

METODOLOGÍA PARA ANÁLISIS Y ESTUDIO DE LA SUSCEPTIBILIDAD DE AMENAZAS AMBIENTALES, UTILIZANDO SISTEMAS RPAS

METHODOLOGY FOR ANALYSIS AND STUDY OF THE SUSCEPTIBILITY OF ENVIRONMENTAL THREATS, USING RPAS SYSTEMS

William Barragán Zaque ^a
 Hernán Darío Zárate Arévalo^b
 Lilia Edith Aparicio Pico^c

Resumen

En el presente artículo se presenta un método de menor costo, para el análisis y estudio de la susceptibilidad de las amenazas ambientales en cascos urbanos o zonas rurales dispersas, con un área inferior a 300 hectáreas, en poblaciones menores a 30.000 habitantes. El método estructura las posibles capas, que se puedan generar con los datos y ortofotomosaicos tomados a partir de las imágenes capturadas por RPAS Sistema Aeronaves Pilotadas Remotamente a una escala de 1:5000, sin utilizar información secundaria. Para la comprobación del método, se realizaron pruebas en ortofotomosaicos generados por la Gobernación del Huila en el municipio de Nátaga – Huila, correspondientes a de los años 2016 y 2018 e imágenes del 2018 del municipio de Algeciras - Huila, estas están compuestas de tres bandas espectrales y una resolución espacial de 15 centímetros por pixel. A partir de esta comprobación, se logra identificar la susceptibilidad de amenaza por remoción e inundación en el casco urbano del municipio de Nátaga – Huila.

Palabras clave: Monitoreo ambiental, Factores Ambientales, Gestión Ambiental, Geología, Vehículos aéreos no tripulados, Sistemas de Información Geográfica y Análisis Geoespacial.

Abstract

This paper presents a lower-cost method for the analysis and study of the susceptibility of environmental threats in urban zone or dispersed rural zone, with an area of less than 300 hectares, in populations of less than 30,000. The method structures the possible layers that can be generated with the data and orthophotomosaics taken from the images captured by RPAS Remotely Piloted Aircraft System at a scale of 1: 5000, without using secondary information. To verify the method, the photo mosaics generated by the Government of Huila in the municipality of Nátaga -Huila in the years 2016 and 2018 were carried out, composed of three spectral bands and a spatial resolution of 15 centimeters for pixel. With these inputs, it is possible to identify the susceptibility of threat due to removal and flooding in the urban area of the municipality of Nátaga - Huila.

Recepción: Septiembre de 2021 / Evaluación: Octubre 2021 / Aprobado: Noviembre 2021

^a MSc. en Fotogrametría y Geoinformática. Esp Sistemas de Información Geográfica, Profesor Titular, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. wbarraganz@udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-9851-7857>

^b Candidato MSc. En Ciencias de la Información y las Comunicaciones con énfasis en Geomática. Especialista en Sistemas de Información Geográfico, Administrador Ambiental y Tecnólogo en Gestión Ambiental y Servicios Públicos de la universidad Francisco José de Caldas, piloto certificado de RPAS. hdzaratea@correo.udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0001-5388-0265>

^c Phd. Ciencias Técnicas. Magister En Teleinformatica, Esp. Gerencia de Proyectos Educativos, Profesor Titular, Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Bogotá D.C., Colombia. medicina@udistrital.edu.co ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-1841-4423>

Key words: Environmental monitoring, Environmental factors, Environmental management, geology, Unmanned aerial vehicles, Geographic information systems and Geospatial analysis.

Introducción

En la actualidad se están presentando diferentes fenómenos y desastres ambientales en el territorio colombiano, ocasionando graves afectaciones a la población expuesta, ocasionando pérdidas de bienes o vidas; esta situación lleva a tomar medidas de prevención e identificación de las zonas afectadas por una amenaza, como un factor clave para afrontar estos tipos de eventos junto con la obtención de datos actualizados y detallados de forma versátil.

Los RPAS, son aeronaves utilizadas en diferentes actividades medio-ambientales, aportando información significativa en la adquisición de datos detallados, para el análisis y asignación de los atributos de las capas necesarias, para identificar la susceptibilidad de las amenazas de inundación y/o remociones en masa.

Se diseñó un experimento con el que se propone una metodología, para la captura de datos geográficos, topográficos y análisis geoespaciales del territorio, con el propósito de sistematizar la información de campo y aporte de criterios de evaluación, para la toma de decisiones, en las entidades territoriales.

Para realizar las capas de datos necesarios para dicho análisis, pueden capturarse por medio de un ortofotomosaico resultado de un vuelo realizado con un RPAS, que se define como *“Un vehículo aéreo motorizado que no lleva a bordo un operador humano, utiliza las fuerzas aerodinámicas para generar la sustentación, puede volar autónomamente o ser tripulado de forma remota, que puede ser fungible o recuperable y que puede transportar una carga de pago letal o no, No se considera UAV a los misiles balísticos o semibalísticos, misiles crucero y proyectiles de artillería”*. (Rejado, 2015). Lo anterior se tiene en cuenta, para identificar los componentes ambientales que sirvan para el análisis.

No obstante, para la identificación de la susceptibilidad de la amenaza con el método propuesto, es necesario contar con algunas capas geográficas como: pendientes, curvaturas, geomorfología, cobertura vegetal, Geología y precipitación, para esto se implementa métodos que se puedan aplicar basados en la información captada por el RPAS.

En el desarrollo del ejercicio se identificó que con solo los ortofotomosaicos generados por RPAS, no es posible caracterizar todas las capas requeridas para la identificación de amenazas. Especialmente los atributos asociados a la geología y precipitación, a pesar de esto, se logra el objetivo de identificar las amenazas por inundación y por remoción.

Se hicieron pruebas de la metodología propuesta para la integración de los componentes de amenazas ambientales, se confrontó con imágenes existentes en los municipios de Nátaga y Algeciras en el departamento del Huila.

Características de RPAS

En la actualidad hay diferentes tipos de RPAS, funcionales con combustible, sistema eléctrico e incluso por energía solar. Se pueden clasificar de acuerdo a su principio de sustentación aerodinámica en: multirrotor, ala rotatoria, despegue vertical y vuelo horizontal - VTOL Vertical Take-Off and Landing y ala fija, **Figura 1**. En el desarrollo de la toma de información para este trabajo, se utilizó RPAS tipo multirrotor, denominado quadcoptero o cuatrirrotor, dado que para su funcionamiento requiere 4 rotores.

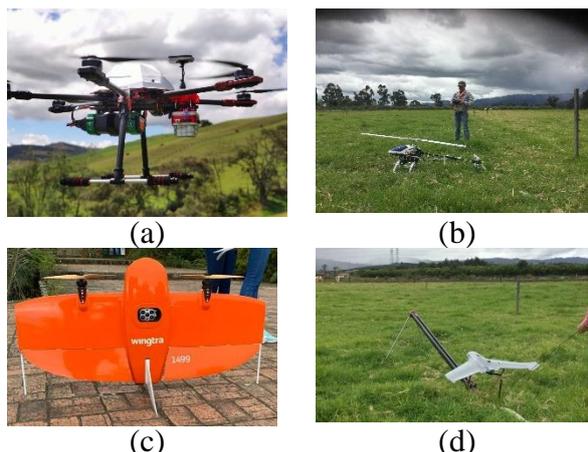


Figura 1 Clasificación de RPAS según principio de sustentación. (a) Multirrotor (b) ala rotatoria (c) VTOL (d) Ala fija.

Fuente: Laboratorio de Fotogrametría.
Universidad Distrital Francisco José de Caldas

Los ortofotomosaicos utilizados fueron de los años 2016 y 2018, la ortofoto del 2018 está compuesta de la siguientes bandas espectrales R, que comprende el rango de longitudes de onda correspondientes al rango del rojo del espectro electromagnético, G que comprende el rango de longitudes de onda correspondientes al rango del verde del espectro electromagnético y B que comprende el rango de longitudes de onda correspondientes al rango del azul del espectro electromagnético; el ortofotomosaico del 2018 además de contener las bandas RGB, contiene un cuarta banda denominada NIR Infrarrojo cercano. Las imágenes de los municipios tienen combinaciones de bandas de la siguiente manera: RGB color real y falso color de IRG.

Ventajas que ofrecen los RPAS para la identificación de las amenazas naturales

En la actualidad hay diferentes métodos para la captura de datos geospaciales exteriorizados en ortofotos, las cuales son resultado de procesos digitales obteniendo una imagen referenciada geográficamente, corrigiendo deformaciones para la toma de medidas en verdadera magnitud. Por lo tanto, para procesos de análisis de temarios ambientales es un insumo básico para la localización geográfica, que se requiere en múltiples aplicaciones para diversas áreas del conocimiento, incrementado la demanda y uso de imágenes ortorectificadas.

De igual forma, los avances tecnológicos, han reducido costos y han permitido la accesibilidad a vehículos aéreos no tripulados RAPS o UAS, para tomar fotografías de alta resolución y crear productos cartográficos con mayor precisión.

En Colombia, se ha utilizado esta técnica de modelación en 3D en el año 2009, cuando se realizó la modelación del monumento “cara triangular” en las estatuas de San Agustín en el Departamento del Huila, logrando desarrollar un modelo en tres principales fases, las cuales consistieron en la calibración de la cámara, la verificación de la metodología con una prueba piloto de una estatua similar y el trabajo de campo que brinda información adicional para identificar puntos de referencia para la restitución del modelo (Barragán, 2009).

Diversas áreas de la investigación se dedicada al mejoramiento de los procesos digitales resaltando la restitución automática de objetos tipo (edificaciones, zonas urbanas, etc), (Ruiz Morales, 2003) (Buill, Núñez, & Rodríguez, 2003), la integración de fotografías con sensores Lidar (Light Detection and Ranging) (Uddin, Altaf, Bilal, Nkenyereye, & Bashir, 2020), donde se realiza captura sincronizada de imagen con un barrido Lidar, aunque esta situación requiere disminuir la altura de vuelo con el fin de garantizar la resolución espacial del sensor de la cámara y el lidar (Dhote & Limbourg, 2020) (Lohr, 2003).

