendo directrices para su protección y manejo sostenible. Esta resolución prohíbe actividades que puedan degradar estos ecosistemas, como la minería y la agricultura intensiva, y promueve prácticas de conservación y restauración ecológica en la zona (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2017).

Además, la Política Nacional de Biodiversidad y el Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas (PNR) orientan las acciones de restauración en el país, buscando restablecer la estructura, composición y funcionalidad de los ecosistemas para generar servicios ecosistémicos y cumplir con compromisos nacionales e internacionales (CIFOR-ICRAF, 2014).

La región de Sumapaz, ubicada en el departamento de Cundinamarca, es reconocida por albergar el páramo más grande del mundo, el Páramo de Sumapaz, que cumple funciones vitales en la regulación hídrica y la conservación de la biodiversidad. Sin embargo, actividades humanas como la ganadería, la agricultura y la extracción de recursos naturales han generado procesos de degradación ambiental en la zona.

En respuesta, se han implementado proyectos de restauración ecológica en Sumapaz. Por ejemplo, entre 2017 y 2018, se desarrolló un proyecto para la restauración de 10 hectáreas de bosque en la localidad de Sumapaz, con el objetivo de recuperar las rondas de las cuencas hídricas y las zonas

afectadas por la extracción de materiales pétreos. Este proyecto incluyó el diagnóstico de áreas, la selección de predios y la implementación de acciones de restauración en las veredas Laguna Verde y Las Palmas (Ecoflora SAS, 2017). Además, la creación de la Zona de Reserva Campesina de Sumapaz busca promover prácticas agrícolas sostenibles y la conservación de los recursos naturales, integrando a las comunidades locales en la gestión ambiental de la región (Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural, 2018). Estas iniciativas reflejan un compromiso conjunto entre el gobierno, las organizaciones y las comunidades locales para restaurar y conservar los ecosistemas de Sumapaz, alineándose con las políticas nacionales de biodiversidad y restauración ecológica. Aunque en el páramo de Sumapaz, se han implementado diversas estrategias de restauración ecológica para contrarrestar las afectaciones causadas por actividades humanas y el cambio climático. Entre las prácticas destacadas se encuentran:

Restauración Ecológica Participativa: Esta metodología involucra a las comunidades locales en la rehabilitación de áreas degradadas, promoviendo la sustitución de actividades no sostenibles por actividades compatibles con la conservación del páramo. Este enfoque busca armonizar las necesidades socioeconómicas de los habitantes con la protección del ecosistema.

Conservación y manejo del Agua: Se implementan proyectos que fortalecen el compromiso y la capacidad local para la gestión ambiental, el manejo territorial y la protección del recurso hídrico, esencial en los ecosistemas de páramo.

DISEÑO METODOLÓGICO

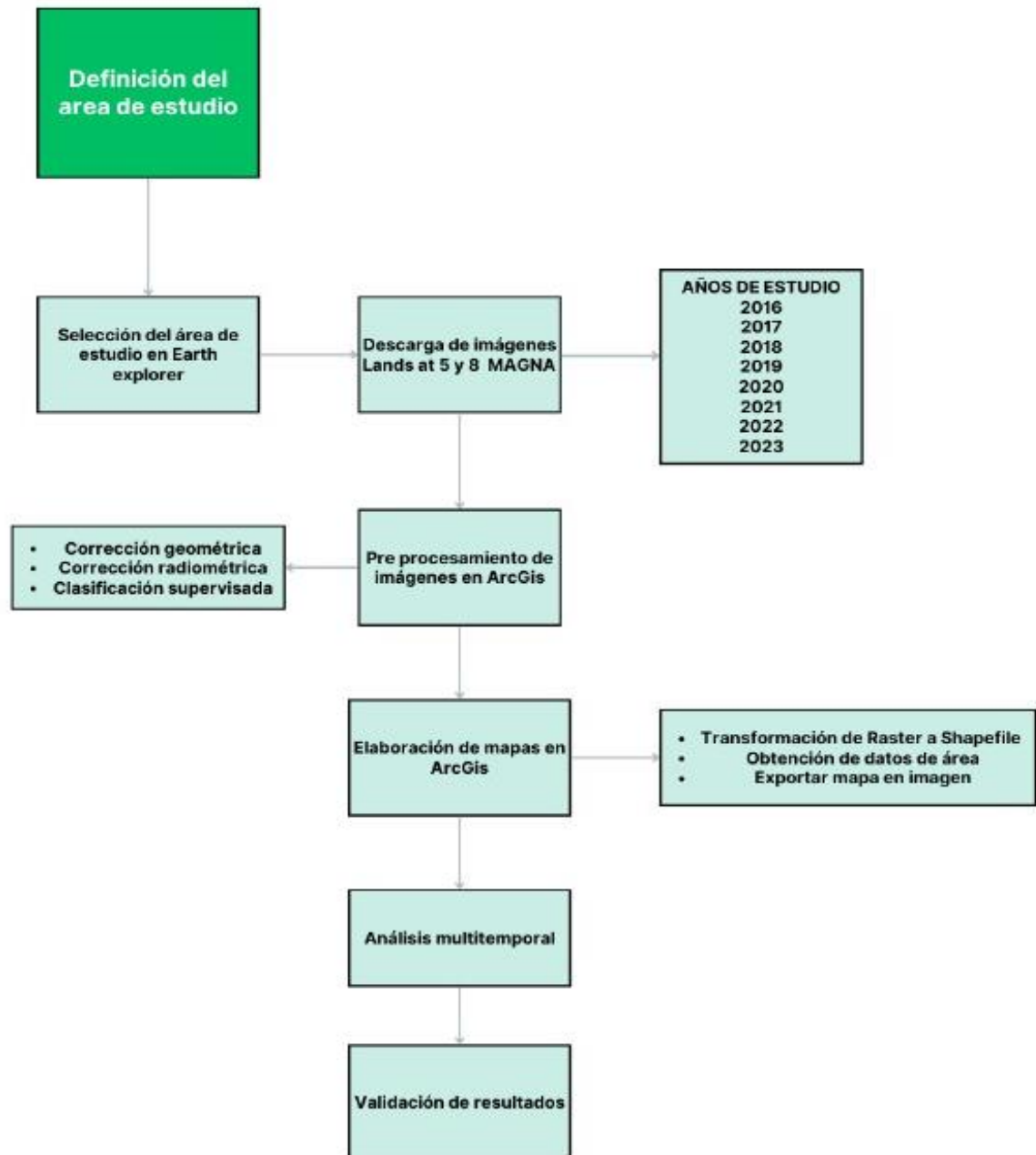
La metodología utilizada en esta investigación se estructuró en cuatro fases, diseñadas para garantizar un análisis y una propuesta viable para la restauración de ecosistemas en la localidad 20 de Sumapaz, Cundinamarca. Este enfoque metodológico combina el uso de tecnologías geoespaciales, como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), con la aplicación del método Fukuoka de dispersión de semillas, asegurando una solución sostenible y adaptada a las condiciones específicas del área de estudio.

Fase 1: Investigación y Diagnóstico

Esta etapa inicial se enfocó en la recopilación y análisis de información relevante para el desarrollo del proyecto. Se llevó a cabo una revisión normativa de las políticas ambientales aplicables a la restauración ecológica en Colombia, con énfasis en la región de Sumapaz. Paralelamente, se realizó una revisión a artículos y estudios previos sobre metodologías de restauración forestal, con el propósito de identificar estrategias efectivas y casos de referencia.

Figura 22

Análisis información SIG existente



Nota. La figura representa tratamiento de información SIG. Elaboración propia.

Como parte del diagnóstico, se seleccionó el área de estudio mediante criterios ecológicos, geográficos y de accesibilidad, empleando imágenes satelitales. Se integró información climática y topográfica para caracterizar el ecosistema y determinar su grado de afectación, además. La recopilación de estos datos permitió establecer una línea base para el análisis y modelamiento posterior.

Fase 2: Diseño y Cálculo

Con base en la información obtenida en la fase anterior, se procedió al levantamiento de datos de campo. Se realizaron visitas técnicas para evaluar las condiciones actuales del área de estudio y validar los datos obtenidos a través de SIG. Además, se llevaron a cabo sobrevuelos con drones para generar orto mosaicos y modelos digitales de elevación, lo que permitió una mayor precisión en la caracterización del terreno y la identificación de áreas prioritarias para la restauración.

Durante esta fase, se adquirieron y configuraron herramientas SIG especializadas para el análisis geoespacial. A través de estos programas, se procesaron y analizaron los datos obtenidos, lo que facilitó la generación de mapas sobre la degradación del ecosistema, la cobertura vegetal actual y las zonas óptimas para la dispersión de semillas. Asimismo, se estudiaron los alcances y funcionalidades de estas tecnologías para asegurar su adecuada implementación en el desarrollo del proyecto.

Fase 3: Modelamiento de Propuesta

En esta etapa, se estructuró un modelo de restauración basado en SIG y en el método Fukuoka de dispersión de semillas. Se diseñaron distintos escenarios de implementación, analizando factores como la densidad de siembra, la selección de especies arbóreas y las condiciones climáticas y edáficas del área de estudio.

Se llevaron a cabo simulaciones en SIG para evaluar la eficiencia de diferentes estrategias de dispersión de semillas. En este análisis se compararon tres alternativas principales:

- Drones con método Fukuoka: Consiste en la dispersión de semillas encapsuladas en bolas de arcilla, lo que protege las semillas y favorece su germinación natural sin intervención humana adicional.
- Aspersión con drones: Método basado en la liberación de semillas sin encapsulación, lo que permite cubrir grandes extensiones en menor tiempo, aunque con menor protección para las semillas.
- Dispersión con helicóptero o avión: Alternativa utilizada en proyectos de gran escala, donde se busca una cobertura rápida en extensas áreas degradadas. Sin embargo, presenta baja precisión en la siembra y una alta tasa de pérdida de semillas debido a la acción del viento y la falta de control sobre la zona de dispersión.

A partir de este análisis comparativo, se establecieron los criterios técnicos y logísticos para la implementación de la estrategia más eficiente dentro del contexto de Sumapaz.

Fase 4: Evaluación y Ajustes

La fase final consistió en la validación de los resultados obtenidos en las etapas previas y la identificación de posibles ajustes en la propuesta metodológica. Se analizaron los costos y la viabilidad operativa de la implementación del método seleccionado, asegurando su compatibilidad con los recursos disponibles y las condiciones ambientales del área de estudio. Se verificó el cumplimiento de los objetivos planteados inicialmente y se realizó un análisis de impacto de la estrategia de restauración propuesta. Finalmente, se elaboró un informe técnico que documentó todos los hallazgos,

recomendaciones y lecciones aprendidas, proporcionando un insumo clave para futuras investigaciones en restauración ecológica en la región de Sumapaz.

DESARROLLO DE LA PROPUESTA

FASE I: DIAGNÓSTICO TÉCNICO E INVESTIGACIÓN

Para la búsqueda de la información se procedió a realizar una investigación sobre los programas que permitieran genera análisis de datos mediante análisis espaciales y ciencia de datos implementando métodos analíticos y algorítmicos mediante la visualización de mapas que permitan integrar información en valores para ser analizados. El programa que se eligió con base principal fue ARCGIS el cual nos permite la posibilidad de crear mapas, integrar datos y brindar análisis del estado actual del proyecto en estudio. A continuación, se anexa figura 1, la cual hace parte del registro fotográfico tomado en sitio como insumo del estado actual del páramo:

Figura 23

Paisaje vegetal páramo de Sumapaz.



Nota. Área protegida Sumapaz. Elaboración propia.

Sumado a las visitas en campo se procedió a realizar una búsqueda de “insumos” los cuales son bases de información existentes presentes en el GEO PORTAL Datos abiertos Agrología, Desarrollo rural Colombia en mapas, SIATAC, Geovisores ANLA y el IDEAM, los cuales fueron de gran utilidad en la información base que permitiera realizar un estudio detallado del área de intervención, sin embargo, es importante recalcar que la investigación desarrollada no está basada específicamente en la creación de mapas o planos de información específica, no obstante, son herramientas esenciales para el desarrollo del documento.

La Cuenca Alta pertenece a la parte más escarpada de la cuenca, y comprende el área localizada entre la Laguna de Los Tunjos ubicada en el Páramo de Sumapaz –sitio donde nace el Río Tunjuelo y el Embalse de la Regadera. Del páramo y la Laguna de Los Tunjos descienden los ríos Chisacá y Mugroso, cuya confluencia procede el Río Tunjuelo. Dichos afluentes nutren la represa de Chisaca, que hace parte

de los componentes del sistema sur de abastecimiento del Acueducto de Bogotá, permitiendo el suministro de agua a la localidad de Usme (EAAB II).

Figura 24

Placa Instituto Geográfico Chisacá



Nota. Elaboración propia.

Como bien se mencionó en los antecedentes de la presente investigación con base en la información presentada por el espectador acerca del inadecuado uso de las cuencas y fuentes hídricas por parte del ejército nacional de Colombia, es necesario realizar un seguimiento parcial de la situación, si bien es cierto, que no es el objetivo principal de la investigación, es una problemática grave que afecta el funcionamiento adecuado del ecosistema y especies nativas. “Diversos estudios han señalado que la contaminación hídrica en estos ecosistemas puede deberse a actividades humanas como la agricultura, la ganadería y la minería” (IDEAM & CAR, 2020). Es importante realizar un análisis multitemporal que permita un acercamiento más preciso sobre el área de intervención y la intervención sobre la superficie vegetal.

ANÁLISIS MULTITEMPORAL

El análisis multitemporal consiste en la recolección de datos geográficos efectivos que representan el cambio de la cobertura de un área en estudio, comparando una o más imágenes. Esta información permite identificar el problema y conocer a través del tiempo los sucesos ocurridos y/o los fenómenos presentes que han tenido injerencia en los cambios observados lo cual permite realizar análisis de mayor precisión en un área seleccionada.

Para obtener las imágenes que se presentaran a continuación se usó el portal USGS golvis (Servicio geológico de los Estados Unidos) el cual usa el satélite Landsat, que recolecta imágenes por todo el globo terráqueo cada 16 días. Los datos que recolecta el satélite están disponibles de forma gratuita en Golvis, Earth Explorer.

Para este trabajo se descargaron las imágenes de Earth Explorer, se eligió filtro la localidad 20 de Bogotá el Sumapaz, ya que es la zona donde realizaremos el estudio multitemporal para conseguir las diferentes coberturas. Para elegir las imágenes tuvimos en cuenta los siguientes criterios: un bajo nivel en las nubes que se veían, fecha de captura y calidad de la imagen. Se eligió un área dentro de la zona de estudio que presentara variación importante a través del paso de los años donde se pudiera identificar la regeneración del terreno, por tanto, en la figura 2 se señala el área específica para el análisis multitemporal y como resultado se obtienen las siguientes ilustraciones

Figura 25

Análisis multitemporal área estudio



17 de enero del 2010



Imagen Landsat 7 TM, 2005

Con el avance del tiempo se registra pérdida de la zona verde que afecta el ecosistema debido que la pérdida de especies naturales de plantas afecta el ecosistema en general y degrada la vegetación natural del terreno. Composición falsa color (colores inusuales como el morado o verde fosforescente).

