



**Universidad de  
los Andes**

Universidad de los Andes

Análisis multitemporal de las zonas mineras de los municipios de Lenguazaque y Guachetá para evidenciar impactos ambientales y cambios en la cobertura de suelos.

Tesis de Pregrado Presentado en cumplimiento de los requisitos para la concesión de grado de

**Geocientífico**

Presenta

**Felipe Camacho Hurtado**

Asesora

**Jillian Pearse, PH.D., José Herrera Escorcia, MSc.**

Departamento de Geociencias

Facultad de Ciencias

Bogotá D.C., Colombia

Primer Semestre 2019



Nota de Entrega

---

---

---

---

Directora

---

Estudiante

---

Jurado

---

# Agradecimientos

En primer lugar, quiero agradecer profundamente al profesor José Luis Herrera Escoria y a la profesora Jillian Pearse, quienes me acompañaron constantemente en este largo proceso. Claramente, su guía, sus consejos y el tiempo que dedicaron para mí y el proyecto, fueron fundamentales para no perder el rumbo y concretar con éxito mi tesis de pregrado. Estaré profundamente agradecido toda mi vida y espero en un futuro no muy lejano volverme a encontrar con estos grandes profesionales y sobre todo excelentes seres humanos. ¡Muchas Gracias!

De igual manera, me gustaría agradecerle a Carlos Valencia y a Santiago Cuartas, quienes mediante la empresa GEOIMEC brindaron asesoría e instrumentación, pero sobre todo y más importante, su valioso tiempo para poder llevar a cabo este proyecto. Realmente fueron personas que estuvieron presentes en las etapas más importantes y por lo cual estaré agradecido profundamente. Ellos representan en lo alto a los Geocientíficos Uniandinos y los valores de compañerismo, responsabilidad y profesionalismo inculcados por la mejor Universidad de Colombia.

Por otro lado, estaré siempre agradecido con la Universidad de Los Andes y el programa de Quiero Estudiar Escala, el cual me dio la oportunidad de vivir esta oportunidad única, aprendiendo de grandes profesores y personas que conocí a lo largo de mi estadía. Quiero agradecer profundamente a William Carantón, Nicolas Peña, Felipe Diaz, Corralitos, Robin y muchos más, quienes estuvieron conmigo en los mejores y peores momentos y con quien viví grandes experiencias como las salidas de campo que recordaré toda mi vida. ¡No los olvidare nunca! De igual manera, quiero agradecer tanto a mis amigos del CACS de toda la vida como a aquellas personas que estuvieron conmigo en diferentes momentos pero que por circunstancias varias ya no estamos en contacto. ¡Éxitos para todos ustedes!

Finalmente, y más importante, quiero agradecerle de todo corazón a mi familia que estuvo presente en todo momento, a mi mamá que me brindo toda su comprensión y apoyo en los momentos más difíciles, a mi papá quien se ha esforzado toda su vida por brindarnos lo mejor incluso dejando su felicidad a un lado y a mi hermano, que ha sido una fuente de inspiración, guía y modelo a seguir. Todo esto no hubiera sido posible sin ustedes. Espero disfrutar de ustedes muchos años más.

¡Los Amo!

## **Resumen**

El objetivo del estudio es realizar un análisis multitemporal tanto a nivel regional como local de los municipios de Lenguazaque y Guachetá en relación con el comportamiento de las coberturas presentes, mediante el uso de herramientas como los vehículos aéreos no tripulados (UAV) e imágenes satelitales Sentinel 2A. El proyecto busca determinar cambios en las coberturas y morfología de las zonas de estudio, debido principalmente a actividades antropogénicas (minería, agricultura, ganadería entre otras) y régimen climático; para así, identificar tanto cualitativamente como cuantitativamente el estado de las coberturas y la salud de la vegetación con relación a los procesos anteriormente mencionados. Teniendo en cuenta lo anterior, se registraron fotografías aéreas mediante dron (con una diferencia aproximada de dos meses) en minas de carbón en el municipio de Lenguazaque, en las cuales simultáneamente se llevan a cabo actividades como agricultura y ganadería. Las fotografías aéreas permitieron generar productos tales como: Ortofotomosaicos, Modelos Digitales de Terreno (DTM), Modelos Digitales de Superficie (DSM), funciones de pendiente y curvatura, perfiles topográficos e índice de vegetación TGI. Lo que permitió evidenciar cualitativamente cambios en las coberturas y topografía (asesentamiento o levantamiento) de la zona. Por otro lado, se realizaron clasificaciones no supervisadas (análisis cuantitativo) para los municipios de Lenguazaque y Guachetá a partir de imágenes satelitales Sentinel 2A con 3 años de diferencia (2016-2019) complementando con el índice de vegetación NDVI. Generando así, un análisis completo que permitió evidenciar posibles afectaciones ambientales.

## **Abstract**

The objective of the study is to perform a multi-temporal analysis at regional and local levels of the municipalities of Lenguazaque and Guachetá in relation to the behavior of the present coverages, using tools such as unmanned aerial vehicles (UAV) and Sentinel 2A satellite images. The project seeks to determine changes in the coverage and morphology of the study areas, mainly due to anthropogenic activities (mining, agriculture, cattle raising, among others) and the climate regime; In order to identify both qualitatively and quantitatively the state of the coverage and the health of the vegetation in relation to the aforementioned processes. Considering the above, aerial photographs were recorded by drone (with a difference of approximately of two months) in coal mines in the municipality of Lenguazaque, in which activities such as agriculture and cattle raising are simultaneously carried out. The aerial photographs allowed to generate products such as: Orthophotomosaics, Digital Terrain Models (DTM), Digital Surface Models (DSM), slope and curvature functions, topographic profiles and TGI vegetation index. What allowed qualitatively evidence changes in coverage and topography (settlement or uprising) of the area. On the other hand, unsupervised classifications (quantitative analysis) were made for the municipalities of Lenguazaque and Guachetá based on 2-year Sentinel 2A satellite images (2016-2019), complementing with the NDVI vegetation index. Generating this way, a complete analysis that allowed to evidence possible environmental impact.

# Objetivos

## Objetivo General

Identificar los cambios en la cobertura y uso de suelos, subsidencia e impacto ambiental asociado a procesos tales como minería y agricultura en los municipios de Lenguazaque y Guachetá. Lo anterior mediante el procesamiento de imágenes satelitales, fotogrametría aérea con dron y herramientas GIS.

## Objetivos Específicos

1. Realizar el procesamiento digital de las imágenes satelitales utilizadas para el área de estudio.
2. Determinar cuantitativa y cualitativamente el cambio en la cobertura de los suelos en el periodo de tiempo determinado mediante el uso del índice de vegetación NVDI, índice TGI y clasificaciones no supervisadas.
3. Determinar niveles de subsidencia y cambios en la cobertura de suelos asociados al régimen climático y actividades antrópicas mediante fotogrametría de dron.
4. Generar mapas temáticos (foto mosaicos) aplicando sensores remotos y herramientas GIS que permita visualizar el cambio de las diferentes coberturas presentes.
5. Evaluar la utilidad y eficacia de los sensores remotos y fotogrametría aérea con dron al momento de analizar el impacto de actividades tales como mineras y agrícolas en la cobertura de suelos.

