

**Análisis de la distribución espacial del retamo espinoso (*Ulex europaeus*),
en tramo del río Lagunilla (Murillo-Villahermosa), mediante
aeronaves no tripuladas.**

Yiceth Margarita Vargas Osorio

Ing. Forestal

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

Director:

Ph. D Manuel Alejandro Tamayo Monsalve

Universidad de Manizales

Facultad de Ciencias e Ingeniería

Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Manizales, 2024

Resumen

El presente trabajo de investigación consiste en la implementación de información geográfica, para analizar la distribución espacial de la especie retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en la parte alta de la cuenca del río Lagunilla, brindando un conocimiento de línea base sobre esta especie que está catalogada como invasora- exótica en Colombia, y que registra afectaciones negativas causando pérdida en la flora nativa; situación que se evidencia en el norte del Departamento del Tolima, en zona de páramo en la vía que conduce entre los municipios de Murillo - Villahermosa, donde se ha registrado la presencia de la especie. En este contexto, el objetivo del estudio es evaluar la distribución del retamo espinoso para los años 2022 y 2023, a partir del procesamiento de imágenes capturados con vehículos aéreos no tripulados -UAV; analizar las áreas susceptibles a la propagación de la especie retamo, partiendo de criterios biológicos, ecológicos y sociales que le favorecen a la especie en la dispersión. Por lo tanto, el estudio permite generar insumos a las Autoridades Ambientales, Entes Territoriales y a la comunidad en general, registros claves para la toma decisiones oportunas y preventivas para disminuir la pérdida de la flora nativa, y conservar la biodiversidad en zonas de alta montaña.

Palabras clave: Teledetección, Vehículos aéreos no tripulados, especies invasoras, ortomosaicos.

Abstract

This research work consists of the implementation of geographic information to analyze the spatial distribution of the thorny broom species (*Ulex europaeus*) in the upper part of the Lagunilla River basin, providing baseline knowledge about this species that is classified as invasive-exotic in Colombia, and that records negative effects causing loss in the native flora; a situation that is evident in the north of the Department of Tolima, in the moorland area on the road that leads between the municipalities of Murillo - Villahermosa, where the presence of the species has been recorded. In this context, the objective of the study is to evaluate the distribution of the thorny broom for the years 2022 and 2023, based on the processing of images captured with unmanned aerial vehicles -UAV; analyze the areas susceptible to the spread of the broom species, based on biological, ecological and social criteria that favor the species in dispersion. Therefore, the study allows generating inputs for Environmental Authorities, Territorial Entities and the community in general, key records for making timely and preventive decisions to reduce the loss of native flora, and conserve biodiversity in high mountain areas.

Keywords: Remote sensing, Unmanned aerial vehicles, invasive species, orthomosaic.

Contenido

	Pág.
1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN Y SU JUSTIFICACIÓN.....	8
1.1 JUSTIFICACIÓN.....	10
2. OBJETIVOS	12
2.1 OBJETIVO GENERAL.....	12
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	12
3. ANTECEDENTES	13
4. REFERENTE NORMATIVO Y LEGAL	17
5. REFERENTE TEÓRICO	19
5.1 ESPECIES EXÓTICAS-INVASORAS	19
5.1.1 <i>Retamo espinoso: Descripción Taxonómica.</i>	19
5.2 COBERTURAS DE LA TIERRA.	22
5.3 TELEDETECCIÓN.....	22
6. METODOLOGÍA.....	24
6.1 ENFOQUE METODOLÓGICO	24
6.2 TIPO DE ESTUDIO	24
6.3 PROCEDIMIENTO.....	25
6.3.1 <i>Fase 1. Evaluar la distribución de la presencia del retamo espinoso (Ulex europaeus), en la parte alta del río Lagunilla mediante el empleo de un vehículo aéreo no tripulado - UAV.</i>	27
6.3.2 <i>Fase 2. Analizar la invasión del retamo espinoso en un tramo de la parte alta del río Lagunilla, en los años 2022 y 2023, a partir del procesamiento digital de imágenes obtenidas con dron.</i>	44
6.3.3 <i>Fase 3: Determinar las áreas susceptibles a la propagación a la invasión de la especie retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla.</i>	47
7. RESULTADOS.....	59
8. CONCLUSIONES	81
9. RECOMENDACIONES	83
10. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	85

Lista de figuras

Figura 1. <i>Retamo espinoso (Ulex europaeus)</i>	20
Figura 2. <i>Metodología para el análisis de la distribución espacial del retamo espinoso</i>	26
Figura 3. <i>Ubicación del área de estudio.</i>	27
Figura 4. <i>Plan de vuelo en un tramo de la Subzona hidrográfica del río Lagunilla.</i>	28
Figura 5. <i>GPS Garmin Etrex 30x para toma de coordenadas de los puntos de referencia.</i>	30
Figura 6. <i>Planta de retamo espinoso (U. europaeus)</i>	31
Figura 7. <i>Focos de retamo espinoso en el área de estudio.</i>	32
Figura 8. <i>Focos de retamo espinoso y al fondo el Nevado del Ruiz</i>	33
Figura 9. <i>Ortomosaico N°1 y N° 2 del área de estudio.</i>	34
Figura 10. <i>Ortomosaico final del área de estudio, tramo del río Lagunilla.</i>	35
Figura 11. <i>Mapa localización del área de estudio con el ortomosaico.</i>	36
Figura 12. <i>Proceso de georreferenciación de acuerdo a los puntos de control.</i>	37
Figura 13. <i>Resultado del proceso de georreferenciación.</i>	37
Figura 14. <i>Combinación Banda 1,2,3</i>	40
Figura 15. <i>Combinación Banda 2,1,3</i>	41
Figura 16. <i>Combinación Banda 3,2,1</i>	42
Figura 17. <i>Resultado del proceso de georreferenciación del vuelo realizado en el año 2022.</i>	45
Figura 18. <i>Área de estudio tomado con vehículo aéreo no tripulado, año 2022.</i>	46
Figura 19. <i>Área de estudio tomado con vehículo aéreo no tripulado, año 2023.</i>	46
Figura 20. <i>Distribución de las coberturas en el municipio de Murillo.</i>	49
Figura 21. <i>Distribución de las coberturas en el municipio de Villahermosa.</i>	50
Figura 22. <i>Mapa de coberturas para el municipio de Murillo-Villahermosa.</i>	51
Figura 23. <i>Mecanismos de dispersión del retamo espinoso en el área de estudio.</i>	57
Figura 24. <i>Condiciones que favorecen la dispersión del retamo en el área de estudio</i>	58
Figura 25. <i>Distribución del retamo espinoso en la zona alta del río Lagunilla.</i>	60
Figura 26. <i>Veredas de Murillo y Villahermosa con presencia de retamo espinoso.</i>	61
Figura 27. <i>Predios con presencia de retamo espinoso en la parte alta del Río Lagunilla.</i>	62
Figura 28. <i>Índice de vegetación NDVI en el área de estudio.</i>	65
Figura 29. <i>Índice de vegetación NDVI en el área de estudio.</i>	66
Figura 30. <i>Focos de retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla, año 2022.</i>	69
Figura 31. <i>Focos de retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla, año 2023.</i>	70
Figura 32. <i>Mapa de susceptibilidad a la expansión del retamo espinoso para el criterio de cobertura.</i>	76
Figura 33. <i>Áreas susceptibles a la expansión del retamo espinoso para el criterio social</i>	80

Lista de tablas

Tabla 1. <i>Unidades de coberturas de la tierra identificadas en el área de estudio.</i>	55
Tabla 2. <i>Comparación del área de los focos de invasión de la especie retamo espinoso, en la zona de estudio entre los años 2022 y 2023.</i>	68
Tabla 3. <i>Cambios en los focos de retamo identificados en el área de estudio para el año 2022 y 2023.....</i>	73
Tabla 4. <i>Coberturas como mayor probabilidad de proliferación del retamo por municipio.</i>	77

Lista de abreviaturas

Abreviaturas

Abreviatura **Término**

UAV Vehículo aéreo no tripulado

SIG Sistemas de Información Geográfica

GPS Sistema de Posicionamiento Global

CAR Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca

CORTOLIMA Corporación Autónoma Regional del Tolima

1. Planteamiento del problema de investigación y su justificación

A nivel mundial, las plantas introducidas han alterado considerablemente los ecosistemas, lo que ha llevado a investigaciones sobre las invasiones biológicas (Preston et al., 2023). Situación que para Colombia no es desconocida, ya que se tienen reportes de la existencia de especies como retamo espinoso (*Ulex europaeus*), planta invasora que compete y desplaza la flora nativa (Ávila-Vélez, Herrera-Martínez, & Celis-Forero, 2023).

Este tipo de afectaciones han sido registradas en el norte del Departamento del Tolima, específicamente en el municipio de Murillo, localizado por la zona norte con el municipio de Villahermosa, con Santa Isabel al sur, al oriente con Líbano y al occidente Villamaría (Caldas) (Gómez Acevedo & Ramírez Villa, 2019). El municipio es caracterizado por su páramo y biodiversidad endémica, además de contar con el macizo montañoso del nevado del Ruiz, donde nace en el flanco oriental el río Lagunilla; esta cuenca es límite hídrico entre el Municipio de Murillo y Villahermosa, y desemboca en el río Magdalena (Herrera Vargas et al., 2019).

En la vía que conecta estos dos municipios (Murillo, Villahermosa), y que también conduce a la ciudad de Manizales (Caldas), se evidencian focos de invasión que pueden alterar

y modificar los ecosistemas de alta montaña, caracterizados por presentar plantas emblemáticas como los frailejones, especies clave para estos ecosistemas, puesto que con sus estructuras contribuyen con la regulación del ciclo hídrico (Cortés-Duque & Sarmiento Pinzón, 2013).

Por lo tanto, la gestión en el monitoreo y evaluación de especies invasoras que amenazan a la flora nativa, necesita de métodos prácticos que permita realizar un seguimiento oportuno, especialmente en vegetación de rápida dispersión como el retamo espinoso (Hartley et al., 2022); es por ello que, en los últimos años se han utilizado las herramientas tecnológicas para la captura de imágenes, como los Sistemas Aéreos No Tripulados- Dron, los cuales recopilan datos terrestres de alta resolución y precisión (Suo et al, 2019).

De acuerdo a lo anterior, es relevante identificar la distribución de estas especies invasoras, permitiendo adoptar medidas preventivas y de manejo, por parte de las autoridades ambientales y entes territoriales que se encuentran en jurisdicción de los municipios de Murillo y Villahermosa, y de esta forma involucrar programas y proyectos que mitiguen la propagación, y así garantizar la conservación de la biodiversidad en los ecosistemas de páramo y evitar posibles proliferaciones a futuro.

1.1 Justificación

El retamo espinoso es catalogado como una especie exótica e invasora en el territorio colombiano (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2008), sin embargo, a nivel regional específicamente en el departamento del Tolima la información es escasa a nula sobre su distribución actual. Es por ello que el uso de herramientas tecnológicas como los vehículos aéreos no tripulados – UAV, cada día toman más fuerza, gracias a su capacidad de capturar datos en tiempo real y con gran nivel de detalle, permitiendo identificar con precisión las áreas con presencia o ausencia de las especies invasoras.

Por ello, la investigación se realiza utilizando drones, que permiten la captura de imágenes con una alta resolución, incluso en áreas donde la topografía y la alta nubosidad dificultan el registro de datos detallados, como es en las zonas de páramo; por lo tanto, estas herramientas, resultan ser una estrategia eficaz para el monitoreo y seguimiento, facilitando la implementación de los análisis multitemporales precisos, esenciales para el control y prevención de la especie invasora.

Por consiguiente, el presente estudio analiza una de las 100 especies invasoras más agresivas del mundo, según la Unión Internacional para la Conservación de la Naturaleza – UICN (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, 2011), brindando conocimiento de línea base para el departamento del Tolima, entre ellos datos relevantes sobre la dispersión del *U. europaeus* en la parte alta del río Lagunilla y las zonas potenciales a la expansión, a partir del uso de imágenes aerotransportadas, considerados como insumos de alta calidad y de utilidad

para la toma de decisiones preventivas y de manejo, que evite posibles proliferaciones en áreas donde aún no ha colonizado.

Lo anterior, resulta relevante en términos de gestión ambiental, considerada como una herramienta clave para la planificación de medidas a ejecutar en corto y mediano plazo, para la protección y conservación de la biodiversidad, entre ellas la flora nativa de crecimiento lento, que a la fecha se ve amenazada por la presencia de estos individuos en la zona del Complejo de Páramo Los Nevados y en la riberas de los ríos como es el caso específico del río Lagunilla, donde se ve amenazada por una especie invasora de fácil dispersión y propagación.

Los resultados de este tipo de proyectos son cruciales, ya que involucran a diversos actores, incluida la comunidad, que puede verse afectada por la invasión de la especie en sus predios y fincas productivas. Además, se integran a instituciones como la Autoridad Ambiental del Departamento y Entes Territoriales en la toma de decisiones para abordar esta problemática ambiental, que no solo impacta la biodiversidad de los ecosistemas de alta montaña, sino que también genera costos significativos para su erradicación y manejo.

2. Objetivos

2.1 Objetivo general

Analizar la distribución espacial del retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en un tramo del río Lagunilla, entre los municipios de Murillo- Villahermosa, mediante el procesamiento de imágenes obtenidas con vehículos aéreos no tripulados, para determinar las zonas de mayor invasión.

2.2 Objetivos específicos

1. Evaluar la distribución de la presencia del retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en la parte alta del río Lagunilla, mediante el empleo de un vehículo aéreo no tripulado - UAV.
2. Analizar la invasión del retamo espinoso en un tramo de la parte alta del río Lagunilla, en los años 2022 y 2023, a partir del procesamiento digital de imágenes obtenidas con dron.
3. Determinar las áreas susceptibles a la propagación de la especie retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla.

3. Antecedentes

Con el fin de controlar la expansión de especies invasoras se han desarrollado diferentes estudios a nivel mundial, los cuales han sido dedicados a identificar su distribución y así controlar y prevenir la afectación en diferentes zonas donde aún no ha colonizado, es por esto que hoy en día se ha vinculado información cartográfica que permite identificar su localización.

De acuerdo a lo anterior, los autores Christina et al. (2020) consideraron aumentar la eficiencia al evaluar la invasión biológica, ya que es una de las amenazas ambientales globales más graves, involucrando a la especie *Ulex europeus* por ser altamente invasiva y por presentar su floración de color amarillo, el cual la hace muy visible en el paisaje, y fácil de identificar, por lo tanto, abarcaron un índice de cambio de nicho independiente del umbral para evaluar la diferencia de nicho entre las poblaciones nativas e introducidas. Así mismo, les permitió tener proyecciones geográficas de la distribución de probabilidades de la presencia del retamo espinoso.

Kattenborn et. al. (2020) aplicaron las redes neuronales convolucionales (CNN) en mosaicos regulares de ortoimágenes de UAV, para mapear especies de plantas leñosas como el *U. europaeus*, especie que se ha extendido ampliamente en Chile Central y que invaden la vegetación nativa; en el estudio utilizaron datos RGB de cuatro vuelos independientes, las áreas fueron seleccionadas para cubrir situaciones representativas de la invasión. Como resultados identificaron que, los modelos de regresión son una herramienta que permite aprovechar los datos de alta resolución adquiridos desde los drones, para predecir patrones de vegetación,

siendo útil en casos, cuando la información espectral es escasa o no ayuda a identificar la vegetación o las especies evaluadas, los patrones espaciales pueden ser esenciales.

De igual manera Gränzig et al., (2021) desarrollaron en su investigación el mapeo de los patrones de ocurrencia de las especies de plantas invasoras y así comprender su dinámica de invasión, el cual es considerado un requisito crucial para prevenir una mayor propagación; manejando como objetivo principal el desarrollo de un marco metodológico operativo para usar ortoimágenes RGB basadas en UAV de ultra alta resolución, y datos Sentinel-2 de resolución media para mapear la distribución específicamente para *Ulex europaeus*. Por lo tanto, brindaron un enfoque establecido para mapear en grandes áreas, adicionalmente, con el empleo de las ortoimágenes de UAV fueron suficientes para diferenciar los principales tipos de cobertura terrestre, y las zonas con un nivel mayor de afectación.

Bertacchi (2022) empleó en su proyecto la reconstrucción del modelo 3D del ortofotomosaico, así como la división en capas de los puntos de nube, el cual permitió medir las principales características fisonómicas y estructurales de la vegetación. Esta investigación presentó como objetivo monitorear el proceso de recuperación de la vegetación después de un incendio y verificar la complementariedad real de la tecnología UAV con los estudios de vegetación en el suelo, comparando parcelas detectadas de forma remota y desde el suelo.

En el caso de estudio de Bergamo et al., (2023) realizaron una adquisición de imágenes UAV, imágenes satelitales y construyeron los ortomosaicos RGB y las nubes de puntos 3D, su

principal objetivo fue abordar los desafíos asociados con el mapeo de la ocurrencia y extensión de plantas invasoras. Específicamente, usaron imágenes de UAV rojas, verdes y azules para derivar un conjunto de índices de vegetación y métricas de dosel en 3D; logrando precisiones de mapeo muy altas, lo que constituye una herramienta altamente rentable en la identificación de especies de plantas invasoras.

A nivel nacional, se identifica el estudio de Vargas (2009) en el cual menciona que la especie *Ulex europaeus* se introdujo hace 50 años en Colombia en zonas de alta montaña que corresponden a ecosistemas de páramo, y relaciona que uno de los primeros lugares en los cuales se introdujo la especie, que fue en la parte sur de la ciudad de Bogotá, con la finalidad de incursionar el retamo espinoso como barrera o cerca viva.

De igual manera, en el páramo de Santurbán, se realizó la formulación del plan de manejo de la especie invasora Retamo espinoso en el municipio de Vetas, donde identificaron la morfología de la especie *Ulex europaeus*, por medio de la georreferenciación de individuos, generando como resultado la elaboración del mapa de ocurrencia de la especie invasora, adicionalmente, dentro de la metodología desarrollaron entrevistas estructuradas con los dueños de los predios con el fin de saber la procedencia y motivo, vinculando de tal manera en sus registros a la comunidad (Jardín Botánico Eloy Valenzuela, 2018)

Por lo tanto, las Autoridades Ambientales en Colombia, como la Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca – CAR, quienes realizaron una investigación basada en la caracterización diagnóstica de las invasiones de retamo espinoso y retamo liso, registrando la

presencia en ecosistemas de páramos y subpáramos; por medio de una identificación de la distribución geográfica y distribución potencial, a su vez vincula mapas de amenaza, vulnerabilidad a la invasión, los cuales son insumos clave para la formulación de Plan de prevención, manejo y control de esta especie (Barrera-Cataño et al., 2019).