28 de marzo del 2015

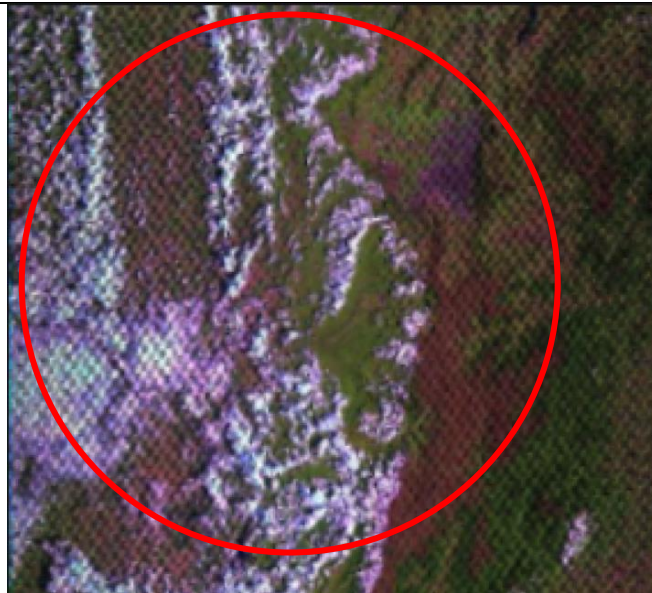


Imagen Landsat 7 TM, 2005

Se evidencia procesos no naturales que afectaron la superficie vegetal, esta situación es generada a los procesos de intervención humana y la zonificación aledaña al área de estudio. Se usaron bandas fuera del espectro visible (como el infrarrojo cercano o medio) como lo es el falso color mostrado mediante la Banda 4 (morado), Banda 5 (infrarrojo cercano), Banda 6 (infrarrojo medio). Implementadas para detectar vegetación sana, suelos secos, áreas intervenidas respectivamente.

19 de diciembre del 2017

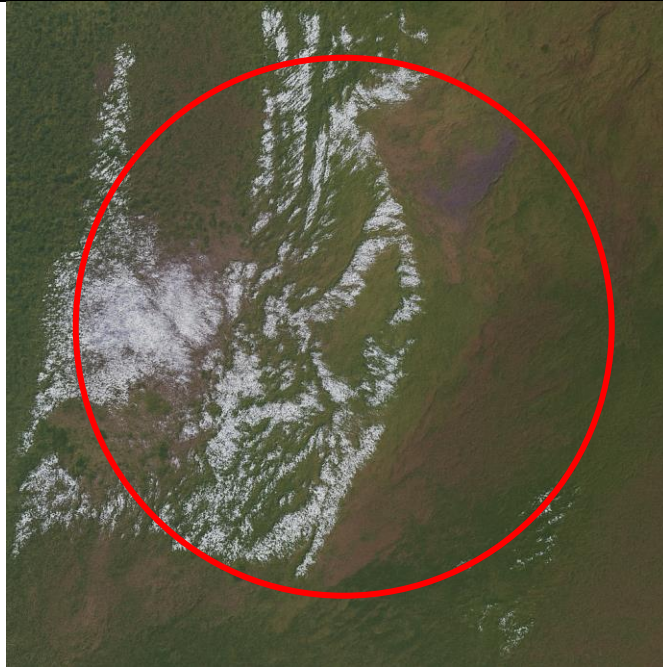


Imagen Landsat 7 TM, 2005

Se evidencia el área con mayor afectación de la capa vegetal, la situación se presenta producto del aumento de la zonificación del área de estudio, actividades agropecuarias que afectan el terreno natural debido al cambio de uso de suelos. La imagen muestra menor presencia de nubes, con colores más claros y diferenciación clara del terreno, donde es posible evidenciar intervención del terreno por posible zonificación o incendio del área. Combinación de bandas (Banda 4 Rojo) (Banda 3 Verde) y (Banda 2 – Azul) importante diferencia de la imagen del año 2002 permite análisis y evaluación del estado del paisaje afectado.



Nota. Imágenes satelitales área de estudio seleccionada en el Sumapaz. Adaptado de Earth Explorer 2025.

Se evidencia que la regeneración natural de las áreas afectadas ha sido lenta y limitada. Según un estudio sobre el deterioro del páramo de Sumapaz, la recuperación pasiva de estas zonas no ha sido suficiente para contrarrestar la degradación del ecosistema, lo que ha generado una pérdida progresiva de cobertura vegetal y biodiversidad (Moreno, 2016). De manera similar, un análisis sobre los

cambios en el uso del suelo señala que las alteraciones en el territorio han afectado la capacidad de regeneración natural del ecosistema, dificultando su recuperación efectiva (Cárdenas, 2017)."

Con base en la información anterior se procedió a realizar un análisis del estado actual del páramo del Sumapaz y recopilar la información necesaria que permita desarrollar la presente investigación, por lo cual el paso a seguir fue realizar el plano de ubicación del proyecto del área a intervenir donde se ejecutarán los estudios correspondientes para la reforestación de los ecosistemas ubicados en el Sumapaz (Cundinamarca). A continuación, se anexa plano generado mediante la implementación de la herramienta ARCGIS y la búsqueda previa de insumos en las bases de datos.

FASE II DISEÑO Y CÁLCULO Y LA INTERPRETACIÓN INFORMACIÓN SIG

Para obtener insumos y aumentar las fuentes de información se procedió a realizar dos visitas en campo con el fin de realizar la recolección del registro fotográfico. Se evidencio que en el páramo de Sumapaz el área de agrícola cuenta con bastante influencia debido que se observa gran cantidad de siembra de cultivos y ganadería que claramente genera afectación del entorno debido a la reducción de la capa vegetal existente.

Se realizó una visita inicial el día 18 de febrero de 2025 con el fin de identificar si el número de viviendas de los habitantes era importante donde se logró observar más de 50 casas las cuales cuentan con importantes extensiones de terreno destinadas a las actividades de siembra y ganadería como forma de subsistir por parte de los campesinos. A continuación, se adjuntan soportes de una muestra de las casas donde fue posible realizar registro fotográfico dado que en el área la población es distante y en diferentes predios se nos prohibió tomar fotos.

Figura 26

Referencia ubicación páramo de Sumapaz



Nota. Elaboración propia.

Se evidenció presencia militar en el páramo de Sumapaz, por tanto, se realizaron consultas pertinentes sobre la seguridad y existencia de presencia de guerrillas presentes en el área de intervención, sin embargo, no se logró obtener información acerca de la presencia de fuerzas al margen de la ley debido que son un factor importante teniendo en cuenta que utilizan el terreno natural para la siembra de coca y demás productos alucinógenos.

Figura 27

Punto de control militar



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se anexan imágenes de las viviendas que se encontraban cerca de la carretera de acceso, sin embargo, no es posible determinar y según el alcance de la presente investigación la totalidad de viviendas existentes en las áreas seleccionadas. Por tanto, se reitera que se tomaron como muestras para la alimentación de información de la encuesta de Survey 123 de ArcGIS, es decir, las casas ubicadas dentro del área de estudio seleccionada fueron la base e insumo para suministro de información gracias al apoyo de los campesinos que participaron y desarrollaron el sondeo.

Figura 28

Casa N°1 zona de Betania encuestada.



Nota. Elaboración propia.

Figura 29

Casa N°2 zona de Betania encuestada



Nota. Elaboración propia.

Figura 30

Casa N°3 zona de Betania encuestada



Nota. Elaboración propia.

Figura 31

Casa N°4 zona de Betania encuestada



Nota. Elaboración propia.

En las casas registradas o cerca a sus alrededores se registró en gran medida el cultivo de papa que se extienden en gran parte de los terrenos que son propiedad de los campesinos los cuales a pesar de tener conocimiento de la importancia del páramo de Sumapaz mantiene la actividad agrícola vigente dado que son proveedores del abastecimiento de la ciudad de Bogotá D.C.

Figura 32

Cultivo N°1 zona de Santa Rosa personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Figura 33

Cultivo N°2 zona de Santa Rosa personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Figura 34

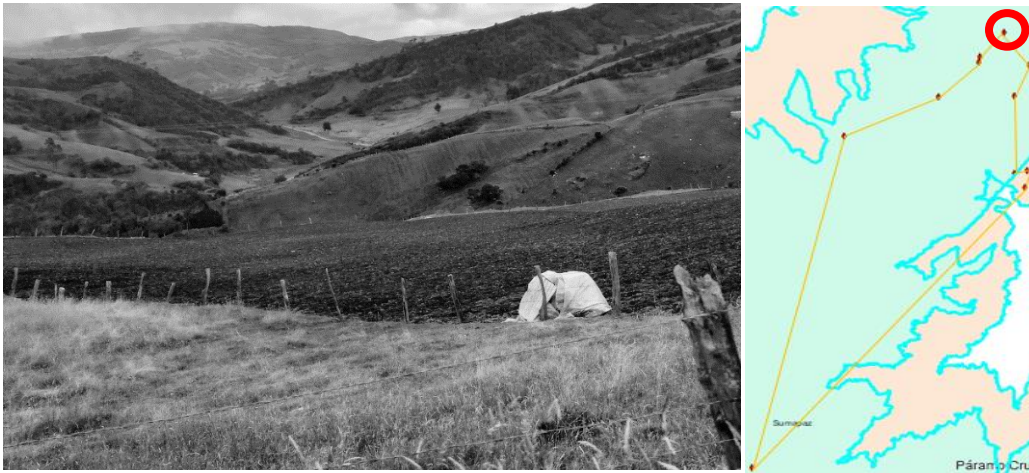
Cultivo N°3 zona de Nazareth personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Figura 35

Cultivo N°4 zona de Nazareth personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Por otra parte, con el avance y recorrido en la carretera se evidencia ganadería en diferentes predios los cuales, en resumen, las causas de la deforestación están directamente relacionadas con la necesidad de los agricultores y ganaderos debido que se requiere talar árboles para ampliar las áreas de agricultura, ganadería y construcción de viviendas.

Figura 36

Ganadería existente paramo Sumapaz zona de Caicedo personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

En la imagen N°31 se evidencia una cantidad importante de ganadería la cual posee una amplia extensión de terreno para los bovinos que su rango de consumo se encuentra entre el 7% y 10% de su peso en pasto, en consecuencia, a contaminación se realiza una delimitación aproximada del nivel que a la vista e identificó como deforestado para el consumo del ganado.

Figura 37

Limites deforestación ganadera



Nota. Líneas avance deforestación para actividades ganaderas. Elaboración propia.

La línea roja es la línea base donde se encontraba el límite de la zona boscosa, sin embargo, por causas de la ganadería y uso de la leña para consumo en actividades diarias, se registra la línea verde la cual indica el nuevo límite deforestado. Como parte del análisis y levantamiento del área se procedió a realizar un sobrevuelo inicial para verificación de estado actual y pruebas de funcionamiento sobre el área escogida la cual se logró evidenciar de forma notable la intervención del ser humano lo cual es grave debido que las autoridades ambientales no realizan seguimiento constante de la situación permitiendo a los habitantes destruir el ecosistema producto de la falta de conocimiento sobre las consecuencias finales.

Para realizar los sobrevuelos mediante el método Fukuoka se genera una cantidad de 10.000 pellets que contenían en su matriz de arcilla, fibras de fique (cabuya), lana y semillas de especies nativas locales; cada pellet pesó en promedio 10 gramos y tenía un tamaño similar al de una moneda de \$500,

la dispersión asistida de estos 10.000 pellets (que contienen 25.000 semillas) se estipula una efectividad de establecimiento del 50 %, evaluada al terminar los seis meses previstos. De esta manera, se obtendrían 12.500 plántulas de especies vegetales nativas creciendo en la parcela seleccionada. (Minambiente, 2021).

El dron que se implementara para las pruebas piloto de diagnóstico es de referencia **DJI AIR 2S ADS-B** destaca por su sensor de 1 pulgada, que permite grabar videos en **5.4k a 30 fps** y fotos de **20 mp**. Pesa **595 gramos** y sus dimensiones plegadas: **180 × 97 × 77 mm (largo × ancho × alto)**, cuenta con un sistema de transmisión o3 para una señal de video fluida y confiable, y un sistema de detección de obstáculos en 4 direcciones.

Figura 38

Pruebas iniciales de funcionamiento



Nota. Elaboración propia

Figura 39

Sobrevuelo inicial área de intervención



Nota. Elaboración propia

Figura 40

Área con leve afectación levantamiento dron



Nota. Elaboración propia

Las imágenes obtenidas, nos dieron un panorama inicial sobre el estado del páramo debido que se logró observar en diferentes puntos afectación de las especies como se muestra a continuación:

Figura 41

Especies nativas afectadas levantamiento



Nota. Elaboración propia

Figura 42

Imagen ortogonal sobrevuelo dron N°1



Nota. Elaboración propia.

Figura 43

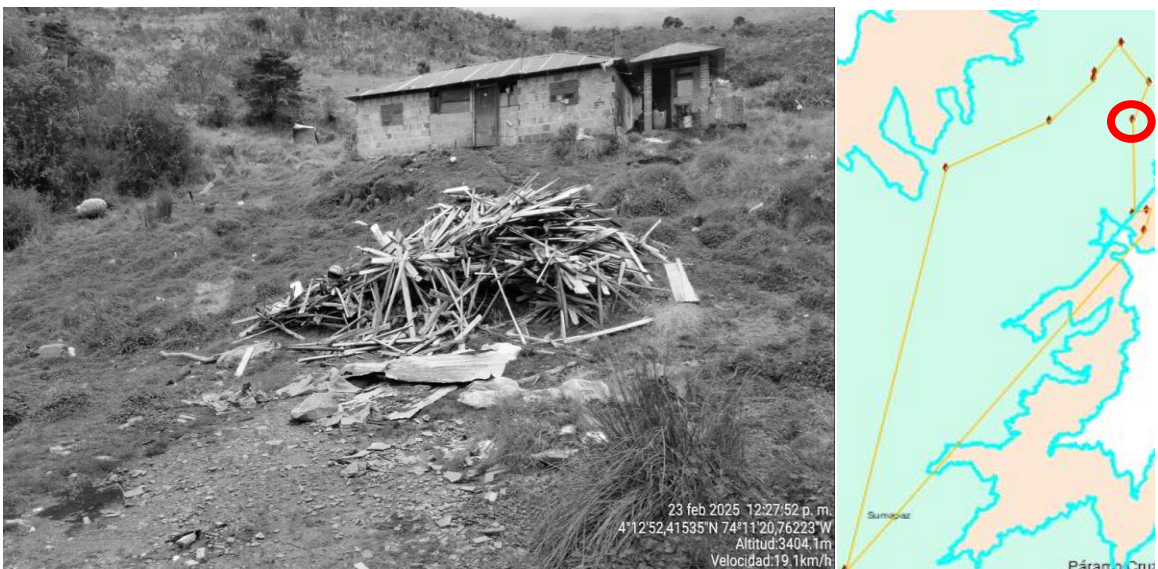
Imagen ortogonal sobrevuelo dron N°2



Nota. Elaboración propia.

Figura 44

Casa N°5 zona de Nazareth personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Adicional se evidencio un hotel para visitantes que se desean hospedarse en el páramo de Sumapaz, también se observó presencia de colegio veredal, salón comunal y secretaria, es decir, el alcance poblacional es importante debido a que se encuentra presencia administrativa nacional para atención de la población. Este fenómeno, permite analizar que con base a los asentamientos humanos el riesgo de afectación del ecosistema aumente debido a las actividades diarias que se realizan por parte de la comunidad para subsistir. Entonces caminan sobre la capa vegetal, meten los carros y las motos a las quebradas, hacen pesca y caza indiscriminada. Como si fuera poco, arrancan y se llevan los frailejones para la ciudad y a cambio dejan toda la basura que traen de allá” (Murcia, 2023).