Los RPAS tienen una relación directa con los SIG Sistemas de Información Geográfica y es una tendencia de futuro en el sector.

Estos RPAS tienen la facilidad de obtener datos de alta resolución con tecnología LIDAR debido a las bondades de esta tecnología, se obtienen nubes de puntos muestreadas comprimidas en formato LAS (.laz) y o en formato ASCII (.asc) como se observa en la **Figura 2** generando MDS (Modelo Digital de Superficie) y ortofotomosaicos generados en formatos GeoTIFF (Ruiz Morales, 2003), (Riaño Melo, 2010).



Figura 2 Nube de puntos, formato LAS del Municipio de Tarqui - Huila. Elaboración Propia Software Pix4 d.

Fuente: Elaboración de los autores

La información con niveles de detalle óptimos, sirven para un análisis confiable y los RPAS tienen una capacidad de crear ortofotomosaico de una resolución espacial de 5 cm por pixel e inclusive menos. Adicionalmente son equipos versátiles que pueden transportar diversos instrumentos de medición, como LIDAR, sensores térmicos y cámaras de alta resolución.

Actualmente, la teledetección aérea y satelital son métodos tradicionales para recopilar información para seguimiento de diversos procesos en la naturaleza (Georgiades, Papageorgiou, & Loizou, 2019), (Barrowes, y otros, 2019) (Wu, Li, Zhang, & Liu, 2019), (Zhao, y otros, 2020), sin embargo, no son eficaces en su resolución temporal, no se obtiene la información en tiempo real y no es lo suficientemente precisa. Comparado con los métodos tradicionales para capturar imágenes. Un RPAS adaptado para fotogrametría y teledetección, permite de forma más flexible e inmediata de obtener imágenes de alta resolución a bajo costo (Chen & Wang, 2019), (Xing, Wang, & Xu, Xing, Wang et al. – Overlap Analysis of the Images, 2010).

Otra ventaja que se obtienen en la utilización de estos vehículos, es la posibilidad de realizar capturas de información en días nublados, debido a que a diferencias de aviones o satélites, la nubosidad es una variable de preocupación en el momento de capturar los datos, los RPAS pueden realizar los vuelos entre 90m y 150m de altura.

Pero esto debe ser captado con un debido proceso para que el resultado sea satisfactorio, donde se deben tener en cuenta diferentes variables para que sea un éxito la captura de estos datos como, el trabajo de campo antes de la captura de la información, en el momento del procedimiento y el postproceso, que debe estar acompañada de diversas herramientas para obtener niveles de detalle óptimos.

Desventajas de los RPAS

Estos vehículos son muy versátiles, pero pueden tener algunas dificultades para su operación y también algunas limitaciones de los datos capturados.

Las imágenes tomadas con RPAS presentan inconvenientes en el área de cobertura de la imagen, que es mucho más reducida y requiere numerosas tomas para conformar un mosaico de imágenes, lo cual se convierte en una labor dispendiosa, se acumula el error sucesivamente

lo que causa derivas de posición de cada imagen en el mosaico (Xing, Wang, & Xu, Xing, Wang et al. – A Robust Method for Mosaicking, 2019), (Xing, Wang, & Xu, Xing, Wang et al. – Overlap Analysis of the Images, 2010).

Otro inconveniente es el fenómeno de oclusión, es uno de los obstáculos más difíciles para visualizar objetos tipo, este problema ha tenido pocos avances en su solución, contextualizado en modelos de detalle. Los intentos de solución a la oclusión en reconocimiento de objetos 2D, utilizan el modelado de la máscara de visibilidad / ocluidor (Fransens, Strecha, & Gool, 2006) (Gao, Packer, & Koller, 2010) (Suha Kwak, Woonhyun Nam, Bohyung Han, & Joon Hee Han, 2015) (Wang, Han, & Yan, 2009) Los detectores de formación para objetos ocluidos, frecuentemente usan profundidad o indicios de movimiento (Enzweiler, Eigenstetter, Schiele, & Gavrila, 2010), la “parte ocluida” hace parte de la información perdida. Una aplicación específica es la utilizada para identificar oclusión en automóviles, aplicando RANSAC (Robustly Aligning a Shape Model and It’s Application to Car) permite la localización de un conjunto de puntos característicos en una imagen que delimitan la forma de un objeto, como un automóvil o un rostro, esta localización se conoce como alineación (Acosta, Ivo, & Andreas, 2020).

Se tienen alternativas para superar esta limitación, empleando un modelo de dos capas, donde los objetos se detectan la primera vez, usando la variación del método poselet (Bourdev & Malik) para obtener una ubicación aproximada; la forma detallada se obtiene con la posición y la máscara de oclusión, de donde se infiere un modelo 3D explícito como el utilizado en los modelos detallados planteados por Zia (Zia, Stark, Schiele, & Schindler, 2013).

La condición meteorológica en el área de estudio, la normativa que regula el uso de estos aparatos y la seguridad social en la que se encuentre el territorio son algunas de las dificultades identificadas.

Cálculo del vuelo y planeación

Uno de los factores en el desarrollo del experimento es la identificación de la cantidad de área que se puede abarcar con el RPAS (Chai, y otros, 2020), con el cual se realizó el experimento, en el caso específico fue utilizado el RPAS de cuatro rotores (Song, Xing, Xi, Yang, & Yu, 2020), para esto se analizó el tiempo de vuelo de estos aparatos, calculando un promedio con un rendimiento de solo 60% y el 40% restante equivale al tiempo de maniobra de sincronización, despegue, inicio del vuelo y aterrizaje.

Para poder calcular el área a cubrir se debe tener en cuenta el tiempo promedio y la velocidad de este tipo de RPAS o UAS como se documenta en la **Tabla 1**.

RPAS/UAS	Marca	Tiempo de Vuelo en minutos	Tiempo de Vuelo en segundos
MAVIC 2	DJI	31	1860
PHANTOM 4 pro v.02	DJI	30	1800
MAVIC AIR	DJI	21	1260
MAVIC PRO PLATINUM	DJI	30	1800
PHANTOM 3 SE	DJI	25	1500
PHANTOM 4ADVANCED	DJI	30	1800
PHANTOM 3 PRO	DJI	23	1380
PHANTOM 2 VISION	DJI	15	900
INSPIRE 2	DJI	27	1620
INSPIRE 1 PRO	DJI	15	900
Promedio		24,7	1482

Valor de neto del 60% de autonomía	14,82	889,2
------------------------------------	-------	-------

Tabla 1 Tiempo de vuelo y velocidad de cuadricóptero Fuente: Información Página oficial de (DJI, 2019)

Fuente: Elaboración de los autores

Una vez calculado los promedios de tiempos y velocidad se calcula sobre el 80% de rendimiento y posterior la distancia que recorre.

$$D = (v \times t) * 0.8 \tag{1}$$

Donde D = Distancia promedio
 v = Velocidad promedio
 t = Tiempo promedio
 0.8 = Rendimiento

$$8002.8 \text{ m} = (11.25 \times 889.2s) * 0.8$$

El cálculo dio como resultado un promedio de 8002.8 m de recorrido útil.

Para calcular el área, se tomó una longitud de entre línea de vuelo de 50 m y una distancia de línea de vuelo de 600 m a una altura de 90m a nivel del terreno.

$$A = L \cdot W \tag{2}$$

Donde A = Área resultado
 L = Longitud
 W = Ancho

$$400.140 \text{ m}^2 = 8.002,8 \text{ m} \cdot 50m$$

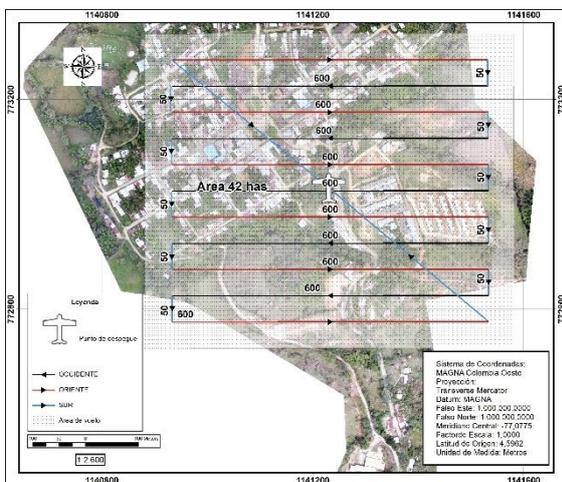


Figura 3 Plan de vuelo.

Fuente: Elaboración de los autores

Una vez realizado el cálculo, dio como resultado 400.140 m² equivalente a 40 hectáreas. Teniendo en cuenta esta área en promedio, se realiza el plan de vuelo que abarque la zona de estudio, en la Figura 3, se encuentra un ejemplo del trazado del plan de vuelo.

También es pertinente calcular la cantidad de vuelos necesarios para realizar, el área de estudio y una cantidad de puntos de control mínimos para la toma de ortofotomosaicos. Para esto se calculó con una muestra de la información de los centros poblados del departamento del Huila. A cada uno se les incrementa el 20% de su área, esto para cubrimiento total del área de estudio y se realiza bajo la distribución de frecuencia con datos en serie agrupados.

$$fr = \frac{f}{n} \quad (3)$$

Donde n = Es igual al número total de los datos.

Frecuencia Relativa (fr) = Indica la proporción con que se repite un valor. Es el cociente entre la frecuencia absoluta y el número total de datos. La suma de las frecuencias relativas es siempre uno.

Frecuencia Acumulada (fa) = Indica el número de valores que son menores o iguales que el valor dado. Es la suma de la frecuencia absoluta primera con la segunda, este valor con la tercera, y así sucesivamente.

$$f\% = fr * 100 \quad (4)$$

Frecuencia Porcentual (f%) = Llamada también frecuencia relativa porcentual. Se obtiene multiplicando la frecuencia relativa por 100. La suma de las frecuencias porcentuales es siempre 100%.

