

IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE RETAMO ESPINOSO (*Ulex europaeus*), UTILIZANDO TELEDETECCIÓN ESPACIAL, EN EL MUNICIPIO DE SIBATÉ [CUNDINAMARCA]

IDENTIFICATION OF AREAS WITH PRESENCE OF THORNY BROOM (*Ulex europaeus*), USING SPATIAL REMOTE SENSING, IN THE MUNICIPALITY OF SIBATÉ [CUNDINAMARCA]

Ávila Vélez, Edier Fernando; Herrera Martínez, Luis Alberto; Celis Forero, Álvaro

 Edier Fernando Ávila Vélez

edierf@hotmail.com

Universidad de Cundinamarca. Bogotá, Colombia, Colombia

Luis Alberto Herrera Martínez

lalbertoherreira@ucundinamarca.edu.co

Universidad de Cundinamarca. Bogotá, Colombia, Colombia

Álvaro Celis Forero

acelisforero@yahoo.es

Universidad de Cundinamarca. Bogotá, Colombia, Colombia

Revista de Investigación Agraria y Ambiental

Universidad Nacional Abierta y a Distancia, Colombia

ISSN: 2145-6097

ISSN-e: 2145-6453

Periodicidad: Semestral

vol. 14, núm. 1, 2023

riaa@unad.edu.co

Recepción: 02 Junio 2022

Aprobación: 16 Septiembre 2022

Publicación: 17 Diciembre 2022

URL: <http://portal.amelica.org/ameli/journal/130/1303815010/>

DOI: <https://doi.org/10.22490/21456453.5840>

Financiamiento

Fuente: Universidad de Cundinamarca, en alianza con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación

Nº de contrato: 62851 "Diseño de estrategias para el control de retamo espinoso (*Ulex Europaeus* L.)

Beneficiario: IDENTIFICACIÓN DE ZONAS CON PRESENCIA DE RETAMO ESPINOSO (*Ulex europaeus*), UTILIZANDO TELEDETECCIÓN ESPACIAL, EN EL MUNICIPIO DE SIBATÉ [CUNDINAMARCA]

Resumen: Contextualización: las plantas invasoras, como el retamo espinoso (*Ulex europaeus*), impactan negativamente la biodiversidad y el desarrollo normal de los ecosistemas en los territorios donde está presente. Así mismo, estas plantas disminuyen el área disponible para siembra, lo cual conlleva a la disminución de las cosechas.

Vacío de conocimiento: se hace pertinente desarrollar metodologías de bajo costo y efectivas para identificar las zonas afectadas por este tipo de malezas, con el fin de que exista información para disminuir el impacto de estas al medio ambiente y a las comunidades campesinas de la zona.

Propósito: implementar una propuesta para la identificación de las zonas afectadas por retamo espinoso en el municipio de Sibaté Cundinamarca, debido a su presencia en grandes extensiones.

Metodología: primero, se realizó un trabajo con la comunidad campesina del municipio, identificando y georreferenciando algunas zonas donde la planta hace presencia; seguidamente, usando una imagen satelital y multiespectral [PlanetScope] de los lugares identificados y georreferenciados, se calcularon los valores de intensidad espectral de esta. A continuación, se analizaron estadísticamente los percentiles de la imagen y se cuantificaron los percentiles 25 y 75; después, se calcularon los píxeles de la imagen con algún grado de probabilidad de presencia de la planta invasora, utilizando el algoritmo de "Hot Spot" o "zonas calientes. Para finalizar, se validaron las zonas con presencia probable de la planta, utilizando vehículos aéreos no tripulados [UAV].

Resultados y conclusiones: se identificaron puntos y zonas donde posiblemente hay presencia de retamo espinoso en Sibaté [Cundinamarca]. Se hallaron dos áreas en las que se aplicó la metodología propuesta en el centro del municipio, con un 99 % de probabilidad de presencia de la planta invasora; a la vez, se evidenciaron ocho puntos con una probabilidad de 95 % de presencia de retamo espinoso y, por último, se encontraron ocho puntos con probabilidad del 90 % de la presencia de la planta

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/about>



Esta obra está bajo una Licencia Creative Commons Atribución-
NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional.

CÓMO CITAR: Ávila-Vélez, E., Herrera-Martínez, L. y Celis-Forero, A. (2023). Identificación de zonas con presencia de retamo espinoso (*Ulex europaeus*), utilizando teledetección espacial, en el municipio de Sibaté [Cundinamarca]. *Revista de Investigación Agraria y Ambiental*, 14(1), 201 - 219. <https://doi.org/10.22490/21456453.5840>

invasora. Finalmente, se corroboraron parte de las áreas y puntos con posible presencia de la planta, implementando vuelos no tripulados. Se observó una alta correlación espacial entre las áreas georreferenciadas y las áreas corroboradas en campo, lo cual es relevante para procesos de restauración ecológica.

Palabras clave: retamo espinoso, teledetección espacial, imágenes satelitales, espectro radiometría satelital.

Abstract: Contextualization: Invasive plants, such as thorny broom (*Ulex europaeus*), have a negative impact on biodiversity and on the normal development of the ecosystems in territories where it is present. Also, those plants reduce the area available for cultivation, which leads to decrease of the harvests.

Knowledge gap: it is pertinent to develop low-cost and effective methodologies to identify the areas affected by this type of weeds; that way, the obtained information could be used to reduce the impact of those plants on the environment and in the peasant communities of the area.