Figura 45

Hostal Santa Rosa zona de Nazareth personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Figura 46

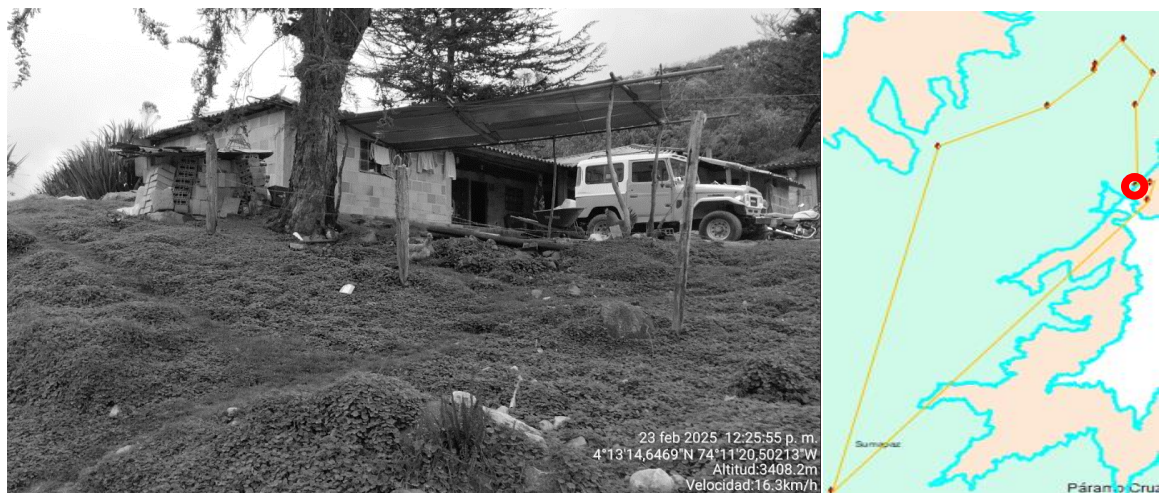
Recorrido carretera principal páramo Sumapaz personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Figura 47

Casa N°6 zona de Nazareth personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

Figura 48

Casa N°7 zona de Nazareth personal encuestado



Nota. Elaboración propia.

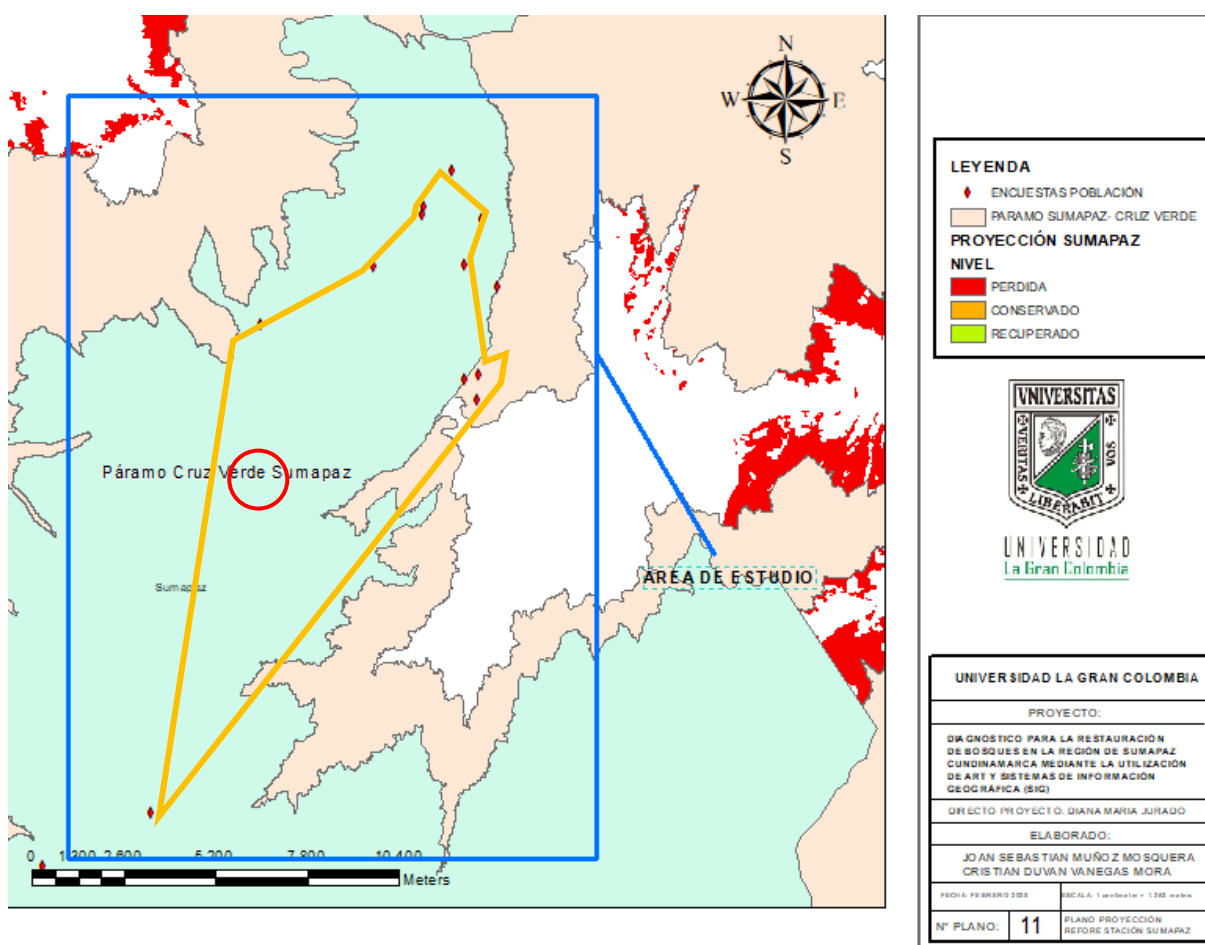
En este punto se logró realizar un acercamiento con los habitantes quienes nos contaron sobre el estado del páramo y fueron quienes alimentaron la información de la encuesta del Survey 123, las figuras presentadas anteriormente son las casas o puntos donde se logró realizar las encuestas con el personal de la zona que estuvo dispuesto a colaborar con el suministro de información. Es importante recalcar, que a medida que se puedan realizar mayores visitas se podrá recolectar más información. Cabe destacar que como se ha mencionado anteriormente, este proyecto busca ser la base de consulta para nuevas investigaciones que estén enfocadas en la misma línea de investigación lo cual permitirá a futuro una implementación directa de la propuesta en el campo que permita realizar procesos de reforestación con los equipos y herramientas adecuados, además de una base de información completa que permita al personal determinar puntos estratégicos para el desarrollo de la propuesta.

FASE III ANÁLISIS DEFORESTACIÓN ÁREA DE ESTUDIO Y MODELAMIENTO PROPUESTA

Como se ha mencionado anteriormente, en la figura 11 se realizó la demarcación del área de estudio para centrar la investigación en dos puntos que se cuentan cercanos a las urbes y son más susceptibles a verse afectados por la interacción con la población aledañas.

Figura 49

Deforestación área de estudio Páramo de Sumapaz



Nota. La figura representa la deforestación (perdida) alrededor del área de estudio del páramo de Sumapaz. Mapas Bogotá.

En el plano anterior, no se evidencia detalladamente la alta deforestación que se tuvo en años anteriores (2019-2020) en el páramo producto de las expansiones de viviendas en el punto, sin embargo, se evidencia el alcance de la reforestación debido que se tiene a analizar debido a la importante área de páramos es imposible el seguimiento constante de sentidos encargadas las cuales no dan abasto en la protección total del páramo lo cual permite que campesinos y la población en general intervenga el área vegetal para fines privados sin importar la afectación que genera en el ecosistema.

Según los informes más recientes del IDEAM hasta el año 2024, entre 2019 y 2020 se presentó una alta deforestación en los páramos de Colombia, causada principalmente por la expansión de la frontera agrícola, la construcción ilegal de viviendas y caminos, así como por actividades ganaderas. Aunque estas afectaciones no siempre se evidencian claramente en los planos disponibles, sí se ha logrado visualizar parte del alcance de los procesos de reforestación impulsados por programas como “1 Millón de Hectáreas Restauradas” y “Páramos: Agua y Vida”, enfocados en la recuperación ecológica con especies nativas y el trabajo comunitario. No obstante, debido a la gran extensión y difícil acceso del ecosistema de páramo, el monitoreo constante resulta complejo, pues las entidades encargadas no cuentan con la capacidad suficiente para vigilar todo el territorio, lo que ha permitido que algunas comunidades campesinas intervengan zonas de vegetación con fines privados, sin tener en cuenta el impacto negativo que esto genera en el equilibrio ecológico. El último informe técnico del IDEAM, publicado en marzo de 2024, señala que, aunque la deforestación nacional ha disminuido en un 29 % respecto al 2022, los páramos siguen siendo altamente vulnerables y requieren con urgencia un fortalecimiento institucional para garantizar su protección efectiva.

El siguiente paso consiste en desarrollar el plan de seguimiento como bien se mencionó en la fase II, el proceso de monitoreo detallado presenta limitaciones, ya que no se cuenta con el tiempo ni

los recursos económicos necesarios para realizar revisiones periódicas con la frecuencia e intensidad requeridas para una actualización precisa y completa de los datos. Por ello, este análisis se basa en el criterio de alcance y las funcionalidades que ofrecen las tecnologías de Sistemas de Información Geográfica (SIG), con el objetivo de garantizar una implementación adecuada y eficiente.

La herramienta seleccionada para el estudio fue *Survey 123* de ArcGIS la cual nos permitirá generar cuestionarios en tiempo real con el fin que los usuarios alimenten la información sobre estado actual del páramo Sumapaz, si bien es cierto, que para el proyecto se tiene una delimitación específica en el área de estudio, es importante que la herramienta permanezca disponible y sea útil en el futuro para estudiantes y/o académicos que deseen continuar con la investigación o en su defecto deseen retroalimentarse de la base de datos obtenida.

La encuesta generada cuenta con los siguientes parámetros de recaudación de información:

- Se solicita al usuario la información sobre la ubicación en tiempo real. Adicionalmente, el usuario no lo verá, pero se tendrá en cuenta la longitud y latitud dado que al momento de recolección y análisis de datos será fundamental para identificar puntos cercanos de eventos de la información.

Figura 50

Ubicación en tiempo real en Survey 123



Nota. Elaboración propia. (<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>)

- Fecha y hora son otro parámetro para tener en cuenta dado que se busca contar con información mensual, trimestral, semestral y anual del área de estudio.
- Estado del área se le solicitará al usuario si evidencia estabilidad de especies, deforestación y reforestación.

Figura 51

Registro actual del área de ubicación

¿QUÉ EVIDENCIAS EN EL ÁREA ACTUAL?

Qué debe hacer?

Seleccione **solo una (1) opción** que represente mejor lo que observa en el área:

- **Reforestación:** si se están sembrando nuevas especies.
- **Deforestación:** si nota tala, pérdida de vegetación o daño ecológico.
- **Estabilidad de especies:** si el ecosistema parece estar en equilibrio sin cambios visibles.
- **¿Para qué sirve?**
- Para clasificar las acciones o el estado ambiental en el lugar.

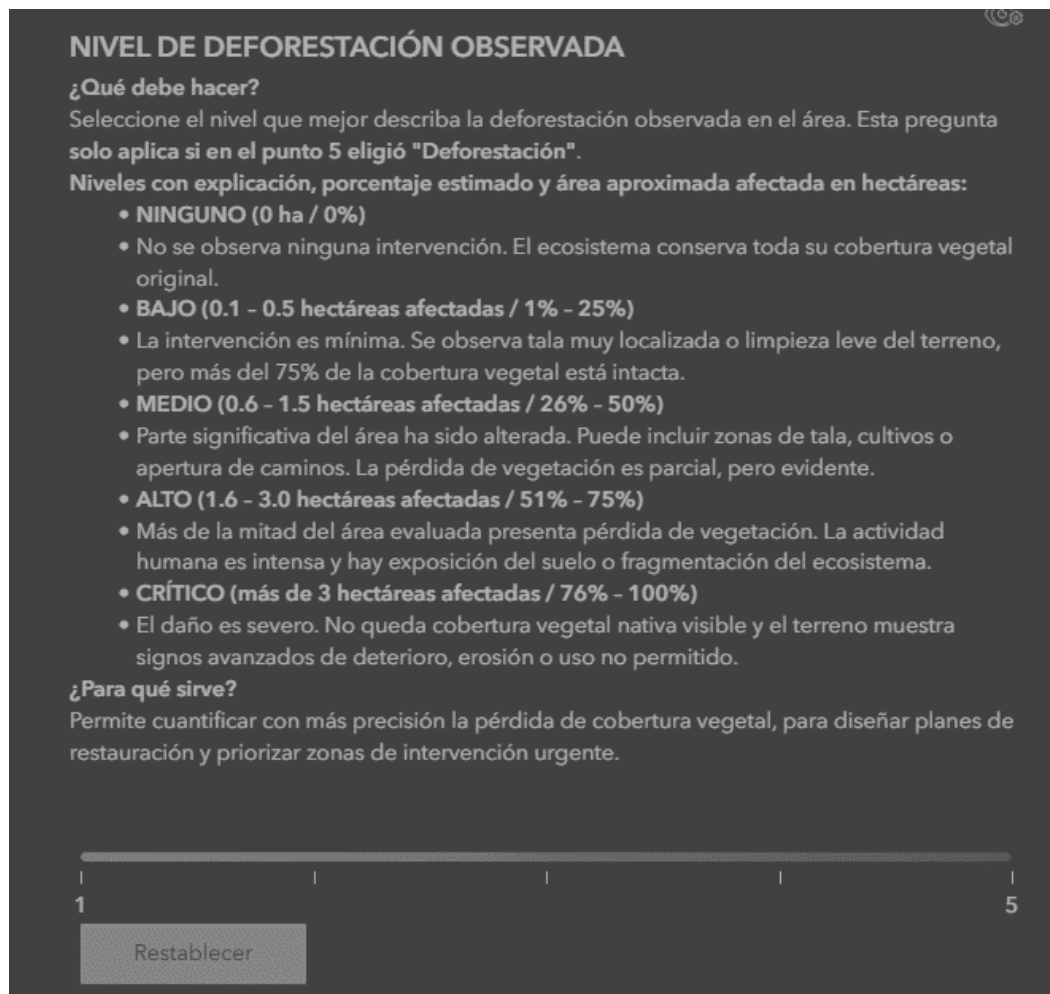
	SEÑALA LO OBSERVADO:
REFORESTACIÓN	☐
DEFORESTACIÓN	☐
ESTABILIDAD ESPECIES	☐

Nota. Elaboración propia. (<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>)

- Si el usuario informa sobre la deforestación tendrá el alcance de registrar la percepción del nivel que evidencia en el área de 1 a 5.

Figura 52

Nivel de deforestación observada



NIVEL DE DEFORESTACIÓN OBSERVADA

¿Qué debe hacer?
Seleccione el nivel que mejor describa la deforestación observada en el área. Esta pregunta solo aplica si en el punto 5 eligió "Deforestación".

Niveles con explicación, porcentaje estimado y área aproximada afectada en hectáreas:

- **NINGUNO (0 ha / 0%)**
• No se observa ninguna intervención. El ecosistema conserva toda su cobertura vegetal original.
- **BAJO (0.1 - 0.5 hectáreas afectadas / 1% - 25%)**
• La intervención es mínima. Se observa tala muy localizada o limpieza leve del terreno, pero más del 75% de la cobertura vegetal está intacta.
- **MEDIO (0.6 - 1.5 hectáreas afectadas / 26% - 50%)**
• Parte significativa del área ha sido alterada. Puede incluir zonas de tala, cultivos o apertura de caminos. La pérdida de vegetación es parcial, pero evidente.
- **ALTO (1.6 - 3.0 hectáreas afectadas / 51% - 75%)**
• Más de la mitad del área evaluada presenta pérdida de vegetación. La actividad humana es intensa y hay exposición del suelo o fragmentación del ecosistema.
- **CRÍTICO (más de 3 hectáreas afectadas / 76% - 100%)**
• El daño es severo. No queda cobertura vegetal nativa visible y el terreno muestra signos avanzados de deterioro, erosión o uso no permitido.

¿Para qué sirve?
Permite cuantificar con más precisión la pérdida de cobertura vegetal, para diseñar planes de restauración y priorizar zonas de intervención urgente.

1 5

Restablecer

Nota. Elaboración propia. (<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>)

- Especies por sembrar, en este apartado se espera que el usuario al haber escogido *reforestación* deberá informar sobre el tipo de especie que va a plantar y la cantidad

estimada desde 10 especies hasta 1000 especies en total diferenciadas entre diferentes rangos.