## Tabla de contenido

1.	Introducción.....	1
1.1	Contexto .....	1
1.2	Motivación.....	2
1.3	Zona de Estudio .....	3
1.3.1	Municipio de Lenguazaque.....	3
1.3.2	Municipio de Guachetá.....	4
2.	Geología .....	5
2.1	Geología Estructural y Tectónica .....	5
2.1.1	Anticlinal de Tausa .....	5
2.1.2	Sinclinal de Chécua .....	5
2.1.3	Anticlinal de Guacheneca .....	6
2.1.4	Falla de Sutatausa .....	6
2.1.5	Falla de Cucunubá. ....	6
2.2	Mantos de Carbón.....	7
2.2.1	Manto Cero.....	7
2.2.2	Manto La Cisquera .....	7
2.2.3	Manto Tesoro .....	7
2.2.4	Manto Tesorito .....	7
2.2.5	Manto Gemela .....	7
2.2.6	Manto El Consuelo .....	7
2.2.7	Manto El Piedro.....	7
2.2.8	Manto El Rubí .....	7
2.2.9	Manto Bocatoma.....	8
2.2.10	Manto La Perdida .....	8
3.	Marco Teórico .....	8
3.1	Sensores Remotos.....	8
3.1.1	Imágenes Multiespectrales .....	9
3.2	Índices de Imágenes .....	10
3.2.1	Índice Normalizado de Vegetación (NDVI): .....	10
3.2.2	Triangular Greenness Index (TGI): .....	11
3.3	Fotogrametría Aérea .....	11
4.	Metodología y Resultados.....	14

4.1	Fotogrametria Aérea con Dron.....	16
4.1.1	Ortofotomosaicos, Modelos de Elevación y derivados e Índices TGI .....	16
4.1.2	Análisis de subsidencia .....	27
4.2	Análisis Imágenes Satelitales Sentinel 2A.....	32
4.2.1	Clasificación No Supervisada .....	32
4.2.2	Índice NDVI .....	36
5.	Conclusiones.....	38
6.	Referencias .....	41
7.	Anexos .....	44

## Índice de Figuras

Figura 1.	Localización del Municipio de Lenguazaque. Tomado de Google Earth (2019)...	3
Figura 2.	Localización del Municipio de Guachetá. Tomado de Google Earth (2019).....	4
Figura 3.	Mapa estructural de la plancha 209 Zipaquirá. (Montoya & Reyes, 2003) .....	6
Figura 4.	Composiciones RGB del Lago Urmia. (Rokni et al., 2014).....	9
Figura 5.	Relación entre la escala de la imagen y la escala del plano. Quirós (2014).....	12
Figura 6.	Altitud del vuelo sobre el nivel del mar. Quirós (2014).....	12
Figura 7.	Procedimiento para el procesamiento de las imágenes con PIX4D (Suh & Choi, 2017). .....	14
Figura 8.	Numero de fotografías sobrepuestas en el ortofotomosaico (Mina El Cardonal)	16
Figura 9.	Resultado del procesamiento de las imágenes Mina el Triunfo: <b>A.</b> Ortofotomosaico primera toma de fotografías. <b>B.</b> Ortofotomosaico segunda toma de fotografías. <b>C.</b> Modelo Digital Terrestre (Primera toma). <b>D.</b> Modelo Digital de Superficie (Primera Toma).....	17
Figura 10.	Características topográficas derivadas de DSM y DTM (Primera toma). Mina el Triunfo: <b>A.</b> Pendiente <b>B.</b> Curvatura <b>C.</b> Hillshade derivado del DSM .....	18
Figura 11.	Índice TGI Mina el Triunfo: <b>A.</b> Primer registro fotográfico <b>B.</b> Segundo registro fotográfico .....	19
Figura 12.	Resultado del procesamiento de las imágenes Mina El Cardonal: <b>A.</b> Ortofotomosaico primera toma de fotografías. <b>B.</b> Ortofotomosaico segunda toma de fotografías. <b>C.</b> Modelo Digital Terrestre (Primera toma). <b>D.</b> Modelo Digital de Superficie (Primera Toma).....	20
Figura 13.	Características topográficas derivadas de DSM y DTM (Primera toma). Mina El Cardonal: <b>A.</b> Pendiente <b>B.</b> Curvatura <b>C.</b> Hillshade derivado del DSM.....	21
Figura 14.	Índice TGI Mina El Cardonal: <b>A.</b> Primer registro fotográfico <b>B.</b> Segundo registro fotográfico.....	22
Figura 15.	Resultado del procesamiento de las imágenes Mina La Vuelta: <b>A.</b> Ortofotomosaico primera toma de fotografías. <b>B.</b> Ortofotomosaico segunda toma de	

fotografías. <b>C.</b> Modelo Digital Terrestre (Primera toma). <b>D.</b> Modelo Digital de Superficie (Primera Toma).....	24
Figura 16. Características topográficas derivadas de DSM y DTM (Primera toma). Mina La Vuelta: <b>A.</b> Pendiente <b>B.</b> Curvatura <b>C.</b> Hillshade derivado del DSM.....	25
Figura 17. Índice TGI Mina La Vuelta: <b>A.</b> Primer registro fotográfico <b>B.</b> Segundo registro fotográfico .....	26
Figura 18. Perfiles Topográficos A-A' Mina El Triunfo: <b>A.</b> Primer Registro. <b>B.</b> Segundo Registro .....	27
Figura 19. Perfiles Topográficos B-B' Mina El Triunfo: <b>A.</b> Primer Registro. <b>B.</b> Segundo Registro .....	28
Figura 20. Perfiles Topográficos A-A' Mina El Cardonal: <b>A.</b> Primer Registro. <b>B.</b> Segundo Registro .....	29
Figura 21. Perfiles Topográficos B-B' Mina El Cardonal: <b>A.</b> Primer Registro. <b>B.</b> Segundo Registro .....	30
Figura 22. Perfiles Topográficos A-A' Mina La Vuelta: <b>A.</b> Primer Registro. <b>B.</b> Segundo Registro .....	30
Figura 23. Perfiles Topográficos B-B' Mina La Vuelta: <b>A.</b> Primer Registro. <b>B.</b> Segundo Registro .....	31
Figura 24. Clasificación No Supervisada Municipio de Lenguazaque. 10 de Enero del 2016 .....	32
Figura 25. Clasificación No Supervisada Municipio de Lenguazaque. 3 de Febrero del 2019 .....	33
Figura 26. Clasificación No Supervisada Municipio de Guachetá. 10 de Enero del 2016 ..	34
Figura 27. Clasificación No Supervisada Municipio de Guachetá. 3 de Febrero del 2019 .	35
Figura 28. Índice NDVI Municipio de Lenguazaque y marcadores minas estudiadas. <b>A.</b> 10 de Enero del 2016 <b>B.</b> 3 de Febrero del 2019 .....	37
Figura 29. Índice NDVI Municipio de Guachetá. <b>A.</b> 10 de Enero del 2016 <b>B.</b> 3 de Febrero del 2019 .....	38
Figura 30. Modelo Digital Terrestre (Segunda Toma) Mina El Triunfo. ....	44
Figura 31. Modelo Digital de Superficie (Segunda Toma) Mina El Triunfo.....	44
Figura 32. Hillshade Mina El Triunfo a partir del DSM (Segunda Toma). ....	45
Figura 33. Pendiente Mina El Triunfo (Segunda Toma).....	45
Figura 34. Curvatura Mina El Triunfo (Segunda Toma). ....	46
Figura 35. Modelo Digital Terrestre (Segunda Toma) Mina El Cardonal.....	46
Figura 36. Modelo Digital de Superficie (Segunda Toma) Mina El Cardonal .....	47
Figura 37. Hillshade Mina El Cardonal a partir del DSM (Segunda Toma).....	47
Figura 38. Pendiente Mina El Cardonal (Segunda Toma). ....	48
Figura 39. Curvatura Mina El Cardonal (Segunda Toma). ....	48
Figura 40. Modelo Digital Terrestre (Segunda Toma) Mina La Vuelta .....	49
Figura 41. Modelo Digital de Superficie (Segunda Toma) Mina La Vuelta.....	49
Figura 42. Hillshade Mina La Vuelta a partir del DSM (Segunda Toma).....	50
Figura 43. Pendiente Mina La Vuelta (Segunda Toma). ....	50
Figura 44. Curvatura Mina La Vuelta (Segunda Toma). ....	51