Frecuencia Relativa Acumulada (fra). Es la suma de la frecuencia relativa primera con la segunda, este valor con la tercera, y así sucesivamente.

$$fra\% = fra * 100 \quad (5)$$

Donde

Frecuencia Relativa Acumulada Porcentual (fra%). Indica el número de valores que son menores o iguales que el valor dado. Se obtiene multiplicando la frecuencia relativa acumulada por 100. Se calcula así:

Para el presente desarrollo metodológico, se identificó 142 centros poblados, que pueden ser objeto de estudio en el departamento del Huila. Para analizar e identificar las necesidades técnicas para realizar el estudio en este tipo de zonas, se agrupó los datos por su área y se identificó el rango para su clasificación:

$$R = v_{max} - v_{min} \quad (6)$$

Donde $R = Rango$

$v_{max} = Valor\ Máximo$

$v_{min} = Valor\ Mínimo$

Una vez obtenido el rango se procede al cálculo de los intervalos de clase definido como (ni), Herbert Sturges (Linas Solano & Rojas Álvarez, 2005) en 1926 considera un histograma con ni clases donde define el número de clase a elegir viene dado por

$$ni = 1 + 3,22 * \log(n) \quad (7)$$

Se calcula el ancho del intervalo definido como (i), que se obtiene dividiendo el rango por el número de intervalos

$$i = \frac{R}{ni} \quad (8)$$

Debido a que los valores no son un número exacto se realiza el ajuste para un nuevo rango denominado (R') y se define con el múltiplo superior matemático que redondea un número hacia arriba al entero más próximo o al múltiplo significativo más próximo.

Una vez obtenido él (R') se recalcula $x_{max}' = x_{min}'$ una vez obtenido el resultado se calcula d

$$d = \frac{R - R'}{2} \quad (9)$$

Donde d = a la diferencia de los intervalos.

Un elemento relevante para análisis y determinación estudio de la susceptibilidad de amenazas ambientales, es la definición del valor del área a intervenir y el número de vuelos RPAS a realizar. El cálculo de números de vuelo debe garantizar poder cubrir los centros poblado a

estudiar. Esta definición se realizó con los datos de área de los centros poblados del departamento.

Se identifica las variables de los datos.

$$n = 142$$

$$v_{max} = 321,801$$

$$v_{min} = 0,212$$

$$R = 321,801 - 0,212$$

$$R = 321,589$$

Se calcula los intervalos.

$$ni = 1 + 3,22 * \log (142)$$

$$ni = 7$$

Y se calcula el ancho del intervalo

$$i = \frac{R}{ni}$$

$$i = 45,941$$

Debido a que el número no es exacto se recalcula los intervalos definidos con ($i' = 46$) con este resultado se procede a calcular el nuevo Rango definido (R').

$$R = ni * i'$$

$$R' = 7 * 46$$

$$R' = 322$$

Se calcula la diferencia definida como (d) dividida en 2.

$$d = \frac{R - R'}{2}$$

$$d = 0.4112$$

Se toma la (d) y se le suma al v_{max} y se le resta la v_{min} dando como resultado los nuevos valores máximos definidos v_{max}' y v_{min}'

$$v_{max}' = 322.1006$$

$$v_{min}' = 0.0117$$

Se realiza el cálculo del promedio

$$Pormedio = 30,14$$

Una vez definido los rangos se realiza el cálculo de las frecuencias y da como resultado lo expuesto en la **Tabla 2** y en la **Figura 4**.

Intervalo de clase							
ni	v'_{max}	v'_{min}	X	Ni	Fi	Ni	fi%
1	0	45	23	102	72%	102	72%
2	46	91	69	21	15%	123	87%
3	92	137	115	14	10%	137	97%
4	138	183	161	0	0%	137	97%
5	184	229	207	1	1%	138	98%
6	230	275	253	3	2%	141	100%
7	276	321	299	0	0%	141	100%

Tabla 2 Concentraciones urbanas según área por intervalos de clase

Fuente: Información base de la gobernación del Huila. Elaboración de los Autores

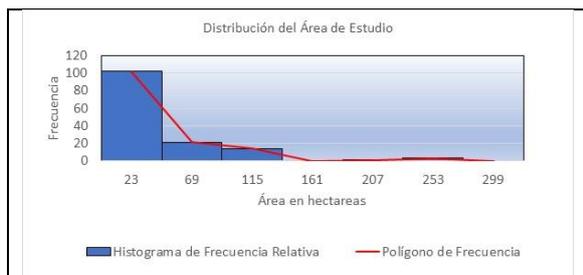


Figura 4 Distribución de áreas, centros poblados del departamento del Huila
Fuente: Elaboración de los Autores

En la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**, los centros poblados basados en su área se distribuyen en los tres primeros rangos, de 0 ha a 45 ha con una media de 23 ha se concentra el 72%, en centros poblados de 46 ha – 91 ha con una media de 69 m² está concentrado el 15% y el 10% en áreas de 92 ha – 137 ha con una media de 115 ha, según esto se puede deducir que los centros poblados en los que podría aplicar el método no superan las 137 has. Concentrados en su mayoría en centros poblados menores a 91 ha.

Rango del Centro Poblado	Inicio Hectáreas	Final Hectáreas	Puntos de Control	No de Vuelos
01	0	45	4	1
02	46	91	5	2
03	92	137	7	3
04	138	183	8	4
05	184	229	9	5
06	230	275	10	7
07	276	321	11	8

Tabla 3 Cantidad de puntos de control de centros poblados

Se propone los puntos de control y la cantidad de vuelos, según el área promedio de duración del vuelo de los RPAS calculada en 40 hectáreas. Aunque esta es una propuesta de la cantidad de puntos de control para la ortorectificación, se debe tener en cuenta los diferentes softwares de procesamiento de Ortofotomosaico para RPAS y a su vez procesan modelos de elevación del terreno y Modelo digital de superficies (Wanqiang, Huang, & Liu, 2020).

Material y métodos

Análisis de las amenazas con la información capturada por medio de los RPAS

El trabajo se enfoca en realizar la clasificación partiendo de la información de un ortofotomosaico realizado con especificaciones técnicas para cartografía 1:5000, se genera un interrogante ¿Qué análisis de Amenazas naturales podría realizar con tan solo la información capturada por medio de RPAS? (Ferreira, y otros, 2020). Para poder dar respuesta a esto se realizó un método partiendo de la unificación diferentes métodos existentes, para analizar un terreno en específico y mirar que resultados se obtienen.

Para realizar el análisis de la amenaza por remoción se aplicó el modelo de la Figura 5, este consiste en asignar pesos ponderados a cada una de las capas y sus categorías, teniendo en cuenta conceptos como, cobertura de usos del suelo, pendientes, curvaturas de la tierra, precipitación, geomorfología y geología, estas capas por lo general son utilizadas en este tipo de estudio y cada una de estas son realizada en terreno con ayuda de imágenes satelitales, en el ejercicio no se realizó trabajo de campo, solo se trabaja con la información capturada por RPAS

suministrada por la gobernación del Huila de la oficina del Departamento Administrativo de Planeación de la dependencia SIGDEHU Sistemas de Información Geográfica del Departamento del Huila y se obtuvo los siguientes resultados.

En el trabajo se implementó el modelo de la Figura 5 dividido en 4 fases, y en cada fase se ejecutaron las siguientes acciones:

La fase 1 es la obtención de las imágenes tomadas por medio de RPAS en especial por los Multirrotor de la **Figura 1 (a)**.

La fase 2 es la que genera y clasifica las diferentes capas necesarias para implementar el modelo de la Figura 5, teniendo en cuenta las que puedan ser clasificadas con la información captada por medio de RPAS.

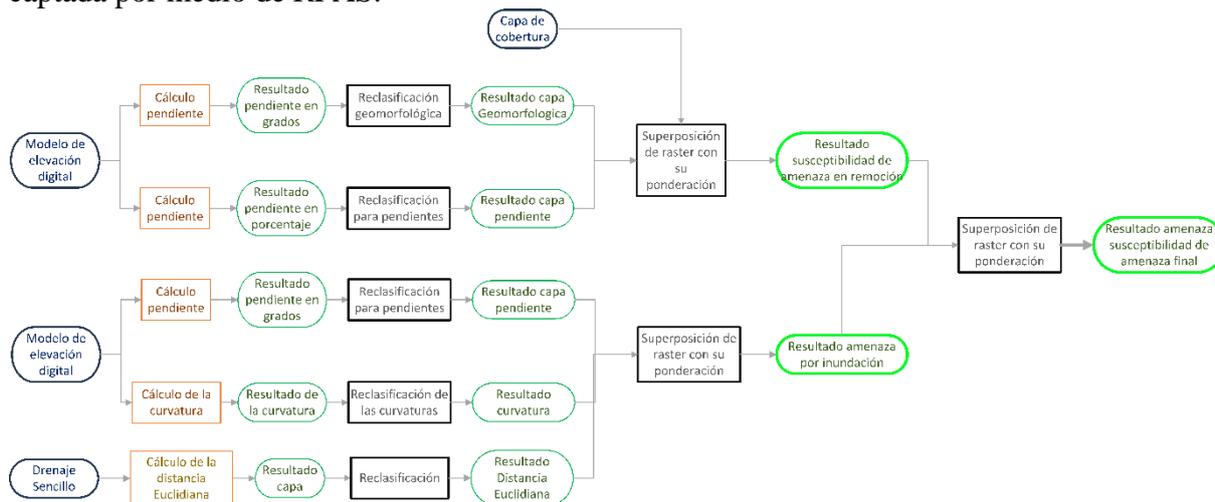


Figura 5 Modelo de susceptibilidad de amenaza propuesto
Fuente: Elaboración de los autore

La fase 3 comprende el análisis espacial por medio de una superposición y cálculo de las capas, identificando las zonas susceptibles de amenaza por inundación y por remoción.

La fase 4 es la combinación del resultado de la fase 3, obteniendo una caracterización de la amenaza en el área de estudio y se realiza la evaluación del método por medio del coeficiente Kappa.

Resultados y discusión

Fase 1

El experimento se realizó en Colombia en el departamento del Huila en el municipio de Nátaga, el cual se encuentra en la región occidental del departamento; cuenta con un estudio de amenazas naturales realizado por la Universidad Nacional de Colombia Sede Medellín en 1991, un estudio realizado en el año 2016 por la Gobernación del Huila y a su vez cuenta con un ortofotomosaico del 2016 de tres bandas RGB con una escala de 1:5000 realizada para una actualización de los estudios de amenaza en cumplimiento del (Decreto 1807, 2014). Este ortofotomosaico se realizó con un RPAS Phantom 3 Profesional.