Figura 53

Selección especies a sembrar

PLANTA A SEMBRAR

¿Qué debe hacer?
Complete esta sección **solo si se encuentra realizando labores de reforestación** en el área.
Debe indicar dos cosas:
Cantidad aproximada de ejemplares que va a sembrar o ha sembrado (elijan un rango):

Especie vegetal utilizada para la reforestación (seleccione una de las siguientes):

- **Frailejones:** planta representativa del páramo, esencial para retención de agua y conservación del ecosistema.
- **Guaimaro:** especie nativa útil para restauración ecológica y alimentación de fauna.
- **Cucharo:** árbol nativo de rápido crecimiento, importante para recuperar coberturas.
- **Corneto:** especie del ecosistema altoandino, usada en procesos de restauración.

¿Para qué sirve?
Esta información es clave para hacer seguimiento a las especies sembradas, evaluar su adaptación y medir el impacto positivo de las acciones de reforestación en el páramo.

	10-50 ESPECI MENES	51-100 ESPECI MENES	101-200 ESPECI MENES	201-300 ESPECI MENES	301-500 ESPECI MENES	500-1000 ESPECI MENES	MÁS DE 1000 ESPECI MENES
FRAILEJONES	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
GUAIMARO	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CUCHARO	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐
CORNETO	☐	☐	☐	☐	☐	☐	☐

Nota. Elaboración propia. (<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>)

- Imagen actual: Es requisito que el usuario reporte mediante una imagen el estado en tiempo real del área donde se encuentran previo al envío.
- Archivos e informes: En este apartado se podrá agregar archivos o informes más detallados que ayuden a complementar la información existente.
- Comentarios: El usuario podrá agregar un comentario, observación o anotación que evidencie en el área y que contribuya en la retroalimentación del análisis de datos.

Figura 54

Información soporte adicional de encuesta Survey 123

AGREGUE IMAGEN DE SU REPORTE*

¿Qué debe hacer?
Suba una **imagen clara del lugar observado**, puede ser una fotografía del área afectada o reforestada.

¿Para qué sirve?
Provee evidencia visual para verificar la información reportada.

Soltar image aquí o seleccionar image

ARCHIVOS, INFORMES DEL AREA

Esta opción es OPCIONAL.

¿Qué debe hacer?
Si tiene documentos, estudios o análisis del área (en formatos PDF, Word, Excel, etc.), puede cargarlos aquí.

¿Para qué sirve?
Enriquece la información con datos técnicos o análisis adicionales hechos en el sitio.

Soltar archivo aquí o seleccionar archivo (pdf, doc, docx, xls,xlsx, pptx, ppt, txt)

AGREGA UN COMENTARIO

Si deseas puedes agregar un comentario de lo que estés evidenciando en el momento.

Enviar

Nota. Elaboración propia. (<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>)

La encuesta previamente presentada se puede consultar y diligenciar mediante el siguiente enlace:

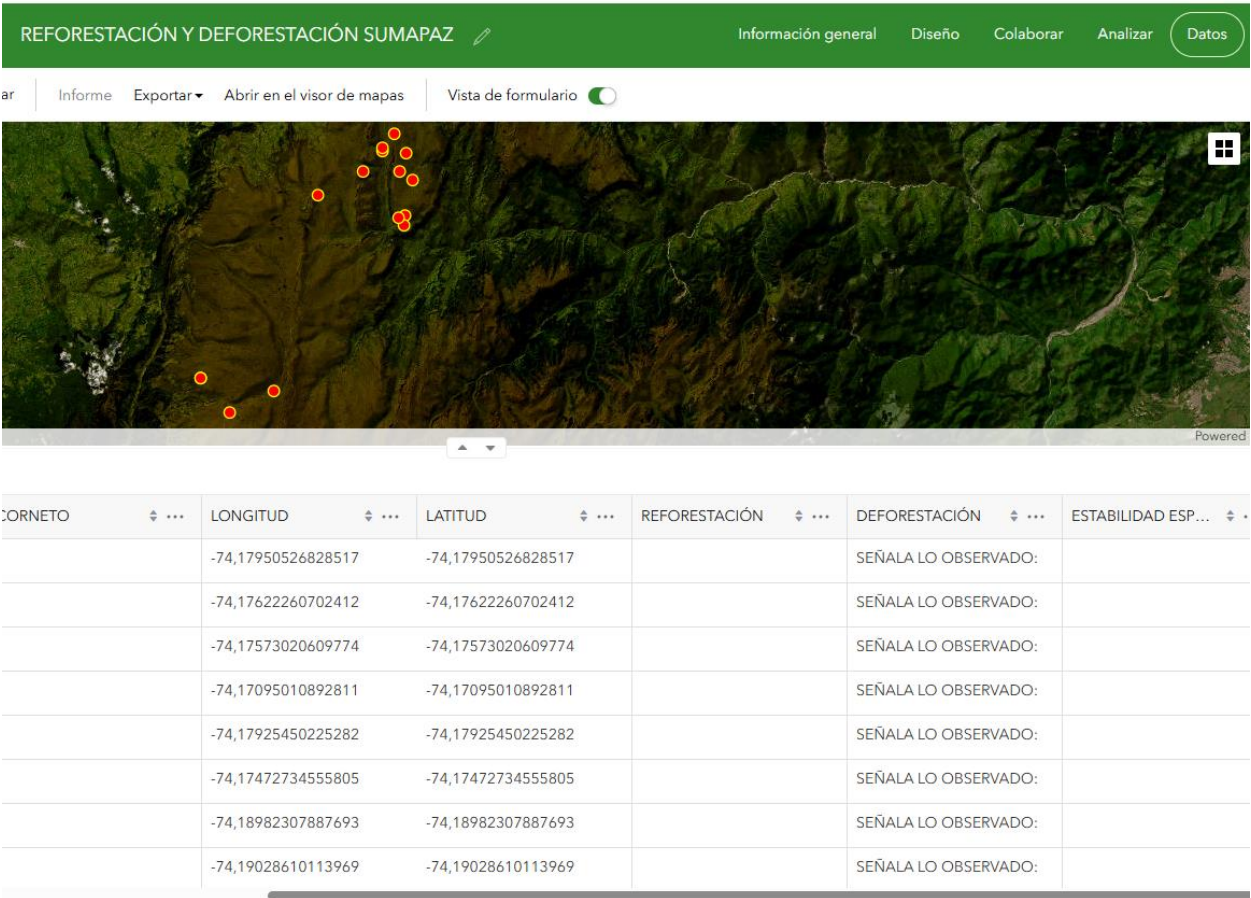
<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>

En este punto se informa que los proceso de reforestación que mencionaron los encuestados fueron con base en el contrato No 120-2023 prestar el servicio para la restauración ecológica, el cual fue proceso piloto de educación ambiental para la restauración ecológica, y así motivar a la comunidad a investigar, conocer, apropiar y reflexionar sobre el entorno ecológico, social y cultural del territorio desarrollado por Ecoflora S.A.S. se realizaron 9 talleres prácticos de educación ambiental, con los estudiantes en una institución educativa y con los dos grupos de restauradores que implementaron las estrategias de restauración en los predios seleccionados en las UPR Río Blanco y Río Sumapaz.

El objetivo final es realizar análisis detallados con los datos y estadísticas obtenidas permitirán obtener reportes con mayor precisión y serán base de consulta e insumos descargables para informes del estado actual del Sumapaz en cuanto a la reforestación y deforestación en el área de intervención. No se descarta que a futuro esta información sea montada en las bases de sistema de información geográfica o se genere como visor para consulta de estudios y/o análisis. A continuación, se evidencian datos base de ejemplo tomadas en los dos días de visita el 18 de enero de 2025 y el 23 de febrero de 2025.

Figura 55

Información obtenida de encuestas Survey 123

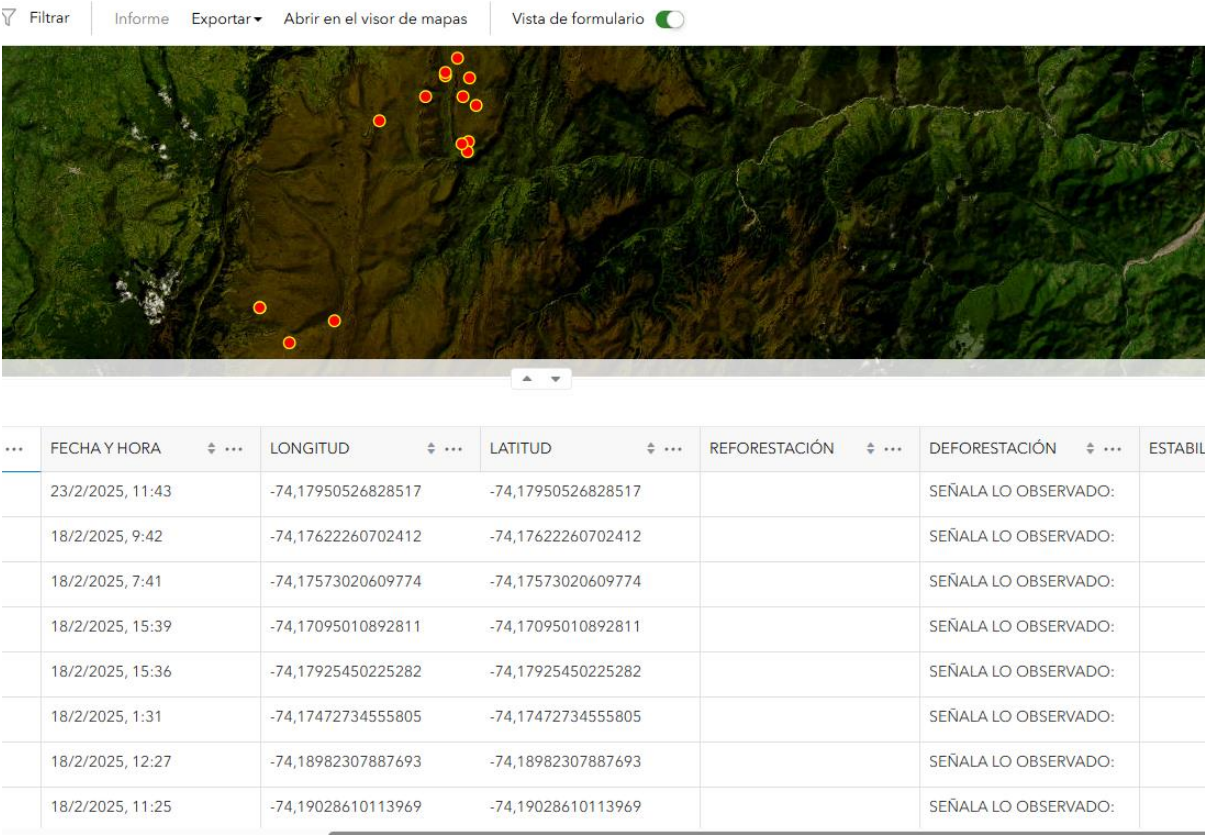


. Nota. Elaboración propia. (<https://survey123.arcgis.com/share/f53cf0dbbd7c4660b87187519c9f7011?open=menu>)

En la figura 44, se evidencia el resultado de la recolección de la información con ayuda de la encuesta generada en Survey donde es posible alimentar los atributos que contribuyen a especificar información precisa de un punto específico del área de intervención que obliga al usuario a especificar su ubicación e informar el estado actual según evidencian, es decir, como bien se muestra desde la figura 35 hasta la figura 39 se debe alimentar de forma obligatoria esta serie de datos que dividen el aspecto de reforestación y deforestación en tiempo real.

Figura 56

Información soporte adicional encuesta Survey 123



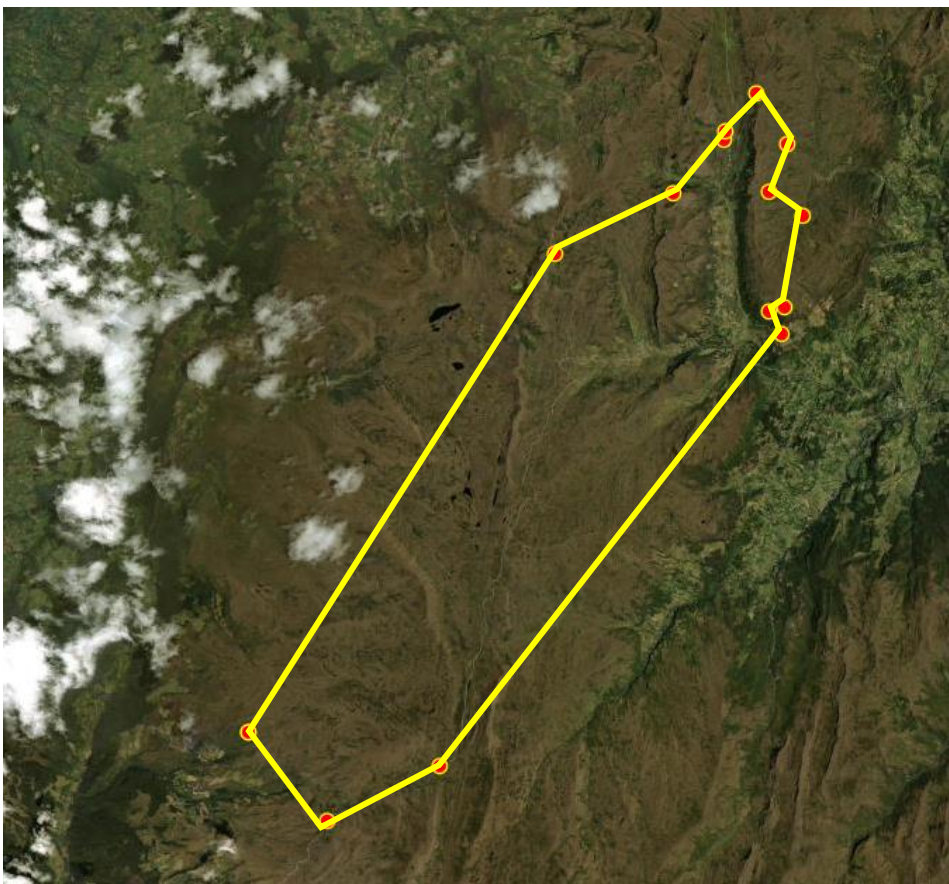
Nota. Elaboración propia.

La información obtenida será el insumo de una nueva capa que contiene información detallada y podrá alimentar los nuevos mapas que generen y permitan realizar análisis precisos en mayor proporción debido que los existentes presentan diferencias entre años y no se actualizan de forma pertinente, caso actual como lo es el desarrollo de la presente investigación la cual no contaba con una biblioteca SIG numerosa, es por ello que la implementación de este modelo de recolección de información será fundamental para nuevas investigaciones como bien se ha mencionado anteriormente.

Se puede apreciar que el área de estudio seleccionada presenta las características necesarias mencionadas en el marco geográfico que afectan el ecosistema debido a la intervención de actividades agropecuarias, zonificación e incendios. Se procede a descargar la información de las encuestas las cuales poseen información de la ubicación del encuestado mediante su latitud y longitud como se mostró en la figura 55. A continuación, se identifica polígono de intervención:

Figura 57

Polígono conformado por coordenadas recolectadas de la ubicación Survey 123



Nota. Elaboración propia. ArcGis Pro

La aplicación Survey 123 de ArcGIS permite a los usuarios realizar la descarga en los siguientes formatos: CSV, Excel, KML, SHP y file Geodatabase lo cual permite realizar estudios y análisis gráficos con la información numérica obtenida en campo.