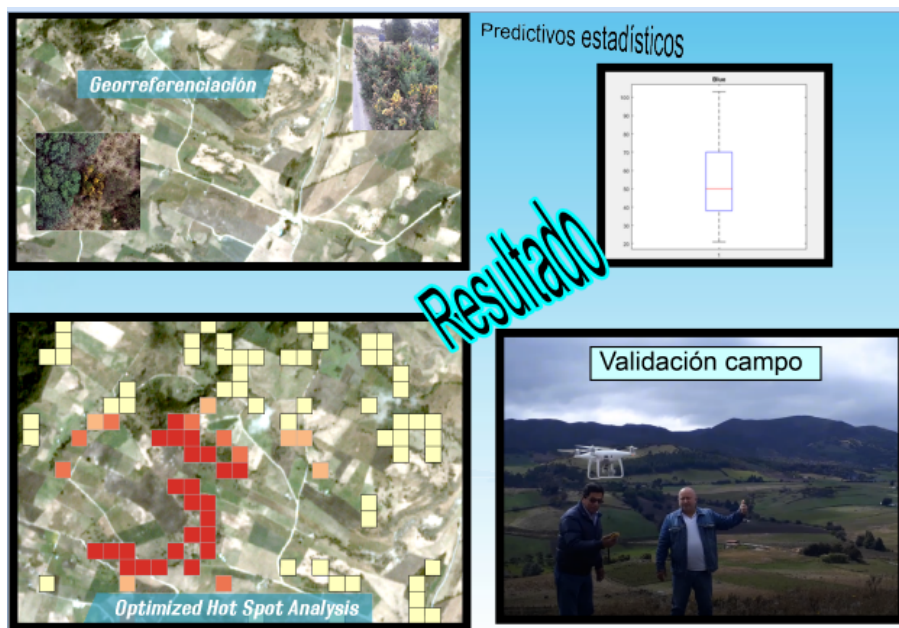
Purpose: To implement a proposal for the identification of the areas affected by the invasive thorny broom plant in the municipality of Sibaté, Cundinamarca.

Methodology: First, with the peasant community of the municipality, were identified and georeferenced some areas where the plant is present; next, using a satellite and multispectral image [from PlanetScope] of the identified and georeferenced areas, the spectral intensity values of the image were calculated. Then, statistical analyzes of the percentiles were realized, and the 25th and 75^t. percentiles were quantified; after that, the pixels with some degree of probability of the presence of the invasive plant were calculated, using the "Hot Spot" algorithm or "hot zones". Finally, the areas with probable presence of thorny brooms were validated, using unmanned aerial vehicles (UAV).

Results and conclusions: It was possible to identify points and areas where there is, possibly, presence of thorny brooms in the municipality of Sibaté, Cundinamarca. There are two areas where the proposed methodology was applied in the center of the municipality, with a 99% probability of having the invasive plant; at the same time, eight points with a probability of 95% of presence of the plant were evidenced; finally, were found eight points with a probability of 90% of the presence of the invasive plant. At the end, part of the areas and points with possible presence of the plant were corroborated, implementing unmanned flights. A high spatial correlation was observed between the georeferenced areas and the areas corroborated in the field, which is relevant for ecological restoration processes.

Keywords: Thorny broom (*Ulex europaeus*), remote sensing, satellite images, satellite spectroradiometry.

RESUMEN GRÁFICO



autores

1. INTRODUCCIÓN

En la década de los años 50, debido a los procesos de colonización, en Colombia y en especial en su capital, Bogotá, se vivió un proceso avanzado de deforestación. Para contrarrestar este fenómeno, la administración local decidió realizar la plantación de la especie retamo espinoso (*Ulex europaeus*) (Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá, 2021). Esta planta invasora es una especie que compite agresivamente con plantas nativas (Muñoz, 2009), causando pérdida de biodiversidad y el desplazamiento de algunas de ellas. A su vez, genera cambios en la estructura vegetal del ecosistema (Osorno, 2014).

Se han tenido reportes de la existencia y colonización de la mencionada planta en zonas de bosque alto andino y subpáramo (Sarmiento et al., 2016) de Colombia; igualmente, se ha documentado la presencia de tal planta invasora en otras partes del mundo, como Estados Unidos, Costa Rica, Sudamérica, India y Japón, entre otras. La presencia de retamo espinoso afecta drásticamente el sector agropecuario, disminuyendo las áreas de cultivo y desplazando la flora y fauna endémica (Sanguino, 2018).

El retamo espinoso crece en forma de matorral denso, conformando parches amplios de difícil penetración, y puede alcanzar hasta 7 metros de altura; esta planta acumula gran cantidad de ramas secas y en zonas del trópico florece todo el año (León y Vargas, 2011). Sumado a esto, la planta posee un alto poder calorífico, dada la cantidad de aceites en sus semillas, por lo cual, al quemarse, se propaga con mayor velocidad (Ocampo-Zuleta, 2019); infortunadamente, los habitantes y agricultores afectados por esta maleza [como medida de control] utilizan el corte, arranque y quema de la misma, sin considerar los daños ambientales que realizan al ecosistema y el beneficio que traen a su dispersión (Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA], 2011). Sin embargo, se han implementado otras iniciativas en los territorios afectados por esta planta invasora, como su erradicación de los cerros orientales de Bogotá y la restauración ecológica (Barrera-Cataño, 2019; Sánchez et al., 2018; León y Vargas, 2011; Ocampo-Zuleta, 2019), mitigando en alguna medida su proliferación y afectación.

Algunos estudios acerca de la caracterización de zonas afectadas por la presencia de retamo espinoso se han realizado a través de visitas de campo y recorridos por predios y vías de los territorios (Sanguino, 2018),

estas técnicas demandan mayor tiempo, costos económicos y pueden quedar áreas sin identificar. Debido a lo anterior, es necesario utilizar técnicas de mayor cobertura, como la teledetección espacial, (Beltrán, 2014; Everitt et al., 1987) para identificar las zonas con presencia de retamo espinoso y, así, contribuir a su control y posible erradicación. Por lo anterior, utilizar técnicas de teledetección espacial puede contribuir a mapear y delimitar áreas donde probablemente existe colonización de la planta invasora.