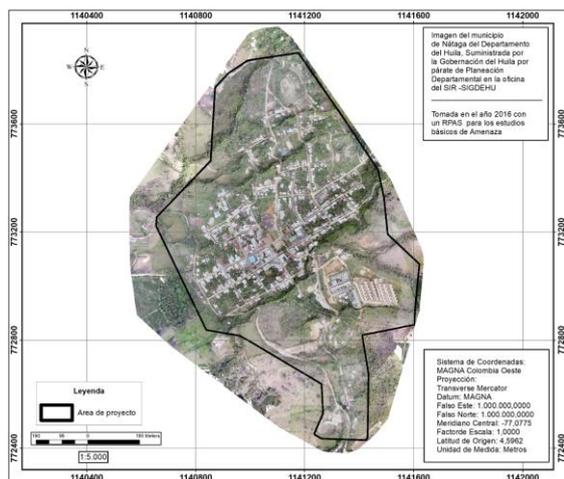


Figura 6 Imagen del municipio de Nátaga-Huila

Fuente: Información Gobernación del Huila, Adecuación de los Autores

También cuenta con un ortofotomosaico del año 2018 realizado por la Gobernación del Huila por medio del SIGDEHU “Sistema de Información Geográfica del Huila”, para actualizar la cartografía básica a escala 1:2000, esta cuenta con 4 bandas rojo, verde, azul e infrarrojo cercano y dos combinaciones RGB e IRG. Este ortofotomosaico se realizó con un RPAS Phantom 4 Profesional.

El área del estudio es de 78,5 ha de las 113 ha de la Ortofoto con una topografía de pendiente alta y montañosa representada en la Figura 6.

Fase 2

Cobertura y Uso del Suelo

La vegetación es un factor influyente para poder analizar la estabilidad del terreno, que para el caso se determina con nivel de detalle de cartografía 1:5000, este factor ya ha sido evaluado por diferentes científicos y se ha llegado a una conclusión: el efecto mecánico del sistema radicular favorece la estabilidad de las laderas al incrementar la resistencia del suelo a desplazarse, al aumentar la rugosidad disminuyen las velocidades y en esa forma disminuye la erosión, se pueden presentar grandes reducciones de velocidad de flujo utilizando una cobertura densa y espacialmente uniforme y la relación positiva de la vegetación en la estabilidad del terreno, está dada generalmente a mayor variabilidad en las características fisonómicas y florísticas. Por otra parte, la vegetación influencia la estabilidad de las laderas en dos formas (1) reducción de la humedad del suelo por evapotranspiración e interceptación; y (2) mayor cohesión del suelo por aportes del sistema radicular (Edier, Hernán, & Jaime, 2010), (Mallmann, Zaninni, & Pereira Filho, 2020).

Para esta capa se identificó los siguientes atributos que son visibles en los centros poblados; como agua, vías destapadas, bosques, arbustos, construcciones, cultivos, vías pavimentadas, zonas destapadas. Para generar la capa de coberturas se realizó, por medio de un método de clasificación supervisada, con su respectivo análisis del coeficiente Kappa (K) que se utiliza para verificar los resultados obtenidos. A continuación, se describe los métodos utilizados.

Spectral Angle Mapper. El algoritmo del mapeador de ángulo espectral (SAM), es basado en una suposición ideal de que un solo píxel de control remoto en la detección de imágenes representa una cierta cobertura del suelo material, y puede asignarse de forma exclusiva a un solo terreno clase de cubierta, este algoritmo determina la similitud espectral calculando el

ángulo entre los dos espectros, tratándolos como vectores en un espacio con dimensionalidad igual al número de bandas. (Rashmi S, 2014).

Mahalanobis Distance. La distancia de Mahalanobis es una medida de distancia entre dos puntos en el espacio definidos por dos o más de dos variables correlacionadas, es decir, Mahalanobis distance toma las correlaciones dentro de un conjunto de datos entre la variable en consideración. Si hay dos variables no correlacionadas, la Distancia de Mahalanobis entre los puntos de la variable en el diagrama de dispersión 2D es igual a la distancia euclidiana.

Por lo tanto, un pequeño valor de la distancia de Mahalanobis aumenta la posibilidad de una observación para estar más cerca del centro del grupo y lo más probable es que sea asignado a ese grupo. (Madhura M, 2013).

Spectral Correlation Mapper. El método del Spectral Correlation Mapper (SCM) es un derivado del coeficiente de correlación de Pearsonian Correlation Coefficient que elimina la correlación negativa y mantiene la característica de minimizar el efecto de sombreado que resulta en mejores resultados (Carvalho & Meneses, 2000).

Minimun Distance. El clasificador de mínima distancia se utiliza para clasificar datos de imagen desconocidos en clases que minimizan la distancia entre los datos de imagen y la clase en el espacio de características múltiples. Basado en el índice de similitud. (Madhura M, 2013).

Maximun Likelihood. El clasificador de máxima verosimilitud, evalúa cuantitativamente tanto la varianza como la covarianza de los patrones de respuesta espectral de categoría al clasificar un píxel desconocido.

La distribución de la nube de puntos que forman la categoría de datos de entrenamiento es gaussiana (distribución normal). Esta suposición es generalmente razonable para distribuciones de respuesta espectral comunes. Bajo el supuesto, la forma de distribución de un patrón de respuesta de categoría se puede describir completamente por el vector medio y la matriz de covarianza.

Dados estos parámetros, se calcula la probabilidad estadística de que un valor de píxel dado sea miembro de una clase particular de cobertura del suelo. (Madhura M, 2013).

Una vez aplicados los cuatro metodos y su respectivas verificaciones, se observan los resultados realizados con el metodo de Coeficiente Kappa (K) con una muestra de 201 puntos materializados en la Figura 7.



Figura 7 Resultado Coeficiente de Kappa por Método.

Fuente: Elaboración de los autores

De acuerdo a los resultados de la Figura 7, el método que se acerca mas a la realidad es **Maximun Likelihood** con un 70% de coincidencia del muestreo.

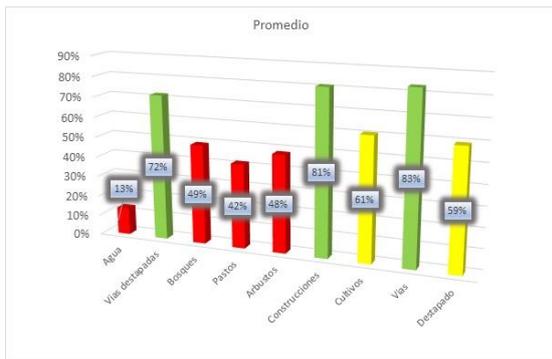


Figura 8 Resultado por cobertura con el método Kappa en las tres imágenes seleccionadas.

Fuente: Elaboración de los autores

Una vez identificado el método se tomó y se realizó un análisis con las tres imágenes tomadas por los RPAS y por cada una de las siete capas.

El resultado del promedio de la cobertura de suelo generada por capa con el método elegido se observa en la **Figura 8**, aunque hay que tener en cuenta que, en la ortofoto había muy pocos cuerpos de agua visibles, debido a los bosques de galería o riparios de los drenajes existentes en este municipio. Además, en la **Figura 8** se evidencia que las capas de vías, vías destapadas y construcciones tuvieron mejor interpretación. No obstante, las capas vegetales homogéneas como bosques pastos y arbustos estuvieron debajo del 50 % de la evaluación kappa y como resultado se obtuvo la representación de la **Figura 9**.

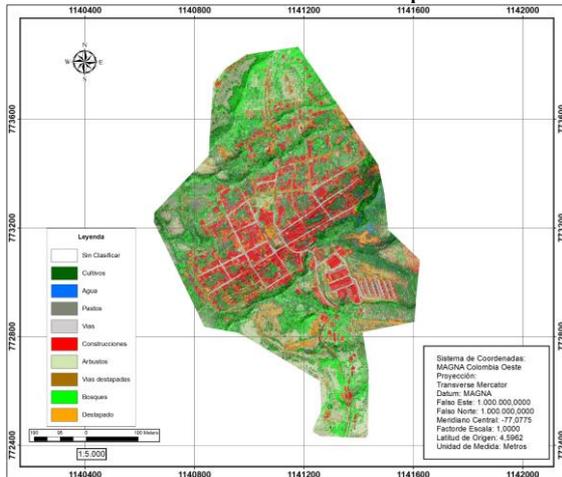


Figura 9 Resultado de la clasificación de cobertura

Fuente: Elaboración de los autores

Capa Pendiente. La pendiente es el grado de inclinación o porcentaje del terreno, esta variable es sumamente importante debido a que afecta el contexto de amenaza de remoción en masa e inundación.

La pendiente es calculada por la tasa máxima de cambio del valor de esa celda a sus vecinas. Básicamente, el cambio máximo en la elevación sobre la distancia entre la celda y sus ocho vecinas, identifica el descenso cuesta abajo más empinado desde la celda (Burrough, 1998). Hay que tener en cuenta que con la resolución espacial que se obtienen con las imágenes tomadas por medio de RPAS o UAS, el análisis de pendientes es muy detallado.

Para el concepto de pendiente se utilizan dos reclasificaciones.

Valor Pendiente (%) -Registro-	Valor
< 5	1
5-12	2
12-35	6
35 - 75	8
> 75	10

Tabla 4 Valores de la capa de pendientes. Remoción en masa
Fuente: Elaboración de los autores

Para el análisis de remoción, en la reclasificación se asigna valores de 1 a 10 para evaluar la incidencia de la pendiente en las amenazas, hay que tener en cuenta que para el análisis de amenaza de remoción las pendientes altas se consideran más vulnerables, pero para la amenaza por inundación es inversamente proporcional, ya que en las laderas planas es más probable que se evidencie inundaciones, teniendo en cuenta la morfometría asociadas con el grado de inclinación del terreno su categorización se expresa en la **Tabla 4**.

Para las inundaciones se maneja el concepto de que las zonas en donde el flujo de agua aumenta su lámina y genera rebose, corresponde a áreas de bajo gradiente y de baja inclinación. Para categorizar se toma el concepto de la pendiente en porcentaje, se categoriza según la Tabla 5.