Figura 58

Tipos de formatos a exportar la información de Survey 123



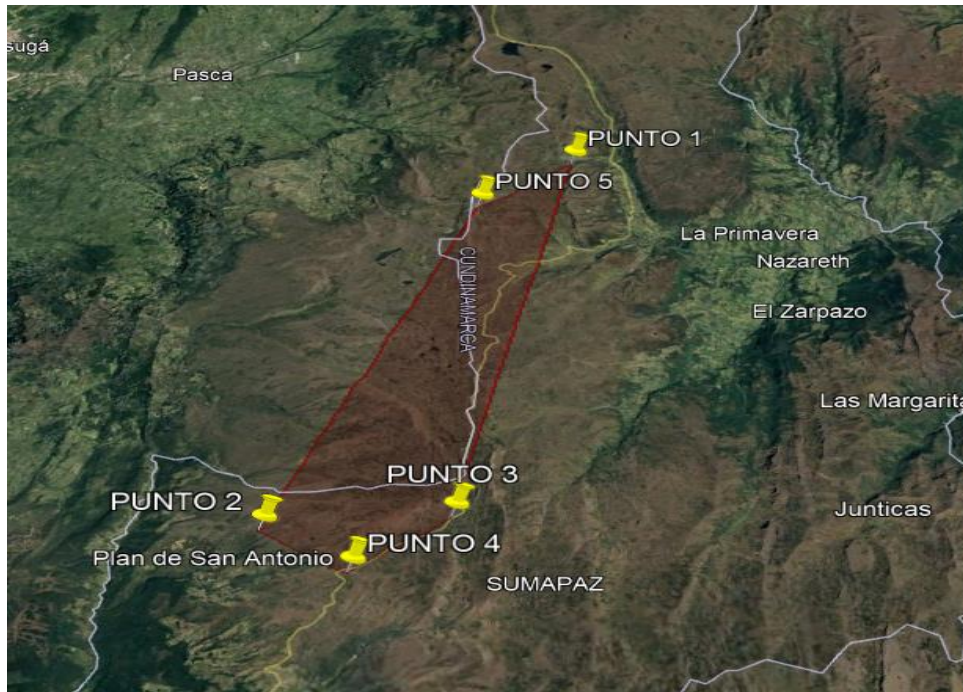
Nota. Elaboración propia.

La información obtenida permite realizar una planeación de vuelo aproximada con el fin que el dron tenga la información inicial e implemente las coordenadas geográficas obtenida y con la programación asignada este pueda realizar el recorrido en sitio y realice el proceso de reforestación con las cantidades de semillas seleccionadas previamente según sea el área de impacto que se desea intervenir, es decir, al dron se le asignará previamente la ubicación precisa, tipo de planta y cantidad a reforestar con base en la información obtenida de las encuestas de Survey 123 que permite anexar un soporte de registro fotográfico que complementa la información remitida por el usuario y así se pueda verificar su autenticidad. Es importante mencionar que adicional a este proceso, se realizaran sobrevuelos con los drones para aumentar más aun con un registro fotográfico y videos de las zonas afectadas lo cual brindara certeza de realizar los procesos de reforestación en las áreas seleccionadas.

La información obtenida fue descargada en formato KML y SHP lo cual permitió realizar una visualización panorámica en la herramienta Google Earth y en ArcGIS donde se indicaron las coordenadas transformadas de decimales a grados, minutos y segundos para cada uno de los puntos seleccionados en los recorridos realizados y para ello se les asignó un nombre. Se realizó el polígono que es la representación del área visitada donde se evidenció mayor afectación del ecosistema por la intervención de ganadería principalmente y el cultivo de alimentos. La información se muestra a continuación:

Figura 59

Puntos obtenidos coordenadas en Google Earth

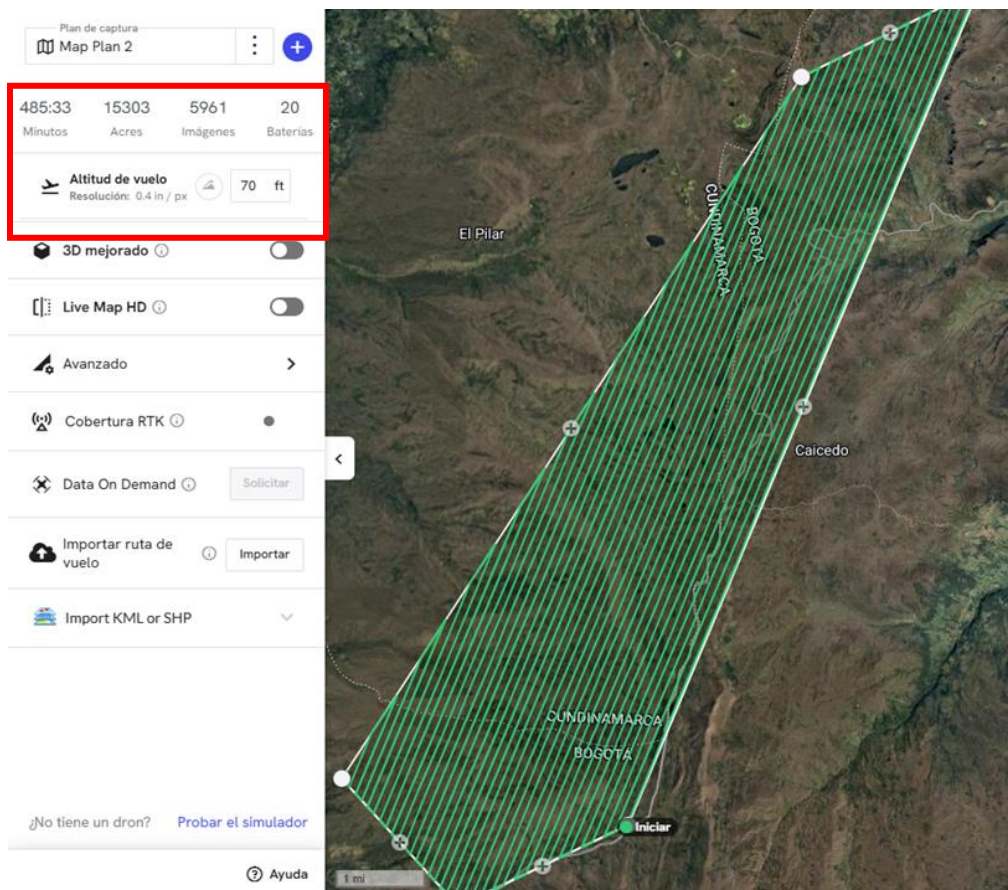


Nota. Elaboración propia.

Dicho lo anterior, se procede a realizar una simulación de vuelo con base en la herramienta Drone Ploy la cual permite generar recorridos en el área que se le asigne. En este punto el dron cuenta con la información únicamente del área generada en el polígono de la figura 55, el programa a su vez permite establecer como lo muestra en el panel izquierdo la altitud, asignación de un recorrido tipo cuadrícula y nos genera un reporte del área a recorrer con el tiempo respectivo que tardará en realizarlo.

Figura 60

Vista satelital aproximada del área de estudio



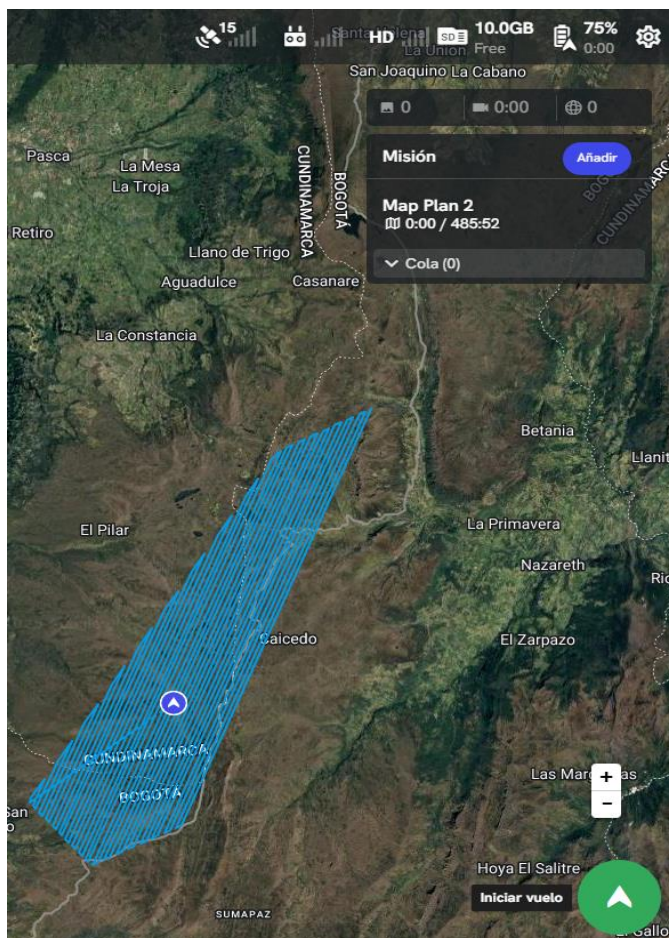
Nota. Elaboración propia.

El recorrido asignado se evidencia una duración de **485 minutos** que en horas es aproximadamente **8 horas**, el programa estima una cantidad de 185 líneas de vuelo para un total de **5961 fotos** en calidad de **72 ppp** (pixeles por pulgada), es decir, **96 fotos por cada km2** y **32 fotos por cada línea** de sobrevuelo a una altura de **70 ft (21,33 m)** . Es fundamental la implementación de los drones los cuales cuentan con la capacidad de realizar tareas en un tiempo muy inferior al que le

tardaría a un ser humano en realizar producto de situaciones como accesibilidad, tiempo de transporte, entre otros. El trazado realizado para el área de sobrevuelo no cuenta con traslajos debido que genera mayor desgaste de baterías, aumento de almacenamiento de información y tiempo, por tanto, para el alcance del diagnóstico es pertinente optimizar los recursos. A continuación, se anexa registro fotográfico del proceso de la simulación realizada con el dron y la ruta previamente asignada:

Figura 61

Inicio simulación dron ruta asignada



Nota. Elaboración propia.

A continuación, se anexa registro fotográfico del sobrevuelo realizado. El área seleccionada que corresponde a el área indicada en la figura 48, la cual fue determinada con base en los análisis preliminares generados en la visita realizada el día de mayo del 2025, y que permitió generar la figura 32 la cual representa los límites y avance de la deforestación producto de actividades ganaderas, por tanto, se realizó el sobrevuelo en el área y se obtuvo el siguiente registro fotográfico.

Figura 62

Imagen aérea N°1 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia. Tomadas con el dron

Figura 63

Imagen aérea N°2 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 64

Imagen aérea N°3 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 65

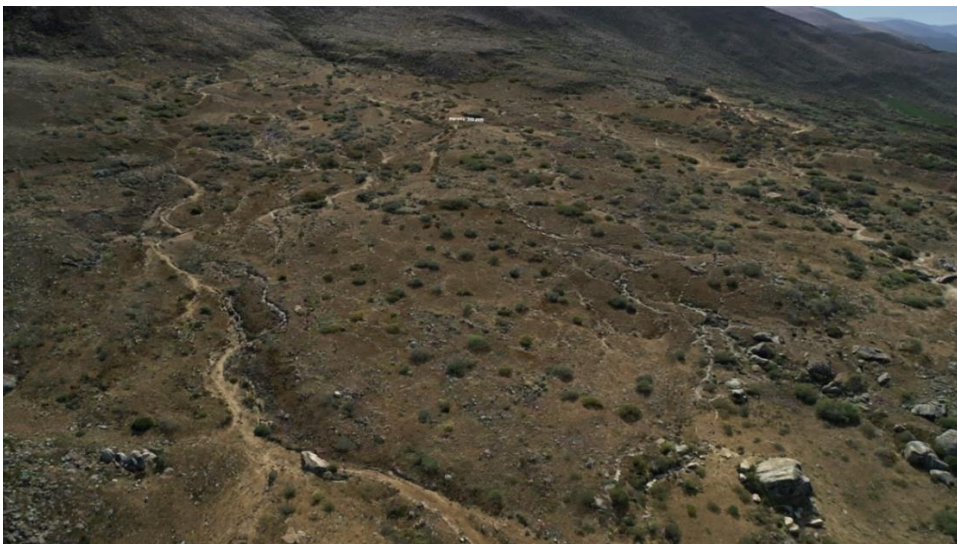
Imagen aérea N°4 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 66

Imagen aérea N°5 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 67

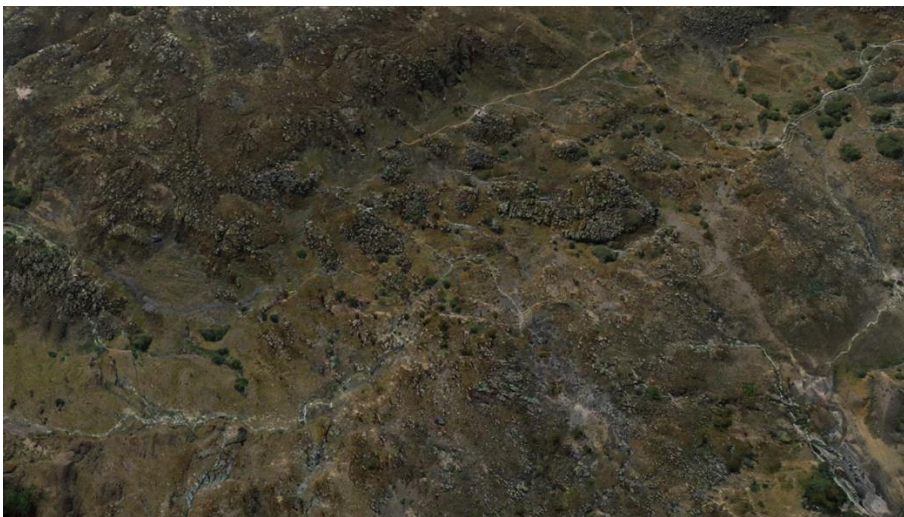
Imagen aérea N°6 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 68

Imagen aérea N°7 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 69

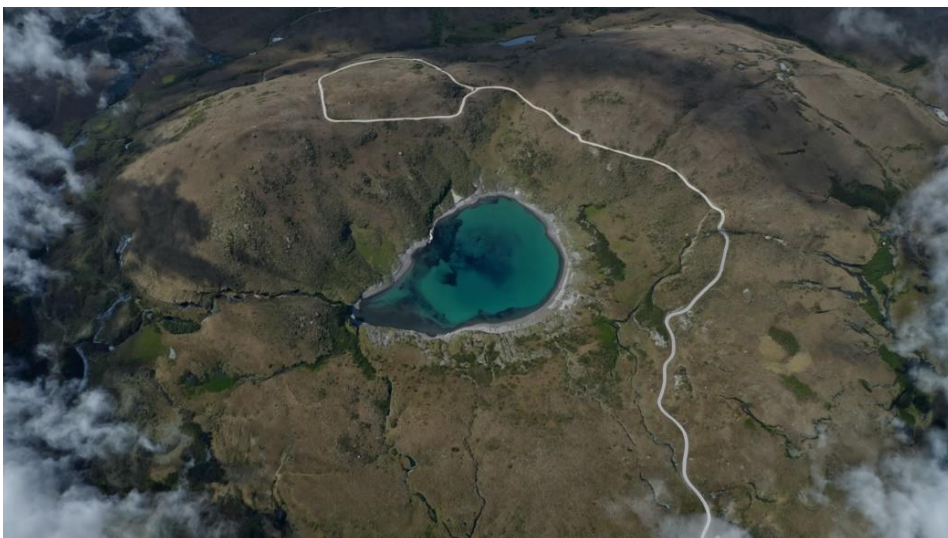
Imagen aérea N°8 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 70

Imagen aérea N°9 sobrevuelo dron área deforestación



Nota. Elaboración propia.