Estudios anteriores dan cuenta de la aplicación de técnicas de teledetección espacial en Colombia (Barreto, 2021) y en Uruguay (Sampayo y Vinçón, 2018), utilizando imágenes satelitales [Sentinel-2] de una resolución espacial media. También se encuentra lo realizado por Castro y Peñaloza (2015), que emplearon vehículos aéreos no tripulados en los cerros orientales de Bogotá [Colombia], pero con la limitante de menor cobertura espacial. Además, existen desarrollos informáticos con información relevante acerca de la identificación y cuantificación de zonas con presencia de retamo espinoso [1] (Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá, 2020), pero únicamente en la ciudad de Bogotá y en la zona rural de esta entidad territorial. No existe información de los municipios vecinos. Por eso, el objetivo de la presente investigación fue la identificación de zonas con presencia probable de dicha planta en el municipio de Sibaté [Cundinamarca, Colombia]. La presente investigación aporta una técnica innovadora, ya que se fundamenta en la utilización de sensores espaciales o teledetección de mayor resolución espacial y en el potencial de la resolución radiométrica [específicamente la longitud de onda del infrarrojo cercano] para la extracción de información temática de coberturas que pueden perjudicar y alterar el medio ambiente.

2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1. Zona de Estudio

La presente investigación se desarrolló en el municipio de Sibaté [Cundinamarca, Colombia], con latitud norte de $4^{\circ}26'14''$ y $74^{\circ}14'05''$ de longitud oeste, aproximadamente; posee una altura sobre el nivel del mar de 2700 metros y es considerada una despensa agrícola importante en la región. Esta zona está siendo afectada por retamo espinoso en áreas de conservación ecosistémica, como el Páramo de Sumapaz, y otras empleadas para la producción agrícola familiar y/o pastoreo.

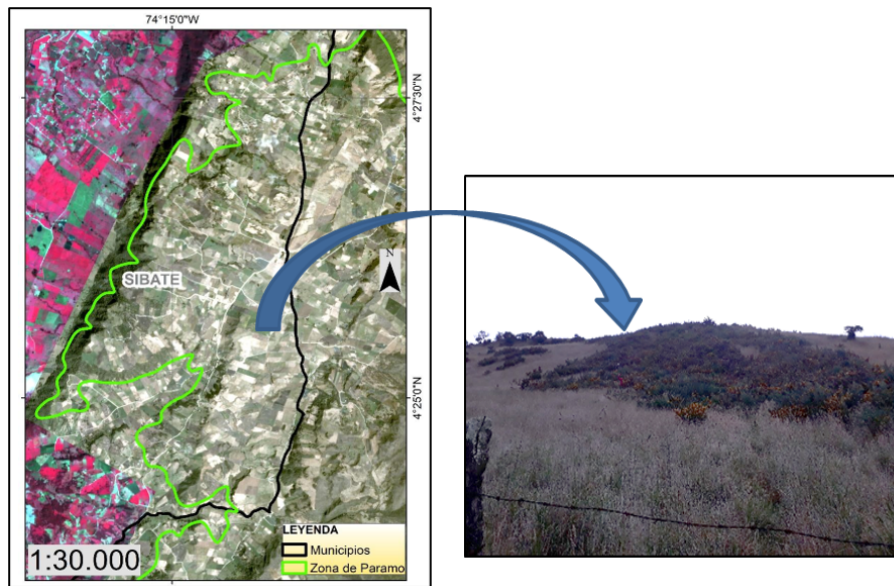


FIGURA 1.
Zona de estudio. Límite del municipio de Sibaté [Cundinamarca] y la zona del páramo de Sumapaz afectados por parches de retamo espinoso.
Autores.

2.2. Materiales

Como insumos satelitales, se adquirieron imágenes multiespectrales PlanetScope[2] (L3Harris Geospatial Solutions, 2022). de la zona de estudio, las cuales presentan los siguientes parámetros:

TABLA 1.
Parámetros de las imágenes utilizadas en la identificación de retamo espinoso.

Parámetros de las Imágenes	
Resolución espacial	3 metros
Resolución radiométrica	4-band multispectral (Blue 455 – 515 nm, Green 500 – 590 nm, Red 590 – 670 nm, NIR 780 – 860 nm)
Resolución temporal	2014 – presente
Proyección Cartográfica	UTM, WebMercator
Datum	WGS 84
Formato	GeoTIFF

autores.

2.3. Metodología

Para la investigación se realizó un diseño experimental basado en cuatro variables independientes y una dependiente. Las cuatro variables independientes son las bandas o longitudes de onda que tiene la imagen satelital PlanetScope1:

- VI1 Banda Blue 455–515 nm
- VI2 Banda Green 500–590 nm

- VI3 Banda Red 590–670 nm
- VI4 Banda NIR 780–860 nm

VII: Variable Independiente 1 y así sucesivamente

Y la variable dependiente es la presencia, o no, de retamo espinoso en la coordenada identificada en campo sobre el píxel o celda de la imagen satelital.

Hipótesis

Lo que se buscó fue una medida o un análisis estadístico-descriptivo que explicara el comportamiento de los valores radiométricos presentes en las longitudes de onda o bandas espectrales en las que se observa la presencia de retamo espinoso, teniendo en cuenta esta condición: si se modifican los valores o rangos radiométricos de las bandas o longitudes de onda, se esperaría que el píxel no tenga presencia de la planta invasora. Con estas premisas se formuló un análisis estadístico-descriptivo de los datos que pudiese trabajarse por rangos, debido a que la interacción de la energía electromagnética, capturada por las imágenes satelitales, está influenciada por variables que no se pueden controlar, como la radiación solar, el estado atmosférico, el clima, la contaminación entre otras, y pueden variar de un lugar a otro en varios metros. En consecuencia, y según la experiencia de los investigadores, se decide trabajar por rangos radiométricos y no por medidas puntuales.

Análisis estadísticos

Con las características mencionadas anteriormente, se decidió implementar datos estadísticos-descriptivos de percentiles, los cuales son medidas de posición y se calculan con los datos de la tabla 2.

TABLA 2.

Georreferenciación de las zonas encontradas en campo con sus respectivos valores radiométricos.