Valor Pendiente (%) -Registro-	Categoría
<3	Alta
3-5	Medio Alta
5-7	Medio
7-12	Medio Baja
>12	Baja

Tabla 5 Valores asociados a la inundación, reclasificación en la capa de pendientes
Fuente: Elaboración de los autores

Capa de Curvaturas

El concepto de curva está plasmado en el comportamiento y forma del terreno, extraídos de un modelo de elevación digital.

La curvatura es una medida invariante de una superficie, que indica qué tanto esta curvada. Se dice que son invariantes ya que permanecen constantes ante traslaciones y rotaciones. Esta medida la cual tiene sus orígenes en la geometría diferencial. (Narváez, Branch, & Ortega Lobo, 2007).

En lo referente al tema, lo que nos interesa son las curvaturas que puedan tener una posible inundación teniendo en cuenta su pendiente, lo que quiere decir que la escorrentía del agua es un factor importante, cuyo objeto es obtener las curvaturas con su tipo de inclinación.

Distancia Euclidiana

La distancia euclidiana (D) se encuentra dentro de los conceptos de coeficiente de distancia de acuerdo a (Clifford & Stephenson, 1975), la distancia euclidiana es una medida de disimilitud que es aplicada a datos merísticos y continuos; que puede varía desde cero “Similitud Completa” a valores indefinidos, dependiendo de la variables y magnitudes que se apliquen.

La distancia euclidiana se estima por medio del teorema de Pitágoras, se debe calcular el D^2 , siendo utilizada como una medida de disimilitud (Clifford & Stephenson, 1975), define la relación (n dimensiones) entre puntos en un espacio euclidiano (Rodríguez Salazar, Álvares

Hernández, & Nuñez, 2001), teniendo en cuenta que en el área de estudio, se utiliza para la identificación de las amenazas por inundación, sobre las fuentes hídricas que se identifiquen en el territorio.

$$D_i(x_1, x_2) = \sqrt{\sum_{i=1}^n (y_{i1} - y_{i2})^2} \quad (10)$$

Donde: x_1 = muestra 1
 x_2 = muestra 2
 y_1 = Valor de la variable i en la muestra 1
 y_2 = Valor de la variable i en la muestra 2
 n = numero total de variables

Al resultado de la distancia euclidiana, se le aplica una reclasificación manejando el concepto de que a menor distancia es el cuerpo de agua y se reclasifica como se encuentra en la Tabla 6.

Distancia	Categoría
0 – 5	1
5 – 10	2
10 – 15	3
15 – 30	4
20 >	5

Tabla 6 Clasificación de distancia euclidiana

Capa Geomorfológica

En la zonificación de amenazas por movimientos en masa, la geomorfología es un factor importante para el análisis de la evolución del territorio y su relación con la ocurrencia de procesos con características definidas, existen incluso metodologías de zonificación basadas en el mapeo directo de unidades geomorfológicas, en las que la amenaza es determinada directamente por expertos en el tema o por combinaciones cualitativas con otras temáticas relacionada (Westen, 2003).

Lo ideal para la capa es asignarle valores de la amenaza según la zona, la estructura de estos atributos geomorfológicos requiere de experiencia previa y personal capacitado en geomorfología y sus ciencias afines, así como en formación relacionada con el procesamiento digital de imágenes, la fotointerpretación, el manejo de herramientas SIG y el trabajo de campo. Par el experimento se tomó la clasificación por su grado de inclinación que se realiza de acuerdo con la Tabla 7.

Inclinación	Clasificación	Valor	Descripción
0 – 2	Muy baja	1	Plano a casi plano
2 – 4	Media Baja	2	Suavemente inclinado.
4 – 8	Baja	3	Inclinado.
9 - 16	Media	5	Moderadamente abrupto.
16 - 35	Alta	8	Abrupto.
35 - 55	Medio Alta	9	Muy abrupto.
> 55	Muy Alta	9	Extremadamente abrupto.

Tabla 7 Reclasificación de pendientes para la geomorfología

Fuente: (IDEAM, Instituto Hidrologico, Meteorología y Estudios Ambientales., 2013)

Capa Geológica.

Un mapa geológico es un documento de referencia a la vez científico y pedagógico en el que se muestra sobre un mapa topográfico la distribución de las rocas, los materiales superficiales no consolidados y las estructuras que los deforman.

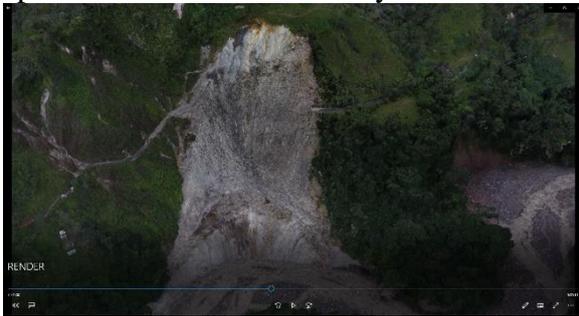


Figura 10 Imágenes de un render en el municipio de Cumaral Meta- Colombia
Fuente: Elaboración de los autores

Desde el punto de vista académico, es un documento fundamental ya que a partir de la información de un mapa geológico se puede interpretar la evolución de la Tierra. Por lo tanto, es indispensable para todos aquellos interesados en las geo ciencias y en la gestión sostenible tanto de los recursos naturales como del ambiente, incluyendo en este último aspecto la evaluación de los riesgos geológicos. (Gómez Tapias, y otros, C.A. 2015.)

Dado esto, se concluye que la información que se captura por medio del RPAS, no es suficiente para poder realizar esta capa, necesita expertos en la materia para realizar la clasificación. A pesar de esto, con la información captada por medio del RPAS se puede digitalizar y estructurar un render como el de la **Figura 10**, que es una imagen digital en 3 dimensiones que puede exteriorizar las condiciones del terreno, esto para que los profesionales en el área tengan una idea y puedan visualizar en diferentes perfiles el terreno que se desea analizar, lo cual a veces en terreno no es posible por el difícil acceso a ciertas áreas.

Fase 3

En esta fase una vez obtenido los resultados de la fase 2 se ejecuta el modelo de la Figura 11.

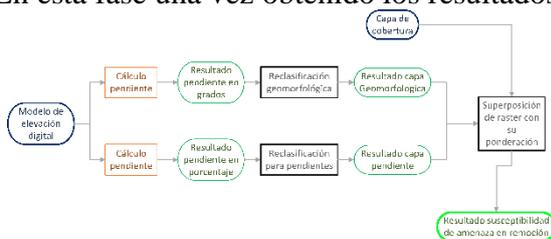


Figura 11 Método de amenaza por remoción en masa
Fuente: Elaboración de los autores

Teniendo en cuenta que en este modelo no se cuenta con la geología por lo expuesto anteriormente, el resultado despues de implementar el modelo se puede observar en la Figura 12.

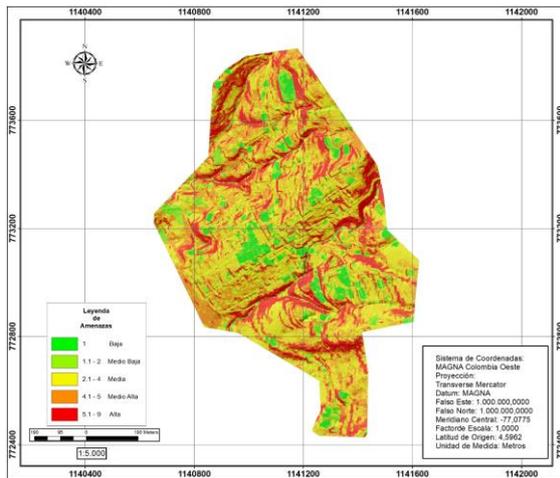


Figura 12 Resultado del método de remoción, 2016

Fuente: Elaboración de los autores

Al comparar el resultado se observa que se llega a una buena interpretación de la susceptibilidad de la amenaza. No obstante, se observa que en la **Figura 13**, resultado del estudio de la Gobernación, que la categorización de la amenaza se encuentra en vectores de polígonos definidos, a diferencia de la **Figura 12**, que existe más variabilidad y menos concentración de las categorías. Esto se debe a dos factores; la geología y el tamaño del pixel del ortofotomosaico captado por el RPAS.

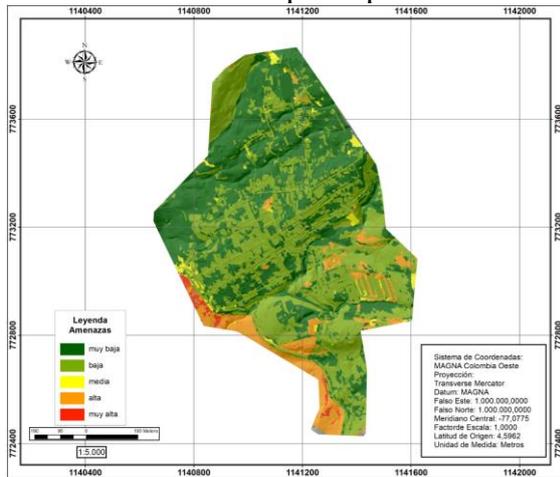


Figura 13 Amenazas identificadas en el estudio año 2016

Fuente: Adaptación estudios de amenaza año 2016 Gobernación del Huila

Modelo de Amenaza por Inundación

Para análisis de amenaza por inundación, tiene por finalidad identificar las áreas que son afectadas por el aumento del nivel de agua en las corrientes y sobre las llanuras aluviales.

Para la identificación de las zonas de incidencia de esta amenaza con la captura de la imagen por medio de RPAS, se toma la capa de curvaturas, pendientes y la capa vectorial de los drenajes que se encuentren en el área de estudio descrita en el modelo de la **Figura 14**.

Factor	Peso Factor (%)
Pendientes de inundaciones	15
Curvatura	30
Distancia Euclidiana	55

Tabla 8 Ponderación para la amenaza por inundación
Fuente: Elaboración de los autores

En la implementación se realiza una ponderación entre la capa de curvatura y pendientes descrita en la **Tabla 8**, una vez asignado los valores, se ejecuta el modelo de la **Figura 14** para generar los atributos de inundación asociados a un drenaje, capa que servirá para ajustar el modelo final de las amenazas.