Figura 71

Imagen aérea N°10 sobrevuelo dron área deforestación

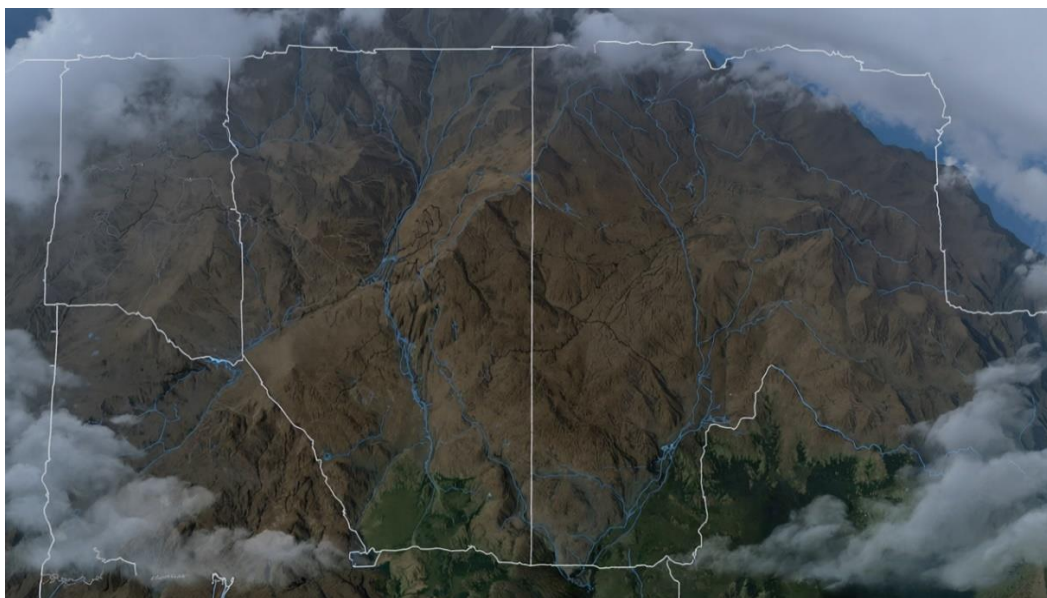


Nota. Elaboración propia.

Las imágenes anteriores pueden ser consultadas mediante la herramienta **Story Maps** de ArcGIS, la cual permite realizar un recorrido específico de los puntos estudiados mediante los sobrevuelos con dron gracias a la ubicación obtenida mediante las encuestas de *Survey 123* lo cual fue clave para la selección del área de estudio. A continuación, se anexa el enlace para consulta de la información: <https://arcg.is/0yvfgD1>

Figura 72

Imagen aérea N°11 sobrevuelo dron área deforestación delimitados



Nota. Elaboración propia.

ALTERNATIVA SELECCIONADA

Una vez revisadas y evaluadas las alternativas, basadas en la (tabla N°2) del presente documento y la información analizada del marco teórico se establece que la propuesta de la dispersión aérea con drones utilizando el método Fukuoka se destaca como la alternativa más adecuada para la restauración de ecosistemas en la zona elegida para trabajar de la localidad 20 Páramo de Sumapaz. Este enfoque ofrece una alta precisión en la dispersión, asegurando que las semillas se depositen en áreas óptimas para su desarrollo y en las zonas afectadas. Además, las bolas de arcilla protegen las semillas de factores adversos, incrementando significativamente la tasa de germinación, de este modo se reduce la necesidad de intervenciones posteriores. Aunque la preparación de las bolas de arcilla y las limitaciones de carga de los drones pueden representar desafíos, los beneficios en términos de

eficiencia, eficacia y respeto al medio ambiente superan estas desventajas, especialmente en terrenos de difícil acceso.

El dron implementado para las pruebas piloto de diagnóstico fue el DJI Air 2S ADS-B, el cual se destaca por su sensor de 1 pulgada, que permite la captura de video en resolución 5.4K a 30 fps y fotografías de 20 megapíxeles. Con un peso de 595 gramos y dimensiones plegadas de 180 × 97 × 77 mm, este equipo resultó ser una herramienta eficiente en campo, facilitando el levantamiento de información aérea de forma ágil y precisa. Durante la ejecución de los sobrevuelos, se programaron un total de 185 líneas de vuelo, obteniendo 5.961 imágenes a una resolución de 72 ppp (píxeles por pulgada), lo que equivale a 96 fotografías por kilómetro cuadrado y 32 imágenes por cada línea de sobrevuelo, considerando una altura de vuelo de 70 pies (aproximadamente 21,33 metros). La cobertura alcanzada fue de 61,92 km², lo que permitió generar una base de datos significativa.

Previo a los vuelos, se aplicaron encuestas estructuradas mediante la plataforma Survey, y se elaboraron planos utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG). Estos insumos fueron fundamentales para orientar las misiones de vuelo mediante la ubicación de los puntos (coordenadas) obtenidos en las encuestas lo cual permitió priorizar zonas críticas y optimizar la captura de datos. Gracias a esta integración metodológica, se logró seleccionar la alternativa de intervención más rápida y viable. Con base en los resultados del diagnóstico, se definió la implementación del método Fukuoka para procesos de reforestación, estimando una capacidad de intervención de 5 a 10 hectáreas por día, con una eficiencia proyectada del 65 %. Esta estrategia permitió completar las diferentes fases del proyecto en un periodo total de 5 meses.

El costo total del proyecto fue de \$3.230.750, siendo el concepto más representativo el alquiler del dron, el cual, a pesar de su valor, resultó esencial para el avance y la consolidación de los objetivos planteados, al permitir un monitoreo rápido, detallado y de alta resolución que a su vez redujo tiempos en sobrevuelos para los diagnósticos del área de estudio.

FASE IV. EVALUACIÓN Y AJUSTE: EFECTIVIDAD Y ALCANCE DE LOS DRONES

Con base en la información recolectada y obtenida de la investigación, se realiza una retroalimentación en cuanto al cumplimiento de los objetivos planteados se evidencia un avance importante en la investigación con los recursos disponibles que permitieron realizar un diagnóstico del área de intervención y que además será la base de nuevas investigaciones que se desarrollen en el futuro. La ilustración presentada hace referencia a el cronograma de actividades el cual se planifica y organiza las tareas que serán llevadas a cabo para la realización de este proyecto; Se encuentra dividido por fases de la uno a la cuatro para así tener un mejor control de lo que se va a realizar. Donde la fase uno abarca Investigación y diagnóstico, la fase dos Diseño y cálculo tránsito, la fase tres Modelamiento de propuesta y por último la fase cuatro Evaluación y ajustes. El desarrollo de todas las fases se encuentra comprendido en un tiempo de 5 meses.

El presupuesto tentativo abarca a plenitud todas las fases, lo cual no es necesario realizarle ajustes hasta la presente fecha. Sin embargo, si es necesaria la contribución económica de un tercero para la compra o alquiler de los drones que se usarán para llevar a cabo el proyecto.

Figura 74

Presupuesto del proyecto

PRESUPUESTO ESTIMADO EJECUCIÓN	
FASES (ACTIVIDADES)	Presupuesto Estimado (COP)
FASE 1 Investigación y diagnóstico	\$ 650.000,00
Revisión normativa y directrices	\$ 100.000,00
Estudio de antecedentes	\$ 200.000,00
Investigación área de estudio	\$ 250.000,00
Definición y Planificación de ejecución	\$ 100.000,00
FASE 2 Diseño y cálculo tránsito	\$ 1.320.750,00
Inicio visita en campo del proyecto	\$ 300.750,00
Levantamiento de condiciones existentes	\$ 200.000,00
Adquisición programas SIG	\$ 620.000,00
Estudios de alcance tecnología SIG	\$ 200.000,00
FASE 3 Modelamiento de propuesta	\$ 800.000,00
Estado y seguimiento modelo implementación	\$ 100.000,00
Diseños en programas SIG	\$ 200.000,00
Selección de especies de arboles	\$ 50.000,00
Ánalisis de vuelo (simulación programa)	\$ 150.000,00
Diseños definitivos	\$ 300.000,00
FASE 4 Evaluación y ajustes	\$ 460.000,00
Verificar cumplimiento objetivos	\$ 10.000,00
Validación de costo y programación	\$ 200.000,00
Ánalisis de resultados	\$ 150.000,00
Elaboración informe final	\$ 100.000,00
TOTAL PROYECTO	\$ 3.230.750,00

Nota. Elaboración propia.

ANÁLISIS DE RESULTADOS

Durante el avance de la investigación se logró determinar que la información existente sobre el estado de los páramos es inconsistente debido que no se actualiza de forma frecuente lo cual impide realizar investigaciones con fundamentos y bases sólidas, no obstante, sin embargo, con la información encontrada se logró realizar el análisis gráfico del estado actual del páramo en cuanto a la deforestación que fue la ruta inicial para fomentar la implementación del aplicativo *Survey 123* el cual es fundamental dado que es la herramienta que permitió realizar las proyecciones de reforestación debido a la información técnica y numérica que permitió recolectar en tiempo real lo siguiente:

Tabla 6

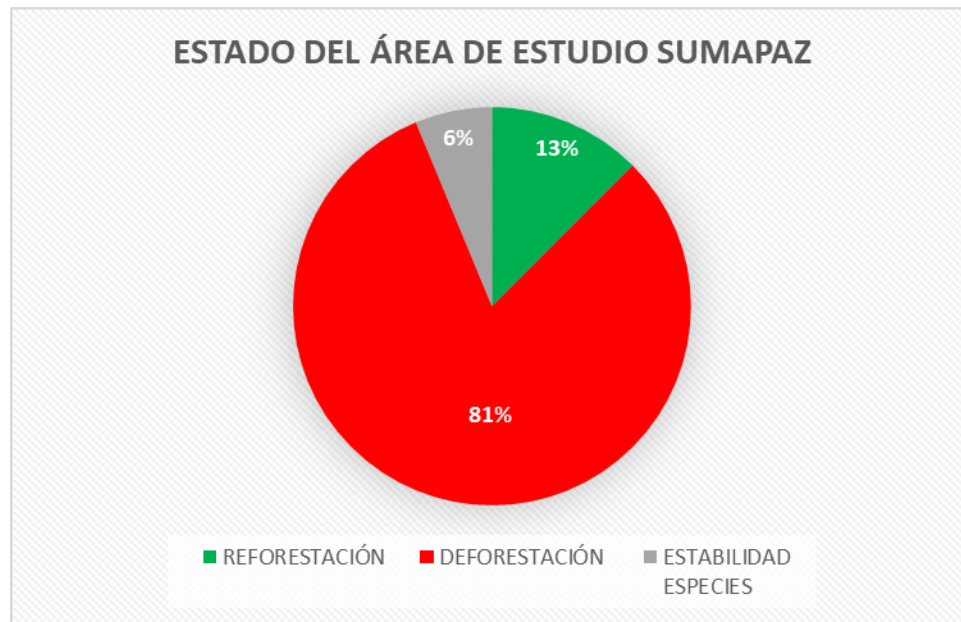
Procesos observados área de estudio

PROCESOS	CANTIDAD
REFORESTACIÓN	2
DEFORESTACIÓN	13
ESTABILIDAD ESPECIES	1

Nota. Adaptado de encuesta Survey 123 deforestación y Deforestación Sumapaz 2025.

Figura 75

Estado del área de estudio Sumapaz



Nota. Adaptado de datos obtenidos de la encuesta Survey 123 Deforestación y deforestación Sumapaz 2025.

El 81% de la deforestación representa una importante pérdida de la cobertura vegetal dentro del área de estudio seleccionada lo cual corresponde a las intervención de diferentes factores que se desarrollaron en la presente investigación principalmente en el marco geográfico donde se discriminaron las áreas aferentes que presentaban intervención directa o parcial en actividades de expansión agrícola, ganadera; el aumento de la zonificación que a la par desencadenan incendios forestales provocando la degradación del terreno natural.

Por otra parte, se evidencia un proceso de reforestación mediante campañas de concientización y siembra de Ecoflora S.A. como se menciona en la página 88, aunque se están llevando a cabo acciones, la cifra de 13% refleja que los esfuerzos no son capaces de contrarrestar el ritmo de la reforestación.

Finalmente, la estabilidad de especies con un valor de 6% refleja que una pequeña área del territorio conserva condiciones estables del terreno natural, sin embargo, es propenso a verse afectado por el gran alcance de los procesos de deforestación. Con el fin de comprender el alcance de la afectación de las áreas, se realizó el análisis de datos obtenidos del apartado “nivel de deforestación observada” de la encuesta de Survey 123 donde se obtuvo:

Figura 76

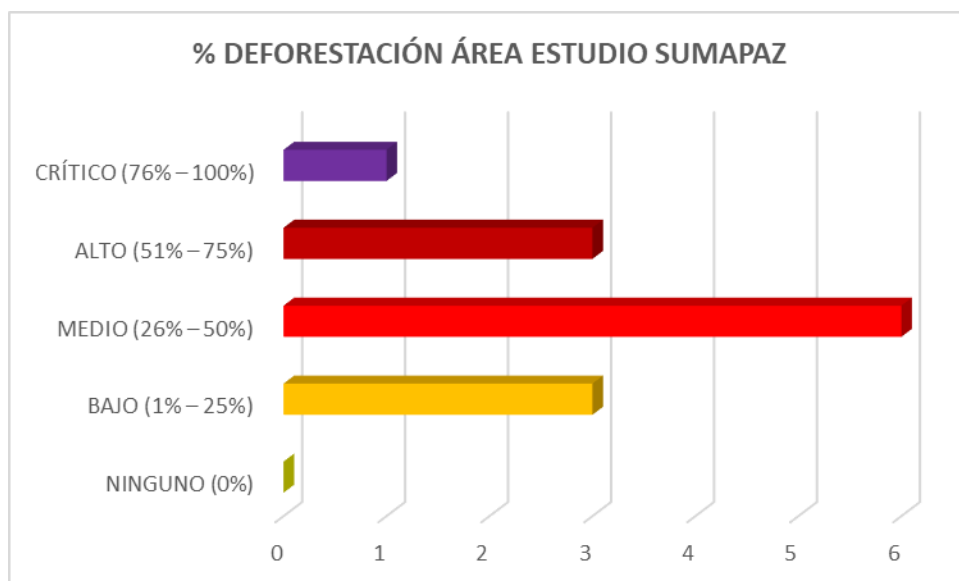
Nivel deforestación área de estudio

NIVEL DEFORESTACIÓN	CANTIDAD
NINGUNO (0%)	0
BAJO (1% – 25%)	3
MEDIO (26% – 50%)	6
ALTO (51% – 75%)	3
CRÍTICO (76% – 100%)	1

Nota. Adaptado de encuesta Survey 123 deforestación y Deforestación Sumapaz 2025.

Figura 77

Porcentaje deforestación área estudio Sumapaz



Nota. Adaptado de datos obtenidos de la encuesta Survey 123 Deforestación y deforestación Sumapaz 2025.

Se evidencia un predominio del nivel de deforestación medio lo cual indica que una gran parte del territorio ha sido afectado de forma importante, sin embargo, persiste una cantidad de vegetación lo cual es una oportunidad para implementar medidas de mitigación.

El rango alto implica a una pérdida de más de un cuarto de la mitad de la vegetación original sumando el rango medio mencionado anteriormente, y que a este se suma el rango crítico a pesar de ser menor a los valores anteriores, alerta de una degradación extrema. Es importante, que las áreas con bajo nivel de deforestación se les realice un seguimiento que impida la intervención que afecte la cobertura vegetal.

Con base en la información anterior, se implementaron los SIG, que permitieron identificar las zonas más vulnerables con alta degradación en la localidad de Sumapaz. Donde las principales causas de afectación incluyen:

- Expansión agrícola y ganadera.
- Deforestación no controlada.
- Incendios forestales y cambios en el uso del suelo.

El análisis de imágenes satelitales de las figuras N° 1,2,3,16 y 17 permitió establecer áreas prioritarias para la restauración, basándose en criterios como la cobertura vegetal remanente, proximidad a fuentes hídricas y conectividad ecológica. Para la primera fase la recopilación de información a partir de las imágenes satelitales, cartografía ambiental y las bases de datos del IDEAM, IGAC y el SIAC además de las fuentes externas consultadas. Se evidencia que los hallazgos principales son los siguientes:

- Zonas Críticas: Se identificaron áreas con alta deforestación, principalmente en las cercanías de actividades agropecuarias y en sectores con cambios en el uso del suelo.
- Impacto en la Biodiversidad: La pérdida de la cobertura vegetal ha afectado el correcto ciclo ecológico, donde se ve involucrada la fauna local y la regeneración natural.