Figura 45. Composición RGB Municipio de Lenguazaque. 10 de Enero del 2016 y marcadores de la localización de las minas estudiadas.....	51
Figura 46. Composición RGB Municipio de Lenguazaque y marcadores de la localización de las minas estudiadas. 3 de Febrero del 2019.....	52
Figura 47. Composición RGB Municipio de Guachetá. 10 de Enero del 2016 .....	52
Figura 48. Composición RGB Municipio de Guachetá. 3 de Febrero del 2019.....	53
Figura 49. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Enero 1 – Enero 31). Tomado de la CAR .....	53
Figura 50. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Febrero 1 – Febrero 5). Tomado de la CAR .....	54
Figura 51. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Marzo 12 – Marzo 31). Tomado de la CAR .....	54
Figura 52. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Abril 1 – Abril 30). Tomado de la CAR .....	55

## **Índice de Tablas**

Tabla 1. Especificaciones técnicas Dron (DJI PHANTOM 4).....	13
Tabla 2. Extensión de las coberturas en el Municipio de Lenguazaque 2016.....	33
Tabla 3. Extensión de las coberturas en el Municipio de Lenguazaque 2019.....	34
Tabla 4. Extensión de las coberturas en el Municipio de Guachetá 2016.....	35
Tabla 5. Extensión de las coberturas en el Municipio de Guachetá 2019.....	36

# 1. Introducción

## 1.1 Contexto

Dentro de las industrias mineras más importantes del mundo encontramos la minería de carbón, una roca sedimentaria formada a partir de la descomposición de grandes masas vegetales bajo la influencia de altas temperaturas y presiones durante millones de años (Servicio Geológico Mexicano [SGM], 2014). Como resultado del proceso anterior se encuentran diferentes clases de carbón, siendo las principales el carbón térmico, con bajo contenido de carbono y alta humedad, utilizado principalmente como combustible y el carbón de coque, caracterizado por una alta dureza y alto rendimiento térmico, utilizado en mampostería y hornos (Torres, Rocha, Melo y Peña, 2015). En cuanto a su explotación, encontramos minas a cielo abierto con profundidades de hasta 50 metros y minas subterráneas con capacidad de extraer el carbón de hasta 300 metros de profundidad mediante bandas transportadoras (SGM, 2014). Teniendo en cuenta las propiedades anteriores y la utilidad del carbón mineral en el sector energético y siderúrgico, el carbón logró constituirse como parte fundamental del área energética desde el siglo XVIII (Revolución Industrial) hasta hoy en día, incluso con el dominio actual del petróleo como combustible (Viloria, 1998).

En cuanto al sector minero en Colombia, la extracción está enfocada principalmente alrededor del carbón mineral, oro, níquel, platino y esmeraldas, llegando a ser el productor principal de carbón en Latinoamérica y décimo a nivel mundial con reservas de hasta 7 billones de toneladas métricas (Wacaster, 2007), con una producción de 86.1 millones de toneladas de carbón térmico y 4.4 millones de toneladas de carbón metalúrgico (Agencia Nacional Minera [ANM], 2017). Esto se debe a que las reservas carboníferas en Colombia se han calculado en 6.748 millones de toneladas medidas (Viloria, 1998), siendo el Cesar el departamento que aporta el 60% de la producción (11.6 millones de toneladas en el primer trimestre de 2018), seguido por el departamento de la Guajira, el cual aporta el 36% de la producción anual (7.3 millones de toneladas en el primer trimestre de 2018) y finalmente el departamento de Cundinamarca, con una producción de 250.000 toneladas en el primer trimestre de 2018 (ANM, 2018).

Antiguamente la producción de carbón en los departamentos de Boyacá y Cundinamarca era destinada únicamente a la demanda doméstica, sin embargo, a partir del siglo XX se empezó a evidenciar un aumento en la demanda y producción de carbón, generando como resultado una economía de la región ya no basada exclusivamente en la agricultura. Este desarrollo permitió evidenciar la alta calidad del carbón de las regiones, ya que permite generar coque (importante en la producción de hierro) (Rudas, Hawkins y Sánchez, 2014) teniendo como consecuencia un aumento a nivel tecnológico y de producción de la industria carbonera en la zona en las últimas décadas, con el fin de aprovechar al máximo la calidad, pasando de un nivel de minería artesanal a una minería a pequeña y mediana escala.

A pesar de que se han mejorado las condiciones tanto laborales como tecnológicas y las consideraciones ambientales al momento de realizar la extracción de carbón, la presencia de

la minería ilegal y de minería a pequeña escala que aún no tiene en cuenta los factores tecnológicos y legales representan una gran problemática ambiental, afectando flora, fauna y cuerpos de agua por la emisión de partículas y acidificación del suelo (Rodríguez y Ardila, 1999). En primer lugar, la superficie del suelo y las corrientes se ven afectadas tanto por el desagüe de las minas como por el hundimiento del suelo (subsidiencia), además, el uso de químicos y residuos de explotación generan considerables cambios en la cobertura de uso suelos y alteración de la capa orgánica, finalmente, la tala de especies arbóreas (necesarias para el desarrollo responsable de la minería) genera un problema grave de secamiento de los cauces aledaños (Rudas *et al.*, 2014). De manera que la explotación minera es uno de los elementos (no el único) que debe ser considerado como alterador de coberturas de suelos.

Teniendo en cuenta lo anterior, es necesario llevar a cabo los controles ambientales pertinentes, para evidenciar una extracción de carbón ambientalmente sostenible, protegiendo la calidad de los suelos, cuerpos de agua y zonas de agricultura que se encuentran aledañas a los lugares de extracción de carbón, de acuerdo a esto, el propósito del proyecto es evidenciar la evolución de las condiciones ambientales (cobertura de suelos y subsidiencia) bajo las cuales se ha producido carbón en los municipios de Lenguazaque y Guachetá del departamento de Cundinamarca, además, estudiar el comportamiento de coberturas asociadas a la agricultura y demás procesos que se desarrollan de manera simultánea a la producción de carbón; mediante un análisis multitemporal de imágenes satelitales (enfocado a nivel regional) en un periodo de 3 años y un análisis de subsidiencia y salud de vegetación mediante fotogrametría de dron (enfocado a nivel local) en un periodo de 2 meses.

## 1.2 Motivación

Como se ha podido evidenciar, la extracción de carbón mineral es parte fundamental de la economía actual del departamento de Cundinamarca y por lo tanto un factor importante para tener en cuenta. De este modo escogí los municipios de Lenguazaque y Guachetá ya que en primer lugar son una economía emergente asociada a la minería de carbón y en segundo lugar pude evidenciar personalmente como en pequeñas áreas están distribuidos los sectores de minería, agricultura y diferentes coberturas de suelos como bosques y pastos, sin dejar de un lado que las comunidades de las zonas conviven diariamente a pocos metros de estos elementos. Debido a la constante interacción de las comunidades de niños y adultos con los factores mencionados anteriormente es necesario evaluar las condiciones ambientales bajo las cuales se está realizando la explotación de carbón, ya que las comunidades se ven afectadas por problemas oftalmológicos, pulmonares y gastrointestinales asociados directamente al mal manejo de desechos y contaminación de cuerpos de agua debido a la actividad minera (Rodríguez y Ardila, 1999). De manera que considere realizar el estudio en esta zona para evidenciar cambios en la cobertura de suelos en determinados periodos de tiempo, fenómenos de subsidiencia y afectaciones ambientales asociadas a procesos como la minería y agricultura, para así, socializar a la población acerca del estado ambiental de las zonas de estudio.