Por otro lado, se identifica el estudio de Ríos-Camacho (2022), en el municipio de Duitama, del departamento de Boyacá, donde se identificó y cuantificó las áreas afectadas por la especie *Ulex europaeus*, y de acuerdo a criterios técnicos formular una serie de estrategias o medidas que ayuden en el control y seguimiento,; para ello utilizaron una metodología cualitativa que con ayuda de herramientas como software ArcGis y otras aplicaciones, permitieron obtener el registro y cuantificación de las áreas

Otro estudio es realizado por Ávila et al., (2023) donde utilizaron imágenes satelitales para el análisis de la distribución de este tipo de especies invasoras, a través de sensores espaciales de mayor resolución para la extracción de información temática de coberturas, e identificaron puntos probables a ser afectados por el retamo espinoso, y zona con presencia de la planta invasora. Se validó la metodología con los píxeles o muestras de verificación tomados en campo, encontrándose una correlación espacial entre ellas; se logró, a través de la teledetección espacial y radiometría satelital, caracterizar espectralmente el comportamiento de retamo espinoso en un territorio específico.

4. Referente normativo y legal

Se presentan a continuación las normativas principales a nivel nacional sobre invasiones biológicas y para la especie retamo espinoso (*Ulex europaeus*).

4.1 El Congreso de Colombia, mediante la Ley 99 de 1993, establece los principios generales ambientales y determina que la biodiversidad del país por ser patrimonio nacional debe ser protegida prioritariamente y aprovechada de forma sostenible, enmarcan las medidas necesarias para asegurar la protección de especies de fauna y flora silvestres (El Congreso de Colombia, 1993.)

4.2 El Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, mediante Resolución número 0848 de 2008, adopta “unas especies exóticas como invasoras y se señalan las especies introducidas irregularmente al país que pueden ser objeto de cría en ciclo cerrado y se adoptan otras determinaciones”. Declarándose como invasoras especies exóticas o foráneas, en la categoría de flora la especie *Ulex europaeus*.

4.3 La Secretaría Distrital de Ambiente, por medio de la Resolución 7615 de 2009, prohíbe en el perímetro urbano de Bogotá D.C., la plantación, el trasplante, la venta, la distribución y la comercialización de las especies exóticas invasoras retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Teline monspessulana*).

4.4 Mediante la Resolución 0207 de 2010 adoptada por el Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo territorial, “Por la cual se adiciona el listado de especies exóticas invasoras declaradas por el artículo primero de la Resolución 0848 de 2008 y se toman otras determinaciones”, en la categoría de flora se identifica en el listado de especies exóticas

invasoras al *Ulex europaeus*, retamo Espinoso (Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial, 2010).

4.5 El Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2011), formula el Plan Nacional para la prevención, el control y manejo de las Especies Introducidas, Trasplantadas e Invasoras; mediante el cual realiza un diagnóstico y listado preliminar de especies introducidas, trasplantadas e invasoras en Colombia, incluyendo en plantas introducidas el retamo espinoso (*Ulex europaeus*).

4.6 De acuerdo a la Resolución número 0684 de 2018, expedida por el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible, establece lineamientos tanto para la prevención y manejo integral de las especies de retamo espinoso (*Ulex europaeus L.*) y retamo liso (*Genista monspessulana (L.) L.A.S. Johnson*) como para la restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de las áreas afectadas por estas especies en el territorio nacional.

4.7 El Consejo Nacional de Política Económica y Social- CONPES 4050 del 2021, enmarca el incremento de especies invasoras y los efectos de la actividad humana, el cual reflejan un aumento en los impulsores de degradación del patrimonio natural, reflejado en el nivel de amenaza de especies y de los ecosistemas protegidos.

5. Referente teórico

5.1 Especies exóticas-invasoras

Las Especies exóticas-invasoras, han sido capaces de colonizar efectivamente un área en donde se ha interrumpido la barrera geográfica, y se han propagado sin asistencia humana directa en hábitats naturales o seminaturales, y cuyo establecimiento y expansión amenaza los ecosistemas (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS, 2018).

En la categoría de especies exóticas invasoras para Colombia, se identifica el retamo espinoso (*Ulex europaeus*), planta arbustiva de origen europeo, presenta rápido crecimiento, alta densidad de matorrales, alta producción de semillas y amplia distancia de dispersión; coloniza e invade rápido las áreas degradadas o con moderado nivel de transformación. Catalogada como las 100 especies invasoras más agresivas del mundo (MADS, 2018).

5.1.1 *Retamo espinoso: Descripción Taxonómica.*

El *U. europaeus*, es un arbusto leguminoso de la familia Fabaceae, leñoso, su origen es del oeste europeo y norte de África; las plantas adultas varían su tamaño de acuerdo al nivel de invasión (entre 1 y 4 metros); las hojas una vez supera la altura de los 6 y 8 centímetro inmediatamente aparecen hojas nuevas en forma de espina. Esta especie, se reproduce tanto sexual como asexualmente, en el caso de la producción por semillas es alta, alcanzando valores de 100.000 semillas por planta, desde su fase adulta hasta que muere, con un gran potencial para formar bancos de semillas; son pirogénicas debido a la alta producción de combustibles, lo

que les favorece para expandir sus semillas con una mayor facilidad; sus flores son de color amarillo y pueden estar individual o en racimo (Figura 1) (Barrera-Cataño, et al, 2019).

Figura 1.

Retamo espinoso (Ulex europaeus)



Nota. Retamo espinoso identificado en las márgenes del Río Lagunilla. **Fuente.** Elaboración propia

- ***Impactos del retamo espinoso en el ecosistema.***

Esta especie se ubica en un rango altitudinal que oscila entre los 2.200 a los 3.700 m s.n.m, caracterizado por ser ecosistemas de bosques andinos, altoandinos y de páramo, (Barrera-Castaño, et al, 2019). Estos últimos, son áreas catalogadas como ecosistemas estratégicos y considerados como fábricas de agua ya que regulan el ciclo hidrológico, y como corredor biológico para diversas especies de flora y fauna, ubicados entre el límite superior del bosque andino y límite en las nieves perpetuas (Corporación Autónoma Regional del Tolima - CORTOLIMA, 2013); sin embargo, se ven afectados por el retamo espinoso, logrando colonizar principalmente en áreas que han sido degradados por diferentes disturbios de carácter antrópico o natural; ocasionando cambios a nivel de estructura, composición y función en las zonas donde arriba y logra colonizar; entre los impactos identificados están el desplazamiento de especies nativas y fragmentación de las coberturas vegetales (Barrera-Castaño, et al, 2019).

- ***Impactos del Retamo Espinoso a Nivel Social.***

El retamo espinoso aparte de generar impactos negativos en los ecosistemas donde coloniza, también genera una pérdida en la productividad del suelo, esto relacionado directamente en los casos donde los predios son utilizados con fines agropecuarios, por lo tanto, genera pérdidas significativas en la economía de las familias campesinas al reducir el porcentaje de área productiva, al ser reemplazadas por la especie invasora; la presencia de esta especie se convierte en una amenaza para las fincas o predios vecinos, debido a la forma de dispersión de la semilla por saltos, alcanzando grandes distancias del foco madre (Barrera-Castaño, et al, 2019).

5.2 Coberturas de la tierra.

Las coberturas de la tierra proporcionan información fundamental para diversos procesos nacionales como los mapas de ecosistemas, conflictos de uso del territorio, ordenación de cuencas y del territorio, seguimiento a la deforestación de los bosques, y los inventarios forestales (Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales - IDEAM, 2010).

La leyenda nacional para la elaboración del mapa de coberturas de la tierra de Colombia, escala 1:100.000, según la metodología CORINE (Coordination of Information on the Environmental) Land Cover adaptada para el país, tiene como propósito el inventario homogéneo de la cubierta biofísica (cobertura) de la superficie de la tierra. La leyenda nacional fue estructurada de manera jerárquica, derivando las unidades de coberturas de la tierra con base en criterios fisonómicos de altura y densidad, claramente definidos y aplicables a todas las unidades consideradas para un grupo de coberturas del mismo tipo. De esta manera, se garantiza que sea posible la inclusión de nuevas unidades o la definición de nuevos niveles de unidades para estudios más detallados, permitiendo su ubicación y definición rápidamente (IDEAM, 2010).

5.3 Teledetección.

La teledetección consiste en adquirir datos-imágenes de la superficie terrestre, desde diferentes sensores y herramientas, una de ellas corresponde a los vehículos aéreos no tripulados, los cuales ampliaron enormemente las posibilidades de adquirir datos de alta

resolución para evaluar la distribución espacial de la composición de especies y las características de la vegetación (Kattenborn et al., 2020).

Las Aeronaves no tripulados-UAV, también conocidos como sistemas aéreos no tripulados- UAS, son aeronaves destinadas a volar sin piloto a bordo y a distancia, los cuales pueden representar una alternativa interesante y de bajo costo para el trabajo de campo intensivo en mano de obra (Gränzig et al., 2021).

Uno de los aportes más significativos de la teledetección espacial al estudio de los recursos naturales y del medio ambiente es su capacidad para seguir y evaluar procesos dinámicos; por ser información adquirida por sensores, las imágenes adquiridas por ellos constituyen una fuente valiosísima para estudiar los cambios que producen en la superficie terrestre, ya sean por el ciclo estacional, catástrofes naturales o alteraciones de origen humano (Cortolima & Universidad del Tolima, 2020).

Adicionalmente, otro de los beneficios generales de la detección basada en UAV, son los Ortomosaicos, que corresponden a imágenes de alta resolución que permiten la comparación de imágenes temporales y comprenden ángulos de visión similares, (Lopatin et al., 2019); de igual manera es importante que en los procesos de teledetección, se lleven a cabo la georreferenciación, que corresponde a la técnica de posicionamiento espacial de una entidad en una localización geográfica única y bien definida para un sistema de coordenadas y datum específicos, siendo una operación habitual dentro de los Sistemas de Información Geográfica – SIG (Valania, 2019).

6. Metodología

6.1 Enfoque metodológico

El tipo de trabajo de este proyecto corresponde a una investigación aplicada, con un enfoque mixto, al ser una combinación del enfoque cualitativo y cuantitativo, debido a que las características, el proceso y las bondades del estudio está basado en:

- *Cualitativo:* definición de la situación – preparatoria (exploración, diseño), trabajo de campo (recolección de datos), interpretación de patrones, estudio intensivo y en profundidad de diferentes aspectos de un fenómeno o entidad social.
- *Cuantitativa:* formulación y delimitación del problema, planeación selección de diseño de investigación, recolección de datos (fuentes primarias y secundarias), establece relaciones estadísticas entre características o fenómenos, correlación entre variables, sirve para planear después investigaciones más extensas.

6.2 Tipo de estudio

El estudio se caracteriza por ser cuantitativa de tipo explorativo debido a que se relaciona una investigación poco estudiada en el departamento del Tolima, correlacional debido a que establece relaciones estadísticas entre características o fenómenos, y a nivel cualitativo

estudio de casos, el cual es un estudio intensivo y en profundidad de diferentes aspectos de un fenómeno o entidad social.

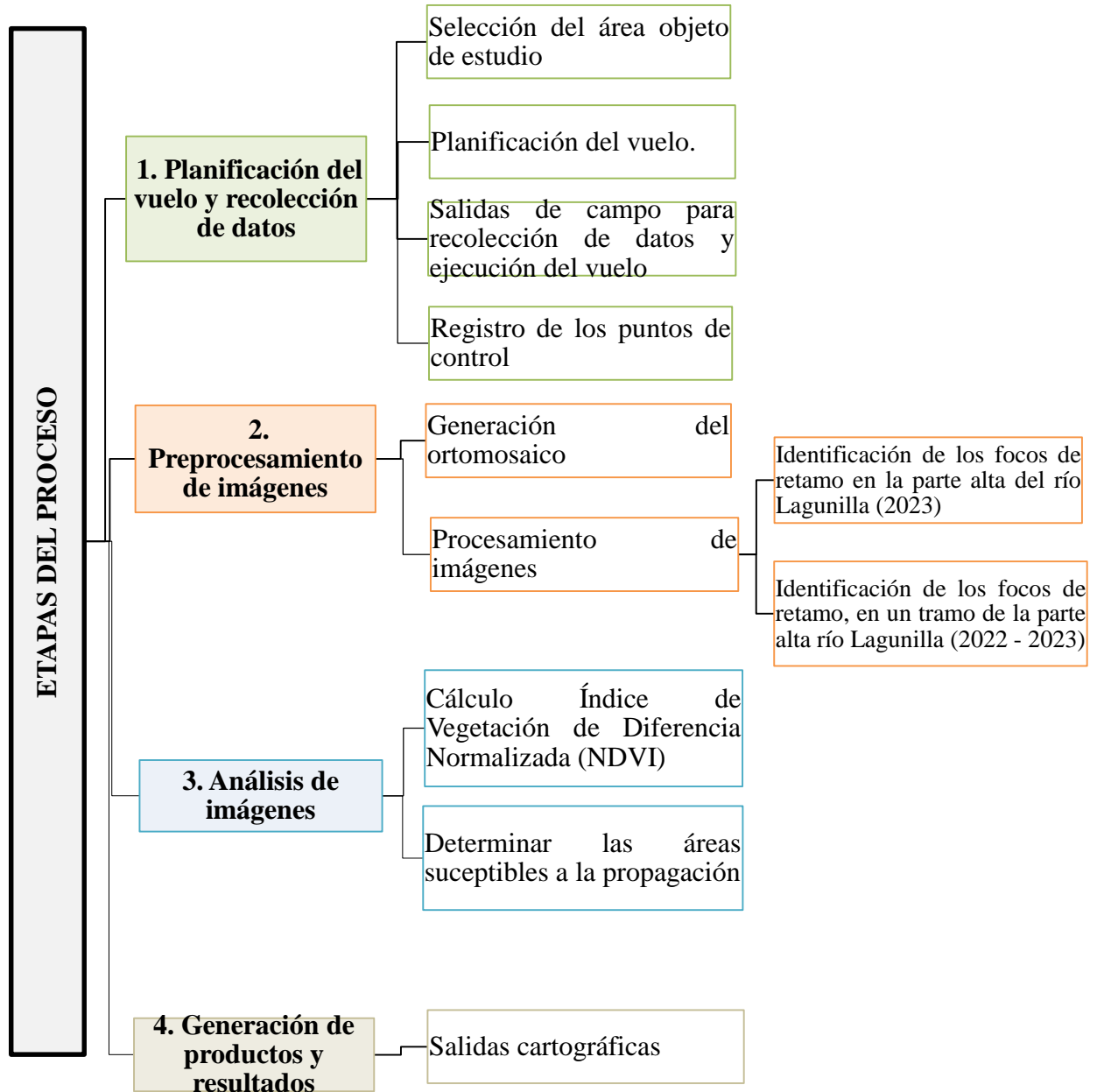
6.3 Procedimiento

La metodología aplicada para *el análisis de la distribución espacial de la especie retamo espinoso (Ulex europaeus), en un tramo de la parte alta del río Lagunilla, entre los municipios de Murillo- Villahermosa, Tolima, empleando aeronaves no tripuladas*, está dividida en cuatro (4) fases las cuales se detallan en la Figura 2:

1. Planificación del vuelo y recolección de datos
2. Preprocesamiento de imágenes
3. Análisis de imágenes
4. Generación de productos y resultados

Figura 2.

Metodología para el análisis de la distribución espacial del retamo espinoso



Fuente. Elaboración propia.

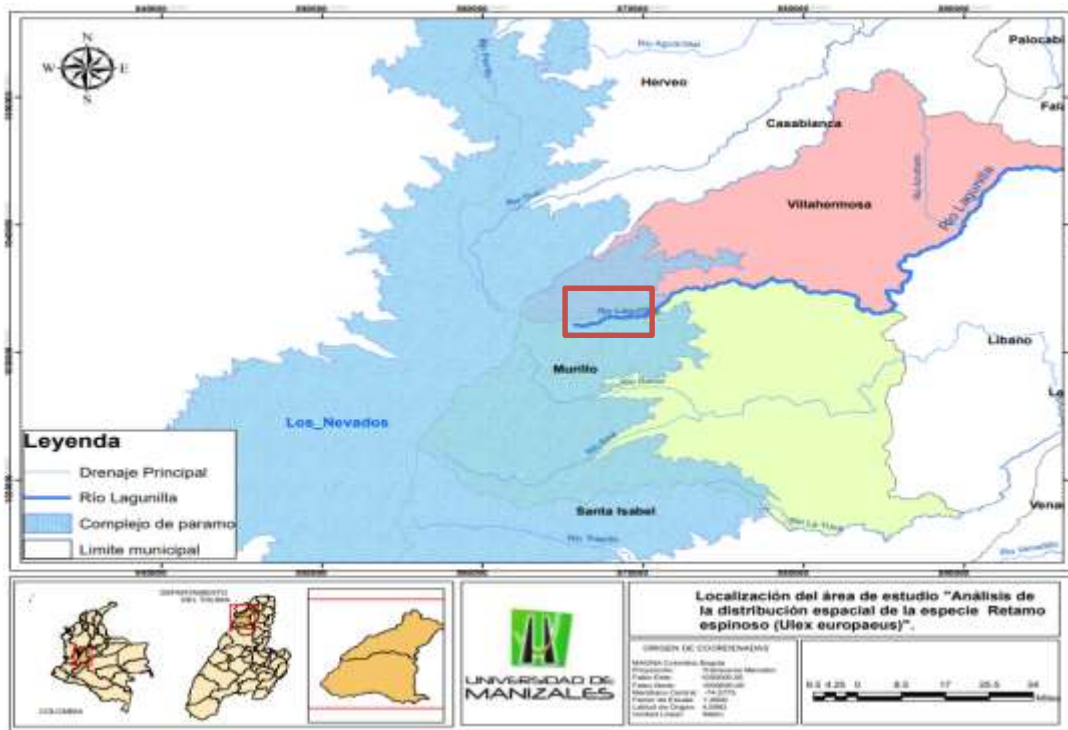
6.3.1 Fase 1. Evaluar la distribución de la presencia del retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en la parte alta del río Lagunilla mediante el empleo de un vehículo aéreo no tripulado - UAV.

- Definición área de estudio

La zona de estudio se ubica en un tramo del río Lagunilla, específicamente en la parte alta del río Lagunilla, en el límite municipal de Murillo y Villahermosa en el departamento del Tolima (Figura 3); esta área fue seleccionada tras recorridos preliminares que identificaron un segmento del río Lagunilla con el mayor impacto de la invasión de la especie retamo espinoso (*Ulex europaeus*).

Figura 3.

Ubicación del área de estudio.