Punto	Longitud	Latitud	Blue	Green	Red	Nir
1	-74,234722	4,412778	266	479	676	2185
2	-74,235278	4,407222	70	270	379	1877
3	-74,233889	4,431389	359	594	801	2353
4	-74,236111	4,400556	219	455	615	2382
5	-74,241667	4,430556	507	779	1072	3432
6	-74,231389	4,458333	241	501	693	1931
7	-74,232913	4,441344	55	279	424	1854
8	-74,232737	4,441405	38	246	401	1657
9	-74,232580	4,441440	64	257	435	1726
10	-74,232487	4,441451	68	293	468	1968
11	-74,232158	4,441458	103	359	535	2368
12	-74,231968	4,441494	85	365	538	2237
13	-74,231847	4,441536	76	367	520	2306
14	-74,232809	4,441362	45	254	411	1654
15	-74,232977	4,441333	59	299	452	2082
16	-74,232876	4,441305	83	294	429	1806
17	-74,232813	4,441324	38	258	401	1671
18	-74,232857	4,441345	29	249	376	1771
19	-74,232856	4,441363	29	249	376	1771
20	-74,232803	4,441394	40	253	405	1697
21	-74,232758	4,441430	27	243	418	1814
22	-74,232749	4,441446	48	265	432	1751
23	-74,232686	4,441445	21	242	390	1624
24	-74,232679	4,441389	48	255	388	1620
25	-74,232720	4,441317	85	321	467	1869
26	-74,232763	4,441335	50	266	421	1703
27	-74,232764	4,441370	50	258	418	1657

autores.

El primer paso de la investigación, después de tener los datos de los percentiles, fue conseguir las imágenes de los terrenos afectados por retamo espinoso. Se observa, en la figura 2, la distribución espacial de las tomas realizadas en campo, en los predios que estaban afectados por la planta invasora.



FIGURA 2.

Distribución espacial de las muestras tomadas en campo. Municipio de Sibaté, Cundinamarca.

Autores.

El segundo paso fue dividir las imágenes tomadas en campo, según criterios como el área afectada, la accesibilidad al terreno y la señal de GPS para su georreferenciación, en dos grupos. El primer grupo de imágenes se utilizó para analizar estadísticamente los valores de reflectancia [21 muestras]. Y el segundo grupo, compuesto por 6 muestras, se usó para verificar los datos arrojados por el procesamiento. A continuación, se obtuvieron los valores de los percentiles 25 y 75 con el fin de caracterizar los tamaños por medio de este dato estadístico (Cano et al., 2016) y asegurar, así, que los valores de reflectividad de retamo espinoso estuvieran presentes [tabla 3 y figura 3].

TABLA 3.

Valores descriptivos de los percentiles 25 y 75 en valores digitales.

Percentil	Blue	Green	Red	Nir
25	38	252	401	1667
75	70	295	455	1893

autores.

Al tomar el rango espectral entre los percentiles 25 y 75, estamos garantizado que el 75 % de los datos espectrales están por debajo de 70 niveles digitales y que el 75 % de los valores están por encima de 38 niveles digitales para la VII banda Blue [455 – 515 nm]. Por tal motivo, con estos valores tendríamos un rango de 38-70 niveles digitales para la banda VII, y así con las demás variables independientes: VI2, VI3, VI4. Obsérvese la figura 3 y figura 4 (b) de este manuscrito.

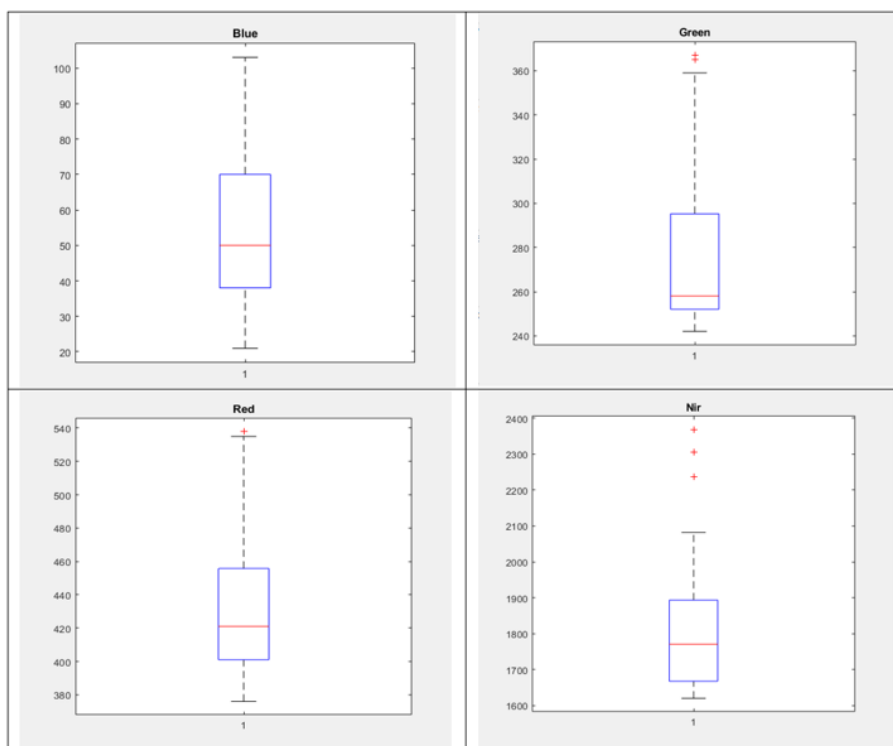


FIGURA 3.
Gráfica de percentiles realizada en el software Matlab.
Autores.

El tercer paso fue aplicar los valores estadísticos de percentiles a la imagen satelital adquirida por cada banda o longitud de onda, según la tabla 3.