## 1.3 Zona de Estudio

### 1.3.1 Municipio de Lenguazaque

El municipio de Lenguazaque está ubicado al norte del departamento de Cundinamarca más exactamente en la Provincia del Valle de Ubaté, sobre la Cordillera Oriental a 116 km de Bogotá (Ver Figura 1). Se encuentra en las coordenadas geográficas:

**Latitud Norte:** 5° 19''

**Longitud Oeste:** 73° 43''

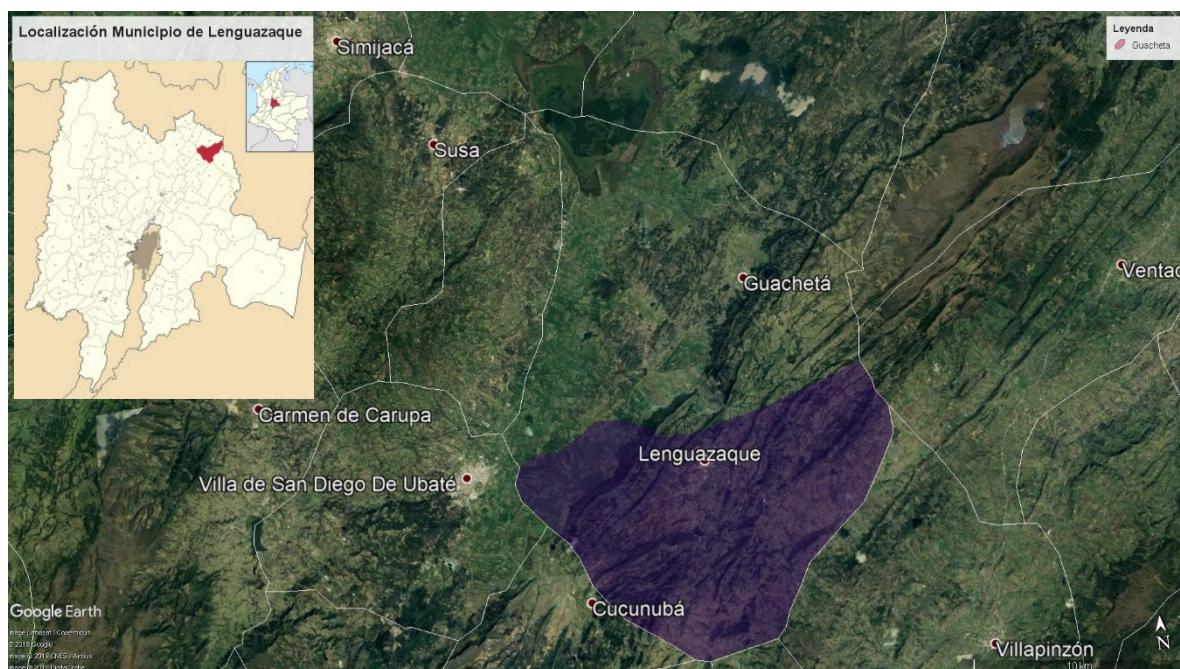


Figura 1. Localización del Municipio de Lenguazaque. Tomado de Google Earth (2019).

Lenguazaque cuenta con una extensión de aproximadamente 15.356 Ha (156.7 km<sup>2</sup>) de las cuales 39 Ha corresponden al perímetro urbano y 15.317 Ha al sector rural (Plan de Desarrollo Municipal de Lenguazaque, 2015). Se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 2.589 m.s.n.m. y cuenta con una temperatura entre los 12°C y los 13.5 °C (pisos Térmicos Frio y Páramo). Con una población de 10268 habitantes para el año 2015 según el DANE.

Respecto a la conformación Político-Administrativa, el municipio de Lenguazaque pertenece a la Provincia de Ubaté, la cual conforman los municipios de Carmen de Carupa, Cucunuba, Fúquene, Guachetá, Simijaca, Suda, Sutatausa, Tausa y Ubaté. Lenguazaque está conformado por veintiún veredas: Paicagüita, Ramada Alta, Chirvaneque, Resguardo, Estancia Contento, Taitiva, La Cuba, Faracia Retamo, Espinal Alisal, Tibita Hatico, Gachaneca, Siatama, Ramada Flores Fiantoque, La Glorieta, El Salto, Faracia Pantanito, Espinal Carrizal, Tibita Centro, Tibita El Carmen y Estancia Alisal (EOT Municipio de

Lenguazaque, 2000). Respecto a la economía del municipio, de acuerdo con la Alcaldía municipal de Lenguazaque, se basa en actividades tales como extracción de carbón, ganadería y agricultura, con productos tales como papa, arveja, remolacha, cebolla y productos lácteos como queso.

Hidrográficamente, el Municipio de Lenguazaque está asociado a las cuencas de los ríos Ubaté -Suarez y las subcuencas del río Lenguazaque, Laguna de Cucunubá, Ubaté - Suta y del bajo Fúquene. El río Lenguazaque se destaca como el segundo en importancia en la Estación Boquerón con un caudal promedio de 1.7 m<sup>3</sup>/s y tiene gran importancia como subcuenca de la Laguna Fúquene, ya que esta última funciona como un regulador de las crecientes del río Ubaté y sus afluentes (Plan de Desarrollo Municipal de Lenguazaque, 2015)

### 1.3.2 Municipio de Guachetá

El municipio de Guachetá está ubicado al Nororiente del departamento de Cundinamarca a 118 km de Bogotá (Ver Figura 2). Limita al Norte con los municipios de Ráquira y Samacá (Departamento de Boyacá); al Sur con los municipios de Lenguazaque y Ubaté (Departamento de Cundinamarca); al Oriente con el municipio de Ventaquemada (Departamento de Boyacá) y Lenguazaque y al Occidente con los municipios de Ubaté y Fúquene (Departamento de Cundinamarca) (Alcaldía Municipal de Guachetá en Cundinamarca). Se encuentra en las coordenadas geográficas:

**Latitud Norte:** 5° 23'' 15'

**Longitud Oeste:** 73° 41'' 20'

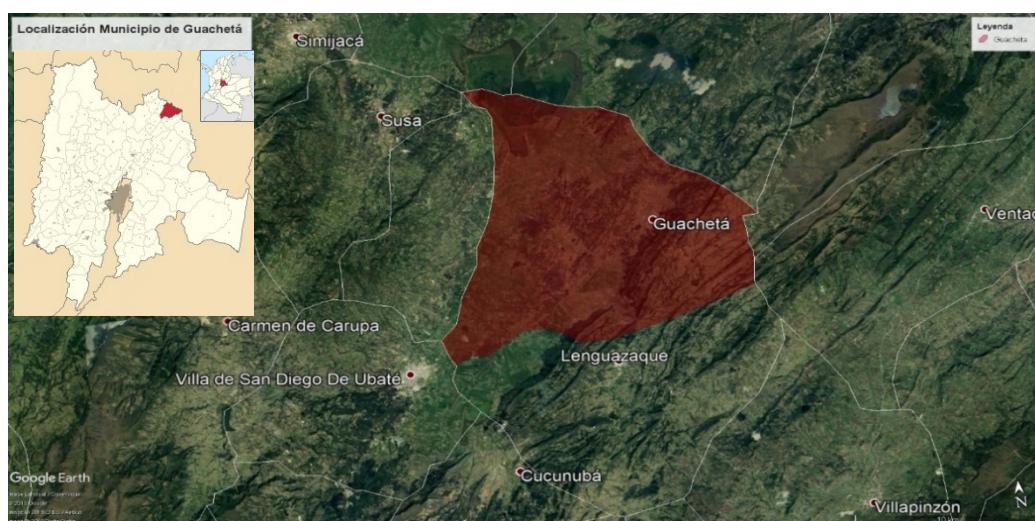


Figura 2. Localización del Municipio de Guachetá. Tomado de Google Earth (2019)

Guachetá cuenta con una extensión de aproximadamente 17.745 Ha (177.45 km<sup>2</sup>) de las cuales 57.81 Ha corresponden al perímetro urbano (IGAC). Se encuentra a una altura sobre el nivel del mar de 2688 m.s.n.m. y cuenta con una temperatura entre 12° y 13° (pisos térmicos frío y páramo). Con una población de 11385 habitantes para el año 2015 según el DANE.