Fuente. Elaboración propia, 2024

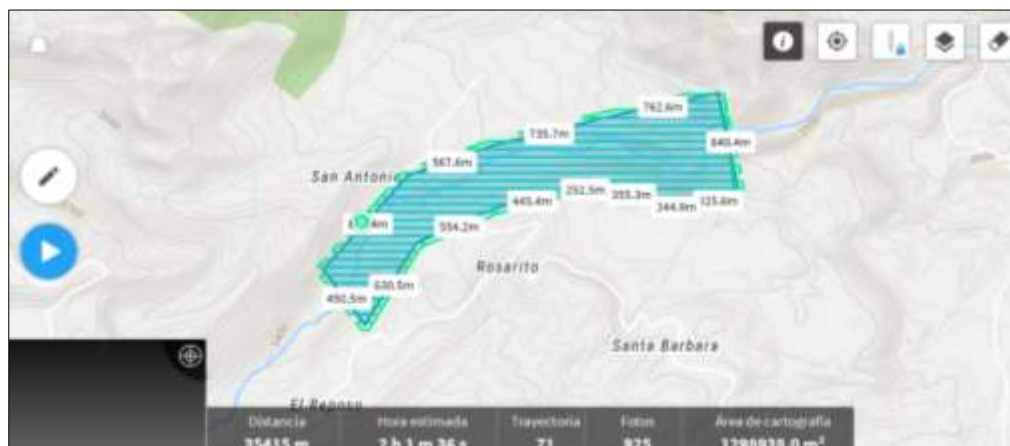
- **Planificación del vuelo.**

En la fase de planificación en oficina, se desarrolló el plan de vuelo en la plataforma AirData UAV, donde se abordó un tramo de la parte alta del Río Lagunilla del área definida para el presente estudio.

La toma de los datos en campo, se programaron en dos momentos, la Figura 4 corresponde a un segmento del tramo el cual fue realizado en el mes de septiembre del 2023.

Figura 4.

Plan de vuelo en un tramo de la Subzona hidrográfica del río Lagunilla.



Fuente. Plataforma AirData UAV

- **Obtención de datos:**

Adquisición de Imágenes: las fotografías aéreas fueron capturadas utilizando herramientas tecnológicas, Drones, permitiendo obtener información detallada y actualizada de la zona, con una mayor resolución para la cobertura del suelo.

De acuerdo a lo anterior, una vez establecida la ruta de vuelo, se llevaron a cabo dos

sesiones de recolección de los datos en campo: el primero se realizó iniciando el mes de septiembre del 2023, y el segundo se realizó en la primera semana del mes diciembre del mismo año. Estas actividades se realizaron mediante visitas específicas al tramo ubicado en la parte alta del río Lagunilla, a partir de imágenes capturadas por drones. El trabajo de campo fue realizado con la colaboración y apoyo de las herramientas de la Corporación Autónoma Regional del Tolima- CORTOLIMA, y con el equipo de profesionales de la Oficina Asesora de Direccionamiento Estratégico- TIC de CORTOLIMA, para la captura de las imágenes.

Los vuelos se ejecutaron mediante un vehículo aéreo pilotado a distancia (Dron): UAV DJI MAVIC 2 ZOOM, que de acuerdo al manual de usuario (2018), El DJI Mavic 2 Zoom cuenta con sistemas de visión omnidireccionales y sistemas de detección por infrarrojos, Captura fotos complejas con facilidad gracias a las tecnologías de la firma DJI, como la detección de obstáculos y los modos de vuelo inteligente como Hyperlapse, Punto de interés, ActiveTrack™ 2.0, TapFly, QuickShots, Panorámica y los sistemas avanzados de asistencia al piloto (APAS).

El Mavic 2 Zoom utiliza la última tecnología para aumentar la estabilidad y la calidad de las imágenes, reduce el rango de vibración angular del Mavic 2 Zoom a $\pm 0,005^\circ$; cuenta con una cámara totalmente estable, gracias a un estabilizador en 3 ejes, que graba vídeos 4K, hace fotos de 12 megapíxeles, admite zoom óptico 2x, objetivos de 24-48 mm y filtros. En cuanto a los parámetros de la cámara, se cuenta con un sensor de dimensiones 6.396 (mm) x 4.797 (mm).

Marca de control: hace relación al punto de referencia en tierra utilizado para verificar la precisión de una imagen o de los mosaicos de imágenes para corregirlas de forma geométrica, por lo tanto, esta marca de control debe estar bien definida representando una característica conocida y siendo fácilmente visible o identificable (Cruz Martínez, 2008).

De acuerdo a lo anterior, en el presente estudio se realizó la toma de diferentes marcas de control, registrados en campo mediante el Sistema de Posicionamiento Global GPS: *Garmin Etrex 30x* (Figura 5).

Figura 5. *GPS Garmin Etrex 30x para toma de coordenadas de los puntos de referencia.*



Nota. Imagen tomada en campo, en el fondo se observa un foco de retamo espinoso. **Fuente.**

Elaboración propia.

Cartografía social: durante las visitas de campo, se estableció contacto directo con la comunidad con el fin de recolectar información base sobre la especie invasora, las actividades

productivas desarrollados en la zona aledaña al río Lagunilla, y las prácticas de manejo que la comunidad ha implementado con respecto al retamo espinoso en el área de estudio.

Figura 6.

Planta de retamo espinoso (U. europaeus)



Nota. Imágenes capturadas con Dron, en el área de estudio. **Fuente.** Elaboración propia

Figura 7.

Focos de retamo espinoso en el área de estudio.





Nota. Imágenes capturadas con Dron, en el área de estudio en la parte alta del Río Lagunilla. **Fuente.** Oficina TIC- Cortolima.

Figura 8.

Focos de retamo espinoso y al fondo el Nevado del Ruiz



Nota. Imágenes capturadas en las salidas de campo. **Fuente.** Elaboración propia

a) *Analizar la invasión del retamo espinoso en un tramo de la parte alta del río Lagunilla, para el año 2023.*

- *Procesamiento de las imágenes.*

Se realiza el procesamiento mediante, el software PIX4Dmapper versión 4.8.4, para la generación del Ortomosaico, el Modelo Digital de Superficie (MDS), generando un informe de calidad el cual es empleado para obtener una visión general del proyecto y evaluar su precisión.

Se realizaron dos vuelos, el primero cubrió un área total de 78,3541 hectáreas (ha) y el segundo vuelo abarcó un área de 152,7894 ha (Figura 9), sin embargo, para trabajar de una manera unificada se fusionaron los ortomosaicos, utilizando el software especializado en Sistemas de Información Geográfica versión ArcGIS Pro 3.2.2, a través de la herramienta *Data Management Tools, Raster Dataset, Mosaic To New Raster*, abordando un total de 201,85 ha (Figura 10), correspondiente al valor total del área del presente estudio.

Figura 9.

Ortomosaico N°1 y N° 2 del área de estudio.

a)



b)



Nota: a) Vuelo N°1 b) Vuelo N°2 . **Fuente.** Equipo de TIC-CORTOLIMA, 2023.

Figura 10.

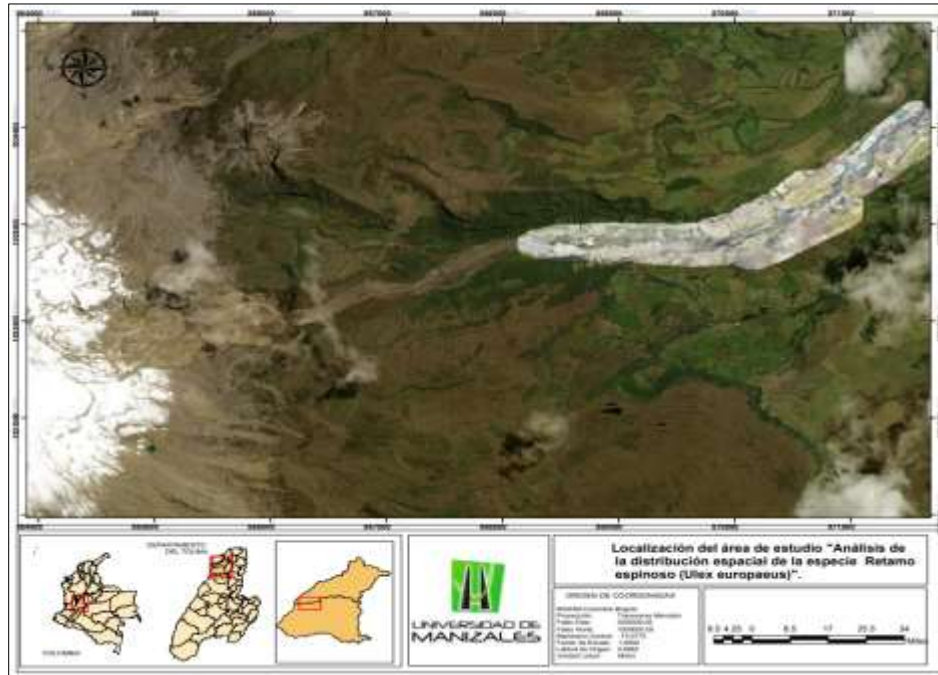
Ortomosaico final del área de estudio, tramo del río Lagunilla



Fuente. Elaboración propia.

Figura 11.

Mapa localización del área de estudio con el ortomosaico.



Fuente. Elaboración propia.

- *Post-procesamiento de los datos*

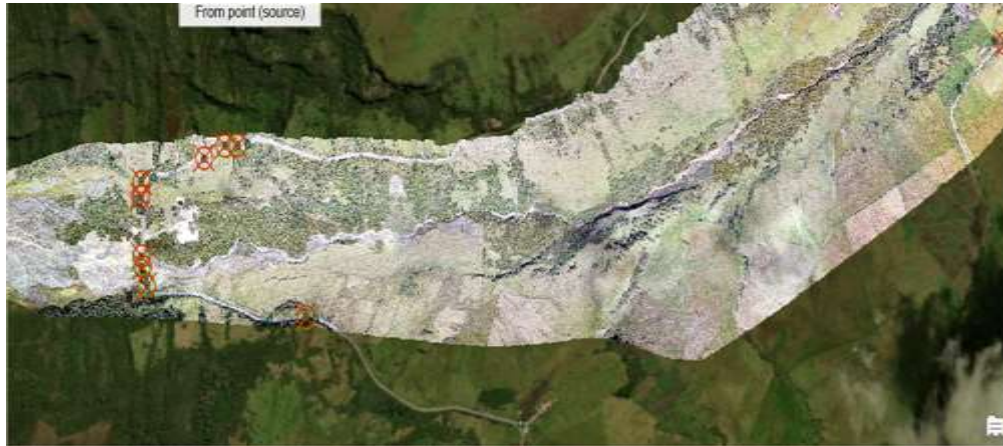
Puntos de control: corresponden al píxel específico en una imagen o localización en un mapa del cual conocemos sus coordenadas geográficas, estos puntos de control son empleados en corregir la distorsión geométrica de la imagen, a través de la superposición referenciada o el emparejamiento de las coordenadas con las de la imagen; es por ello que las coordenadas de la imagen junto con las del mapa se utilizaron para calcular la función de transformación que rectifica la imagen (Cruz Martínez, 2008).

En este contexto, se procedió a descargar las marcas de control y realizar el proceso de

Georreferenciación de la imagen respecto a la tierra, mediante los puntos tomados por el GPS, obteniendo como resultado la Figura 12, para el proceso de referenciación, se realizó con el Software ArcGis Pro.

Figura 12.

Proceso de georreferenciación de acuerdo a los puntos de control.



Fuente. Elaboración propia.

En consecuencia, al obtener una mejor precisión dentro del rango permitido se tiene como resultado un empalme entre el Mapa Base del software ArcGis Pro, con la imagen tomada en campo mediante el vehículo aéreo no tripulado- Dron.

Figura 13.

Resultado del proceso de georreferenciación.





Nota. En las imágenes se visualiza el resultado de la georreferenciación empleando puntos de control tomados en campo, a la izquierda de cada figura se identifica la imagen capturada con el Dron, y a la derecha el mapa base del software ArcGIS Pro. **Fuente.** Elaboración propia.

- **Delimitación detallada de cada uno de los focos presentes en el área de estudio.**

Utilizando el ortomosaico, se realizó la delimitación de cada uno de los focos de la especie vegetal retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla, mediante la herramienta ArcGIS Pro, permitiendo identificar las áreas donde están invadidas por esta especie.

El anterior proceso, fue desarrollado gracias al detalle proporcionado por las imágenes capturadas mediante el uso de las herramientas tecnológicas de los drones, tal como lo mencionan (Gränzig, et al., 2021), donde realizan un proceso de delineado manual dentro de las ortoimágenes de UAV, los cuales indican que se pueden utilizar como datos de referencia para una clasificación adecuada de la cobertura terrestre, debido a la información detallada de las ortoimágenes, el cual es suficiente para diferenciar los principales tipos generales de cobertura terrestre, incluso en el caso de las clases de coberturas con características similares, logrando

diferenciar el *Ulex europaeus*, sin embargo, es importante mencionar que, se identifica una mayor precisión en los casos donde los focos de retamo espinoso presentan floración.

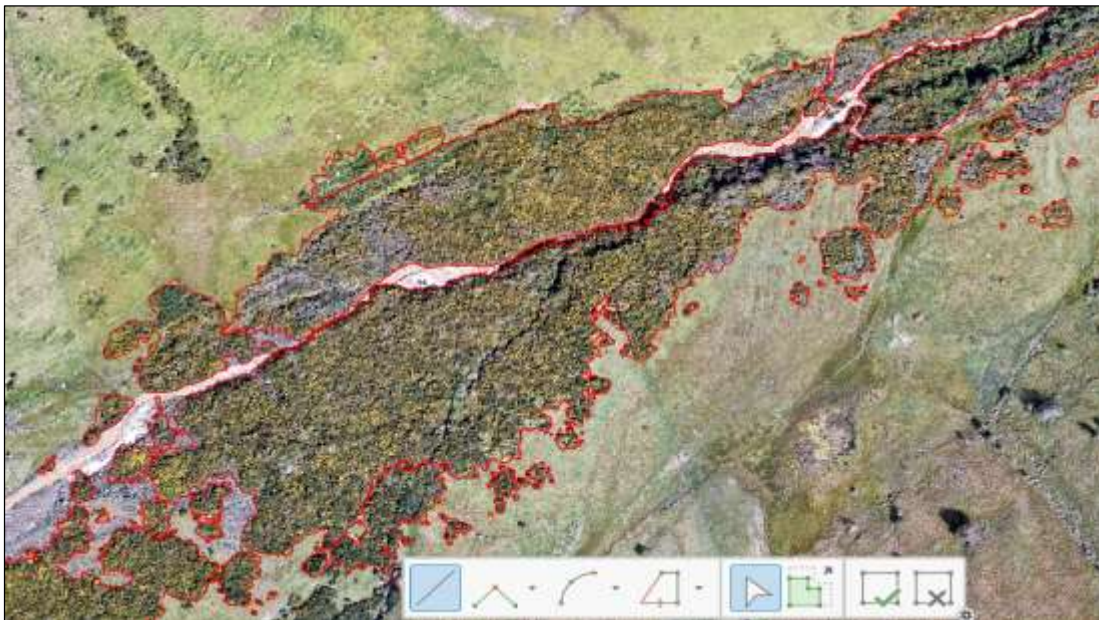
Para los puntos de retamo que no contaba con las condiciones de floración mencionadas anteriormente, fue necesario complementar la información con datos recopilados en campo, utilizando vídeos y fotografías tomadas tanto desde el suelo como desde el aire; esta acción también se evidencia en la literatura en estudios realizados para la especie, identificando que a menudo es difícil distinguir entre parches de retamo espinoso y otras coberturas vegetales como bosques naturales, bosques plantados, vegetación herbácea o arbustiva (Barreto, 2021). Esta situación se identificó en el área de estudio, donde se contaba con la presencia de especies nativas, lo que impide claridad en el proceso de identificación de los parches, sin embargo, en el proceso de delineado de los focos, se utilizó diferentes combinaciones de bandas RGB, lo que permitió resaltar y clasificar con mayor certeza la especie invasora presente en el área de estudio.

En el presente trabajo, se emplearon diferentes combinaciones, para mejorar la visualización de las coberturas; entre ellas, se destacaron las siguientes:

- *Combinación Banda 1,2,3*: esta combinación permitió identificar con claridad la tonalidad de los focos de retamo espinoso, resaltando los colores en tono verdadero. En particular, resalta los parches de retamo que presentan floración, mostrando una tonalidad amarilla, característica de la especie, lo cual facilita la diferenciación de estos focos con respecto a otras especies.

Figura 14.