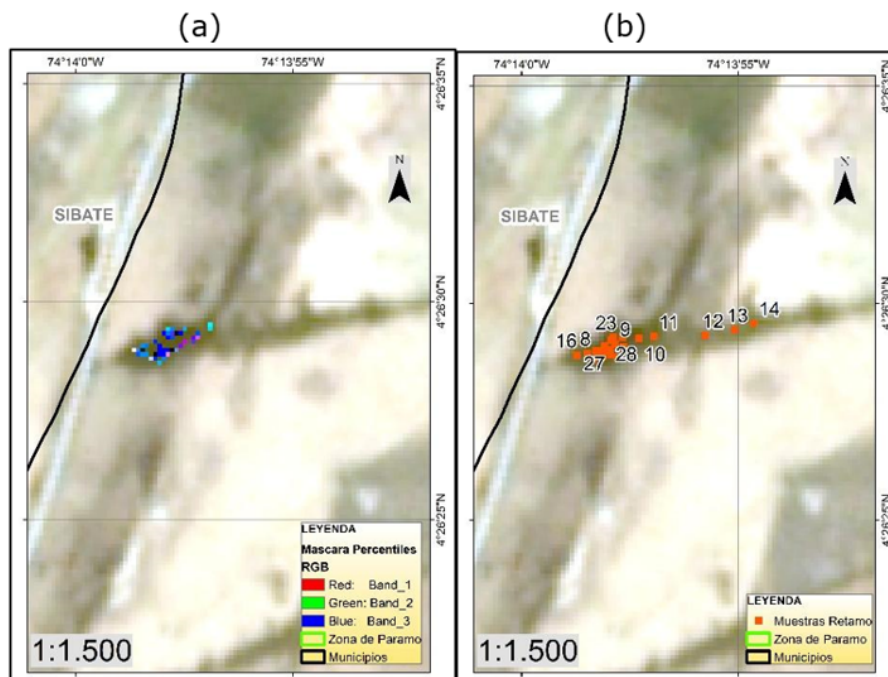
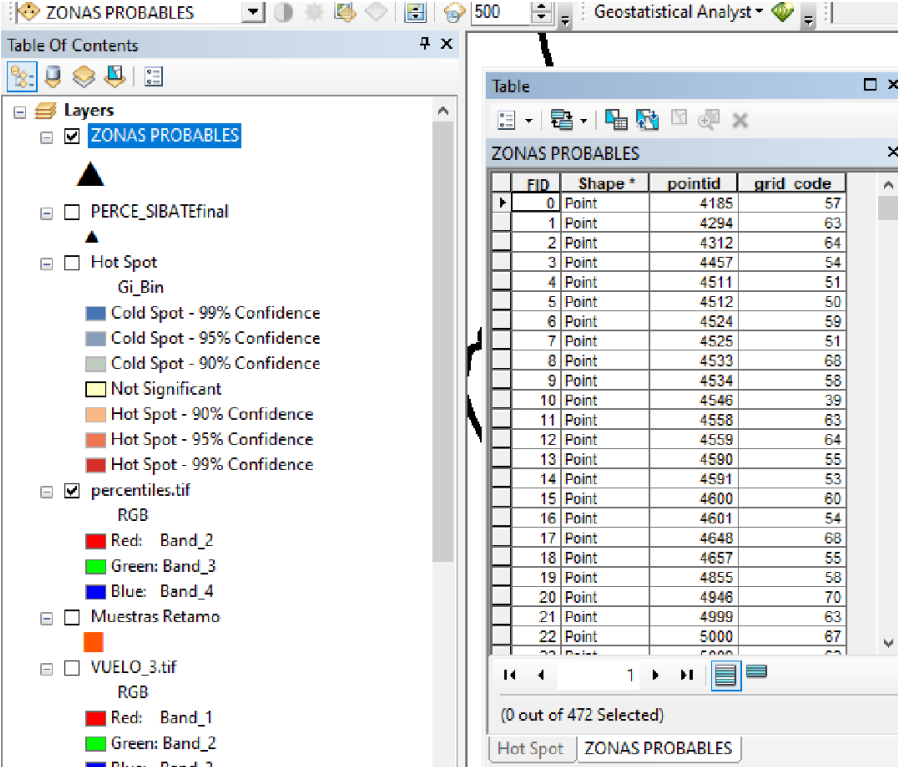


FIGURA 4.
 Visualización de la aplicación del análisis estadístico de los percentiles (a) y (b) a las muestras tomadas en campo. Realizado en el software ArcGIS.
 Autores.

El cuarto paso consistió en aplicar un análisis estadístico espacial, denominado “Optimized Hot Spot Analysis”, al entorno del software ArcMap (Environmental Systems Research Institute [Esri], 2020). Esta técnica está muy bien documentada y validada, como una de las mejores para encontrar patrones espaciales, basados en la autocorrelación espacial de las entidades geográficas (Goovaerts, 2001; Liu et al., 2022).

Análisis Geoestadísticos

Del anterior análisis estadístico se obtuvieron 472 píxeles o celdas que cumplen la condición de la Tabla 3. El anterior proceso se realizó en el software ArcGIS 10.6.



The screenshot shows the ArcGIS interface with a 'Table' window open. The table contains the following data:

FID	Shape*	pointid	grid_code
0	Point	4185	57
1	Point	4294	63
2	Point	4312	64
3	Point	4457	54
4	Point	4511	51
5	Point	4512	50
6	Point	4524	59
7	Point	4525	51
8	Point	4533	68
9	Point	4534	58
10	Point	4546	39
11	Point	4558	63
12	Point	4559	64
13	Point	4590	55
14	Point	4591	53
15	Point	4600	60
16	Point	4601	54
17	Point	4648	68
18	Point	4657	55
19	Point	4855	58
20	Point	4948	70
21	Point	4999	63
22	Point	5000	67

FIGURA 5.
Gráfico de la tabla de atributos generada a partir de la aplicación de la selección de los percentiles en la imagen satelital.

Autores.

Con la anterior capa de información temática se procedió a aplicar la técnica para detectar zonas calientes, denominada en el ámbito de los sistemas de información geográfica como “Optimized Hot Spot Analysis”. La anterior técnica se realizó con el software informático ArcGIS 10.6., usando la extensión de herramientas de estadística espacial. La técnica de zonas calientes analiza la dispersión o la generación de conglomerados estadísticamente significantes, por lo cual, cuando se aplica la herramienta, se genera un valor de “GiZScore”, el cual indica un conglomerado fuerte a nivel de entidades geográficas y con niveles de confianza significativos del 90 %, 95 % o 99 %. Los valores negativos se entienden como baja dependencia o autocorrelación para crear un conglomerado.