Respecto a la conformación Político-Administrativa, el municipio de Guachetá en el perímetro urbano está conformado por 4 barrios y 59 manzanas, mientras que en el sector rural está conformado por veinte veredas: San Antonio, Peñas, Falda de Molino, Santuario, Frontera, Cabrera, Gacheta Alto, Monroy, Gachetá El Carmen, Gacha, Tagua, Ticha, Nenguá, Miña, Rabanal, Pueblo Viejo, Tagua, Punta Grande, La Puntica y La Isla (Alcaldía Municipal de Guachetá). Respecto a la economía del municipio, se basa principalmente en la actividad agrícola (papa, arveja, maíz – mazorca, frijol y trigo), ganadería y extracción de carbón (principalmente en las veredas de Peñas y Santuario).

Hidrográficamente, el municipio de Guachetá está asociado a la cuenca de los ríos Ubaté, Susa, Simijaca, Chiquinquirá, Suarez y cuenca de la Laguna de Fúquene y de las subcuenca del río Fúquene, Suta y Lenguazaque. Además, se encuentran dos reservas naturales: El parque Natural del Robledal y el Páramo de Rabanal, en los cuales se encuentran coberturas tales como bosque nativo, bosque de galería primario, pastos naturales entre otros. (Alcaldía Municipal de Guachetá de Cundinamarca)

## 2. Geología

Los municipios de Lenguazaque y Guachetá están constituidos por formaciones del Cretácico, Terciario y Cuaternario. La Corporación Autónoma de Cundinamarca (CAR, 2006) caracteriza los aspectos de Estratigrafía y Tectónica en base a la microcuenca del Río Lenguazaque.

### 2.1 Geología Estructural y Tectónica

A nivel general, debido al choque entre las placas tectónicas de Nazca o Pacífico y la Placa Suramericana la zona estuvo sometida a esfuerzos compresivos significativos, resultando en la orogénesis de los Andes. Teniendo en cuenta la interacción entre las placas mencionadas anteriormente la zona de estudio se caracteriza por evidenciar fallas de tipo inverso y de cabalgamiento además de estructuras tales como sinclinales y anticlinales alargados hacia el Oeste y simétricos de orientación NNE (Ver Figura 3); pliegues que contienen las formaciones carboníferas (CAR, 2006). Las estructuras geológicas más importantes son:

#### 2.1.1 Anticlinal de Tausa

Denominación dada por (McLaughlin y Arce, 1975). Evidencia un arrastre en sentido sinestral como resultado del accionar de la Falla del Neusa. El anticlinal tiene una amplitud de 2 km en el sector sur (donde se presenta un cierre estructural) mientras que en la parte Norte (cuyo núcleo es conformado por la Formación Churuvita) evidencia un espesor de más de 5 km. Adicionalmente, el anticlinal es simétrico hacia el sur y por el efecto de la falla de Sutatausa tumbado hacia el Occidente (Montoya y Reyes, 2003).

#### 2.1.2 Sinclinal de Chécua

Denominación dada por (McLaughlin y Arce, 1975). Estructura ubicada entre las localidades de Zipaquirá y Lenguazaque, conocida también como Sinclinal de Guachetá. Es una estructura simétrica cuyo núcleo está conformado por la Formación Bogotá y sus flancos por

las Formaciones Cacho y Guaduas. El flanco Oriental está más inclinado por acción de la falla de Cucunubá y hacia el Sur evidencia depósitos cuaternario de la Sabana de Bogotá (Montoya y Reyes, 2003).

### 2.1.3 Anticinal de Guacheneca

Denominación dada por (Ulloa y Rodríguez, 1991). Estructura que se extiende por la Laguna de Suesca con rumbo N40°E hacia el Sur y N60°E hacia el Norte. Se encuentra limitado hacia el Occidente por la falla de Cucunubá, hacia el Occidente por la falla de Nemocón y hacia el Sur (municipio de Lenguazaque) por ambas fallas. Evidencia una profundidad de 300 metros y está conformada por en el núcleo por la Formación Conejo y en los flancos por las Formaciones Lidita Superior, Plaeners y Labor-Tierra. (Montoya y Reyes, 2003).

### 2.1.4 Falla de Sutatausa

Denominada por (Ulloa y Rodríguez, 1991) como la falla que constituye el límite Oriental de la zona Occidental. Evidencia una vergencia al Occidente, hacia el Sur limita el anticinal de Tausa y el sinclinal de Neusa mientras que hacia el Norte debido al cierre estructural del sinclinal de Neusa limita el Grupo Guadalupe y la Formación Conejo con la Formación Arenisca Dura y con el techo de la Formación Conejo (Montoya y Reyes, 2003).

### 2.1.5 Falla de Cucunubá.

Denominada por Ulloa y Rodríguez (1991) como una estructura con rumbo regional de N40°E y rumbo local N25-60°E. Caracterizada como una falla de cabalgamiento con vergencia al occidente que pone en contacto la parte superior de la Formación arenisca Tierna con la Formación Guaduas y la Formación Plaeners con la Formación Cacho (al sur del Municipio de Lenguazaque) (Montoya y Reyes, 2003).

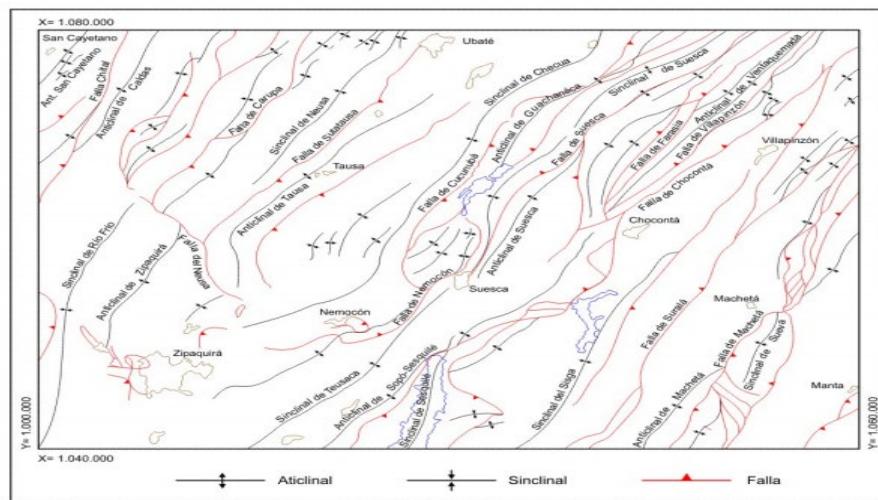


Figura 3. Mapa estructural de la plancha 209 Zipaquirá. (Montoya & Reyes, 2003)

## **2.2 Mantos de Carbón**

Dentro de las unidades de explotación de carbón asociadas al miembro inferior de la Formación Guaduas encontramos:

### **2.2.1 Manto Cero**

Ubicado entre el techo de la Formación Guadalupe y el manto cisquera, se considera un manto blando de aspecto lustroso asociado a intercalaciones de lutita carbonosa (Cely, 2016).

### **2.2.2 Manto La Cisquera**

Localizado a 130 metros sobre el techo de la arenisca tierna de la Formación Guadalupe, considerado un manto limpio, blando y de aspecto brillante, constituido por lutitas laminares que incluyen lentes de carbón, evidenciando un espesor de más de 4 metros en el municipio de Guachetá (Cely, 2016)

### **2.2.3 Manto Tesoro**

Localizado a 60m sobre el manto la Cisquera, considerado un manto limpio, blando y semibrillante, constituido por arcillolitas grises poco blandas (Cely, 2016).

### **2.2.4 Manto Tesorito**

Localizado a 4 metros del Manto Tesoro, considerado un manto limpio, semibrillante y medianamente duro, con un espesor de 0.80 metros y constituido por limolitas grises blandas y arcillolitas duras (Cely, 2016)

### **2.2.5 Manto Gemela**

Localizado sobre el manto Tesorito, considerado un manto limpio, semibrillante y medianamente duro, con un espesor de 0.60 metros al sur del municipio de Guachetá, constituido por arcillolitas semi-duras (Cely, 2016).