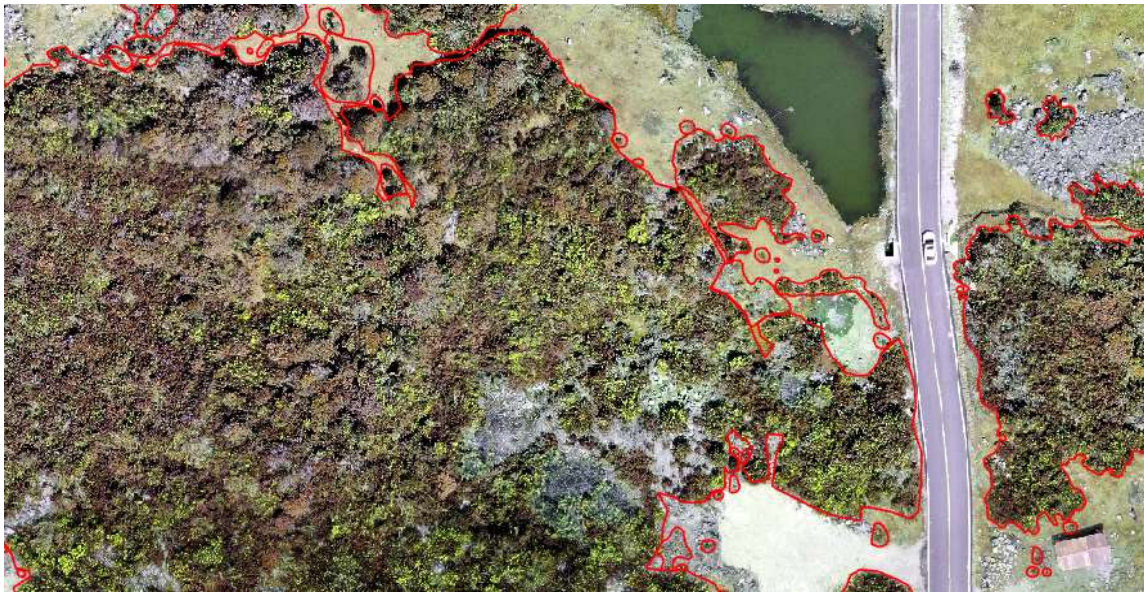
Combinación Banda 1,2,3



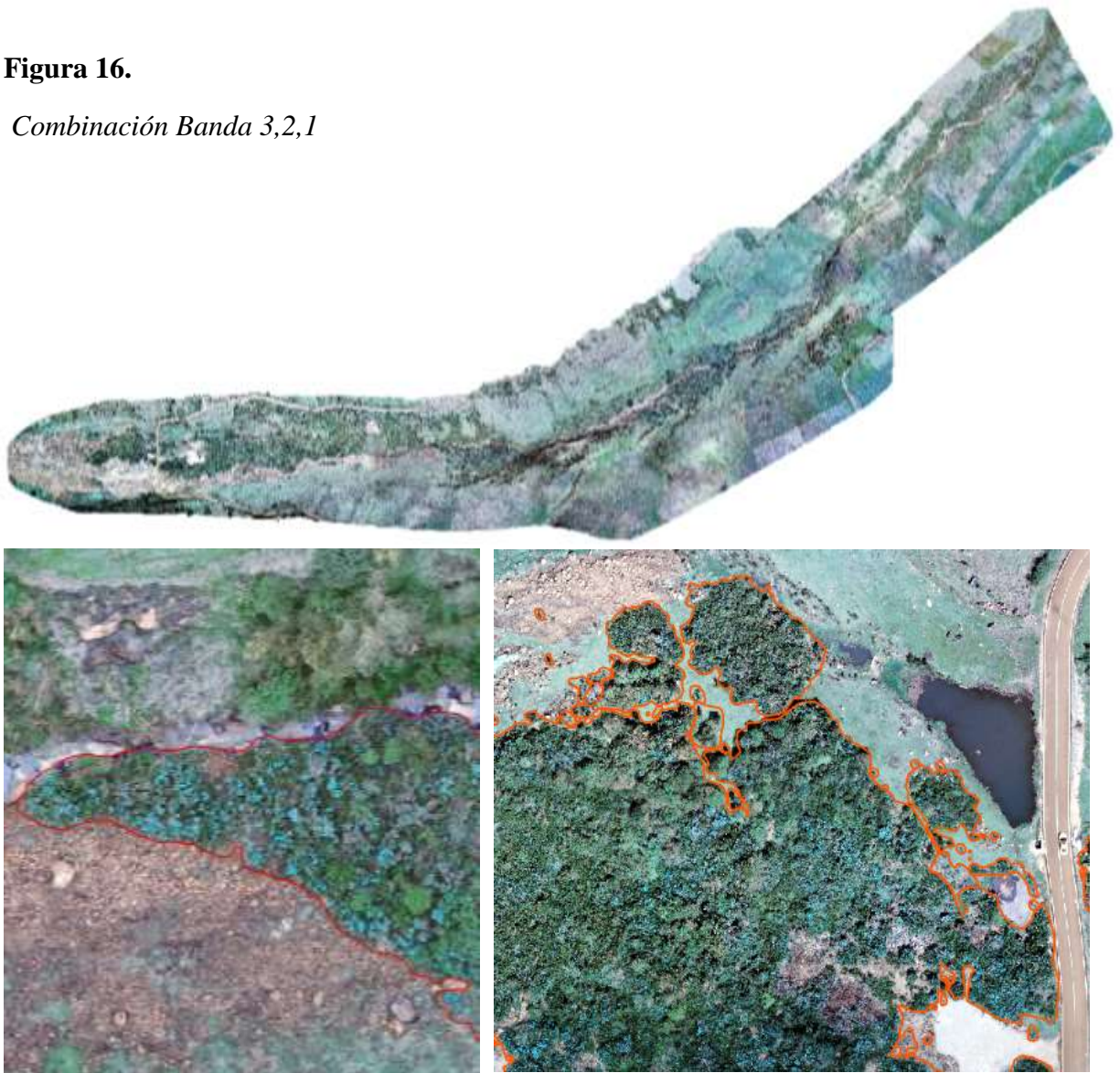
- *Combinación Banda 2,1,3*: esta combinación permite ver con claridad las zonas de retamo espinoso, tanto los parches que presentan floración como aquellos que fueron intervenidos en procesos de quema o erradicación y que aún se presentan residuos en el área objeto de estudio.

Figura 15.

Combinación Banda 2,1,3



- *Combinación Banda 3,2,1*: las tonalidades que generan esta combinación permite identificar con claridad las áreas con densidad boscosa y diferenciar el retamo espinoso, de otras especies arbóreas para los casos donde no presenta floración.

Figura 16.*Combinación Banda 3,2,1*

Cómo se relaciona en la literatura, el potencial de las ortoimágenes basadas en UAV, permite una alta precisión general de la clasificación de las coberturas terrestres, sin embargo, es importante realizar procesos de campo que conlleven a identificar aquellas áreas donde su identificación no es clara, o puedan ser confundidos con otras especies vegetales (Gränzig, et al., 2021).

b) Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI)

Este índice aprovecha el contraste de características entre dos bandas de un dataset ráster multiespectral: la absorción de pigmento de clorofila en la banda roja y la alta reflectividad del material de las plantas en la banda infrarroja cercana (NIR). Los valores extremadamente bajos o negativos representan a las áreas sin ninguna vegetación, tales como nubes, agua o nieve. Los valores muy bajos representan a áreas con muy poca vegetación o sin ninguna vegetación, tales como hormigón, piedra o suelo desnudo. Los valores moderados representan áreas de matorrales y praderas. Los valores altos representan a las zonas forestales y la vegetación densa (ESRI, s.f.).

Para calcular el NDVI se utilizó la siguiente ecuación:

$$NDVI = \frac{(NIR - ROJO)}{(NIR + ROJO)}$$

Donde NIR simboliza los valores del pixel de la banda infrarrojo cercano y ROJO representa los valores por pixel de la banda roja en los cálculos aritméticos por pixel. Para lograr esta combinación, se realizó una operación matemática entre las bandas cuyo resultado permite representar en forma gráfica algunas características de la planta como el vigor y el estrés hídrico (Bonnaire Rivera, et al., 2021).

En el presente trabajo, se realizó el proceso del cálculo del NDVI, en el software ArcGis Pro, mediante la herramienta de *Ráster Functions*, desplegando el Índice NDVI.

6.3.2 Fase 2. Analizar la invasión del retamo espinoso en un tramo de la parte alta del río Lagunilla, en los años 2022 y 2023, a partir del procesamiento digital de imágenes obtenidas con dron.

Según Chuvieco (1995), refiere que los estudios multi-anales, son empleados en la detección del cambio entre dos fechas de referencia, por tanto, la mayor parte de los trabajos de clasificación digital abordan cada imagen independientemente, para luego detectar los cambios por comparación en la clasificación obtenidas a partir de las fechas distintas. Donde los métodos de detección de cambios se basan en la técnica de sustraer pixel a pixel, los ND de las dos imágenes originales, para luego indicar umbrales de cambio entre ellas.

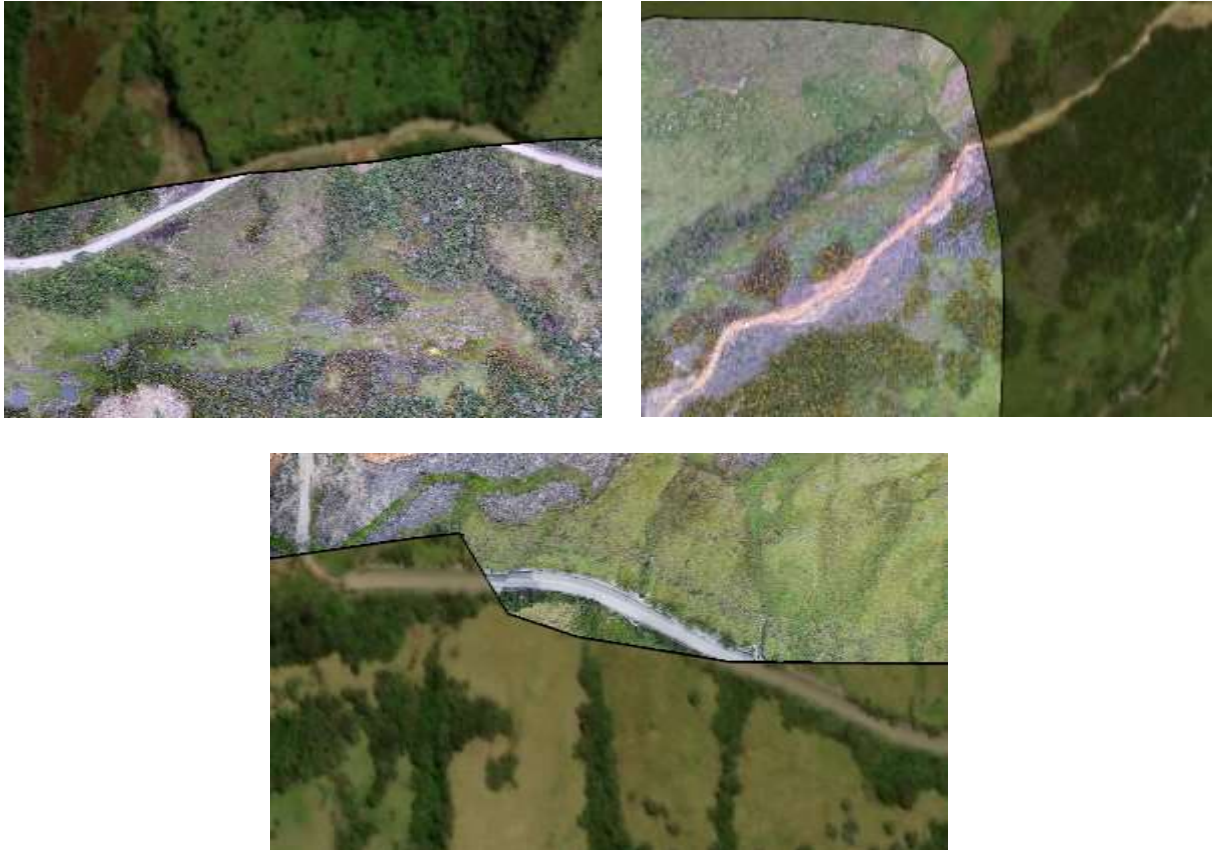
En este sentido, el vuelo de dron para obtener información del área de estudio, se realizó en la primera semana del mes de Julio del 2022, utilizando un vehículo aéreo no tripulado UAV – DJI MATRICE 210 V2, con el apoyo del equipo de la Oficina Asesora de Direccionamiento Estratégico -TIC de la Corporación Autónoma Regional del Tolima. Este vuelo abarcó un total de 65,6279 ha.

Posteriormente, se procedió a realizar un recorte de la misma área utilizando el Software Arcgis, para el vuelo efectuado en el 2023 en la misma zona de estudio, permitiendo contar con un polígono de igual área tanto para el año 2022 como para el 2023. El objetivo principal fue analizar si la presencia del retamo espinoso en esta área había aumentado o disminuido.

El proceso de georreferenciación se llevó a cabo de manera similar para ambos años, ubicando los puntos de control y verificando con el mapa base (Figura 17).

Figura 17.

Resultado del proceso de georreferenciación del vuelo realizado en el año 2022.



Nota. En las imágenes se visualiza el resultado de la georeferenciación empleando puntos de control tomados en campo, en cada figura se identifica la imagen capturada con el Dron y a la derecha el mapa base del software ArcGIS Pro. **Fuente.** Elaboración propia.

A continuación, se visualiza las imágenes de los vuelos realizados en el año 2022 y en el año 2023, en la misma zona de estudio que corresponde a la cuenca alta del Río Lagunilla, ubicado en el límite entre los municipios de Murillo y Villahermosa, Tolima.

Figura 18.

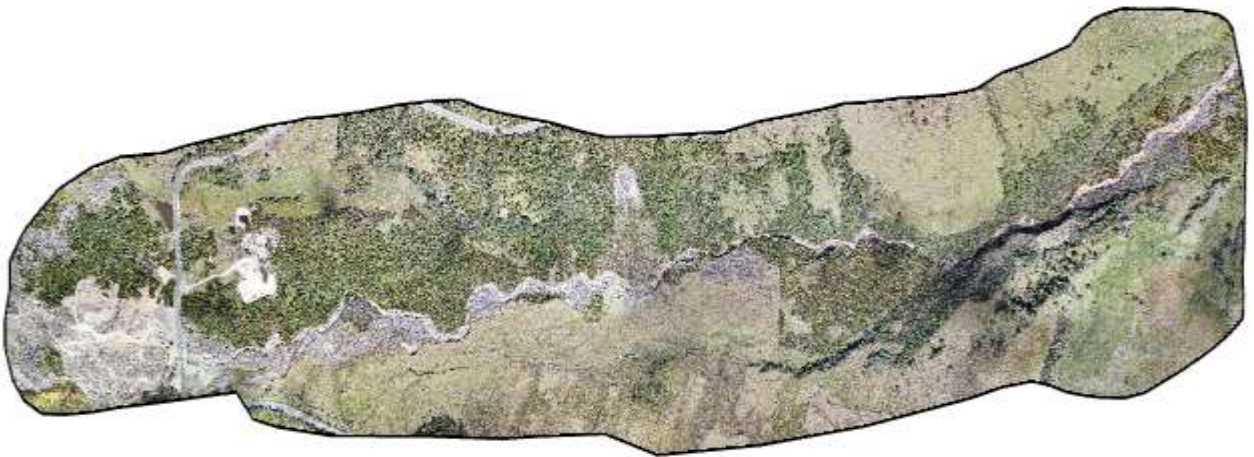
Área de estudio tomado con vehículo aéreo no tripulado, año 2022.



Nota. Imagen capturada con un Matrice 200 **Fuente.** Cortolima, 2022.

Figura 19.

Área de estudio tomado con vehículo aéreo no tripulado, año 2023.



Nota. Imagen capturada con un Dji Mavic Pro. **Fuente.** Cortolima, 2023.

- **Proceso de Georreferenciación año 2022.**

La georreferenciación de las imágenes obtenidas en el año 2022 se llevó a cabo de la misma manera que las fotografías aéreas de 2023, utilizando puntos de control y verificación con el mapa base. Es pertinente manifestar, que las imágenes empleadas en el presente trabajo están conformadas por tres bandas RGB y un infrarrojo cercano NIR. Posteriormente, se realizó la digitalización de las ortofotografías del año 2022 (Figura 18) y del año 2023 (Figura 19), llevando a cabo el proceso de clasificación manual de los focos de retamo espinoso en los dos periodos.

6.3.3 Fase 3: Determinar las áreas susceptibles a la propagación a la invasión de la especie retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla.

De acuerdo al Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (2018), la especie de retamo espinoso es una amenaza para los ecosistemas nativos colombianos, principalmente en los bosques andinos, altoandinos, páramos, humedales de montaña; puesto que estas especies colonizan e invaden rápidamente las áreas degradadas y las áreas con moderado nivel de transformación.

Es por ello, que para determinar las áreas susceptibles a la propagación a la invasión de la especie, se utilizó el estudio realizado por CORTOLIMA y Universidad del Tolima en el año 2020, denominado “*Análisis de los cambios de cobertura y uso de la tierra para el Departamento del Tolima- ACUT, Fase - I*”, estudio que abordó la cobertura y usos de la tierra a escala 1:25.000 a partir de la interpretación visual de imágenes del satélite correspondientes a los periodos 2016 – 2017 y 2017 – 2018; a partir de la metodología CORINE Land Cover

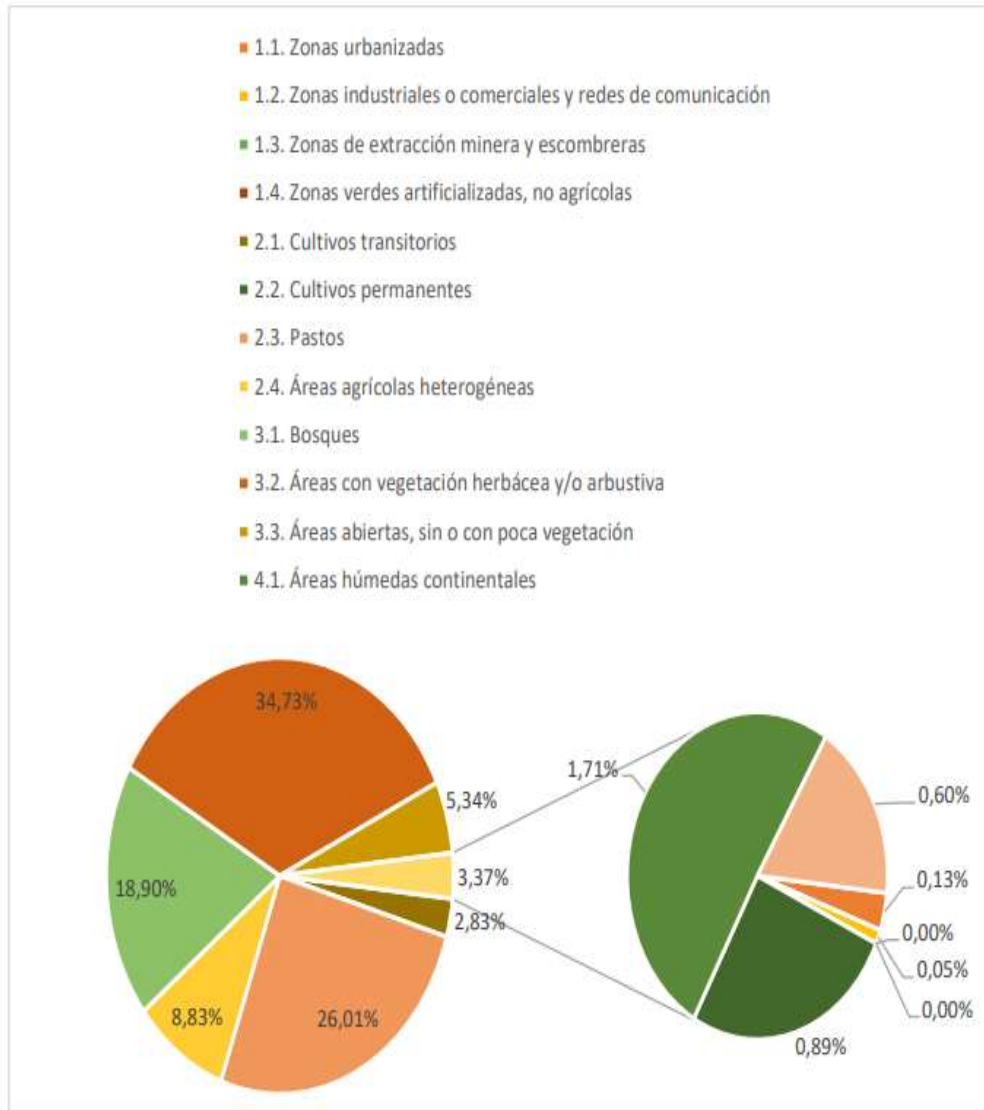
adaptada para Colombia (CLC-C) a escala 1:100.000 con los ajustes pertinentes para llegar hasta el nivel 6 de la leyenda, con trabajo de verificación en campo.