Figura 14 Método de zonas amenazas de inundación

Fuente: Elaboración de los autores

Una vez corrido el modelo de la **Figura 14**, da como resultado la **Figura 15**, se realizó un zoom en una zona, que en el estudio de amenazas de la Gobernación que se categoriza como alta.

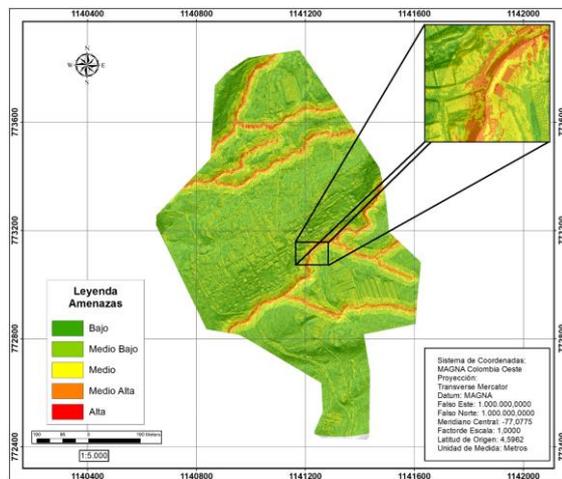


Figura 15 Amenazas por inundación

Fuente: Elaboración de los autores

En esta zona se puede observar que, si se obtiene un resultado de inundación alta, logrando identificar las amenazas con una gran semejanza en la zona del cauce identificada en la **Figura 16**, que es el resultado del estudio de amenazas realizado en el 2016.

Se puede decir que el resultado de la **Figura 16** en el estudio representa un detalle de la inundación más concentrado en polígonos continuos, esto debido al detalle del ortofotomosaico utilizado en el método propuesto en este artículo.

Hay que dar claridad que el método realizado en el estudio de la gobernación, fue por medio de una modelación hidráulica, apoyados con datos captados por una topografía del cauce e incluye la precipitación en la zona, en el ejercicio del proyecto no se toma esta variable.

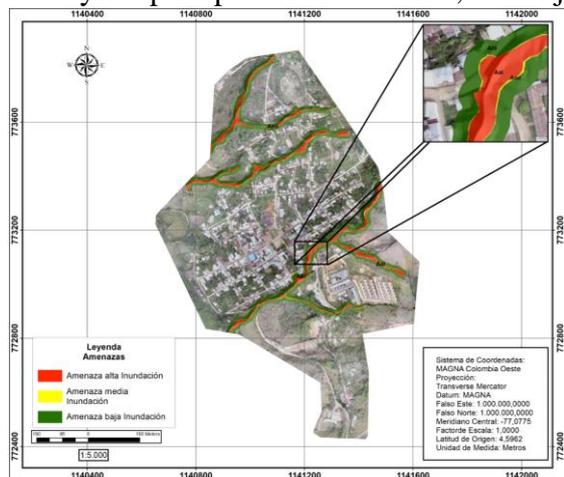


Figura 16 Amenaza por inundación estudio año 2016 Fuente: Adaptación estudios de amenaza año 2016 Gobernación del Huila

Fase 4

Una vez generadas las capas de la fase 3, se cruzan los resultados de los modelos anteriores y así completar el modelo expuesto en la Figura 5.

Una vez obtenido el resultado que se evidencia en la **Figura 17**, se realizó un comparativo entre resultado obtenido y el resultado de la zonificación de la amenaza del estudio de 2016 representado en la **Figura 18**, se observa, que se llega a un resultado óptimo, aunque el de 2016 se realizó con la capa de Geología y precipitación, obteniendo un resultado más homogéneo.

Como se expuso anteriormente, en este proyecto no se tuvo en cuenta la geología ni la precipitación porque no se encontró, metodología alguna que se pudiera implementar a partir de la captura de RPAS.

Con el objeto de comprobar la hipótesis “Es posible realizar una metodología para integración de las amenazas en los centros poblados o cascos urbanos menores a 30000 mil habitantes con información captada por medio de RPAS. Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente” y evaluando los resultados del modelo, que se corrió en dos centros poblados con características diferentes en su topografía, el municipio de Nátaga – Huila con topografía de pendiente alta y en el municipio de Algeciras - Huila con topografía de pendiente relativamente plana, para la comprobación de resultados cuantitativos, se utilizó la metodología del coeficiente Kappa (k), esta es una medida de precisión de la clasificación, método que se utiliza para la comprobación de la clasificación de coberturas

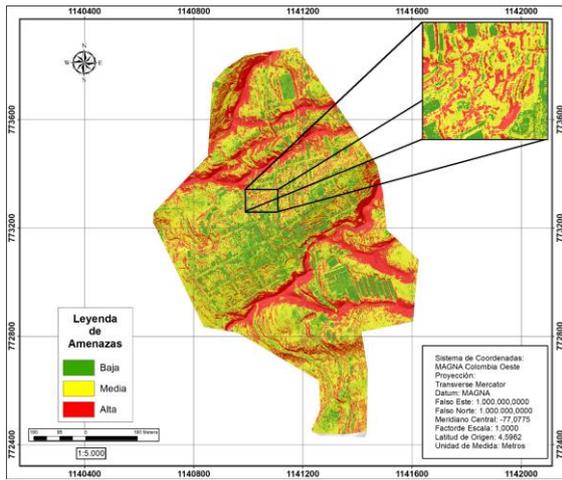


Figura 17 Resultado de la susceptibilidad de amenaza

Fuente: Elaboración de los autores

El concepto de la evaluación Kappa es un estadístico de una medida de la diferencia entre la exactitud lograda en la clasificación y la chance de lograr lo mismo con una clasificación correcta con un clasificador aleatorio. Se calcula como.

$$K = \frac{n \sum_{i=1}^l a_{ii} - \sum_{1=i}^l (a_i \cdot a_{i.})}{n^2 - \sum_{i=1}^l (a_i \cdot a_{i.})} \tag{11}$$

Donde:

- i = dimensión de la matriz (número de clases)
- aii = número de observaciones en la línea i, columna i
- ai. y a.i = total marginal de línea i y de columna i
- n = número total de observaciones.

Se realizó un muestreo aleatorio de la capa de resultado de los estudios realizados por la Gobernación del Huila, identificando los tres conceptos de amenaza Alta, media y baja, se evalúa el resultado del modelo completo, se define el tamaño de la muestra en cada uno de los centros poblados bajo el concepto, de que una muestra más grande de lo necesario implica utilizar más recursos, mientras que una muestra más pequeña disminuye la utilidad de los resultados. Existen en la bibliografía algunas “recetas” prácticas, por ejemplo, (Congalton & Green, 2009) sugiere como una guía general o buena, recoger un mínimo de 50 muestras para cada clase de mapa.

La estadística da otras herramientas, por lo cual deseamos conocer la proporción que cubre el área de estudio determinada (p). Previo al cálculo del tamaño de muestra debemos decidir cuál queremos que sea la precisión de nuestra estimación (por ejemplo, si decido trabajar con una precisión del 5% y observo un 43% podría confiar que el área cubierta estaría entre un 38% y 48%) y el valor de confianza, dado que no se puede asegurar la precisión deseada, debido que trabajamos con una muestra.

Generalmente se trabaja con valores de confianza del 95 o el 99%. Podemos suponer que al observar una unidad de muestreo esta tenga o no la clase de interés, asignamos un valor de probabilidad de 50% y entonces utilizar la función de distribución binomial para los cálculos, y la formula correspondiente será (Boca & Rodríguez, 2001), ejemplo que podemos aplicar al análisis del resultado del proyecto

$$n = \frac{Z^2 p(1 - p)}{d^2} \tag{12}$$

Donde:

Z = valor de la función de distribución Normal acumulada para un área $(1-\alpha)/2$

d = precisión.

Se realizó la matriz de confusión de las dos zonas evaluadas y el resultado del coeficiente Kappa.

En Municipio de Nátaga se realiza con el resultado de método del presente estudio de la **Figura 17**, comparado con el resultado del estudio de amenaza realizado por la gobernación del Huila en el municipio con la capa resultado de la **Figura 18**.

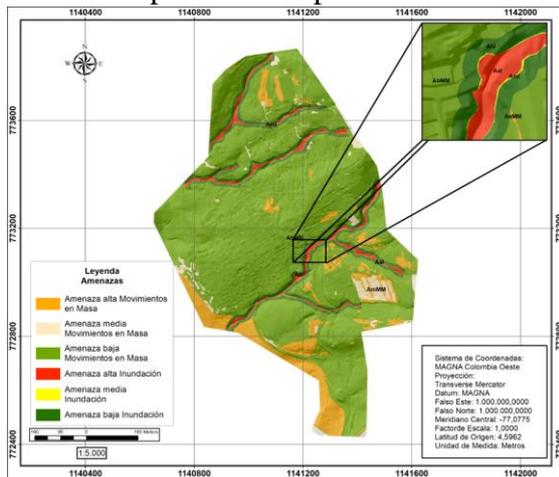


Figura 18 Zonificación de amenaza municipio Nátaga

Fuente: Adaptación estudios de amenaza año 2016 Gobernación del Huila

Según el muestro que se calculó, se realizó 467 muestras aleatorias, este se unifica y se reclasifica en tres capas, para poder ser comparables con los resultados del estudio realizado por la Gobernación del Huila.

El coeficiente Kappa resultado en el municipio de Nátaga es de 0.4346895. Esto muestra que la clasificación respecto a una asignación aleatoria de N elementos en M grupos. El cual da idea del porcentaje de acuerdo, una vez que se ha eliminado la parte debida al azar. Su utilidad es relativa y se puede interpretar que el análisis resultado global del método en zonas con topografía de alta pendiente es adecuado, aunque se encuentre por debajo del 50% se obtuvo un avance significativo.

La matriz de confusión resultado aporta otros índices para analizar como ¿para donde se desplazó la categoría de amenaza en el resultado? o se pueden denominar errores de comisión, se observó que la amenaza baja tuvo una identificación correcta del 18.63% y se desplazó a la siguiente categoría amenaza media el 48.82%.