### **2.2.6 Manto El Consuelo**

Localizado 110 metros por encima del manto Gemela, considerado un manto limpio, semibrillante y duro, constituido por limolitas compactas y resistentes (Cely, 2016).

### **2.2.7 Manto El Pedro**

Localizado 20 metros por encima del manto El Consuelo, considerado un manto semibrillante y duro con un espesor de 0.40 metros, constituido por arcillolitas carbonosas (Cely, 2016).

### **2.2.8 Manto El Rubí**

Localizado 15 metros sobre el manto El Pedro, considerado un manto limpio, semibrillante y medianamente duro, constituido por arcillolitas limosas (Cely, 2016)

### **2.2.9 Manto Bocatoma**

Localizado estratigráficamente 40 metros sobre el manto Rubí y a 110 metros del techo del límite superior del miembro Guaduas inferior, considerado un manto continuo, brillante y duro con un espesor de 1.50 metros, constituido de intercalaciones de lutitas carbonosas (Cely, 2016).

### **2.2.10 Manto La Perdida**

Localizado 40 metros sobre el manto Bocatoma, aflora en el miembro inferior de la Formación Guaduas y está constituido por intercalaciones de arcillolitas, lutitas, areniscas y mantos de carbón con posibilidad de explotación (Cely, 2016).

## **3. Marco Teórico**

### **3.1 Sensores Remotos**

La teledetección es considerada como la ciencia de recopilación de imágenes, procesamiento de información (de datos crudos a imágenes) e interpretación, con el fin de generar información y datos que sean válidos para ser usados en un amplio rango de estudios (Sabins y Floyd, 2007). La generación de datos se basa en la relación entre el comportamiento físico de un objeto y la absorción de energía en diferentes rangos del espectro electromagnético, es decir, atributos tales como las coberturas de suelos tendrán un comportamiento (espectral) determinado por los valores de reflectancia o emisión en diferentes longitudes de onda (Paruelo, 2008). Durante las últimas décadas, gracias al lanzamiento de varios satélites (Landsat 7, Landsat 8, Sentinel 1, Sentinel 2, entre otros) aplicados al estudio de recursos naturales, se ha incrementado sustancialmente la información disponible, el nivel de detalle y calidad de esta (aumentando las resoluciones espectrales, espaciales y temporales), resultando en un mayor uso de sensores remotos para la obtención de información (González y Rodríguez, 2013).

Los Sensores Remotos son ampliamente utilizados en diferentes aplicaciones tales como: cambios en el uso y cobertura de suelo, monitorio de desastres, cambios en la vegetación, desarrollo urbanístico, hidrogeología, minería, entre otros (Rokni, Ahmad, Selamat y Hazini, 2014). Además, teniendo en cuenta el constante registro que se ha llevado a cabo durante años, se pueden estudiar fenómenos actuales, detectando patrones que pueden ser extrapolados para analizar procesos pasados de los cuales no hay datos algunos (Sexton, Urban, Donohue, Song, 2013). Para aplicar Sensores Remotos en cualquiera de los casos mencionados anteriormente, es necesario tener en cuenta elementos como la resolución espacial, temporal, spectral y radiométrica asociada a cada sensor, ya que, estas características determinan el enfoque del estudio, por ejemplo, sistemas de alta resolución temporal (Quick Bird, NOAA, Modis, entre otros) son enfocados en procesos como erosión, deforestación y regeneración de vegetación, mientras sistemas con media y alta resolución spectral (Landsat, Aster o Envisat) son enfocados en análisis de contaminación, hidromorfia y salinización (González y Rodríguez, 2013).

### 3.1.1 Imágenes Multiespectrales

Las imágenes multiespectrales son consideradas un arreglo de diferentes imágenes tomadas de manera simultánea, enfocadas cada una en diferentes intervalos de longitud de onda, cada imagen multiespectral se caracteriza por un rango espectral captado, un numero de bandas espectrales captadas y un rango de longitud de onda entre cada banda espectral (Sabins y Floyd, 2007). Las imágenes multiespectrales son muy importantes ya que permiten evidenciar características que a simple vista no son reconocibles, debido a que se encuentran asociadas a longitudes de ondas que no podemos captar. Por ejemplo, en la misión de Landsat 7 se encuentran 7 bandas multiespectrales (Gómez, Álvarez y Cruz, R, 2005), cada banda contiene información de la emisión y absorción de los objetos o aspectos analizados en determinada longitud de onda, de esta manera, se puede evidenciar por ejemplo, mayor reflectancia de la vegetación en la banda verde que en la azul, en la banda roja (teniendo en cuenta la absorción de energía por parte de la clorofila) y en el infrarrojo cercano (Sabins y Floyd, 2007).

Sin embargo, cada imagen por si sola enfocada en una sola banda espectral, no nos da la mayor cantidad de información disponible. Para aprovechar de mejor manera la información asociada a cada banda espectral, se realiza la composición de imágenes a partir de 3 canales multiespectrales, lo que permite crear composiciones tales como RGB (Ver Figura 4) utilizando las bandas 3, 2 y 1 (canal rojo, verde y azul) y las bandas 4, 3 y 2 con infrarrojo cercano (Sabins y Floyd, 2007). de manera, que cada composición cumple la función de enfocarse en ciertos elementos en particular, ya sean características vegetales, hidrográficas y geológicas.

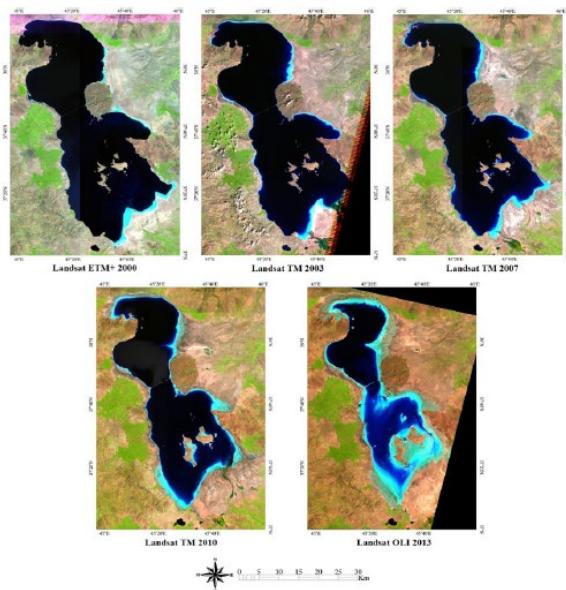


Figura 4. Composiciones RGB del Lago Urmia. (Rokni et al., 2014)

Las composiciones RGB son muy importantes teniendo en cuenta que a partir de estas se desarrollan tanto las clasificaciones supervisadas como las no supervisadas. Las

clasificaciones son descritas como la agrupación de objetos en clases con ayuda de técnicas estadísticas y en relación con las características presentes (Gutiérrez, 2005). La clasificación no supervisada se diferencia de la clasificación supervisada principalmente por el conocimiento de la zona necesario para llevar acabo cada clasificación, ya que, para la clasificación no supervisada no se requiere conocimiento extenso de la zona de estudio debido a que la agrupación se lleva acabo de manera automática (Macedo, Pajares y Santos, 2010). De manera que una vez generada la clasificación no supervisada (con numero de clases conocido o desconocido) se puede cuantificar y analizar los cambios de cobertura asociados.