Dentro de los resultados obtenidos en el citado estudio, relacionan los siguientes análisis de coberturas para los municipios de Murillo y Villahermosa; en el caso del municipio de Murillo, se identifica un total de 42036 ha, se puede apreciar que la cobertura más prevalente es de origen natural la cual corresponde las áreas con vegetación herbáceas y/o arbustivas que cuentan con un área de 14598 ha (34,73%), seguido por la cobertura de origen antrópico perteneciente a los pastos que presentan un área de 10933 ha (26,01%) (Figura 20).

Por otro lado, el municipio de Villahermosa abarca un total de 28093 ha, apreciando que la cobertura más prevalente es de origen natural la cual corresponde a los bosques que cuentan con un área de 11047 ha (39,32%), seguido por la cobertura de origen antrópico perteneciente a los pastos que presentan un área de 8742 ha (31,12%) (Figura 21). Los bosques siguen teniendo una extensión territorial considerable en el municipio, pero es posible que a futuro se vean reducidos por las actividades ganaderas para dar paso a los pastos.

Figura 20.

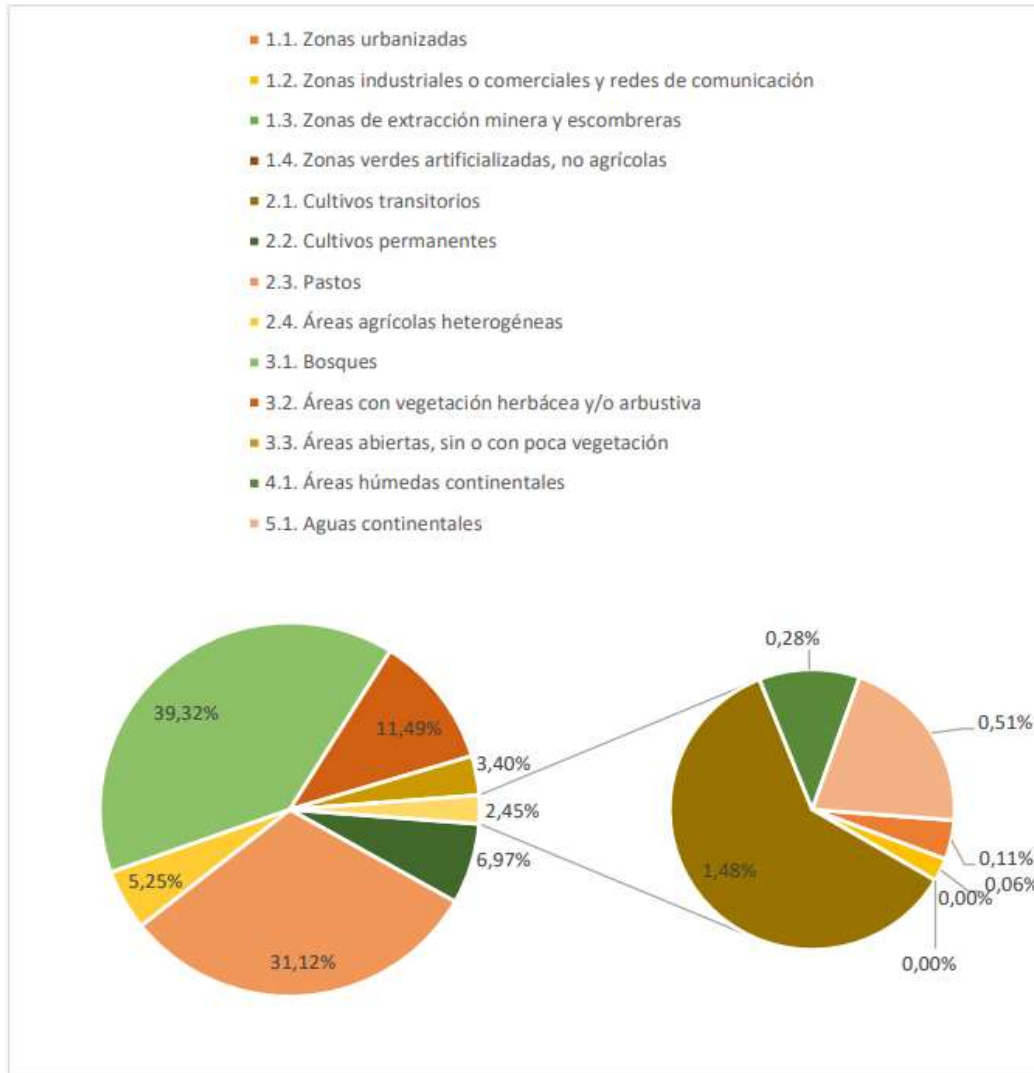
Distribución de las coberturas en el municipio de Murillo.



Nota. Coberturas presentes en el municipio de Murillo. **Fuente:** Proyecto ACUT (Cortolima & Universidad del Tolima, 2020).

Figura 21.

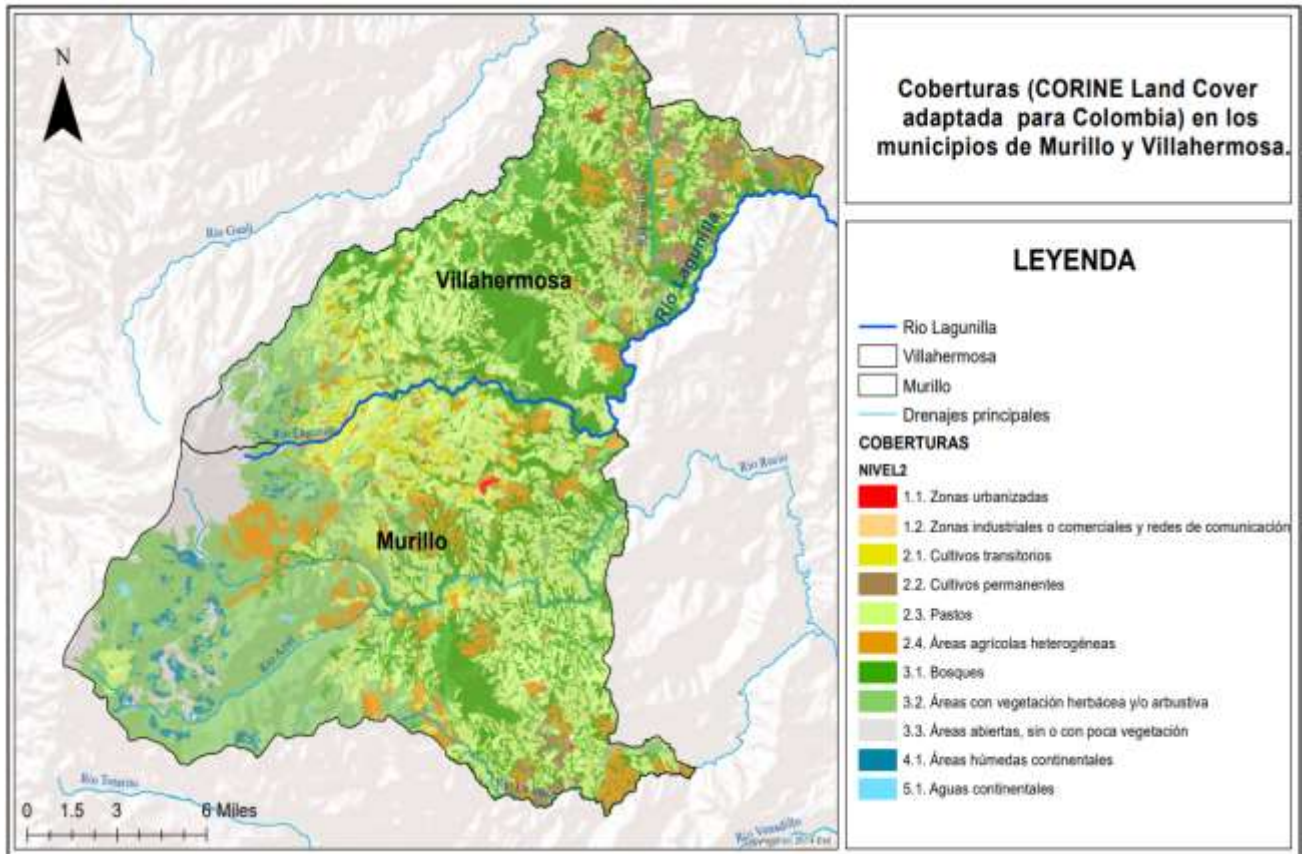
Distribución de las coberturas en el municipio de Villahermosa.



Nota. Coberturas presentes en el municipio de Villahermosa. **Fuente:** Proyecto ACUT (Cortolima & Universidad del Tolima, 2020).

Figura 22.

Mapa de coberturas para el municipio de Murillo-Villahermosa.



Fuente. Elaboración propia

Para el análisis de las unidades de coberturas de la tierra, se empleó el Nivel jerárquico Número dos (2), las cuales se describen a continuación cada una de las unidades mapeadas y codificadas siguiendo los lineamientos de la metodología CLC- adaptada para Colombia. Los números identificados entre paréntesis corresponden a los códigos de las Coberturas de la Tierra:

(1.) *Territorios artificializados.* Comprende las áreas de las ciudades y las poblaciones y aquellas áreas periféricas que están siendo incorporadas a las zonas urbanas mediante un

proceso gradual de urbanización o de cambio del uso del suelo hacia fines comerciales, industriales, de servicios y recreativos.

(1.1.) *Zonas urbanizadas*. Las zonas urbanizadas incluyen los territorios cubiertos por infraestructura urbana y todos aquellos espacios verdes y redes de comunicación asociados con ellas, que configuran un tejido urbano.

(1.2) *Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación*. Comprende los territorios cubiertos por infraestructura de uso exclusivamente comercial, industrial, de servicios y comunicaciones. Se incluyen tanto las instalaciones como las redes de comunicaciones que permiten el desarrollo de los procesos específicos de cada actividad.

(2.) *Terrenos agrícolas*: Son los terrenos dedicados principalmente a la producción de alimentos, y otras materias primas industriales, ya sea con cultivos, con pastos, en rotación y en descanso. Comprende las áreas dedicadas a cultivos permanentes, transitorios, y las zonas agrícolas heterogéneas, en las cuales también se pueden dar usos pecuarios.

(2.1.) *Cultivos transitorios*. Comprende las áreas ocupadas con cultivos cuyo ciclo vegetativo es menor a un año, llegando incluso a ser de sólo unos pocos meses, como por ejemplo los cereales (maíz, trigo, cebada y arroz), los tubérculos (papa y yuca), las oleaginosas (el ajonjolí y el algodón), la mayor parte de las hortalizas y algunas especies de flores a cielo abierto.

(2.2) *Cultivos permanentes*. Comprende los territorios dedicados a cultivos cuyo ciclo vegetativo es mayor a un año, produciendo varias cosechas sin necesidad de volverse

a plantar; se incluyen en esta categoría los cultivos de herbáceas como caña de azúcar, caña panelera, plátano y banano; los cultivos arbustivos como café y cacao.

(2.3) Pastos. Comprende las tierras cubiertas con hierba densa de composición florística dominada principalmente por la familia Poaceae, dedicadas a pastoreo permanente por un período de dos o más años. Algunas de las categorías definidas pueden presentar anegamientos temporales o permanentes cuando están ubicadas en zonas bajas o en depresiones del terreno. Una característica de esta cobertura es que en un alto porcentaje su presencia se debe a la acción antrópica, referida especialmente a su plantación, con la introducción de especies no nativas principalmente, y en el manejo posterior que se le hace.

(2.4.) *Áreas agrícolas heterogéneas*. Son unidades que reúnen dos o más clases de coberturas agrícolas y naturales, dispuestas en un patrón intrincado de mosaicos geométricos que hace difícil su separación en coberturas individuales; las condiciones locales de los suelos, las prácticas de manejo utilizadas y las formas locales de tenencia de la tierra.

(3.) *Bosques y áreas seminaturales*. Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo boscoso, arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales que son el resultado de procesos climáticos; también por aquellos territorios constituidos por suelos desnudos y afloramientos rocosos y arenosos, resultantes de la ocurrencia de procesos naturales o inducidos de degradación. Para la leyenda de coberturas de la tierra de Colombia, en esta categoría se incluyen otras coberturas que son el resultado de un fuerte manejo antrópico, como son las plantaciones forestales y la vegetación secundaria o en transición.

(3.1.) *Bosque*. Comprende las áreas naturales o seminaturales, constituidas principalmente por elementos arbóreos de especies nativas o exóticas. Los árboles son plantas leñosas perennes con un solo tronco principal, que tiene una copa más o menos definida.

(3.2.) *Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva*. Comprende un grupo de coberturas vegetales de tipo natural y producto de la sucesión natural, cuyo hábito de crecimiento es arbustivo y herbáceo, desarrolladas sobre diferentes sustratos y pisos altitudinales, con poca o ninguna intervención antrópica

(3.3.) *Áreas abiertas, sin o con poca vegetación*. Comprende aquellos territorios en los cuales la cobertura vegetal no existe o es escasa, compuesta principalmente por suelos desnudos y quemados, así como por coberturas arenosas y afloramientos rocosos, algunos de los cuales pueden estar cubiertos por hielo y nieve.

(4.) *Áreas húmedas*. Comprende aquellas coberturas constituidas por terrenos anegadizos, que pueden ser temporalmente inundados y estar parcialmente cubiertos por vegetación acuática, localizados en los bordes marinos y al interior del continente

(4.) *Áreas húmedas continentales*. Las áreas húmedas hacen referencia a los diferentes tipos de zonas inundables, pantanos y terrenos anegadizos en los cuales el nivel freático está a nivel del suelo en forma temporal o permanente. Fueron diferenciados los siguientes tipos.

(5.) *Superficies de agua*. Son los cuerpos y cauces de aguas permanentes, intermitentes y estacionales, localizados en el interior del continente y los que bordean o se encuentran adyacentes a la línea de costa continental, como los mares. Se incluyen en esta clasificación los fondos asociados con los mares, cuya profundidad no supere los 12 metros.

(5.1.) *Aguas continentales*. Son cuerpos de aguas permanentes, intermitentes y estacionales que comprenden lagos, lagunas, ciénagas, depósitos y estanques naturales o artificiales de agua dulce (no salina), embalses y cuerpos de agua en movimiento, como los ríos y canales.

En el presente estudio se integró una clasificación nueva a las caracterizadas en la metodología CORINE Land Cover adaptada para el país (IDEAM, 2010), donde se incluye la especie vegetal invasora “*retamo espinoso (Ulex europaeus)*” (Tabla 1), esto se realizó con el principal objetivo de tener una clasificación de píxel más detallada para la especie objeto de estudio, por lo tanto, fue numerada en la leyenda con el número seis (6.).

Tabla 1. *Unidades de coberturas de la tierra identificadas en el área de estudio.*

Nivel 1	Nivel 2
1. Territorios Artificializados	1.1. Zonas urbanizadas
	1.2. Zonas industriales o comerciales y redes de comunicación
2. Territorios Agrícolas	2.1 Cultivos transitorios.
	2.2. Cultivos permanentes
	2.3. Pastos
	2.4 Áreas agrícolas heterogéneas
3. Bosques y áreas Seminaturales	3.1. Bosques
	3.2 Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva.
	3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación
4. Áreas húmedas	4.1 Áreas húmedas continentales
5. Superficies de Agua	5.1. Aguas continentales
6. Retamo espinoso (<i>Ulex europaeus</i>)	

Nota. Adaptada de la Metodología CORINE Land Cover para Colombia. **Fuente.** (IDEAM, 2010)

- **Propagación del retamo espinoso:**

El proceso de expansión del retamo puede darse de manera natural, a través de los diferentes tipos de dispersión: anemócora, zoócora, hidrocora (Figura 23), o de manera asistida, cuando las semillas o propágulos son transportados por los seres humanos (vehículos, ropa, zapatos). Muchas semillas de especies invasoras, a veces, son transportadas de manera involuntaria debido a que van mezcladas con semillas que tienen un interés económico (Barrera-Cataño, et al, 2019). Adicionalmente, como se menciona en la Resolución N° 0684 del 2018, emitida por el MADS, la planta cuenta con una fácil adaptación al estrés ambiental, habilidades competitivas para excluir otras especies vegetales, bajos niveles de requerimientos edáficos que le posibilita colonizar espacios que otras especies no pueden aprovechar.

En la salida de campo desarrollada en la parte alta de la cuenca del río Lagunilla, se evidenció la existencia de diferentes factores que generan la propagación de la especie (Figura 24).

De acuerdo a lo anterior, para determinar las zonas vulnerables a la invasión de la especie retamo espinoso en la zona de Páramo, se tuvo en cuenta los siguientes criterios:

1. Áreas fragmentadas, claros o zonas abiertas
2. Identificación de caminos y vías
3. Áreas urbanas
4. Zonas con alta concurrencia de turistas

Figura 23.

Mecanismos de dispersión del retamo espinoso en el área de estudio.



Fotografía: Río Lagunilla, Villahermosa- Murillo

Hidrocora: método de dispersión de las semillas o frutos llevado a cabo por el agua (lluvia, arroyos o ríos- Corrientes fluviales).



Fotografía: Vereda La Cabaña, Villahermosa

Zoócora: diseminación facilitada por los animales, generalmente de manera pasiva llevando las semillas pegadas a sus pieles



Fotografía: Vereda La Cabaña, Villahermosa

Anemocora: dispersión de las semillas ocasionado por la fuerza del viento. Este agente transportador ocasiona que recorran grandes distancias.

Nota: Basada en la revisión y análisis de información secundaria. **Fuente:** Elaboración propia.

Figura 24.

Condiciones que favorecen la dispersión del retamo en el área de estudio



Nota. Mecanismos de transporte registrados en las salidas de campo en la parte alta del Río Lagunilla.

Fuente. Elaboración propia.

Estos criterios son las principales causas de propagación de la especie, ya que diversos estudios analizan la dependencia de estas plántulas con respecto a la disponibilidad de luz permiten un mejor desarrollo, así como su asociación a paso frecuente de bovinos, vehículos o personas, debido a la relación entre la presencia de *Ulex europaeus* con las perturbaciones y actividades antropogénica, y contribuyen a su germinación y rápido crecimiento (Gränzig et al., 2021).