La amenaza media tuvo un acierto del 49,25%, el 28.91% de la muestra se desplazó a una amenaza baja y el 21.84% a la amenaza alta.

En la amenaza alta se comporta de una forma similar, en esta se identificó correctamente el 62.53% y el 31.69% la identifica como la amenaza media.

Para el municipio de Algeciras se evalúa con el resultado de ejecutar el modelo propuesto en la Figura 19

Una vez ejecutado el modelo en el municipio de Algeciras, arroja como resultado lo evidenciado en la **Figura 19**, resaltando las amenazas altas alrededor de las fuentes hídricas y en dos zonas aisladas, semejante al resultado del estudio de la gobernación que se puede observar en la **Figura 20**.

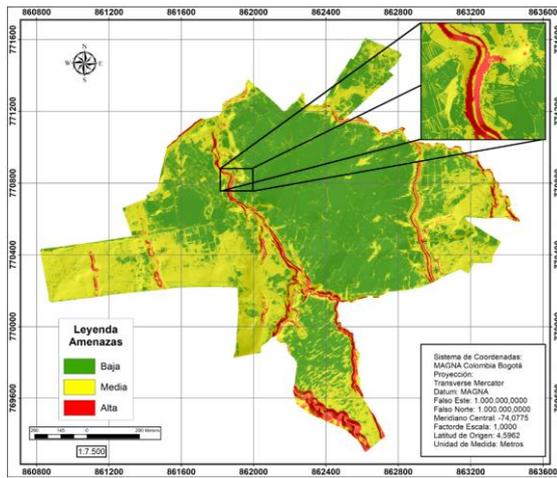


Figura 19 Resultado de la susceptibilidad de amenaza Algeciras
Fuente: Elaboración de los autores

Para la evaluación del método Kappa se define una muestra aleatoria de 395 por cada categoría del resultado del estudio de la gobernación del Huila de la **Figura 20** , para un total de 1185 muestra en el área de estudio, este se ejecuta con el resultado del modelo propuesto en la **Figura 19**.

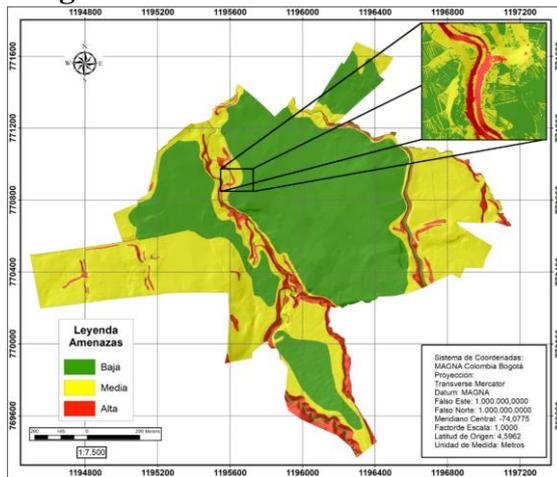


Figura 20 Zonificación de amenaza Municipio Algeciras
Fuente: Adaptación estudios de amenaza año 2019 Gobernación del Huila

El coeficiente Kappa resultado es de 0.68523207. Esto muestra que la clasificación respecto a una asignación aleatoria de N elementos en M grupos. El cual da idea del porcentaje de acuerdo, una vez que se ha eliminado la parte debida al azar. Su utilidad es relativa puesto se puede interpretar que el análisis resultado del método en zonas con topografía plana, se identificó la amenaza adecuadamente por encima del 50%.

La amenaza baja tuvo una identificación correcta del 98.99% y tan solo se desplazó el 1.01% a la siguiente categoría “amenaza media”.

La amenaza media tan solo tuvo un acierto del 29%, pero el 70% de la muestra se desplazó a una amenaza baja.

En la amenaza alta se comportó de una forma similar, en esta se identificó correctamente el 27.59% y su identificación se desliza en un 57.97% en la amenaza media.

Según lo anterior se puede deducir que la clasificación de la amenaza se encuentra subvalorada y tiende a clasificar por debajo de una categoría, ahora si bien entendemos que los fenómenos de amenaza ambientales, su identificación son pronósticos de acuerdo con la información que se tenga, se puede deducir que el componente geológico que enlaza el subsuelo aportaría al ajuste del modelo.

Con esto se podría comprobar la hipótesis “Es posible realizar una metodología para integración de las amenazas en los centros poblados o cascos urbanos menores a 30000 mil habitantes con información captada por medio de RPAS. Sistema de Aeronave Pilotada Remotamente”.

Se aduce que para zonas plana y zonas de alta pendiente el método sirve para identificar las amenazas altas, no obstante, los insumos que se generan a partir de la toma de una ortofotomosaico por medio de RPAS, no son suficiente para dar conclusiones específicas, por lo tanto, es de suma importancia el análisis del subsuelo es sus componentes físicos y geológicos.

Conclusiones

En el experimento se realiza y se estructura una metodología compilada de varios métodos; para la integración de los componentes de amenaza ambiental, no obstante, el alcance de la metodología logró realizar la identificación de la susceptibilidad de amenazas naturales en solo dos componentes, remoción en masa e inundación; esto es debido a que el proyecto está enfocado en realizar el método con la información que se pueda obtener por medio de RPAS y un sensor remoto estándar.

Se logró proponer metodologías compiladas de información secundaria en la identificación de los atributos de las capas de geomorfología, cobertura vegetal, pendientes y curvaturas.

La capa de cobertura, si bien se obtuvo resultados aceptables, por el tamaño del pixel se identifica mucha variabilidad de los atributos, sobre todo en la vegetación.

La capa de geomorfología se podría mejorar encontrando algún método específico para que sea estructurada a escala 1:5000.

Con un RPAS no es posible categorizar la capa de geología que está directamente asociado al análisis del subsuelo; ni la capa de precipitación, la cual utiliza métodos de muestreos de agua por pluviómetros de la caída de lluvia en diferentes lapsos de tiempo. Por tal motivo no se incluyeron en el método, aunque su aporte podría mejorar la interpretación de las amenazas.

Se logró realizar pruebas a la metodología propuesta para la integración de los componentes de amenazas ambientales, en imágenes existentes en los municipios de Nátaga y Algeciras en el departamento del Huila, aunque en el artículo solo se representa el municipio de Nátaga, estos contaban con ortofotomosaicos de sus cascos urbanos y estudios de amenaza de años anteriores, cumpliendo los conceptos técnicos del IGAC. Hay que dar alusión a que la identificación de las zonas de estudios fue primordial para poder realizar el método, puesto que pocas zonas cuentan con estos insumos.

Si bien el método se puede mejorar con información secundaria, este serviría para poder identificar zonas con susceptibilidad de amenaza por inundación y remoción, con los resultados de la metodología se podría centralizar y priorizar esfuerzos para realizar estudios de detalle en las zonas identificadas.

Los modelos de elevación digital son sumamente importantes, por lo cual el cumplimiento de los conceptos técnicos de ortorectificación es imprescindible para la implementación del método.

Trabajos futuros

La clasificación de capa de cobertura se puede mejorar con otros métodos, esto es debido a la resolución espacial de las imágenes tomadas por medio de RPAS, ya que esto conlleva a un detalle que puede afectar los resultados, para esto se debe seguir adelantado las investigaciones del método de clasificación por objetos, esto podría traer grandes avances.

La capa de Geología se podría empezar a estructurar un método para poder identificar las formaciones geológicas locales y a escalas 1:5000 o 1:2000, mejorando la interpretación de las amenazas, sobre todo en las de remoción.

Por el momento se puede tomar la geología existente o realizar la clasificación con perforaciones en terreno y otros métodos que no necesariamente salen del ortofotomosaico estructurados por imágenes tomadas por medio de RPAS.

La capa Geomorfología debe mejorarse para obtener mejores resultados, debido a que solo al tener en cuenta la pendiente, podría quedar corta en la identificación de todos los atributos.

Recomendaciones

Importante precisar que la toma y el postproceso de la imagen tomada por medio de RPAS influye directamente en el resultado, porque si este insumo es defectuoso así mismo serán los resultados, en el proyecto se tomó una imagen que estaba defectuosa y los resultados fueron pésimos, esto - incluye la ortorectificación y la generación del modelo de elevación digital.

Se recomienda que se realice un trabajo muy detallado de la identificación de la zona y los implementos necesarios antes de salir a campo, para no presentar inconvenientes ni retrasos en la captura de información.

La seguridad del personal “*pilotos, ayudante, ingenieros de proceso, trabajadores de campo etc.*” es uno de los principales inconvenientes que se puede tener con este método, porque su ejecución es en zonas como, cascos urbanos pequeños, centros poblados aislado de las grandes concentraciones urbanas y poca presencia institucional y policiva; la toma de la fotografía por medio de RPAS, pueden generar desconfianza e inclusive un alto riesgo de peligro en estos sectores, por las condiciones sociales de conflicto que se puedan tener en el territorio, a pesar de que el gobierno nacional ha firmado algunos tratados de paz, en algunas zonas del país se presentan conflictos que bien puede no ser de interés del proyecto, pero puede afectar los procesos de campo, como ya se ha evidenciado con algunos casos en el sur de Colombia. Se recomienda que antes de realizar cualquier actividad con un RPAS se verifique la seguridad de la zona, sus posibles conflictos y si es el caso de encontrar actores de orden fuera del margen de la ley, es mejor abstener de realizar cualquier actividad relacionada.

Referencias bibliográficas

- Acosta, J., Ivo, B., & Andreas, W. (2020). *Laser ranging used for micro UAV localization: Characteristics and limitations. Paper presented at the Proceedings of SPIE - the International Society for Optical Engineering*. Retrieved from www.scopus.com.
- Barragán, W. (2009). Taking the Benefits of Geographic Information Technologies. *Historical documentation in San Agustín (Huila), Colombia, world historical heritage using close range photogrammetry techniques: a case study of the statue "triangular face"*. Stuttgart.
- Barrowes, B., Glaser, D., Quinn, B., Prishvin, M., O'neill, K., & Shubitidze, F. (2019). *Uas noise in standoff emi measurements. Paper presented at the Proceedings of the Symposium on the Application of Geophysics to Engineering and Environmental Problems*. 2019-March 114-118. doi:10.4133/sageep.32-025 Retrieved from www.scopus.com: SAGEEP.