## 3.2 Índices de Imágenes

Los índices de imágenes son imágenes resultado de la adición y sustracción de bandas, cuyo objetivo es destacar un fenómeno en concreto atenuando aquellos factores que puedan afectar de manera negativa la imagen. Adicionalmente, se utilizan principalmente en la comparación de imágenes a lo largo de un tiempo determinado, con el fin de evidenciar cambios en índices de vegetación, suelos y agua, que me permita evidenciar el estado de procesos naturales o de acción humana como la agricultura (ArcGIS). Los índices más importantes para mi estudio son:

### 3.2.1 Índice Normalizado de Vegetación (NDVI):

Diseñado por Tucker (1979) y enfocado en el seguimiento de coberturas vegetales, se caracteriza por el uso del infrarrojo cercano y la banda roja. Sus valores oscilan entre -1 a +1 y caracteriza la presencia de vegetación en la superficie y su distribución (Ortiz, Melgarejo, Álvarez y León, 2018). Siendo el índice el siguiente:

$$NDVI = \frac{\rho_{NIR} - \rho_{Red}}{\rho_{NIR} + \rho_{Red}}$$

$\rho_{NIR}$  = Banda infrarroja cercana

$\rho_{Red}$  = Banda Roja

Las longitudes de onda ( $\lambda$ ) utilizadas en la generación del NDVI se ubican aproximadamente en 0.6  $\mu\text{m}$  correspondiente a la banda visible del rojo y 0.8  $\mu\text{m}$  correspondiente al infrarrojo cercano (Wang, Adiku, Tenhunen y Granier, 2005). En el caso de estudio, teniendo en cuenta que se utilizaron imágenes satelitales de Sentinel 2, la banda del rojo corresponde a una longitud de onda de 0.665  $\mu\text{m}$  y la banda del infrarrojo a 0.842  $\mu\text{m}$ . El NDVI evidencia a nivel general el estado de la vegetación asociada, ya que, la vegetación saludable tiene grandes cantidades de clorofila, lo que causa una baja reflectancia en las bandas visibles y altas reflectancias en las bandas de infrarrojo cercano, de manera contraria en el caso de vegetación bajo estrés (Turvey y McLaurin, 2012). A partir de lo anterior, el NDVI permite evidenciar valores positivos altos correspondientes a vegetación saludable y valores negativos correspondientes a coberturas tales como suelo seco, agua, nieve o nubes, lo que

permite realizar un seguimiento descriptivo tanto del estado de la vegetación como la presencia de diferentes coberturas en un determinado rango de tiempo, aspecto muy importante en ámbitos como la agricultura (crecimiento de cultivos y producción), clima (influencia de sequías y lluvias en la vegetación) y control ambiental de actividades como la minería, evidenciando tanto estrés como la recuperación de la vegetación asociada (Turvey y McLaurin, 2012).

### 3.2.2 Triangular Greenness Index (TGI):

Es un índice desarrollado (Hunt *et al.*, 2013) como alternativa para estimar niveles de clorofila en la vegetación e indirectamente contenido de nitrógeno presente en cultivos utilizando únicamente imágenes de espectro visible (McKinnon y Hoff, 2017). De acuerdo con lo anterior, es una alternativa de bajo costo para el seguimiento del estado de los cultivos y vegetación presente teniendo en cuenta que no se necesitan espectrómetros de alto costo (Hunt *et al.*, 2013). El índice TGI utilizada las bandas rojo, verde y azul siendo sus longitudes de onda típicas para los sensores CMOS (como en el caso del dron DJI Phantom 4) 625 nm, 525 nm y 460 nm respectivamente (McKinnon y Hoff, 2017). De manera que utilizando estas longitudes de onda y normalizando con la banda verde la ecuación del índice TGI es:

$$TGI = R_{GREEN} - 0.39 * R_{RED} - 0.61 * R_{BLUE}$$

Rgreen = Banda verde

Rred = Banda Roja

Rblue = Banda Azul

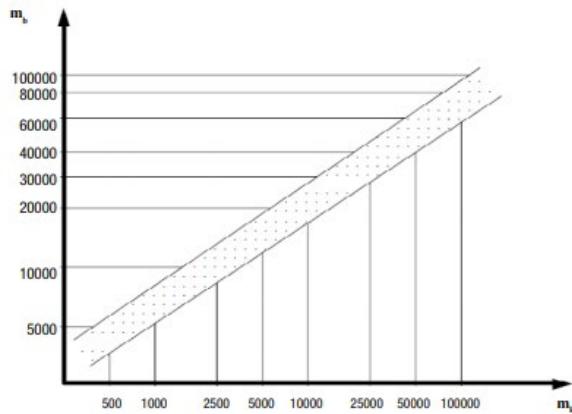
En relación con el índice NDVI, el índice TGI realiza una buena representación de las características evidenciadas por este. Además, teniendo en cuenta la facilidad de aplicación para instrumentación de bajo costo como los drones, el índice TGI es una buena opción. Sin embargo, no puede considerarse como un indicador absoluto de la salud de la vegetación ya que para esto es necesario complementar con el índice NDVI (McKinnon y Hoff, 2017).

## 3.3 Fotogrametría Aérea

De acuerdo con Bonneval, la fotogrametría es considerada como la técnica cuyo objetivo principal consiste en estudiar y definir la forma, dimensiones y ubicación espacial de un objeto, mediante medidas realizadas sobre una o varias fotografías. Sin embargo, no se encarga de la interpretación de fenómenos asociados, únicamente de la generación de planos y mapas de exactitud. Dentro de sus ramas, la más extendida es la fotogrametría aérea, la cual a partir de fotografías aéreas tomada bajo condiciones geométricas específicas, permite la elaboración de mapas y planos (Quirós, 2014).

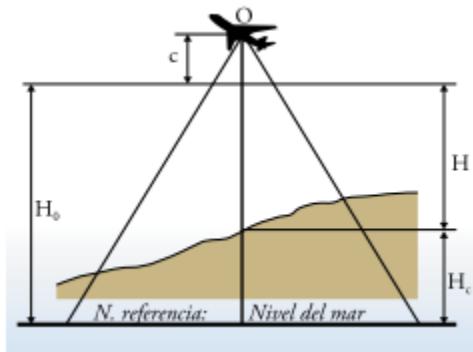
De acuerdo con Quirós (2014) entre los elementos más importantes asociados a la fotogrametría, encontramos la escala de la fotografía (función de la escala del plano a

representar y del tamaño de los objetos que se pretenden detectar). Siendo la relación entre la escala de la imagen  $M_b = 1/m_b$  y la del plano  $M_k=1/m_k$  (Ver Figura 5).



*Figura 5. Relación entre la escala de la imagen y la escala del plano. Quirós (2014)*

Donde  $H$  es la altura media sobre el terreno,  $c$  el valor de la distancia focal y  $m_b$  la escala de la foto (Ver Figura 6).



*Figura 6. Altitud del vuelo sobre el nivel del mar. Quirós (2014)*

La Fotogrametría aérea tiene como ventajas la reducción de costos de proyecto y optimización del tiempo en comparación a la topografía tradicional, continuo registro multitemporal (posibilitando la comparación en otros períodos de tiempo) y finalmente se consolida como una alternativa para regiones de difícil tránsito (Basterra, 2011).

La toma de fotografías comúnmente se realiza mediante cámaras instaladas en aviones, sin embargo, gracias a los avances tecnológicos, hoy en día es común el uso de drones o vehículos aéreos no tripulados para este fin. El uso de tecnologías basadas en sensores de alta resolución en conjunto con los drones ha reducido tanto costos como tiempos de procesamiento, resultando en un aumento significativo de la información disponible. Los drones permiten un fácil acceso a regiones remotas y la obtención de ortofotografías, con las cuales mediante procesamiento digital se puede obtener modelos digitales topográficos de alta resolución, útiles para fines geológicos, paleontológicos, geomorfológicos, gestión de riesgo entre otros. Además, debido al poco peso y tamaño asociado a los sensores, permite la

adquisición rápida y eficaz con alta resolución de la información requerida (Lozano y Gutiérrez, 2016).

En este estudio, utilice el dron DJI Phantom 4, caracterizado por ser un dron de ala rotatoria, el cual presenta 4 hélices y posee una autonomía de 30 minutos por vuelo y hasta 10 km de distancia, puede soportar más de dos kilos y puede girar sobre sí mismo en distancias cortas, lo que lo hace especial para trabajos de carácter topográfico, geofísico, ecológico entre otros. (Lozano y Gutiérrez, 2016). Posee un sensor de tipo CMOS con un tamaño de píxel de 3.9 cm/pixel.