7. Resultados

- **Evaluar la distribución de la presencia del retamo espinoso (*Ulex europaeus*), en la parte alta del río Lagunilla, mediante el empleo de un vehículo aéreo no tripulado - UAV.**

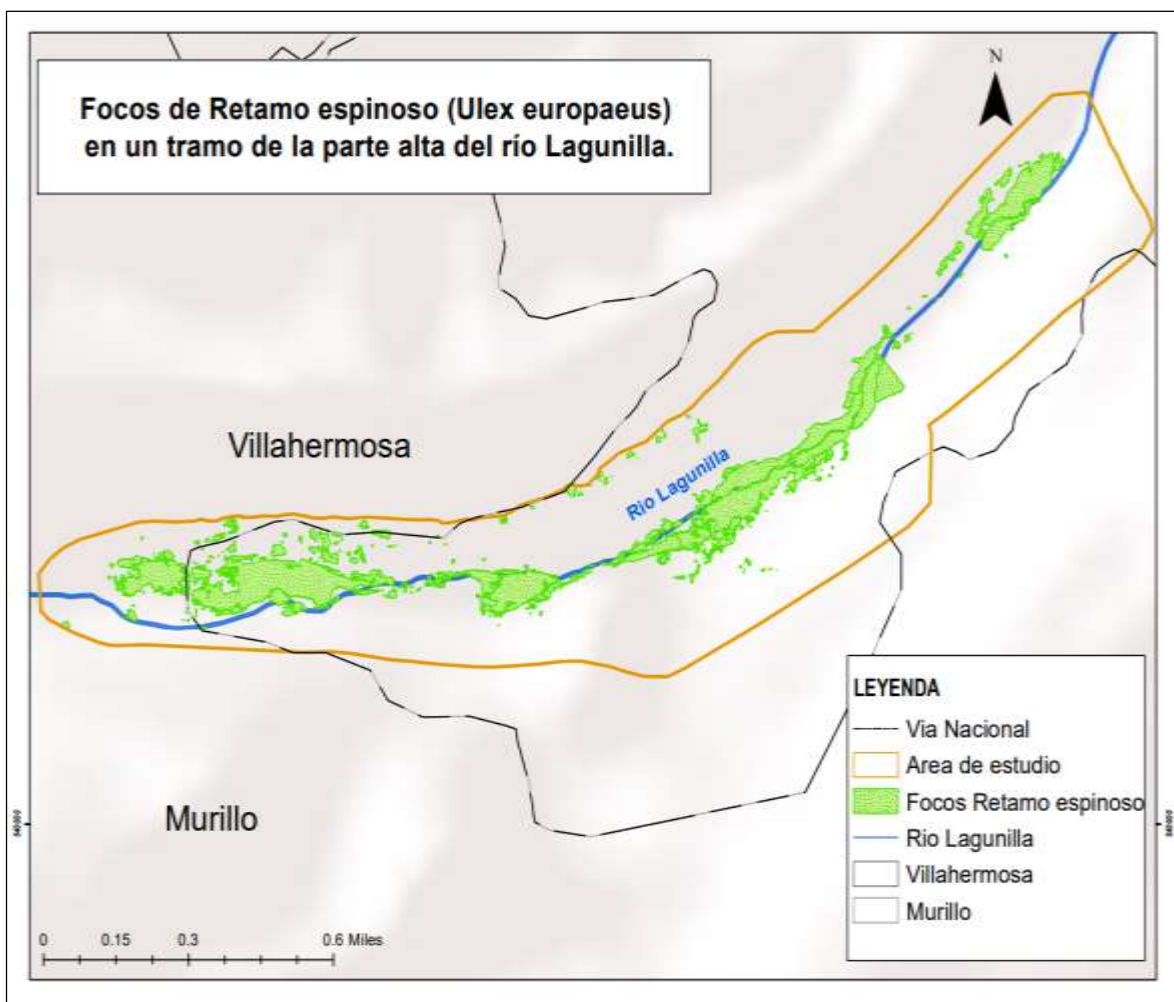
Una vez completado el proceso de fotointerpretación de los vuelos realizados en el área de estudio, se llevó a cabo la clasificación supervisada de cada uno de los focos de retamo espinoso. Posteriormente, con el procesamiento de los datos, se obtuvo como resultado un total de 25,16 hectáreas con presencia de esta especie (Figura 25), lo cual indica una invasión del 12,4% en relación con el total del área de estudio que abarcó 201,85 hectáreas.

Del porcentaje de invasión, el principal foco de invasión de retamo espinoso en el polígono de estudio, está concentrado en las zonas ribereñas del río Lagunilla, identificando la afectación directa en los bosques riparios, tanto en la margen derecha como en la margen izquierda. De acuerdo a Barrera-Cataño et al., (2019) mencionan que diferentes investigaciones sobre la especie *U. europaeus*, han evidenciado que los bordes de quebradas o cuerpos de agua,

son considerados como uno de los ecosistemas más susceptibles a ser invadidos, así como en los suelos desprovistos de vegetación, y en condiciones muy pobres a muy ricos en contenido de materia orgánica.

Figura 25.

Distribución del retamo espinoso en la zona alta del río Lagunilla.



De acuerdo a la revisión a nivel de veredas, se evidencia focos de retamo en las siguientes: La Cabaña (Murillo), Santa Barbara (Murillo) y Betulia (Villahermosa) (Figura 26), y según la cartografía oficial del IGAC “Predios”, se identifica un traslape total con 13 predios (Figura 27) en el área de estudio que abarca los Municipios de Murillo y Villahermosa, los cuales están en una condición de susceptibilidad alta para la dispersión de retamo en el resto de los predios.

Lo anterior, se concluye de acuerdo al estudio de Coberturas y uso de la tierra, realizado por CORTOLIMA y la Universidad del Tolima en el año 2020, en donde se identifica que las veredas que traslapan con el área objeto de estudio están representadas principalmente por las áreas agrícolas heterogéneas, pastos, cultivos transitorios, áreas abiertas, sin o con poca vegetación y vegetación herbácea; coberturas consideradas aptas para el crecimiento y proliferación del retamo espinoso, por encontrarse a disposición directa del sol y por no contener barreras naturales que limiten su propagación.

Figura 26.

Veredas de Murillo y Villahermosa con presencia de retamo espinoso.

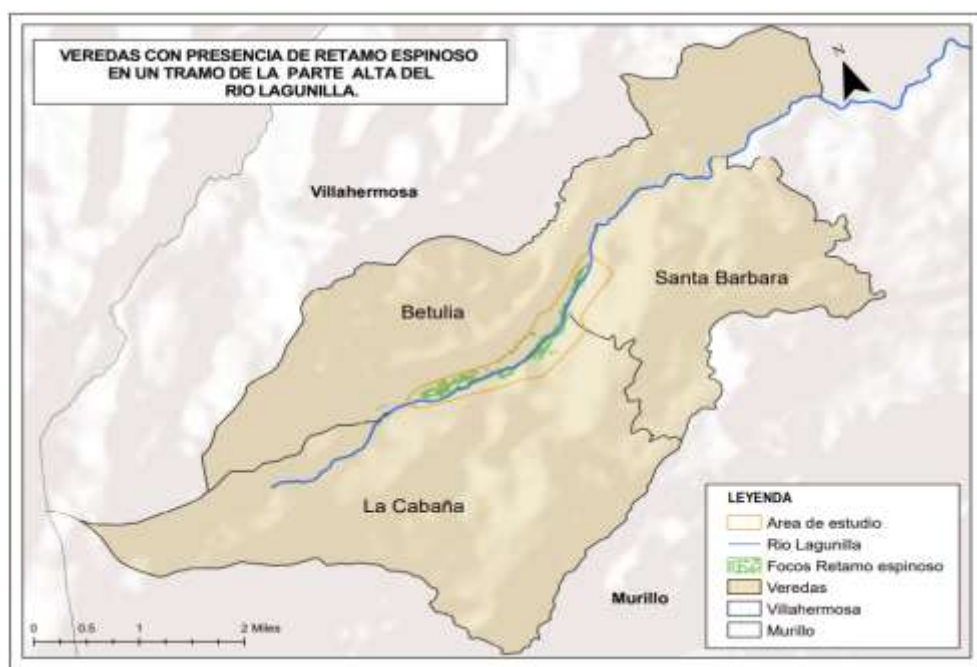
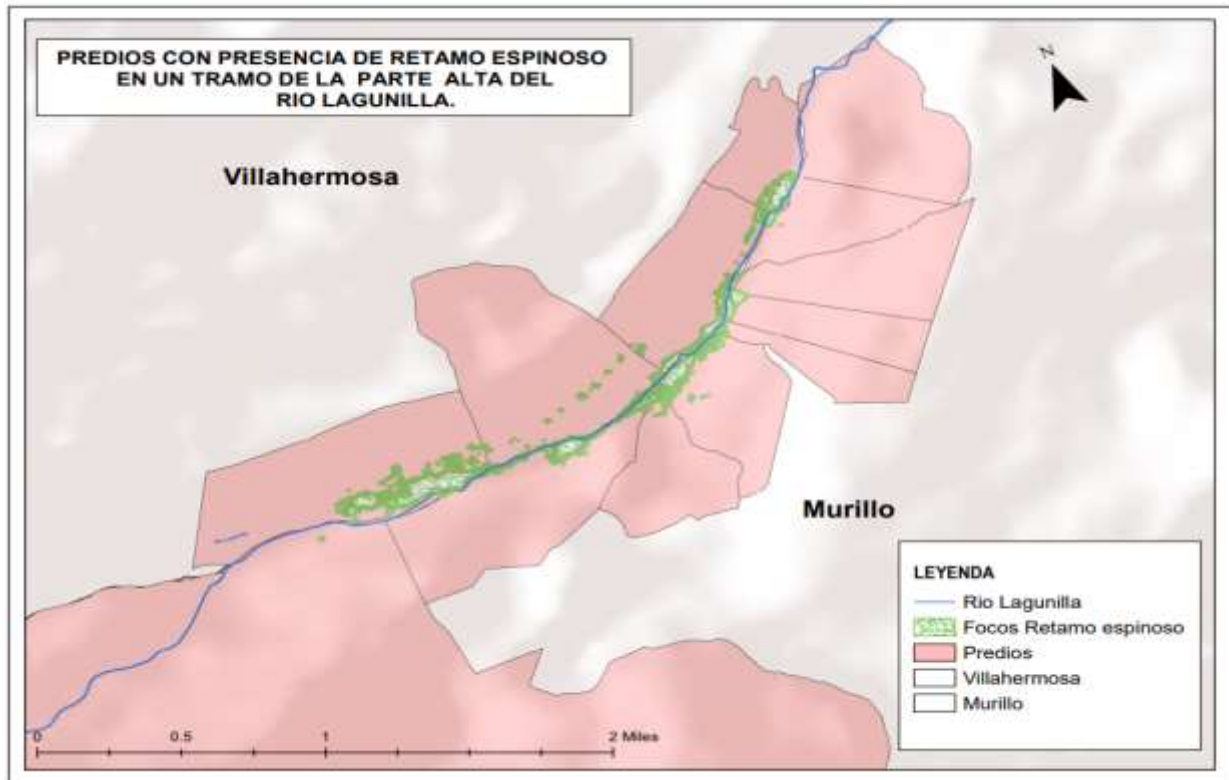


Figura 27.

Predios con presencia de retamo espinoso en la parte alta del Río Lagunilla.



Es importante la caracterización de los predios, ya que permite identificar cuáles son los propietarios o fincas que requieren de una intervención inmediata, y en qué tipos de manejo son importantes a realizar de acuerdo al estado de invasión del predio, ya que según esta condición se determina qué tipo de intervención se debe adelantar, entre ellas se identifican la contención, prevención, control, mitigación o la erradicación, siguiendo los lineamientos establecidos por el MADS, mediante la Resolución 0684 del 2018, permitiendo una posterior restauración y recuperación de estas zonas.

- *Cartografía social.*

Con el objetivo de tener información primaria y corroborar las coberturas y uso del área de estudio, se realizó un proceso de cartografía social, mediante una revisión de los datos en la zona objeto de estudio con los dueños de las fincas ubicadas en la parte alta del río Lagunilla.

A través de la cartografía social se logró evidenciar el conocimiento que tiene la comunidad sobre la especie invasora, identificando que los habitantes locales ya se encuentran familiarizados que es una especie altamente invasora, esto como consecuencia, de los procesos de erradicación que han implementado al interior de sus predios, sin obtener resultados de manejo óptimos, identificando que son zonas donde han invertido recursos propios pero la especie se sigue proliferando ocasionando pérdidas en los procesos ejecutados.

Se identifica que la mayoría de las prácticas de manejo que la comunidad ha implementado con respecto al retamo espinoso en el área de estudio, generalmente, son procesos de erradicación manual empíricamente, sin embargo, lo único que han evidenciado que mitiga la proliferación es la cobertura vegetal o la siembra de cultivos, sin embargo, relacionan que tienen que hacer monitoreos permanentes, evitando que se propague a otros sitios.

Adicionalmente, la comunidad manifiesta que cualquier actividad de manejo o erradicación, debe ser llevada a cabo de manera coordinada con los demás vecinos; esto por tratarse de una especie invasora con características de propagación y colonización rápida, existiendo el riesgo de que vuelva a invadir la zona, incluso después de haber implementado procesos de control e intervención; tal como lo manifiesta Ríos-Camacho (2022), donde indica que se pueden llegar a presentar inconvenientes con los propietarios de terrenos aledaños, donde

no se realizan manejos adecuados, ya que la forma de dispersión de las semillas, puede alcanzar grandes distancias cuando la vaina del retamo explota, sobrepasando cercas que separan los predios o simplemente dispersándose por la acción del viento, lo que puede resultar en pérdidas en la inversión realizada

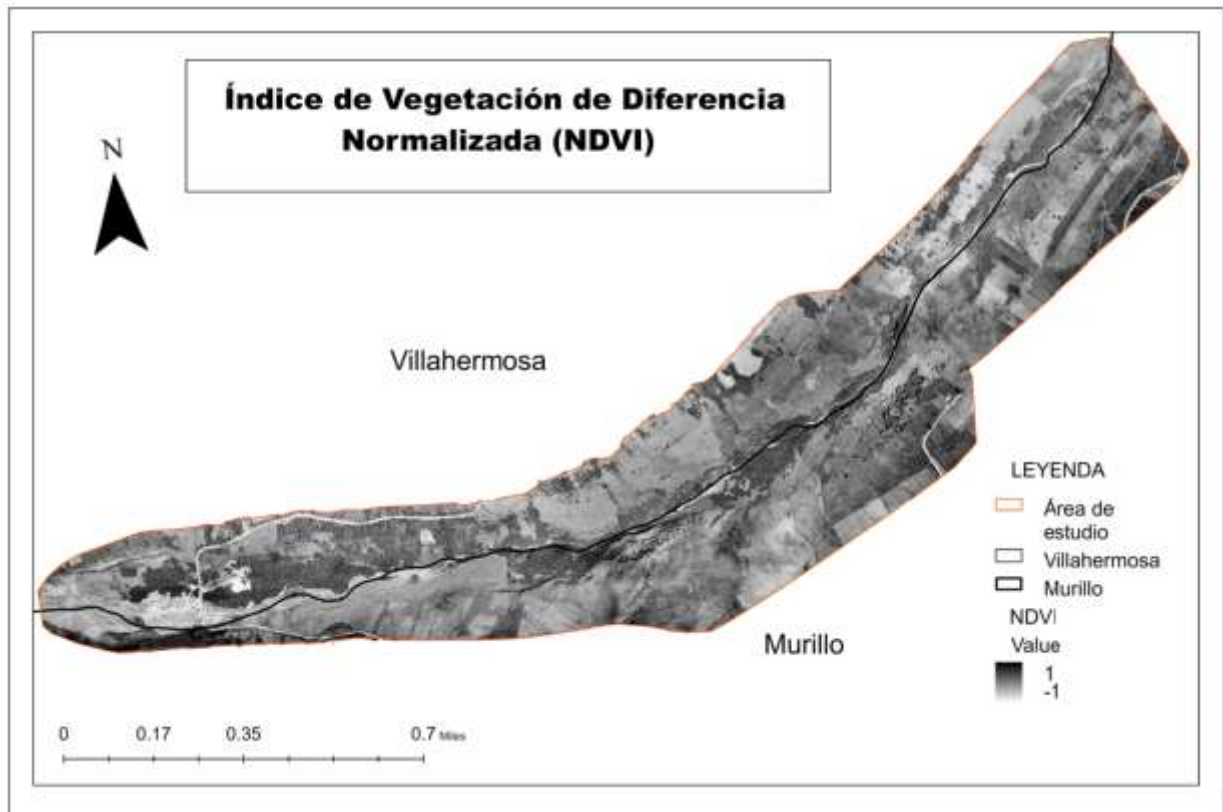
De igual manera, en los recorridos realizados en compañía con la comunidad permitió identificar aquellas zonas con alta presencia de turismo o alta concurrencia de personas, identificando entre ellas la vía nacional (conduce del municipio de Murillo-Tolima hacia el municipio de Manizales-Caldas), como uno de los puntos cruciales, los propietarios indican que en el último año (2022-2023) se ha incrementado notoriamente el tránsito de vehículos, turistas-visitantes y ciclistas, quienes manifiestan tener una alta preocupación por la proliferación de la especie a nuevas zonas; es pertinente manifestar que este aspecto es objeto de análisis en el presente estudio para las áreas susceptibles a la expansión del retamo espinoso para el criterio social.

- *Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).*

Con el objetivo de analizar el Índice de vegetación de diferencia normalizada- NDVI, el cual refiere a la salud vegetal, se realizó el cálculo y posterior análisis, para el área de estudio que abarca un tramo de la parte alta del río Lagunilla, para el año 2023 (Figura 28).

Figura 28.

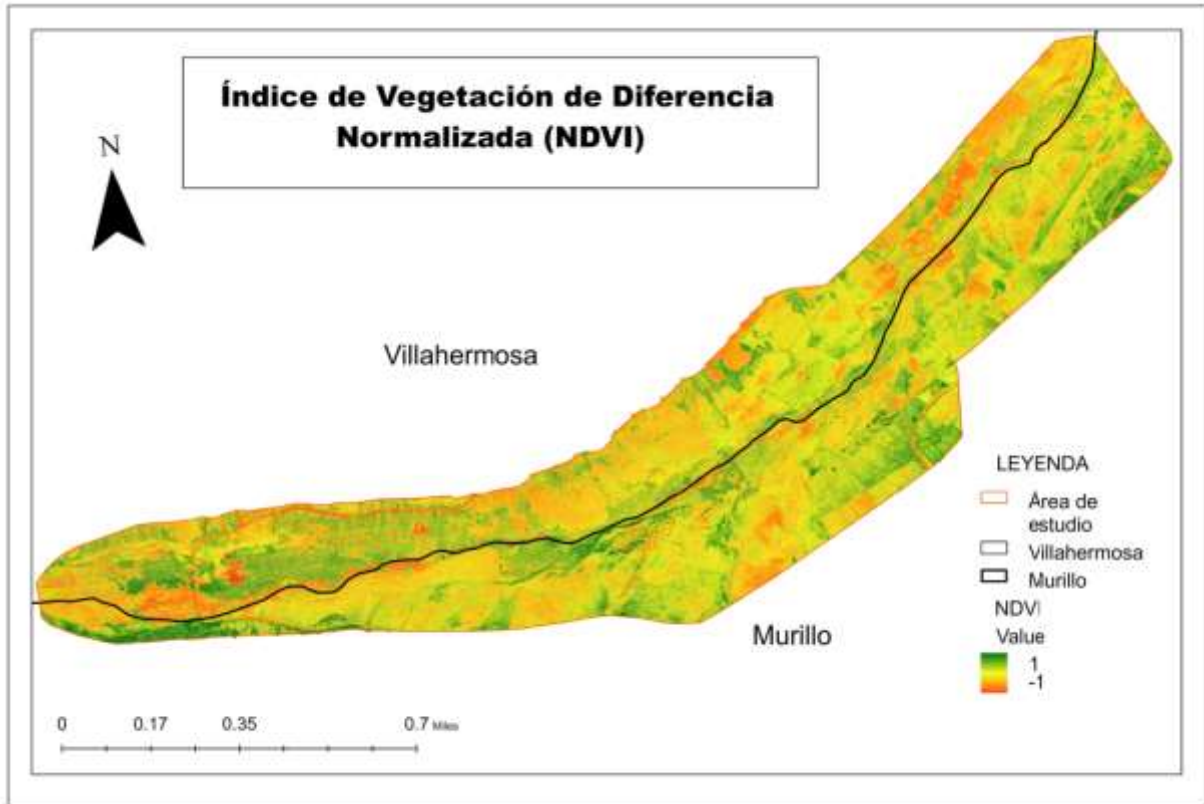
Índice de vegetación NDVI en el área de estudio.