- Boca, T., & Rodríguez, G. (2001). *Métodos estadísticos de la evaluación de la exactitud de productos derivados de sensores remotos*. Argentina: Instituto de Clima y Agua. INTA Castelar.
- Bourdev, L., & Malik, J. (s.f.). Poselets: Body part detectors trained using 3D human pose annotations.
- Buill, F., Núñez, M. A., & Rodríguez, J. J. (2003). *Fotogrametría analítica* (1. ed ed., Vol. 79). Barcelona: UPC.
- Burrough, P. A. (1998). *Principles of Geographical Information Systems*. New York: Oxford University Press. Obtenido de <https://pdfs.semanticscholar.org/d8e0/b6b225b36cac23608b41a51e13ddb2746cbd.pdf>
- Carvalho, O. A., & Meneses, P. R. (2000). Spectral Correlation Mapper (SCM): An Improvement on the Spectral. *Departamento de Geografia da Universidade de Brasília - Campus Universitário Darcy Ribeiro, Asa Norte*.
- Chai, X., Xiao, J., Zheng, Z., Zhang, L., Qu, B., Yan, L., . . . Sun, H. (2020). *UAV 3D Path Planning Based on Multi-Population Ensemble Differential Evolution*. doi:10.1007/978-981-15-3425-6_47 Retrieved from www.scopus.com.
- Chen, Y., & Wang, S. (2019). *Flight Parameter Model Based Route Planning Method of UAV Using Stepped-Adaptive Improved Particle Swarm Optimization*. ICCAR 2019, 524-530. doi:10.1109/ICCAR.2019.8813460 Retrieved from www.scopus.com: Paper presented at the 2019 5th International Conference on Control, Automation and Robotics (ICCAR).
- Clifford, H. T., & Stephenson, W. (1975). *An Introduction to Numerical Classification*. Academic Press, London: cademic Press.
- Congalton, R. G., & Green, K. (2009). *Assessing the Accuracy of Remotely Sensed Data Principles and Practices*. Taylor & Francis Group. Boca Raton. Obtenido de <https://www.routledge.com/Assessing-the-Accuracy-of-Remotely-Sensed-Data-Principles-and-Practices/Congalton-Green/p/book/9780367656676>
- Decreto 1807. (19 de Septiembre de 2014). Diario Oficial No. 49279. *Por el cual se reglamenta el artículo 189 del Decreto-ley 019 de 2012 en lo relativo a la incorporación de la gestión del riesgo en los planes de ordenamiento territorial y se dictan otras disposiciones*. Dado en Bogotá D.C., Colombia: El Presidente de la República de Colombia. Obtenido de <http://www.alcaldiabogota.gov.co/sisjur/normas/Norma1.jsp?i=59488>
- Dhote, J., & Limbourg, S. (2020). *Designing unmanned aerial vehicle networks for biological material transportation – the case of brussels*. . Computers and Industrial Engineering, 148 doi:10.1016/j.cie.2020.106652.
- Edier, A., Hernán, M., & Jaime, V. I. (16 de Julio de 2010). Una revisión sobre el estudio de movimientos en masa detonados por lluvias. *REV. ACAD. COLOMB. CIENC*, Volumen XXXIV, número 131.
- Enzweiler, M., Eigenstetter, A., Schiele, B., & Gavrila, D. M. (2010). Multi-cue pedestrian classification with partial occlusion handling. San Frnacisco, USA: IEEE Conference on Computer Vision and Pattern Recognition.
- Ferreira, M. E., Silva, B. E., Malaquias, F. S., Teixeira, L., Pascoal, L., Santos, N., & Oliveira, T. (2020). *Cerrado Knowledge Platform: A Social And Environmental Management Tool To Conserve Brazilian Savannas*. Paper presented at the 2020 IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference: LAGIRS 2020 - Proceedings, 658-662. doi:10.1109/LAGIRS48042.2020.9165679 Retrieved from www.scopus.com.
- Fransens, R., Strecha, C., & Gool, L. V. (2006). A Mean Field EM-algorithm for Coherent Occlusion Handling in MAP-Estimation Prob.
- Gao, T., Packer, B., & Koller, D. (2010). A segmentation-aware object detection model with occlusion handling. *IEEE Transactions on Systems, Man, and Cybernetics—Part B: Cybernetics*, 1361-1368. Obtenido de

- https://www.researchgate.net/profile/David_Vazquez4/publication/237148071_Occlusion_Handling_via_Random_Subspace_Classifiers_for_Human_Detection/links/0deec52ee22243cac200000/Occlusion-Handling-via-Random-Subspace-Classifiers-for-Human-Detection.pdf
- Georgiades, G., Papageorgiou, X., & Loizou, S. (2019). *Integrated forest monitoring system for early fire detection and assessment*. Paper presented at the 2019 6th International Conference on Control, Decision and Information Technologies, CoDIT 2019, 1817-1822. doi:10.1109/CoDIT.2019.8820548 Retrieved from www.scopus.com.
- Gómez Tapias, J., Gevara Nidia, A., Emma, N., Montes Ramírez, M. F., Almanza Meléndez, F. A., Arcácel Gutiérrez, C. A., & Madrid, M. (C.A. 2015.). Notas explicativas: Mapa Geológico de Colombia. (J. & Gómez, Ed.) *Compilando la geología de Colombia: Una visión a 2015*, 10.
- Linás Solano, H., & Rojas Álvarez, C. (2005). *Estadística descriptiva y distribuciones de probabilidad*. Barraquilla, Colombia: Universidad del Norte.
- Lohr, U. (2003). Precise Lidar DEM and True Ortho Photos. *Fritsch, D. (Ed.): Photogrammetric Week '03*, págs. 111-116.
- Madhura M, S. V. (Febrero de 2013). Comparison of Supervised Classification Methods On Remote Sensed Satellite Data: An Application In Chennai, South India. (L. U. BY, Ed.) *International Journal of Science and Research (IJSR)*, 1407-1411.
- Mallmann, C., Zaninni, A., & Pereira Filho, W. (2020). *Vegetation Index Based In Unmanned Aerial Vehicle (Uav) To Improve The Management Of Invasive Plants In Protected Areas, Southern Brazil*. Paper presented at the 2020 IEEE Latin American GRSS and ISPRS Remote Sensing Conference, LAGIRS 2020: Proceedings, 66-69. doi:10.1109/LAGIRS48042.2020.9165598 Retrieved from www.scopus.com.
- Narváez, E. L., Branch, W. J., & Ortega Lobo, O. (2007). Estimación de Curvaturas y Direcciones Principales en Nube de Puntos no Organizados. *Dyna*, 153, 351-362.
- Rashmi S, S. A. (4 de Junio de 2014). Spectral Angle Mapper Algorithm for Remote Sensing Image Classification. *IJISSET - International Journal of Innovative Science, Engineering & Technology*, Vol 1.
- Rejado, C. C. (2015). *Los DRONES y Aplicacione a la Ingenieria Civil*. . MADRID: Graficas Arias Montano S.A.
- Riaño Melo, O. (2010). *Algebra lineal en el procesamiento digital de imagenes*. Bogotá-Colombia: Imprenta Nacional de Colombia.
- Rodriguez Salazar, M. E., Álvares Hernández, S., & Nuñez, E. B. (marzo de 2001). Coeficiente de Asociación. México, México D.F.: Plaza y Valdés, S.A. de C.V.
- Ruiz Morales, M. (2003). *Nociones de topografía y fotogrametría aérea* (Vol. 14). Granada: Universidad de Granada.
- Song, Y., Xing, X., Xi, Q., Yang, B., & Yu, Z. (2020). *Route planning method for UAV in unknown environment based on improved SAS algorithm*. Paper presented at the Proceedings of the 32nd Chinese Control and Decision Conference, CCDC 2020, 3163-3168. doi:10.1109/CCDC49329.2020.9164144 Retrieved from www.scopus.com.
- Suha Kwak, Woonhyun Nam, Bohyung Han, & Joon Hee Han. (2015). Learning occlusion with likelihoods for visual tracking. Seoul : National University Verified.
- Uddin, Z., Altaf, M., Bilal, M., Nkenyereye, L., & Bashir, A. K. (2020). *Amateur drones detection: A machine learning approach utilizing the acoustic signals in the presence of strong interference*. *Computer Communications* 154, 236-245. doi:10.1016/j.comcom.2020.02.065.
- Wang, X., Han, T. X., & Yan, S. (2009). An HOG-LBP human detector with partial occlusion handling. *IEEE 12th International Conference on Computer Vision*.

- Wanqiang, Q., Huang, Y., & Liu, Q. (2020). *UAV and a deep convolutional neural network for monitoring invasive alien plants in the wild*. *Computers and Electronics in Agriculture*: 174 doi:10.1016/j.compag.2020.105519.
- Westen, C. N. (01 de 11 de 2003). Use of Geomorphological Information in Indirect Landslide Susceptibility Assessment. *Natural Hazards*, 30(3), 339-419.
- Wu, D., Li, R., Zhang, F., & Liu, J. (2019). *A review on drone-based harmful algae blooms monitoring*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 191(4) doi:10.1007/s10661-019-7365-8.
- Xing, C., Wang, J., & Xu, Y. (2010). *Overlap Analysis of the Images from Unmanned Aerial Vehicles*. International Conference on Electrical and Control Engineering.
- Xing, C., Wang, J., & Xu, Y. (2019). A Robust Method for Mosaicking Sequence Images Obtained from UAV. China: National Engineering and Technology Center for Information Agriculture.
- Zhao, Y., Zheng, W., Xiao, W., Zhang, S., Lv, X., & Zhang, J. (2020). *Rapid monitoring of reclaimed farmland effects in coal mining subsidence area using a multi-spectral UAV platform*. *Environmental Monitoring and Assessment*, 192(7) doi:10.1007/s10661-020-08453-5.
- Zia, M. Z., Stark, M., Schiele, B., & Schindler, K. (2013). Detailed 3D representations for object recognition and modeling. *IEEE transactions on pattern analysis and machine intelligence*, 35(11), págs. 2608-2623.