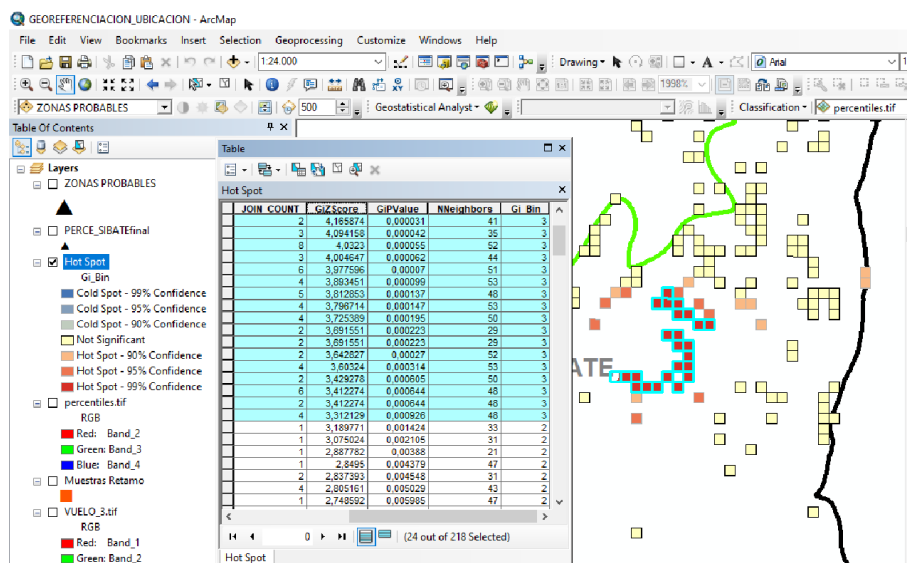


FIGURA 6.

Visualización de la aplicación de la técnica “Optimized Hot Spot Analysis” en el software ArcGIS 10.6.

Autores.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Como resultado principal, después de aplicar la metodología propuesta, se lograron identificar puntos probables o conglomerados de píxeles que son afectados por la presencia de retamo espinoso figura 5.

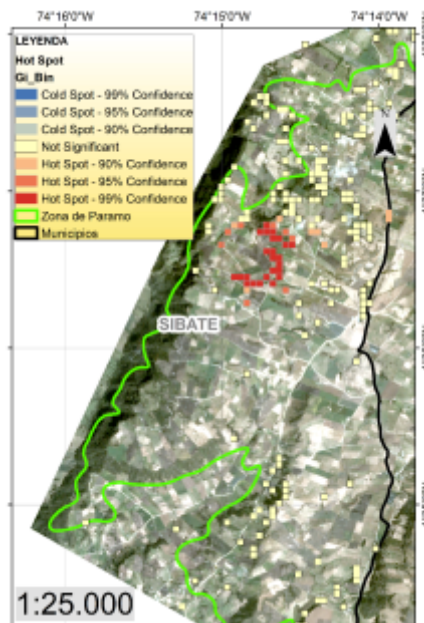


FIGURA 7.

Mapa de las zonas con posible presencia de retamo espinoso.

Autores.

En la figura anterior se puede observar una zona con alta probabilidad de presencia de la planta invasora y ocho zonas con una probabilidad de presencia cercana al 95%. Se validó la metodología con los píxeles o muestras de verificación tomados en campo, encontrándose una gran correlación espacial entre ellas.

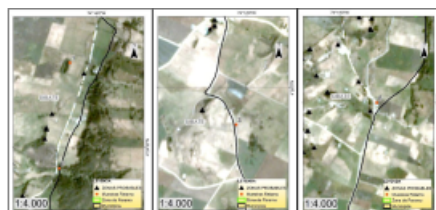


FIGURA 8.

Mapa de comparación de los datos de campo con los datos de las imágenes satelitales.

Autores.

Para poder ubicar exactamente la distribución de retamo espinoso es necesario conocer ciertas características de esta planta, como su evolución fenológica y territorial. Teniendo en cuenta esos datos, se observaron algunos patrones espaciales de aparición de forma lineal, y a veces poligonal, muy cerca de las vías y cauces intermitentes de agua. Dada las características del sensor utilizado, no fue posible concluir explícitamente las zonas de aparición de la planta; por tal motivo se realizaron capturas de información, con una resolución espacial más detallada, utilizando vehículos aéreos no tripulados, los cuales pueden llegar a obtener resoluciones espaciales del orden de centímetros. Otra forma de ganar resolución espacial, sin perder resolución espectral, es utilizar la fusión de imágenes o bandas, como lo realizado por Wang et al. (2016), ya que con esta técnica se generan productos con gran capacidad en el detalle espacial.

Debido a lo anterior, se realizaron salidas para validar los datos calculados con la implementación de la metodología utilizada en este estudio, logrando corroborar varios puntos a través de vuelos realizados con aeronaves no tripuladas (UAV), como se evidencia en la figura 7. Por tal motivo, se puede inferir gran capacidad de adaptación del retamo espinoso a cualquier medio (Sanguino, 2018; Sarmiento et al., 2016), lo que genera una amenaza para el ecosistema, ya que las semillas pueden ser arrastradas por las corrientes superficiales de los cuerpos y cauces de agua y vientos, debido al tránsito de automotores.



FIGURA 9.

Vuelo realizado, con vehículo no tripulado, sobre una zona posible de presencia de retamo espinoso.

Autores.

4. CONCLUSIONES

Con la metodología utilizada en esta investigación se busca mostrar una manera práctica de clasificar píxeles, utilizando una técnica muy sencilla y menos costosa desde el punto de vista económico; debido a que, en muchas áreas del conocimiento, se desconocen las potencialidades de las imágenes satelitales y en general de las técnicas de la geomática (Pacino, 2018) para la extracción de información temática.