Este índice, se ubica entre los valores de -1,0 y 1,0 para representar la densidad de la vegetación y el vigor, donde los valores negativos corresponden principalmente a las nubes, el agua y la nieve, y los valores cercanos a cero corresponden principalmente a las rocas y al terreno desnudo. Los valores muy bajos de NDVI (por debajo de 0,1) corresponden a áreas de rocas, arena o nieve. Los valores moderados (0,2 a 0,3) representan arbustos y praderas, mientras que los valores altos (0,6 a 0,8) indican temperaturas y selvas tropicales (ESRI, s.f.).

Figura 29.

Índice de vegetación NDVI en el área de estudio.



De acuerdo a lo anterior, y como se puede apreciar en la Figura 29, se visualiza en tonos rojos las zonas donde hay ausencia de cobertura vegetal, correspondiente a la cobertura de cuerpos hídricos (río Lagunilla, lagos), la vía Nacional que conduce de Murillo (Tolima) hacia la ciudad de Manizales (Caldas), y que atraviesa el área de estudio, zonas con presencia de rocas entre otros. Así mismo, se identifica para los tonos color verde claro zonas con presencia de pastos.

Los representación en el mapa de color verde oscuro son áreas con vegetación densa; es pertinente aclarar que para el caso de la especie invasora retamo espinoso, es una planta catalogada como arbusto, leñoso, perenne (vive durante más de dos años), estas plantas en estado adulto pueden presentar tamaños variables, su altura pueden oscilar entre los 1 y 4 metros, como es el caso presentado en la cuenca alta del río Lagunilla, además de tener un crecimiento del tallo principal muy ramificado, su grosor puede alcanzar hasta los 10 – 12 cm de diámetros, generalmente se identifica como siempre verde y en constante floración de color amarillo, (Barrera-Cataño et al., 2019), por consiguiente en el resultado arrojado por el índice de vegetación NDVI, se puede visualizar en el mapa para la especie retamo espinoso en la categoría de tonos verdes, ubicados principalmente en la margen derecha e izquierda del río Lagunilla, y distribuido en pequeños focos en la zona objeto de estudio.

Lo anterior, se presenta debido a que el retamo espinoso, pese a que es una especie invasora, sigue estando en la categoría de flora como especie vegetal, por lo que las tonalidades verdes representadas en el mapa pueden ser fácilmente confundidos con otro tipo de plantas; en el área de estudio se evidencia los matorrales densos de retamo presentan un valor del índice en rangos de 0,4 a 0,7, mientras que los parches de retamo que se identifican aislados, en estados iniciales, o con mayor floración están en un rango de 0,2 a 0,4.

- **Analizar la invasión del retamo espinoso en un tramo de la parte alta del río Lagunilla, en los años 2022 y 2023, a partir del procesamiento digital de imágenes obtenidas con dron.**

De acuerdo con la cuantificación de los focos de retamo espinoso para los años 2022 y 2023, se evidencia un aumento en la extensión de esta especie invasora de 1,008 hectáreas. Inicialmente, en el año 2022, el área cubierta por la especie era de 12,18 hectáreas y para el año 2023 alcanzó 13,19 hectáreas (Tabla 2).

En este sentido, para el año 2022 el valor de afectación por el retamo espinoso equivale el 18,8% del polígono, para el caso del año 2023 aumentó a un 20,44 %, en relación con las 64,5 hectáreas que abarcan el área total del polígono objeto de estudio, lo cual se considera un valor de manejo y control requerido a corto y mediano plazo, en un área que está sobre la margen de los bosques riparios, consideradas como áreas de importancia ambiental, por ser corredores ecológicos que permiten el movimiento y la dispersión de especies, actuando estos bosques como filtros naturales y regulando el flujo del agua.

Tabla 2. Comparación del área de los focos de invasión de la especie retamo espinoso, en la zona de estudio entre los años 2022 y 2023.

	Año 2022	Año 2023
Hectáreas invadidas por el retamo espinoso	12,182 ha	13,197 ha
Porcentaje de invasión	18,8 %	20,44 %

Fuente. Elaboración propia

Figura 30.

Focos de retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla, año 2022.

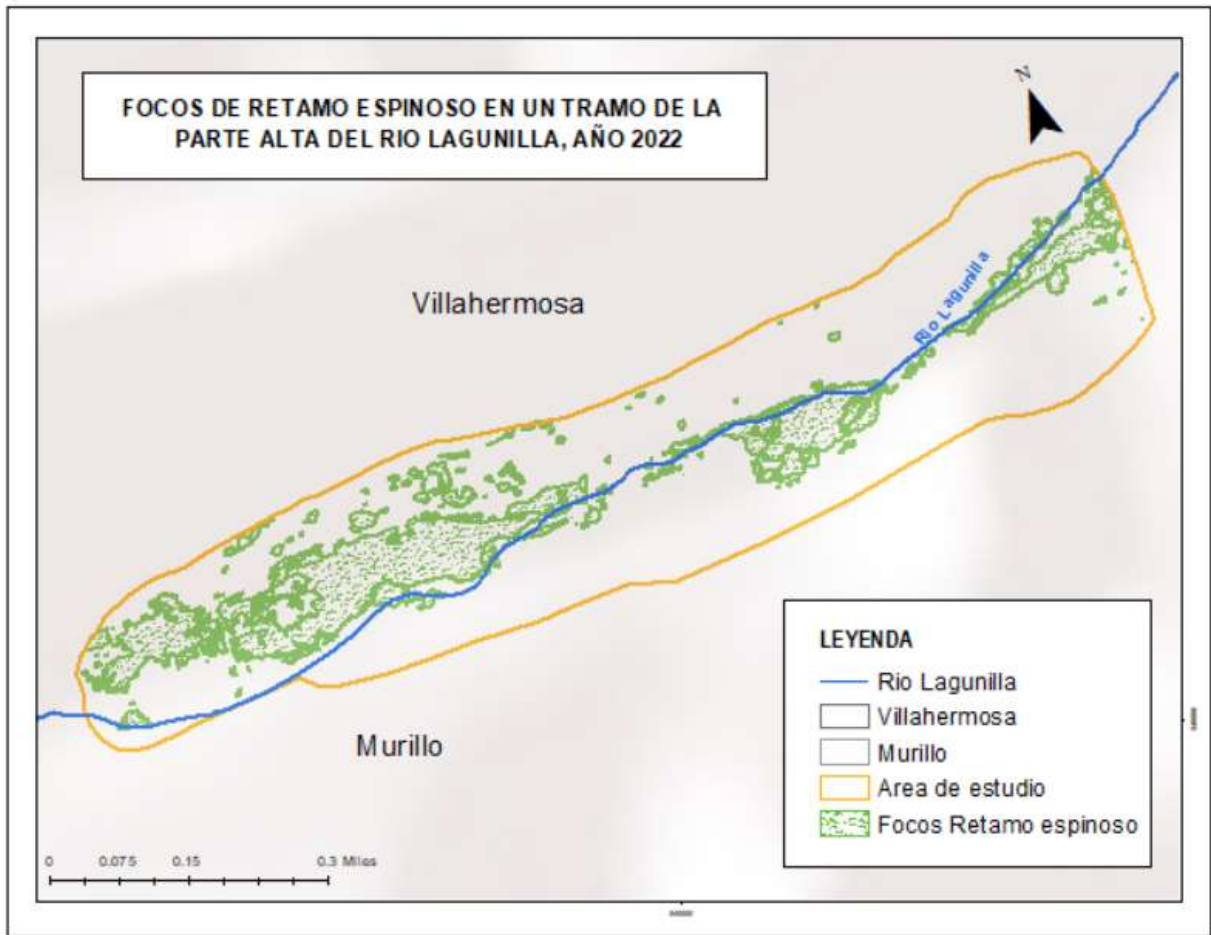
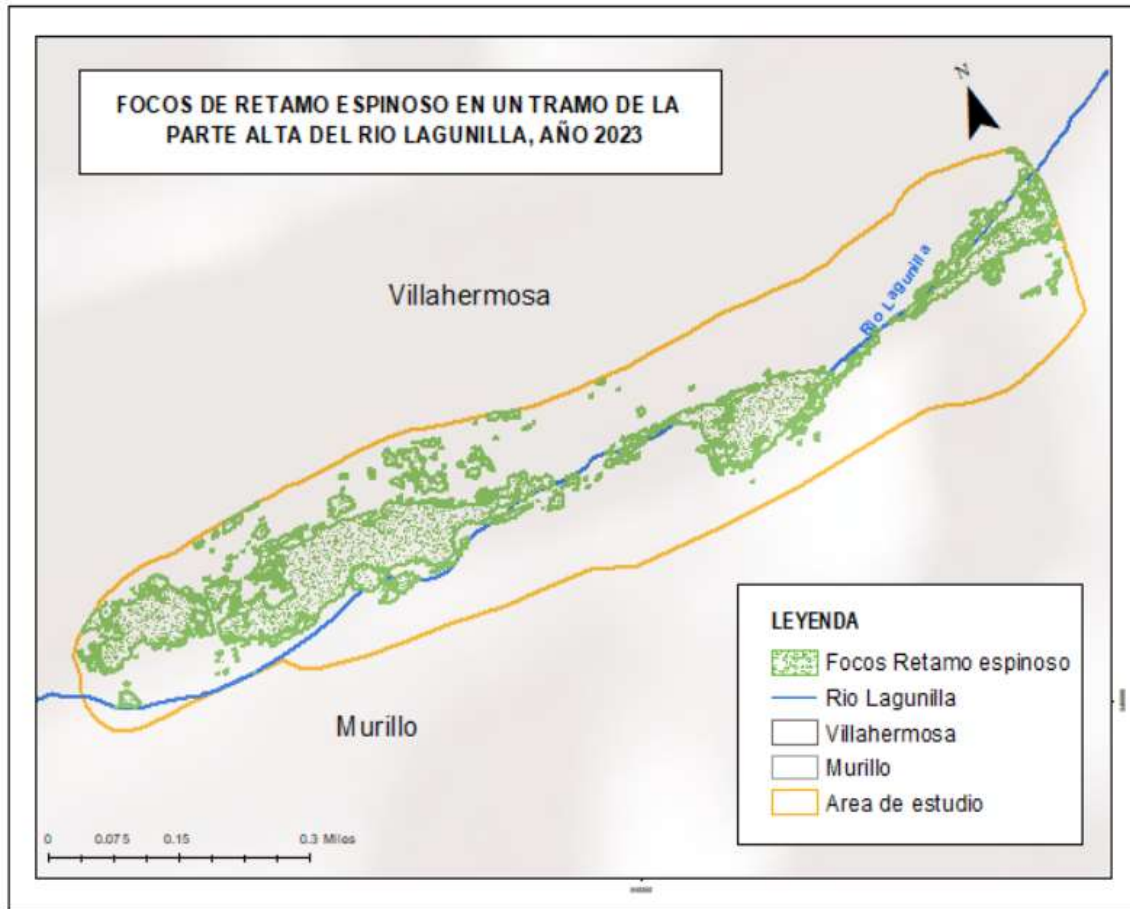


Figura 31.

Focos de retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla, año 2023.



En el presente estudio se identificó que en la parte alta del río Lagunilla, el retamo espinoso inicia con parches aislados y continúa formando grupos densos, es decir, que la especie inicia con plántulas dispersas e individuales, las cuales debido a su rango de amplitud de dispersión, aproximadamente 10 metros alrededor de la planta madre, y también por la dispersión antrópica (vehículos, ropa, zapatos) (MADS,2018), logra colonizar áreas nuevas, para luego iniciar su proceso de expansión, el cual es realizado con facilidad en las coberturas degradadas, y lo que permite formar focos de gran tamaño y extensión .

Lo anterior es corroborado por la literatura, donde relacionan que esta especie se expande a través de difusión la cual consiste en una expansión regular y gradual de las colonias de plántulas desde el centro hacia los bordes; adicionalmente, también se identifica la relación que el retamo invade desde la zona borde de los ecosistemas hacia el interior de estos (Osorio Castiblanco, 2019). En este contexto, en el presente estudio para la zona del río Lagunilla, se evidenció que el retamo colonizó áreas donde hay escasa vegetación, identificando la afectación tanto en los bordes de la vía como la parte central de los bosques riparios.

En la tabla 3, se relacionan los cambios identificados en los focos de retamo espinoso en el área de estudio para el año 2022 y el año 2023, donde se corrobora de manera visual la forma de dispersión del *U. europaeus*;

En la imagen **a.**, se visualiza una plántula individual y aislada, aumentando su radio de dispersión en el año 2023, esto ocurre por la presencia de una cobertura adyacente que no presenta ninguna barrera natural o antrópica para frenar su proliferación.

En las figuras **b.** y **c.**, se identifica que la especie encontró espacios vacíos al interior del foco, lo que se considera unas zonas óptimas para seguir con la propagación, así mismo se evidencia que la planta va conformando matorrales densos, que para una posterior erradicación es considerado de mayor dificultad por la cantidad de espinas presentes, adicionalmente, se relaciona directamente que esta especie al formar matorrales densos y necromasa sobre el tallo, está propensa a generación de incendios en áreas donde se establece (Fajardo-Ortiz et al., 2022).



De igual manera, se identifica en el plan de prevención, manejo y control de las especies de retamo espinoso (*Ulex europaeus*) y retamo liso (*Genista monspessulana*) en la

jurisdicción CAR, para el caso de dispersión del retamo, la expansión de la especie ocurre de manera gradual y concéntrica desde la planta madre o desde el centro de la invasión hacia la parte exterior (Barrera-Cataño et al., 2019), situación evidenciada en el presente estudio.

En la figura **d**, se identifica un cambio significativo en el área de estudio, y corresponde al estado de la vía (la cual atraviesa una parte del río Lagunilla), y para el año 2022 se encontraba destapada y para el año 2023 ya se evidencia con pavimento, lo que se considera de alto impacto por ser una vía de carácter nacional y con alta afluencia de turismo, generando una mayor proliferación de la especie, ya que la expansión de las especies invasoras se presenta en los bordes de vías, principalmente cuando los focos se encuentran en estado reproductivo ya que las semillas pueden ser dispersados por las personas, a través de los zapatos, o por medio de transporte como en las llantas de los vehículos o bicicletas (Barrera-Cataño et al., 2019), situación que es identificado en el área de estudio, donde la mayor parte del año esta especie presenta estado de floración.

Tabla 3.

Cambios en los focos de retamo identificados en el área de estudio para el año 2022 y 2023.

Año 2022	Año 2023
<p data-bbox="220 394 245 424">a.</p> 	
<p data-bbox="220 1150 245 1180">b.</p> 	

c.

Año 2022



Año 2023



d. Año 2022



Año 2023

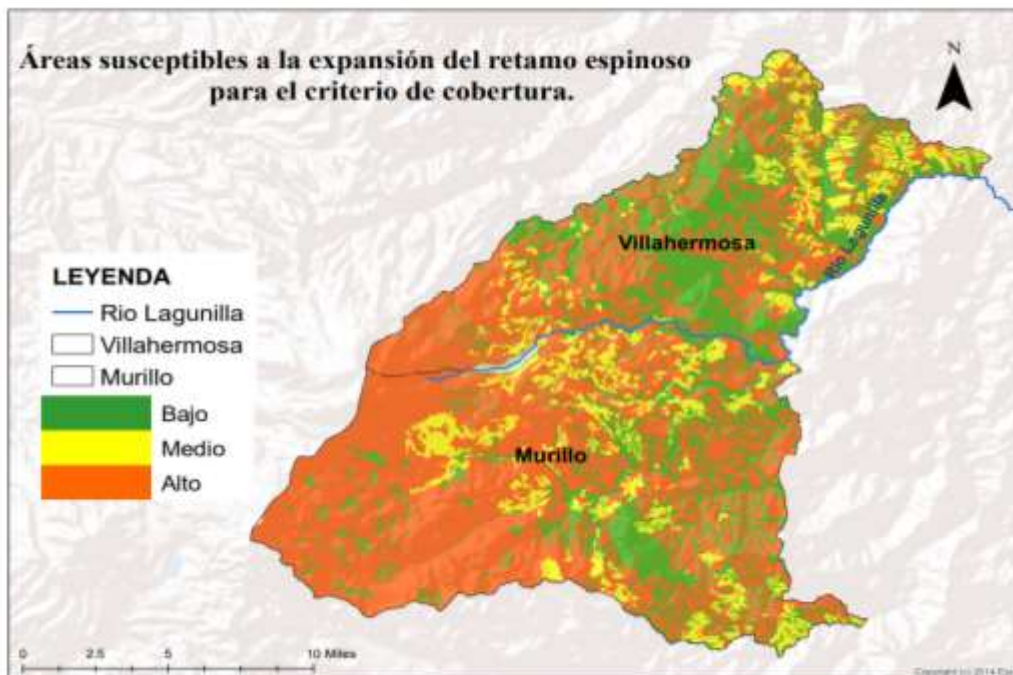


- **Determinar las áreas susceptibles a la propagación de la especie retamo espinoso en la parte alta del río Lagunilla.**

Según la literatura, se han identificado los factores biológicos y ecológicos que ayudan a explicar el éxito invasivo del retamo espinoso, tales como la capacidad de crecer en suelos pobres (Beltrán-Gutierrez, 2021), es por ello que la cobertura, se considera como uno de los criterios más importantes para definir las áreas susceptibles a la expansión de la especie invasora del retamo espinoso, y a la hora de la toma de decisiones en el momento de manejo y control de esta especie.

Figura 32.

Mapa de susceptibilidad a la expansión del retamo espinoso para el criterio de cobertura.