El uso de drones en trabajos de restauración ecológica ha probado ser un método eficaz y de alto impacto en la dispersión de semillas, permitiendo así abarcar grandes áreas de tierra en menos tiempo. Según estudios y pruebas realizadas en otros lugares como lo son México, Canadá y España, un dron hecho para plantar árboles puede cubrir cerca de una hectárea en menos de 20 minutos, con una habilidad de dispersión hasta 500 semillas por vuelo esto según informe de Autopista año 2023. En

pruebas hechas en el Parque Natural del Alto Tajo, España, ¡se vio que usar drones especiales ayuda a plantar 1000 árboles en solo cinco horas! Esto demuestra lo eficiente que puede ser este método y lo rápido que es. (InfoDron, 2018). Estas historias destacan el valor de estos vehículos aéreos no tripulados para ayudar en áreas afectadas por la pérdida del ecosistema y la pérdida de flora. Ahorrando tiempo y dinero comparado con formas clásicas de siembra manual.

Dicho lo anterior, se procedió a realizar una estimación de cuanto es la reforestación actual y la proyectada, posteriormente al finalizar se indica que cantidad se espera obtener con la implementación del presente proyecto que contrarresta los efectos de la afectación ambiental actual. A continuación, se registra la (tabla N°3) donde se evidencia la cantidad de deforestaciones actuales presentadas en los años cercanos al 2025 los cuales son fundamentales para realizar una comparación del impacto específico, el método implementado será la **regresión lineal** debido que permite estimar o predecir valores esperados a futuro.

Tabla 7

Análisis periodos de deforestación Sumapaz

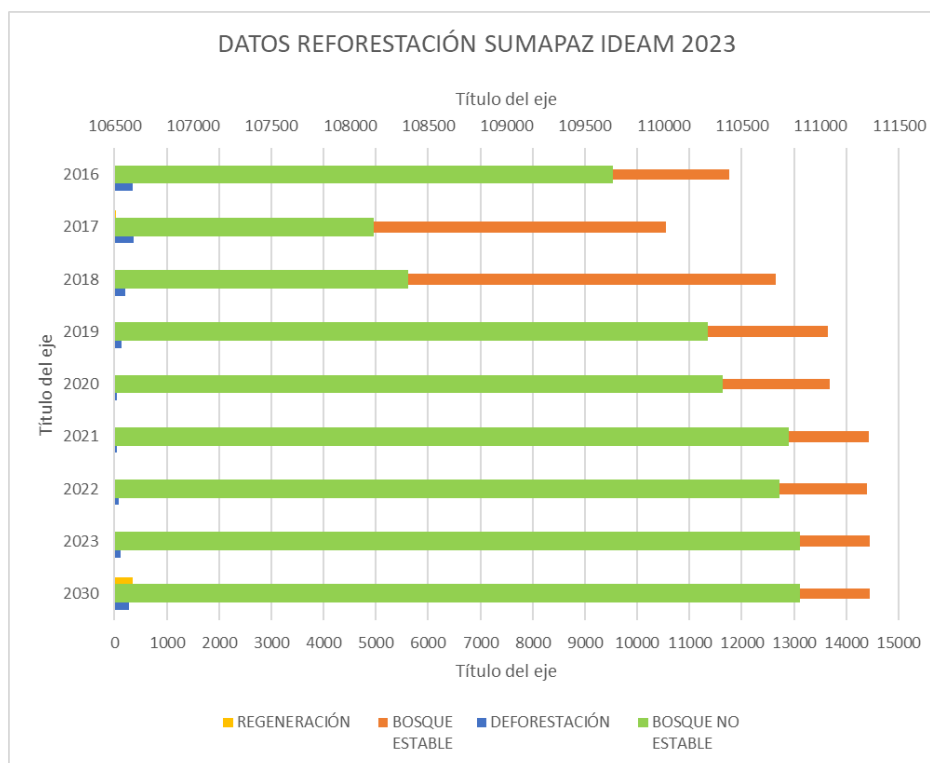
Unidad (HA) hectáreas					
PERÍODO 1	PERÍODO 2	DEFORESTACIÓN	BOSQUE ESTABLE	BOSQUE NO ESTABLE	REGENERACIÓN
2022	2030	205	14445	110873427	0
2022	2023	112	14445	110873427	0
2021	2022	91	14389	110741789	0
2020	2021	56	14432	110793016	0
2019	2020	45	13680	110377,008	0
2018	2019	129	13646	110285015	3
2017	2018	210	12650	108373913	2
2016	2017	360	10549	108150914	32
2015	2016	342	11761	109680228	0

Nota. Elaboración propia.

La tabla anterior gráficamente se ve de la siguiente forma:

Figura 78

Datos reforestación Sumapaz IDEAM año 2023



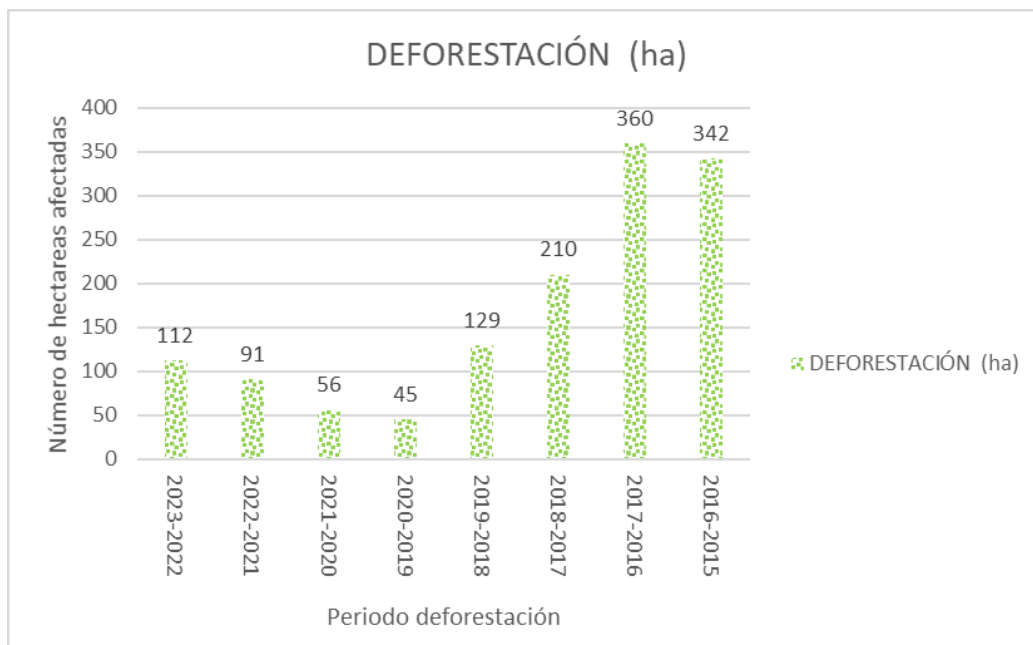
Nota. Adaptado de IDEAM 2023.(<http://archivo.ideam.gov.co>)

En la tabla N°3, se logra evidenciar que mediante los mapas generados y bases de datos SIG del IDEAM el aumento de la cantidad de área año a año es aproximadamente del 45% del año anterior, por tanto, es importante determinar las medidas de mitigación del impacto del páramo de Sumapaz en beneficio de la conservación del área. se evidencia un rango de periodo de tiempo donde se obtuvo información del IDEAM acerca de la deforestación en hectáreas analizadas conta el bosque estable y el bosque no estable, sin embargo, el punto más crítico observado es la regeneración que precisamente no debe ser 100% natural, es decir, puede ser contribuida por la regeneración artificial brindada por el

apoyo del ser humano, pero lamentablemente los números son insignificantes con respecto a lo afectado.

Figura 79

Deforestación actual paramo Sumapaz

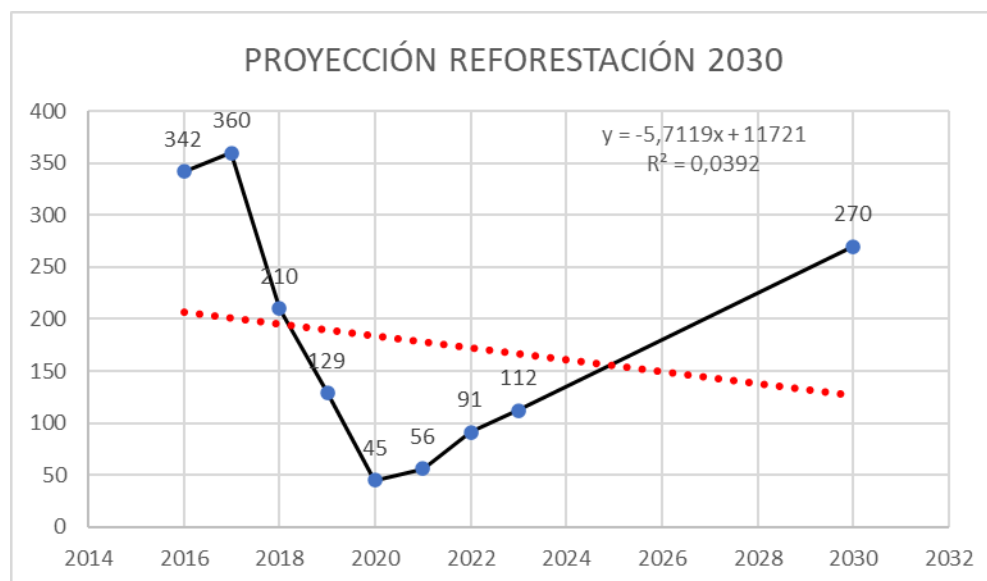


Nota. Adaptado de IDEAM 2023. (<http://archivo.ideam.gov.co>)

En respuesta a la situación planteada previamente, se generó en primera instancia una línea de tendencia que permitiera establecer una proyección hasta el año 2030 con el fin de estimar una cantidad aproximada de afectación para la fecha mencionada.

Figura 80

Proyección Reforestación año 2030.



Nota. Adaptado del IDEAM 2023.

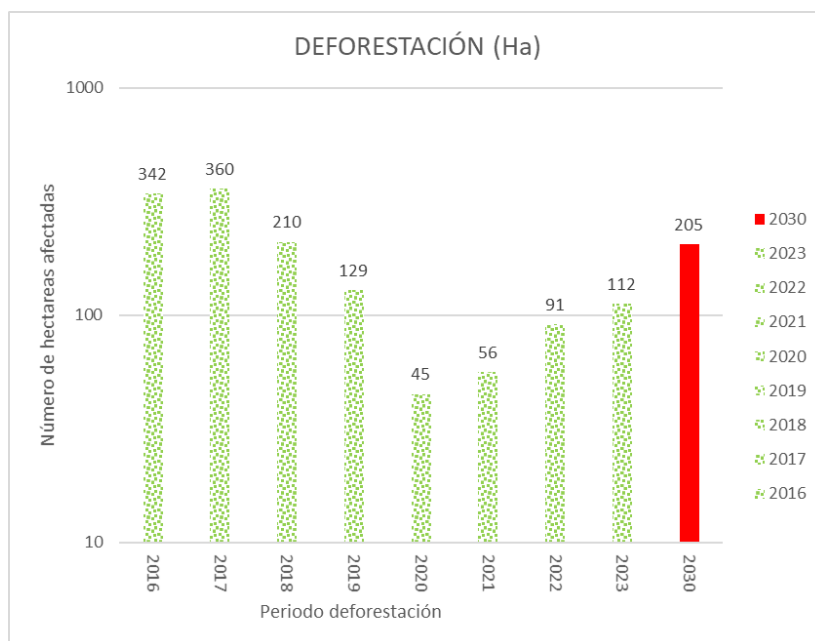
Con base en la fórmula de proyección obtenida en el gráfico 3, se procede a realizar el cálculo para el año 2030 que, aunque no es crítico, no cumple el umbral inicial del año 2017 donde se presentaba una cantidad de 360 hectáreas identificado como un 100%, la diferencia consta de 90 hectáreas que representa una regeneración del 75%, es decir, que se requieren más de 5 años para lograr igualar las cifras iniciales de reforestación y que para el año 2030 no se lograría cumplir la meta. producto del aumento en el impacto de la superficie del páramo Sumapaz, para la fecha se espera contrarrestar con la reforestación con drones los cuales y según lo investigado cuentan con la capacidad de reforestar de **5 a 10 hectáreas por día** con una probabilidad de eficiencia del 65%, lamentablemente, el análisis aquí presentado es gracias a estudios previos realizados e información ejecutada como se menciona en el aparatado de investigaciones previas, sin embargo, la tecnología en drones en Colombia

no es tan avanzada como lo es en otros países donde han invertido gran capital para los procesos de reforestación de bosques afectados por incendios forestales principalmente.

Por otra parte, es importante analizar que el periodo de 2020 a 2022 presentó una reducción importante donde se estipula fue producto s del COVID-19 el cual obligó a la población en general a suspensión de actividades productivas y económicas, no obstante, superada la fecha en el año 2023 se evidenció un alza importante y que con el paso del tiempo irá en aumento debido a la demanda de las ciudades principalmente de la capital colombiana Bogotá D.C. A continuación, se registra la cantidad de 270 hectáreas afectadas para el año 2030 el cual, analizado con respecto a la cantidad del año 2023 de 112 hectáreas, se registra un aumento específico de 41.48% lo cual es preocupante dado que generará en el ambiente un impacto importante de 158 hectáreas más de las que se presentan actualmente, es decir, un incremento proporcional al doble de la afectación en un periodo de solo 7 años. Por tanto, es el tiempo esperado para que el proyecto ponga en marcha su ejecución y sea quien contrarreste el daño ambiental que se avecina al páramo del Sumapaz.

Figura 81

Cantidad proyectada de deforestación 2030



Nota. Adaptado de archivo IDEAM deforestación Sumapaz 2023. (<http://archivo.ideam.gov.co>)

En respuesta para la zona de estudio (Páramo de Sumapaz) tiene una topografía variable, con suelos con mucha humedad y climas cambiantes, la elección del tipo de dron debe ver factores como la estabilidad en el aire, capacidad de carga y duración de la carga del dron. Para el caso de estudio los mejores drones son:

- Drones hexacópteros de carga media: Estos cuentan con seis hélices dando una mayor estabilidad cuando hay vientos y dejan llevar cargas de semillas en depósitos de hasta 8 litros. Un ejemplo de esta tecnología es el dron hecho por Dronecoria, que sirve para esparcir semillas en lugares difíciles. (Autopista, 2023). En consecuencia, 1 litro de mezcla puede contener entre 3.000 y 10.000 semillas, dependiendo del tamaño de la semilla. En un páramo típico de Colombia en un buen estado de

conservación puede haber entre 2.000 y 20.000 frailejones adultos por hectárea. (SiB Colombia, 2022).

Dicho lo anterior, se define que el promedio de 2.000 plantas/hectárea.

Si un dron puede lanzar 24.000 semillas por vuelo (8 L x 3.000 semillas/L) y queremos plantar 2.000 plantas por hectárea:

$$\frac{24.000 \text{ semillas}}{2.000 \text{ semillas} * \text{Hectarea}} = 12 \text{ hectareas}$$

Ahora bien, es importante tener en cuenta que deben tenerse en cuenta factores previamente mencionados en la investigación como lo son el porcentaje de semillas que germinen, la dispersión homogénea (depende factor climático) y perdidas por consumo animal o viento, lo cual teniendo en cuenta el clima del área en intervención reduce a una tercera parte las posibilidades de germinación de las especies seleccionadas (tabla 2) mediante el método Fukuoka. En consideración con lo anterior, el porcentaje de geminación se establece en un 33.33% de efectividad lo cual señala:

12 hectáreas X 0.33: 4 hectáreas por vuelo

Con base en la información obtenida de reforestación y reforestación del IDEAM se procede a realizar una estimación cuantitativa del número de especies que se reforestaran para el año 2030 de 270 hectáreas. A continuación, se evidencia la proyección de reforestación para el año 2030.

Figura 82

Proyección cantidad de especies para reforestación 2030



Nota. Adaptado de archivo IDEAM reforestación Sumapaz 2022.