En este estudio se logró, a través de la teledetección espacial y radiometría satelital, caracterizar espectralmente el comportamiento de retamo espinoso en un territorio específico, como lo realizado por Ávila-Vélez et al. (2019) y Ormazábal et al. (2013), que caracterizaron cultivos de maíz utilizando imágenes satelitales y observaron la evolución espacial de los bosques utilizando imágenes Landsat-5, aplicando espectrorradiometría de campo [esta técnica mide la energía reflejada de los elementos del paisaje]. Existen otras técnicas para clasificar elementos de un territorio usando imágenes satelitales (Haboudane et al., 2004; Perea et al., 2009; Stefanov et al., 2001; Yu et al., 2006); sin embargo, dependen en alto grado de la composición física y química del elemento en el territorio.

Se puede inferir, de acuerdo con lo hallado en este estudio, que el retamo espinoso posee una distribución espacial lineal, adaptada a los elementos del territorio y utiliza como agente multiplicador estos medios: las vías de comunicación, los vientos, las corrientes de aire y las escorrentías de agua que surgen a los lados de las vías. Este concepto es emitido a partir de los vuelos realizados con aeronaves no tripuladas, los cuales se efectuaron para corroborar los datos obtenidos con las técnicas geomáticas de este estudio.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen a los habitantes y agricultores de la vereda “El Romeral” del municipio de Sibaté [Cundinamarca], a la Universidad de Cundinamarca, en alianza con el Ministerio de Ciencia, Tecnología e Innovación, por su apoyo para el desarrollo del proyecto 62851 “Diseño de estrategias para el control de retamo espinoso (*Ulex Europeaus* L.), en los municipios de Sibaté, Soacha y Pasca” y al grupo de investigación Geocartografía, perteneciente a la Universidad de Cundinamarca, por su apoyo en las salidas de campo.

LITERATURA CITADA

- Ávila-Vélez, E. F., Escobar-Escobar, N. & Morantes-Choconta, C. F. (2019). Applying satellite images to spectral signature development of maize production (*Zea mays* L. under Colombia's middle tropics conditions. *Entramado*, 15(2), 256–262. <https://doi.org/10.18041/1900-3803/ENTRAMADO.2.5734>
- Barrera-Cataño, J. I., Rodríguez, D., Rojas, J. E., Moreno, A. C., Ocampo, R., Contreras-Rodríguez, S. M. y Malambo-Duarte, N. (2019). *Plan de prevención, manejo y control de las especies de retamo espinoso (Ulex europaeus) y retamo liso (Genista monspessulana) en la jurisdicción CAR*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca.
- Barreto, E. M. (2021). *Desarrollo de una firma espectral para la identificación de parches de retamo espinoso (Ulex europeus) en los cerros orientales de la ciudad de Bogotá, usando imágenes satelitales SENTINEL-2* [Tesis de especialización, Universidad Militar Nueva Granada]. Repositorio Institucional UMNG. <https://repository.u.nimilitar.edu.co/handle/10654/37423>
- Beltrán, H. E. y Barrera-Cataño, J. I. (2014). Caracterización de invasiones de *Ulex europaeus* L. de diferentes edades como herramienta para la restauración ecológica de bosques altoandinos, Colombia. *Biota Colombiana*, 15(2), 3-26. <https://www.redalyc.org/pdf/491/49140740002.pdf>
- Cano, C., Jones, C., Villarreal, F., García, L., De la Paz, M., Hernández, A., Quintana, A., Ávila, A. J., Gutiérrez, C. y Yañez, J. (2016). El SEM en la evaluación de la calidad del aire a partir del tratamiento estadístico de sistemas PM10. *Acta Microscópica*, 25. https://documen.site/download/el-sem-em-la-evaluacion-de-la-calidad-del-aire-a-partir-del_pdf
- Castro, D. E. y Peñaloza, F. S. (2015). *Metodología para la identificación de especies vegetales invasoras Ulex europaeus (retamo espinoso) y Genista monspessulana (retamo liso) en zonas piloto de Bogotá D.C. usando imágenes multispectrales de alta resolución* [Tesis de pregrado, Universidad Distrital]. RIUD. <https://repository.udistrital.edu.co/handle/11349/2368>
- Empresa de Acueducto y Alcantarillado de Bogotá. (2021). *Retamo Espinoso*. <https://www.acueducto.com.co/wps/portal/EAB2/gestores-ambientales/centro-de-conocimiento/por-temas/retamo-espinoso/>