Es por ello que en la Figura 32, se identifica las zonas en color naranja como las áreas con una alta susceptibilidad a la invasión, siendo en mayor proporción hacia la zona occidental del mapa, que es donde se ubica el área de influencia del nevado del Ruiz, constituida por ser un área de valles de frailejones, que, debido a su crecimiento de un (1) cm por año, son áreas propensas y óptimas para la proliferación del retamo espinoso. Mientras que, en la zona oriental, se evidencian áreas boscosas, lo cual permite ser la barrera natural para la propagación de la especie, consideradas áreas de nivel más bajo a la invasión del retamo.

A nivel municipal, se identificó que, para el municipio de Murillo, según el criterio de cobertura, es el que tiene una mayor área de proliferación (Tabla 4), esto por ser un municipio que predominan las Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, los Pastos y las Áreas abiertas, sin o con poca vegetación, las cuales suman el 66,08% del total del territorio, mientras que en el municipio de Villahermosa para estas coberturas suman un total de 46,01%; pese a que es un valor menor al de Murillo, es un dato que se considera alto para la propagación del retamo al estar cercano al 50% de su territorio apto para las condiciones de propagación.

Tabla 4. Coberturas como mayor probabilidad de proliferación del retamo por municipio.

Cobertura	Murillo	Villahermosa
2.3. Pastos	26,01 %	31,12%
3.2. Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	34,73%	11,49%
3.3. Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	5,34%	3,40%
Total	66,08%	46,01%

Fuente. Elaboración propia

El retamo espinoso se relaciona con los impactos socioeconómicos negativos particularmente con las tierras agrícolas, debido a la fácil propagación en estas zonas y a los altos costos de erradicación que este conlleva (Beltrán-Gutierrez, 2021), en este sentido para los municipios de Murillo y Villahermosa que se encuentran en zonas con una alta condición de susceptibilidad, se relaciona directamente a que son áreas que tradicionalmente han sido utilizadas para cultivos.

Por otro lado, se identificaron las áreas susceptibles a la expansión del retamo espinoso para el criterio social, donde se tienen en cuenta las zonas urbanas, Complejo de páramo Los Nevados, al interior de este ecosistema estratégico se encuentra un área protegida de carácter nacional, Parque Nacional Natural Los Nevados, que ocupa gran parte del área, adicionalmente, se referencian las vías de acceso, que permiten el tránsito de personas, vehículos y animales.

En este sentido, como resultado se identificó en los criterios sociales para el municipio de Murillo, se encuentra un traslape de aproximadamente del 60% en relación a la jurisdicción de su territorio, mientras que para el municipio de Villahermosa se identifica un aproximado del 30%.

De acuerdo a lo anterior, para el municipio de Murillo, se identifica como una zona de alta proliferación del retamo, esto es debido a su alto porcentaje de traslape con el Complejo de páramo los Nevados, tal como lo mencionan en el Plan de manejo ambiental del Complejo de páramo Los Nevados, alrededor del 42% del municipio está conformado por este ecosistema estratégico, que pese ser catalogado como un área de importancia ambiental y estar al interior un área protegida nacional, se caracteriza por ser uno de los principales destinos de turismo de

naturaleza en el país, primando el paisaje que brinda las zonas de alta montaña, con la presencia del Volcán Nevado del Ruíz (Fundación Pangea, 2021), lo cual es considerado uno de las principales causas de proliferación del retamo al tener desconocimiento los turistas-visitantes, sobre la especie, adicionalmente, es una planta de características llamativas por las flores de color amarillo, generando una mayor manipulación y contacto, ocasionando traslados a otras zonas donde aún no ha colonizado.

Por consiguiente, se identifica el municipio de Murillo, como un área de intervención a corto-mediano plazo, por presentar en su territorio un porcentaje alto de áreas susceptibles a ser propagadas por esta especie invasora, caracterizada por un rápido crecimiento y proliferación, adicionalmente, este resultado es corroborado con el dato generado en la Fase 1 del presente proyecto, donde se evidenció un aumento en la propagación del retamo espinoso en el lapso de un año (2022-2023), cubriendo principalmente las áreas donde se ubicaban pastos y áreas fragmentadas, siendo estas zonas consideradas óptimas para la invasión de la especie.

Figura 33.

Áreas susceptibles a la expansión del retamo espinoso para el criterio social



De acuerdo con lo manifestado por la CAR en el plan de prevención, manejo y control de las especies de retamo espinoso y retamo liso, se evidencia que, bajo condiciones climáticas favorables, estas especies tienden a expandirse a otros pisos bioclimáticos. Específicamente, el retamo espinoso muestra una tendencia a desplazarse hacia los subpáramos y páramos (Barrera-Cataño et al., 2019), ecosistemas estratégicos mencionados en el presente estudio. Según la Figura 33, estas áreas son las más susceptibles a la invasión, debido a la vía que atraviesa el río Lagunilla y que cuenta con presencia del retamo espinoso, y continua la ruta al Complejo de páramo Los Nevados, hasta llegar al departamento de Caldas.

8. Conclusiones

1. Las herramientas de UAV son de gran ayuda, especialmente en áreas donde las condiciones climáticas, como la nubosidad y la humedad, dificultan el acceso a imágenes satelitales para medir detalles específicos, como la presencia de especies invasoras. Este es el caso de la cuenca alta del río Lagunilla, ya que se ubica en una zona de páramo, permitiendo este tipo de herramientas identificar y cuantificar la especie vegetal retamo espinoso.

2. El empleo de drones en la conservación de la biodiversidad son estrategias a implementar en diferentes zonas del departamento, ya que permite realizar un monitoreo y seguimiento a las especies invasoras, generando insumos claves para la toma de decisiones y la planificación de acuerdo al estado de afectación en los territorios.

3. El retamo espinoso, es una especie que presenta una fácil propagación en áreas degradadas o coberturas transformadas, situación evidenciada en el presente estudio con el aumento de invasión de un año a otro, lo que conlleva a tomar medidas rápidas en zonas que presentan condiciones favorables para su dispersión.

4. Según los focos de retamo espinoso identificados en los mapas, se concluye que la cuenca del río Lagunilla es uno de los principales puntos de dispersión de esta especie invasora, lo cual se debe a varios factores: la presencia de mecanismos de transporte de semillas que facilitan su propagación, como una vía nacional que atraviesa la zona desde los municipios del Líbano-Murillo (Tolima) hacia la ciudad de Manizales (Caldas), generando un alto flujo de

turistas; de igual manera, a lo largo del cauce, tanto en la margen derecha como en la izquierda, se identificó presencia de ganado y otros animales que también facilitan su dispersión; el ecosistema de páramo donde se encuentra la zona de estudio presenta fuertes vientos, lo que contribuye significativamente a la dispersión de las semillas del retamo espinoso, permitiendo alcanzar distancias considerables.

5. De acuerdo a la cartografía social realizada, la comunidad identifica la necesidad de vincular en los procesos de prevención, y educación ambiental a todos los propietarios que tienen presencia de retamo en sus predios, los cuales pueden ser liderados por las instituciones de orden nacional, regional o local sobre el control de la especie, esto con el objetivo principal de conocer los manejos adecuados y permitidos, disminuyendo los bancos de semillas presentes en el área de estudio.

6. Según la cobertura predominante para el municipio de Murillo, son las Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva, los Pastos y las Áreas abiertas, sin o con poca vegetación y Villahermosa, los cuales son áreas susceptibles a la proliferación del retamo espinoso; para el caso de Villahermosa los bosques siguen teniendo una extensión territorial considerable, sin embargo, es posible que a futuro se reduzcan debido a las actividades ganaderas para dar paso a los pastos; los cuales podrían ser invadidos por el retamo si no se implementan programas de restauración y/o reconversión adecuados en la zona.

9. Recomendaciones

1. Al realizar análisis de especies invasoras, particularmente el retamo espinoso con el empleo de imágenes capturadas con Dron, se recomienda complementar la información con datos colectados en campo, utilizando vídeos y fotografías tomadas tanto desde el suelo como desde el aire, esto surge debido a que, en ocasiones es difícil distinguir entre parches de retamo espinoso y otras coberturas vegetales como lo son los bosques, vegetación herbácea o arbustiva; sin embargo, la mayoría del área del presente estudio, se identificó con presencia de floración del retamo espinoso, lo que facilitó el proceso de digitalización de los focos.

2. Es indispensable a la hora de realizar análisis de distribución potencial de la especie, contar con insumos actualizados, como es la cobertura y uso de la tierra, la identificación en casos de nueva apertura de vías, zonas donde se registran nuevas rutas turísticas, afluencia o tránsito de personas, a fin de tomar las decisiones más acertadas y eficaces, ante una especie de fácil proliferación y dispersión.

3. Se recomienda utilizar herramientas tecnológicas como las aeronaves no tripuladas, para el monitoreo y seguimiento de las especies invasoras, considerándose importante integrar estas tecnologías en los procesos de planificación ambiental al diseñar las estrategias de prevención, manejo y control para el retamo espinoso.

4. En todos los procesos a realizar de prevención, manejo y control, donde se identifica la especie retamo espinoso, es pertinente trabajar de manera articulada con la comunidad, brindando información adecuada sobre este tipo de invasiones, mitigando la dispersión y colonización a nuevas zonas.

10. Referencias Bibliográficas

- Ávila-Vélez, E. F., Herrera-Martínez, L. A., & Celis-Forero, Á. (2023). *Identificación de zonas con presencia de Retamo espinoso (ulex europaeus), utilizando teledetección espacial, en el municipio de Sibaté (Cundinamarca)* (Vols. 14(1), 201 - 219.). Revista de Investigación Agraria y Ambiental.
- Barrera-Cataño, J. I., Rojas Rojas, J. E., Contreras-Rodríguez, S. M., & Basto Mercado, S. I. (2019). *Plan de prevención, manejo y control de las especies de retamo espinoso (Ulex europaeus) y retamo liso (Genista monspessulana) en la jurisdicción CAR. Convenio 1837 Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca & Pontificia Universidad Javeriana. Bogotá. Colombia.*
- Barreto Vaca, E. M. (2021). *Desarrollo de una firma espectral para la identificación de parches de retamo espinoso (Ulex europaeus) en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá, usando imágenes satelitales Sentinel-2.* Bogotá.
- Beltrán-Gutierrez, H. E. (2021). La investigación sobre Ulex europaeus: una aproximación bibliométrica. En *Tierra y Vida*. Bogotá : Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Bergamo, T. F., Sampaio de Lima, R., Kull, T., Ward, R. D., Sepp, K., & Villoslada, M. (2023). *From UAV to PlanetScope: Upscaling fractional cover of an invasive species Rosa rugosa* (Vols. 336, 117693.). Journal of Environmental Management.

- Bertacchi, A. (2022). *UAVs Technology as a Complementary Tool in Post-Fire Vegetation Recovery Surveys in Mediterranean Fire-Prone Forests* (Vols. 13(7), 1009). *Forests*.
- Bonnaire Rivera, L., Montoya Bonilla, B., & Obando-Vidal, F. (2021). Procesamiento de imágenes multiespectrales captadas con drones para evaluar el índice de vegetación de diferencia normalizada en plantaciones de café variedad Castell. *Cienc. Tecnol. Agropecuaria*, 22(1): e1578. doi:https://doi.org/10.21930/rcta.vol22_num1_art:1578
- Suo, C., McGovern, E., & Gilmer, A. (2019). *Coastal Dune Vegetation Mapping Using a Multispectral Sensor Mounted on an UAS* (Vols. 11(15), 1814.). *Remote Sensing*.
- Christina, M., Limbada, F., & Atlan, A. (2020). *Climatic niche shift of an invasive shrub (Ulex europaeus): a global scale comparison in native and introduced regions* (Vols. 13(1), 42-50). *Journal of Plant Ecology*.
- Corporación Autónoma Regional del Tolima - CORTOLIMA. (2013). *Plan de gestión Ambiental Regional del Tolima -PGAR*. Corporación Autónoma Regional del Tolima. Obtenido de <https://www.cortolima.gov.co/servicio-al-ciudadano/glosario/650-paramo>
- Corporación Autónoma Regional del Tolima -CORTOLIMA & Universidad del Tolima, (2020) *Análisis de los cambios de cobertura y uso de la tierra para el Departamento del Tolima*. Fase 1. Corporación Autónoma Regional del Tolima -CORTOLIMA - Universidad del Tolima. Ibagué -Tolima., Colombia. 226 p.
- Cortés-Duque, J., & Sarmiento Pinzón, C. E. (2013). *Visión socioecosistémica de los páramos y la alta montaña colombiana. Memorias del proceso de definición de criterios para la*

delimitación de páramos. Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt.

Cruz Martínez, M. F. (2008). Caracterización de puntos de control en teledetección: aplicación a la corrección geométrica automática de imágenes. Universidad Almería.

Chuvieco, E. (1995). Fundamentos de Teledetección Espacial. Madrid: Ediciones Rialp S.A.

Departamento Nacional de Planeación. (2021). *Consejo Nacional de Política Económica y Social República de Colombia –CONPES 4050. Política para la Consolidación del Sistema Nacional de Áreas Protegidas -SINAP*.

El Congreso de Colombia. (1993.). *Ley 99 de 1993. Por la cual se crea el Ministerio del Medio Ambiente, se reordena el Sector Público encargado de la gestión y conservación del medio ambiente y los recursos naturales renovables, se organiza el Sistema Nacional Ambiental*. doi:<http://https://www.minambiente.gov.co/documento-normativa/ley-99-de-1993/>

ESRI. (s.f.). *Arcgis Pro_ Esri*. Obtenido de <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/latest/help/analysis/raster-functions/ndvi-function.htm>

Fajardo-Ortiz, A. G., Fonseca-Hernández, L. R., Gil-Clavijo, A. I., Martínez-Chiguachi, J. A., & Celis-Forero, Á. (2022). Determinación de viabilidad, vigor y banco de semillas de retamo espinoso (*Ulex europaeus* L.) en un Andisol de un ecosistema de Páramo. *Revista U.D.C.A Actualidad & Divulgación Científica*.

Fundación Pangea. (2021). Plan de manejo Complejo de páramo Los Nevados. Contrato N° 390/2021 CARDER, CORTOLIMA, CORPOCALDAS, CRQ.

- Gómez Acevedo, J. S., & Ramírez Villa, M. C. (2019). *Delimitación de la zona de amortiguamiento del páramo de Murillo, Tolima para la conservación del ecosistema.*
- Gränzig, T., Fassnacht, F. E., Kleinschmit, B., & Forster, M. (2021). *Mapping the fractional coverage of the invasive shrub Ulex europaeus with multi-temporal Sentinel-2 imagery utilizing UAV orthoimages and a new spatial optimization approach.* International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 96, 102281.
- Hartley, R. J., Davidson, S. J., Watt, M. S., Massam, P. D., Aguilar-Arguello, S., Melnik, K. O., . . . Clifford, V. R. (2022). *A Mixed Methods Approach for Fuel Characterisation in Gorse (Ulex europaeus L.) Scrub from High-Density UAV Laser Scanning Point Clouds and Semantic Segmentation of UAV Imagery* (Vols. 14(19), 4775). Remote Sensing.
- Herrera Vargas, D., León Romero, L. A., Tierradentro Cruz, S. Y., Sanchez, M. C., & Mesa, F. (2019). *Diagnóstico Territorial- Esquema de Ordenamiento Territorial, Municipio de Murillo - Tolima.* Alcaldía de Murillo.
- IDEAM, 2010. *Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra. Metodología CORINE Land Cover adaptada para Colombia Escala 1:100.000.* Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales. Bogotá, D. C., 72p.
- Jardín Botánico Eloy Valenzuela. (2018). *Formulación del plan de manejo de la especie invasora Ulex europaeus L (Retamo espinoso) en el municipio de Vetas, páramo de Santurbán Santander.* Vetas, Santander, Colombia.

Kattenborn, T., Eichel, J., Wiser, S., Burrows, L., Fassnacht, F. E., & Schmidtlein, S. (2020).

Convolutional Neural Networks accurately predict cover fractions of plant species and communities in Unmanned Aerial Vehicle imagery (Vol. 6(4)). *Remote Sensing in Ecology and Conservation*. 472-486.

Lopatin, J., Dolos, K., Kattenborn, T., & Fassnacht, F. E. (2019). *How canopy shadow affects invasive plant species classification in high spatial resolution remote sensing* (Vols. 5(4), 302-317). *Remote Sensing in Ecology and Conservation*.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible. (2011). *Plan Nacional para la Prevención, el Control y Manejo de las Especies Introducidas, Trasplantadas e Invasoras: Diagnóstico y listado preliminar de especies introducidas, Trasplantadas e invasoras en Colombia*. Bogotá, D.C.: Colombia: Instituto de Investigación de Recursos Biológicos Alexander von Humboldt -IAvH; The Nature Conservancy –Colombia – TNC; Franco A; Baptiste, María P.; Díaz J; Montoya M.

Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible -MADS. (2018). *Resolución número (0684)*
“Por la cual se establecen lineamientos tanto para la prevención y manejo integral de las especies de Retamo espinoso y Retamo liso como para la restauración ecológica, rehabilitación y recuperación de las áreas afectadas por esta.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2008). *Resolución número (0848)*
“Por la cual se declaran unas especies exóticas como invasoras y se señalan las especies introducidas irregularmente al país que pueden ser objeto de cría en ciclo cerrado y se adoptan otras determinaciones”.

Ministerio de Ambiente, Vivienda y Desarrollo Territorial. (2010). *Resolución 207 de 2010*

“Por la cual se adiciona el listado de especies exóticas invasoras declaradas por el artículo primero.

Osorio Castiblanco, D. F. (2019). *Análisis de plasticidad funcional del Retamo espinoso (Ulex europaeus) a lo largo de un gradiente altitudinal y comparación de sus propiedades físico-bioquímicas con el Retamo liso (Genista monspessulana)*. Bogotá D.C.

Preston, T. M., Johnston, A. N., Ebenhoch, K. G., & Diehl, R. H. (2023). *Beyond presence mapping: predicting fractional cover of non-native vegetation in Sentinel-2 imagery using an ensemble of MaxEnt models*. Remote Sensing in Ecology and Conservation.

Ríos Camacho, D. L. (2022). *Formulación de protocolo de control y seguimiento del retamo espinoso (Ulex europaeus l.) para el municipio de Duitama, Boyacá*.

Secretaría Distrital de Ambiente. (2009). *Resolución 7615 de 2009, Por medio de la cual se prohíbe la plantación, el trasplante, la venta, la distribución y la comercialización de las especies Retama Espinoso (Ulex europaeus) y Retamo Liso (Teline monspessulana)*.

Valania, M. P. (2019). *Tecnologías de la Información Geográfica, instrumentos estratégicos para el análisis. Estudios de caso Tandil*. Párrafos Geográficos, 18(1), 62-78.

Vargas Rios, O., León, O., & Díaz, A. M. (2009). *Restauración ecológica en zonas invadidas por el retamo espinoso y plantaciones forestales de especies exóticas*. Bogotá D.C.