Ahora bien, con la proyección previamente presentada se realiza un análisis número que nos indica que para el año 2030 la reforestación será de 270 hectáreas aproximadamente, sin embargo, al implantar el sistema de drones las cantidades pueden aumentar de forma significativa según el siguiente calculo:

$$\frac{350 \text{ hectáreas}}{4 \text{ hectáreas} * \text{vuelo}} = 87,5 \text{ vuelos}$$

Teniendo en cuenta para este proyecto el área seleccionada, el tiempo estimado de un vuelo consta de **485 minutos** que, al ser convertido en horas, son aproximadamente **8 horas**, es decir, que para reforestar **350 hectáreas** se requiere de **696 horas de vuelo**, que en resumen son **29 días**, claro que

los vuelos dependen de los diferentes factores como accidentalidad geográfica, capacidad de drones, el factor climático, entre otros. Según la proyección realizada en la fase II se estimó una cantidad de **185 líneas de vuelo** para un total de **5961 fotos** en calidad de **72 ppp** (píxeles por pulgada), es decir, **96 fotos por cada km²** y **32 fotos por cada línea** de sobrevuelo a una altura de **70 ft (21,33 m)**. Las 10 hectáreas se definen con base en la capacidad de los drones de reforestar de 5 a 10 hectáreas por día, como se ha mencionado anteriormente. Además, en las investigaciones previas se evidenció que en la localidad de Sumapaz se generó un proyecto que incluyó el diagnóstico de áreas, la selección de predios y la implementación de acciones de restauración en las veredas Laguna Verde y Las Palmas (Ecoflora SAS, 2023); se recalca que el trazado realizado para el área de sobrevuelo no cuenta con traslapes debido que genera mayor desgaste de baterías, aumento de almacenamiento de información y tiempo, sin embargo, se cumple con el proceso de diagnóstico del área.

Finalmente, se evidencia que el análisis estadístico donde el modelo logarítmico adoptado es $Y=2032.9 \cdot \ln(X)-8750$ para los datos recolectados entre 2012 y 2032 (Figura 69) demuestra una evolución significativa en las hectáreas reforestadas, especialmente a partir del año 2022. A través del modelo logarítmico aplicado, con un R^2 de 0.7969 que establece que con menos de 88 vuelos se lograra restablecer 350 hectáreas. En consecuencia, para el área de estudio seleccionada de **61,92 km²** requiere **1556 vuelos** debido a la complejidad de la zona de estudio, los habitantes y la topografía accidentada, para un proyecto de esta magnitud es pertinente el uso de más unidades de drones. "El uso de drones para la reforestación tiene muchas ventajas como ser de seis a diez veces más rápido que los métodos tradicionales y más barato que plantar árboles jóvenes." (Limas, 2023,).

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Con base en el diagnóstico técnico realizado de los bosques en la región de Sumapaz, Cundinamarca, se logró realizar un análisis y evaluación detallada que permitirá ser una herramienta fundamental para futuras investigaciones que cuenten con la capacidad de poner en práctica específicamente el modelo implementado en el presente documento donde los SIG fueron el insumo fundamental para el desarrollo de la propuesta y logró realizar un análisis de la efectividad y alcance de las aeronaves remotamente tripuladas (ART) las cuales son las herramientas más efectivas para reforestar.

Los drones son herramientas fundamentales en los procesos de reforestación debido que cuentan con la capacidad de sobrevolar cualquier tipo de terreno al que el ser humano se le dificulta por accesibilidad y tiempo, sin mencionar el riesgo, los drones cuentan con la capacidad de realizar vuelos programados que generarán un adecuado proceso de dispersión de semillas en terrenos con geografía accidentada en la región de Sumapaz.

Realizar los análisis multitemporales en este tipo de investigación es esencial para contar con insumos suficientes que permitan establecer el proceso adecuado de planificación y ejecución de la actividad de la reforestación debido que permitirá alimentar los programas y bases de datos SIG para consulta y revisión en tiempo real del estado actual de los bosques del Sumapaz.

El método fuokoka es la opción óptima en términos de costo-beneficio, basándonos en el área de estudio debido que presenta ventajas en eficiencia de cobertura y menor impacto en zonas de difícil acceso, el costo para el área de estudio de 61,92 km es de \$216,720.000 pesos, el valor es menor con respecto a la aspersión convencional debido que este método requiere presencia de personal capacitado para la siembra y el método manual genera pérdidas de semillas en un 33.3% por caída en áreas de baja fertilidad o por el viento.

El modelo de implementación se generó de forma parcial debido que no fue posible la accesibilidad a drones de reforestación, sin embargo, y aunque el alcance de la presente investigación no contempla la implementación en sitio, fue posible realizar una aproximación base de un modelo que permita la reforestación en el Sumapaz y que además contempla alternativas de vuelo de dispersión y aspersión donde se espera que para nuevas investigaciones será el punto de partida.

Se requieren realizar al menos de 88 vuelos los cuales representan 29 días para recuperar 350 hectáreas manteniendo la proporción de drones con capacidad de almacenamiento de 8 litros a una tasa de efectividad del 30%. Para el área de estudio seleccionada de **61,92 km²** se requiere que el dron realice 19 sobrevuelos de 696 horas, se recomienda que se puedan implementar 4 o 5 drones en paralelo con el fin que se pueda realizar la reforestación en un tiempo de 4 meses aproximadamente.

Los resultados obtenidos son insumo para la ejecución de proyectos de reforestación avanzados que contemplen una implementación en campo mediante el uso sostenible del suelo, agricultura responsable para conservar y proteger los bosques del Sumapaz.

Para el año 2030 la deforestación alcanzara un nivel de 207 hectáreas, es decir, aumentará con el paso del tiempo un porcentaje del 41.48% con respecto al actual de 112 hectáreas afectadas, en consecuencia, la pronta implementación del modelo de implementación permitirá mitigar y

contrarrestar el enorme impacto que será inicio de una huella de afectación producto de la reforestación.

El análisis de datos obtenido con base a las encuestas generadas mediante la herramienta Survey 123, permitió establecer un desequilibrio en el área de estudio donde los procesos de deforestación dominan los trabajos de reforestación, por tanto, es indispensable la implementación de drones que permita para el año 2030 alcanzar un umbral de reforestación mínimo del 75% de 270 hectáreas comparadas con el mayor registro encontrado que data del año 2017 un total de 360 hectáreas recuperadas. La deforestación crítica no es la más representativa, sin embargo, se debe analizar que la mayoría de la cobertura vegetal se concentra en los niveles medio y alto lo cual alerta de una degradación ambiental importante.

El uso de drones para la restauración ecológica es una realidad, ya que permite reforestar grandes superficies de forma eficiente. En la zona de estudio, la implementación y combinación con el método Fukuoka, el cual se basa en semillas encapsuladas en arcilla para mejorar su protección y garantizar una mejor germinación. Esta combinación permite una dispersión efectiva en terrenos de difícil acceso y donde no es factible el uso de métodos convencionales, favoreciendo así una recuperación natural y más rápida de la zona.

La combinación de drones y tecnología SIG representa una oportunidad significativa para mejorar los esfuerzos de restauración en Colombia. Al abordar los desafíos existentes y capacitar a las comunidades en el uso de estas tecnologías, es posible optimizar los procesos de restauración ecológica y contribuir a la sostenibilidad ambiental del país. Esta iniciativa no solo es una necesidad ecológica, sino también una oportunidad para involucrar a las comunidades locales en la conservación de su entorno, promoviendo un desarrollo sostenible para el país.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acosta, J. C. (2021). Uso de drones para la gestión de incendios forestales y restauración ecológica. *Revista de Medio Ambiente y Tecnología*, 9(2), 45–52.
- Aghai, M., y Manteuffel-Ross, T. (2020). Mejora de la siembra directa con enjambres de vehículos aéreos no tripulados (UAV) y tecnología de semillas. *Tree Planters' Notes*, 63 (2), 32-48.
<https://rngr.net/publications/tpn/63-2/enhancing-direct-seeding-efforts-with-unmanned-aerial-vehicle-uav-201cswarms201d-and-seed-technology>
- Álvarez, P. K. (2018). Conceptos básicos de interpretación de aerofotografías e imágenes satelitales. Lima. DOI: 10.13140/RG.2.2.18697.08809
- (Antacoloma et al., 2024) Antacoloma, L., Escobar Viasus, N. K., Bedoya, M. A., & Viana, K. (s/f). Ganadería, deforestación e institucionalidad: CONALDEF, el control y los derechos humanos. *Dejusticia*. 9.
- Cabrera, A. (2021). Evaluación del uso de los drones como herramienta de apoyo para la reforestación en Colombia. Universidad de Antioquia.
- Caicedo, E. (2024, 1 febrero). ¿Por qué no es momento de sembrar frailejones y cómo se debería restaurar un páramo? *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/vida/medio-ambiente/incendios-en-paramos-por-que-expertos-senalan-que-aun-no-se-debe-restaurar-850269>
- Cárdenas, M. F., & Tobón, C. (2017). Recuperación del funcionamiento hidrológico de ecosistemas de páramo en Colombia. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*, 20(2), 403–412.
<https://doi.org/10.31910/rudca.v20.n2.2017.381>

- CIFOR-ICRAF. (2014). Lineamientos estratégicos para la restauración ecológica en Colombia: Aportes a la formulación del Plan Nacional de Restauración Ecológica, Rehabilitación y Recuperación de Áreas Degradadas (PNR). Centro para la Investigación Forestal Internacional y el Centro Internacional de Investigación Agroforestal. <https://www.cifor.org/knowledge/publication/5196>
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) & Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2020). Evaluación Regional del Agua (ERA): Cuenca media del río Bogotá (Plan de Acción 2016–2019, actualizado en 2020). CAR – IDEAM.
- Dronecoria. (s. f.). Guía de fabricación de Dronecoria. Versión 0.5. Aeracoop. Obtenido de la Guía técnica donde se especifica que estos drones transportan una botella de semillas de 8 litros y pueden contener hasta 500 000 semillas o 6 kg de pellets
- Echeverri Londoño, H. A., Arenas Palomino, P. A., & Perea Hurtado, D. A. Identificación de áreas a reforestar con la aplicación de los sistemas de información geográfica y la metodología de criterio múltiple en el municipio de La Macarena, Meta [Trabajo de grado, UNAD]. Repositorio UNAD. <https://repository.unad.edu.co/handle/10596/62589>
- Ecoflora SAS. (2017). Informe final de intervención ecológica en zonas afectadas por extracción de materiales pétreos en la localidad de Sumapaz. Alcaldía Mayor de Bogotá – Secretaría Distrital de Ambiente.
- El Sumapaz sufre por el turismo desaforado. (s. f.). <http://www.sumapaz.gov.co/milocalidad/sumapaz-sufre-turismo-desafortado>
- El Tiempo. (2024, marzo 8). Páramo de Sumapaz, afectado por sobrepastoreo. <https://www.eltiempo.com/colombia/otras-ciudades/paramo-de-sumapaz-afectado-por-sobrepastoreo-para-cultivos-841152>

Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (s. f.). Sistema Sur – Cuenca del río Tunjuelo:

Captación y regulación (Laguna de Los Tunjos, embalse Chisacá y represa de La Regadera). EAAB.

<https://www.acueducto.com.co>

FAO. (2020). El estado de los bosques del mundo. <https://www.fao.org/state-of-forests/es/>

González, J., Amarillo, R., Sarmiento, J. (2015). Oportunidades en el uso de drones para los cultivos del agro colombiano. *Revista de Tecnología Agrícola*, 3(1), 15-30.

<http://hdl.handle.net/10882/12077>

Heredia, P. (2019). Evaluación del uso de drones como herramienta de apoyo para un efectivo control y monitoreo de páramos en Colombia. Trabajo de grado especialización. Asociación de Profesionales de Drones (APD).

IDEAM. (2021). Informe sobre la deforestación en Colombia. <https://www.ideam.gov.co>

InfoDron.es. (2018, 30 de agosto). CO2 Revolution trabaja en la reforestación con drones. InfoDron.

<https://www.infodron.es/texto-diario/mostrar/3530444/co2-revolution-trabaja-reforestacion-drones>

“Illegal Gold Mining in Colombian Amazon: Social and Environmental Impacts and Their Relationship with Illicit Crops, through a Case Study of San José del Fragua (Caquetá)”– Romero Peñuela, N., Ríos Monroy, J. C., & Güiza Suárez, L. (2020). *Estudios Socio-Jurídicos*, 22(2), 1–28.

Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI. (2021, 20 de diciembre). Dispersión asistida de semillas: experimento científico en desarrollo para la restauración en la Amazonía. SINCHI. <https://sinchi.org.co/dispersion-asistida-de-semillas-experimento-cientifico-en-desarrollo-para-la-restauracion-en-la-amazonia>

Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM). (2023). Informe de monitoreo ambiental de ecosistemas estratégicos: Región de Sumapaz 2015–2022. Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible

Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt (2016). Frailejones de Colombia. 2900 registros, aportados por: Castellanos, C. (Contacto del recurso), Diazgranados, M. (Creador del recurso, Autor, Proveedor de metadatos).

http://i2d.humboldt.org.co/ceiba/resource.do?r=rrbb_colombia_espeletias_2017

Limas, A. (2023, 23 de enero). Aprendiendo a Reforestar con Drones [Artículo]. Tec de Monterrey (Campus Chihuahua). Conecta.

<https://conecta.tec.mx/es/noticias/chihuahua/investigacion/reforestar-con-drones>

Lozoya-Gamez, A. (2023). Drones e Inteligencia Artificial para combatir la deforestación.

<https://tecscience.tec.mx/es/tecnologia/drones-que-combaten-la-deforestacion/>

Ministerio de Agricultura y Desarrollo Rural. (2018). Zona de Reserva Campesina de Sumapaz: Estrategias de sostenibilidad y participación comunitaria. Bogotá, Colombia.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2017). Resolución 1434 de 2017: Por la cual se delimita el área de páramo Cruz Verde – Sumapaz en jurisdicción de los departamentos de Cundinamarca y Meta y el Distrito Capital de Bogotá. <https://www.minambiente.gov.co/wp-content/uploads/2021/10/Resolucion-1434-de-2017.pdf>

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2021, 14 de diciembre). Semillas que caen del cielo: el piloto de restauración ecológica que lanzó MinAmbiente en la Amazonía. Instituto Amazónico de Investigaciones Científicas SINCHI.

Mohan, M., Richardson, G., Gopan, G., Aghai, M., Bajaj, S., Galgamuwa, G., ... Cardil, A. (2021).

Regeneración forestal con apoyo de drones: Tendencias actuales, desafíos e implicaciones.

Teledetección, 13 (13), 2596. doi: 10.3390/rs13132596

Murcia, C., Guariguata, M. R., Andrade, Á., & Moreno, F. H. (2017). La restauración ecológica en

Colombia: tendencias, necesidades y oportunidades. *Revista Colombia Forestal*, 20(1), 5–15.

Perdomo, J. (2021). Drones en la reforestación: una solución innovadora para el agro colombiano.

Red de árboles características de especies. <https://www.reddearboles.org>

Revista de Tecnología y Medio Ambiente, 5(2), 45-58

SiB Colombia. (2022, 2 de febrero). Datos del frailejón y la biodiversidad en Colombia. *Biodiversidad.co*.

<https://biodiversidad.co/post/2022/datos-frailejon-biodiversidad-colombia/>

Tiempo, R. E. (2008, 5 junio). Páramo de Sumapaz, afectado por sobrepastoreo, talas de frailejón y

cultivos de papa. *El Tiempo*. <https://www.eltiempo.com/archivo/documento/CMS-4235917> Plan

piloto para la recuperación y protección del páramo del Sumapaz (corregimiento de San Juan)

Torresan, C., et al. (2016). Drones for forestry: a review. *Forests*, 7(3), 60.

Vargas-Ramírez, N., et al. (2023). Uso comunitario de drones ligeros para la gestión, conservación y

defensa del territorio. *Revista de Tecnología y Sociedad*, 12(1), 23-37.

Villanueva, J. (2018). El uso de SIG en la gestión ambiental en Colombia. *Revista de Geografía*, 15(1), 77-

92.