- Environmental Systems Research Institute [ESRI]. (2020). *Análisis de puntos calientes optimizado (Estadística espacial)*. <https://pro.arcgis.com/es/pro-app/2.8/tool-reference/spatial-statistics/optimized-hot-spot-analysis.htm>
- Everitt, J. H., Pettit, R. D. & Alaniz, M. A. (1987). Remote Sensing of Broom Snakeweed (*Gutierrezia sarothrae*) and Spiny Aster (*Aster spinosus*). *Weed Science*, 35(2), 295–302. <https://doi.org/10.1017/S0043174500079224>
- Goovaerts, P. (2001). Geostatistical modelling of uncertainty in soil science. *Geoderma*, 103, 3–26. [https://doi.org/10.1016/S0016-7061\(01\)00067-2](https://doi.org/10.1016/S0016-7061(01)00067-2)
- Haboudane, D., Miller, J. R., Pattey, E., Zarco-Tejada, P. J. & Strachan, I. B. (2004). Hyperspectral vegetation indices and novel algorithms for predicting green LAI of crop canopies: Modeling and validation in the context of precision agriculture. *Remote Sensing of Environment*, 90(3), 337–352. <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2003.12.013>
- Instituto Nacional de Investigación Agropecuaria [INIA]. (2011). *Estrategia de control de tojo – Ulex europaeus en campos forestales y ganaderos*. <http://www.inia.uy/Publicaciones/Documentos%20compartidos/112935020511161051.pdf#page=15>
- León, O. A. y Vargas, O. (2011). Estrategias para el control, manejo y restauración de áreas invadidas por retamo espinoso (*Ulex europaeus*) en la vereda El Hato, Localidad de Usme, Bogotá D.C. En O. Vargas y S. Reyes. (Eds.). *Memorias del I Congreso Colombiano de Restauración Ecológica* (pp. 474-490). Universidad Nacional de Colombia.
- Liu, W., Ma, L., Smanov, Z., Samarkhanov, K. & Abuduwaili, J. (2022). Clarifying Soil Texture and Salinity Using Local Spatial Statistics (Getis-Ord G_i^* and Moran's I) in Kazakh-Uzbekistan Border Area, Central Asia. *Agronomy*, 12(2), 332. <https://doi.org/10.3390/AGRONOMY12020332>
- L3Harris Geospatial Solutions. (2022). *PlanetScope from Planet®*. <https://www.l3harrisgeospatial.com/Data-Imagery/Satellite-Imagery/Medium-Resolution/PlanetScope?>
- Muñoz, E. (2009). El espinillo (*Ulex europaeus* L. 1753) un invasor biológico en el sur de Chile: estado de su conocimiento y alternativas de control. *Gestión Ambiental*, 17, 23-44. https://www.ceachile.cl/revista/cdn/GA_17_Munoz.pdf
- Ocampo-Zuleta, K. (2019). Modelo descriptivo de restauración ecológica en zonas afectadas por incendios forestales e invasión de retamo espinoso en los Cerros Orientales de Bogotá. *Acta Biológica Colombiana*, 24(1), 1–12. <https://doi.org/10.15446/abc.v24n1.71953>
- Ormazábal, Y., Ávila, C., Mena, C., Morales, Y. y Bustos, Ó. (2013). Caracterización y cuantificación de fragmentos de bosque nativo, en un sector del secano interior de la región del Maule, Chile. *Ciencia Florestal*, 23(3), 449–460. <https://doi.org/10.5902/1980509810556>
- Osorno, V. (2014). Revisión sobre los impactos generados por la competencia ente plantas nativas e introducidas como base para el control de *Ulex europaeus* en la Ciudad de Bogotá D.C. *Revista de Tecnología*, 13(1), 108–113. <https://doi.org/10.18270/rt.v13i1.1305>
- Pacino, M. C. (2018). La ciencia geomática presente y futuro. *Revista argentina de ingeniería*, 10(5), 37-41. https://ri.conicet.gov.ar/bitstream/handle/11336/101397/CONICET_Digital_Nro.b1f027b0-a8a1-4284-9683-a3c14c113e0b_B.pdf?sequence=5&isAllowed=y
- Perea, A. J., Meroño, J. E. y Aguilera, M. J. (2009). Algoritmos de clasificación experta aplicados en imágenes satelitales Quickbird para el mapeo de la cobertura de la tierra. *Chilean Journal of Agricultural Research*, 69(3), 400–405. <https://doi.org/10.4067/S0718-58392009000300013>
- Sampayo, D. y Vinçón, I. (2018). *Precisión y exactitud de la banda espectral Red-Edge aplicado a la detección y monitoreo del bosque nativo en Uruguay* [Tesis de pregrado, Universidad de la República]. Colibrí. <https://hdl.handle.net/20.500.12008/21723>
- Sánchez, M. P., Millán, D. L., Salazar, M. L., Rico, D. Z. y Manrique, P. (2018). Erradicación de retamo espinoso e inicio de restauración ecológica en los cerros orientales de Bogotá. (Prueba piloto) [Conferencia]. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI 2018*, Cartagena, Colombia. <https://doi.org/10.26507/pone-ncia.422>

- Sanguino, J. A. (2018). Identificación de impactos generados por el retamo espinoso en la vereda Santa Rosa localidad Ciudad Bolívar. *Semillas Ambientales*, 12(1), 160–164. <https://revistas.udistrital.edu.co/index.php/bsa/article/download/13628/13973/>
- Sarmiento, C., Agudelo, C. y León, O. (2016). El límite superior del bosque en la alta montaña colombiana. *Biodiversidad: reporte de estado y tendencias de la biodiversidad continental de Colombia*, 17. <https://doi.org/10.21068/B001.2016.102>
- Secretaria Distrital de Ambiente de Bogotá. (2020). *Visor para la Difusión Ambiental y Participación ciudadana*. <http://visorgeo.ambientebogota.gov.co/minimo/?lon=-74.150618&lat=4.599787&z=11&l=7:1|18:1>
- Stefanov, W. L., Ramsey, M. S. & Christensen, P. R. (2001). Monitoring urban land cover change: An expert system approach to land cover classification of semiarid to arid urban centers. *Remote Sensing of Environment*, 77(2), 173–185. [https://doi.org/10.1016/S0034-4257\(01\)00204-8](https://doi.org/10.1016/S0034-4257(01)00204-8)
- Wang, Q., Shi, W., Li, Z. & Atkinson, P. M. (2016). Fusion of Sentinel-2 images. *Remote Sensing of Environment*, 187(15), 241-252. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.10.030>
- Yu, Q., Gong, P., Clinton, N., Biging, G., Kelly, M. & Schirokauer, D. (2006). Object-based detailed vegetation classification with airborne high spatial resolution remote sensing imagery. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 72(7), 799–811. <https://doi.org/10.14358/PERS.72.7.799>

NOTAS

- [1] Como ejemplo se encuentra el visor para la Difusión Ambiental y Participación ciudadana de la Secretaría Distrital de Ambiente de Bogotá (2020). <https://visorgeo.ambientebogota.gov.co/minimo/?lon=-74.150618&lat=4.599787&z=11&l=7:1|18:1>
- [2] La descripción de los sensores PlanetScope se encuentra en esta página (L3Harris Geospatial Solutions, 2022): <https://www.l3harrisgeospatial.com/Data-Imagery/Satellite-Imagery/Medium-Resolution/PlanetScope?>

ENLACE ALTERNATIVO

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5840> (html)

<https://hemeroteca.unad.edu.co/index.php/riaa/article/view/5840/5961> (pdf)