ESPECIFICACIONES	
Max Flight Time	28 Min
Navigation	GPS & GLONASS
GPS Positional Accuracy	0.5 m (z), 1.5 m(x,y)
Sensor	1/2.3" CMOS
ISO Range	100-1600 (photo)
Electronic Shutter Speed	1/8000s
FOV	94°
Aperture	f/2.8
Image Size	4000 x 3000
Image Capture Interval	2.5 s

Tabla 1. Especificaciones técnicas Dron (DJI PHANTOM 4)

Si bien actualmente gran parte de la cartografía (incluyendo los levantamientos topográficos) son realizados con técnicas fotogramétricas (Sobrino, 2006), es necesario tener ciertas consideraciones para el uso de drones en esta tarea. En primer lugar, a pesar de que el uso de esta tecnología permite obtener datos con una eficacia mayor en comparación a los métodos topográficos tradicionales, la precisión del GPS utilizado varía en escala de metros, de manera que es necesario llevar a cabo correcciones mediante puntos de control terrestre (Casella *et al.* 2016). Dentro de las fuentes de error que afectan el sistema GPS utilizado por el dron encontramos: diferencias en los tiempos registrados por el satélite y el receptor, dispersión no lineal de las ondas electromagnéticas debido a la ionización de moléculas de agua, refracción de las ondas debido a condiciones meteorológicas (temperatura, presión y humedad) y efecto multirayectoria asociados a reflexiones múltiples (Olynik, 2002). De manera que al haber utilizado únicamente el dron (el cual utiliza GPS y GLONASS para su posicionamiento), sin estaciones de control en tierra, en mi estudio no se pueden realizar estas correcciones y solamente se puede analizar el resultado topográfico desde una perspectiva relativa mas no absoluta.

## 4. Metodología y Resultados

Se realizó la primera toma de fotografías áreas mediante dron en las minas autorizadas de Lenguazaque el 2 de Febrero de 2019, siendo estas: Mina El Cardonal, ubicada en la vereda La Cuba con coordenadas N 5°19'21.3984'' W 73°41'24.8676''. Mina La Vuelta, ubicada en la vereda La Cuba con coordenadas N 5°17'58.5312'' W 73°41'24.8616'' y Mina El Triunfo ubicada en la vereda Ramada Alta con coordenadas N 5°18'43.6752'' W 73°44'8.0772''. La toma de fotografías se realizó con el dron DJI Phantom 4, mediante un plan de vuelo digitalizado y georreferenciado anteriormente.

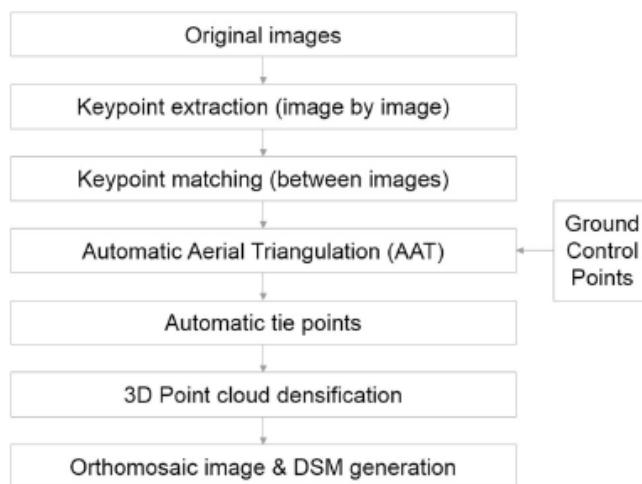


Figura 7. Procedimiento para el procesamiento de las imágenes con PIX4D (Suh & Choi, 2017).

El dron registró 29 fotografías por mina (Ver Figura 8) en vuelos de una duración aproximada de 4 minutos, evidenciando una autonomía y facilidad de registro de datos importante. Posterior al registro fotográfico, se realizó el procesamiento utilizando el software Pix4Dmapper Pro (Ver Figura 7), el cual, mediante cada una de las 29 fotografías registradas de forma individual y los puntos clave asociados, los cuales son invariantes en escala y permiten la sobreposición de las fotografías mediante análisis cross-comparison (Suh y Choi, 2017) y una corrección automática de triangulación aérea (Schenk, 1997), genera un ortofomosaico a partir de una nube 3D de densidad de puntos coordinados X,Y,Z. Además, se obtiene un Modelo Digital Terrestre (DTM) y Modelo Digital de Superficie (DSM), los cuales pueden convertirse fácilmente a cualquier formato GIS.

Una vez obtenidos los DSM y DTM, se genera un mapa de sombras del DSM, para evidenciar la resolución y el nivel de detalle asociado a la fotografía aérea mediante UAV. Sin embargo, teniendo en cuenta que el DSM contiene información influenciada por la vegetación, construcción y elementos ajenos a la superficie como tal, no se tiene en cuenta en posteriores análisis. Respecto al DTM, el cual elimina el efecto de los elementos mencionados anteriormente presentes en el DSM, es utilizado para generar dos cortes topográficos por mina, además, de características topográficas tales como funciones de pendiente y de curvatura. Las cuales respectivamente permiten evidenciar inclinación, concavidad y/o

convexidad del terreno. Asociando valores positivos de la función de curvatura a superficies cóncavas (aceleración del flujo), valores negativos a superficies convexas (desaceleración del flujo) y valores cercanos de cero a superficies lineales (ArcGIS).

La segunda toma de fotografías aérea mediante dron se realizó el 30 de Marzo de 2019 en las minas correspondientes a la toma de fotografías aéreas del 3 de Febrero de 2019 (mina El Cardonal, mina la Vuelta, mina El Triunfo). Se realizó el procesamiento descrito anteriormente, con la generación de los DSM y DTM, los perfiles topográficos y funciones de pendiente y de curvatura a partir del DTM. De manera que teniendo en cuenta un intervalo de aproximadamente 2 meses entre la toma de fotografías aéreas, se procede a realizar una comparación entre estos elementos, principalmente los perfiles topográficos asociados al DTM, ya que fueron realizados exactamente en el mismo lugar y con la misma orientación, permitiéndome evidenciar cambios topográficos en ese intervalo de tiempo. Por otro lado, para cada mina asociada se calculó el índice TGI mediante la herramienta de Ráster Calculator en ArcGIS, tanto en la toma de fotografías del 3 de Febrero de 2019 como el 30 de Marzo de 2019, permitiéndome no solo identificar cambios asociados a la salud de la vegetación y niveles de clorofila sino también asociados al régimen climático durante este intervalo.

Por otro lado, mediante imágenes satelitales de Sentinel 2A con resolución de 10m, obtenidas mediante acceso libre y en un rango de tiempo de 3 años (2016-2019) involucrando los Municipios de Lenguazaque y Guachetá, se procedió a realizar en primer lugar una clasificación no supervisada, con el fin de generar mapas de uso y cobertura que permitan evidenciar cuantitativamente el comportamiento de los Municipios estudiados. Los mapas fueron generados conjuntamente mediante los softwares PciGeomatica y ArcGIS, teniendo en cuenta coberturas como bosque, vegetación herbácea, construcciones, pasto seco, agricultura entre otras (Ver Tabla 4 y 5). En segundo lugar, se realizó el índice NDVI para cada intervalo, con el fin de analizar cualitativamente los Municipios de estudio y evidenciar si la clasificación no supervisada realizada es correcta, obteniendo así, una visión general de la evolución de la zona.

El procesamiento de las imágenes satelitales se realizó en la herramienta Composite del Software ArcGIS, utilizando los canales 2,3,4 y 8, correspondientes a las bandas azul, verde, rojo e infrarrojo cercano respectivamente. Generando composiciones RGB con los canales 2,3 y 4 y el índice NDVI con los canales 4 y 8. Permitiéndome al igual que la fotogrametría aérea con dron evidenciar cambios en la salud de la vegetación asociado a los procesos mineros en la zona, pero a un nivel regional y con menor resolución.

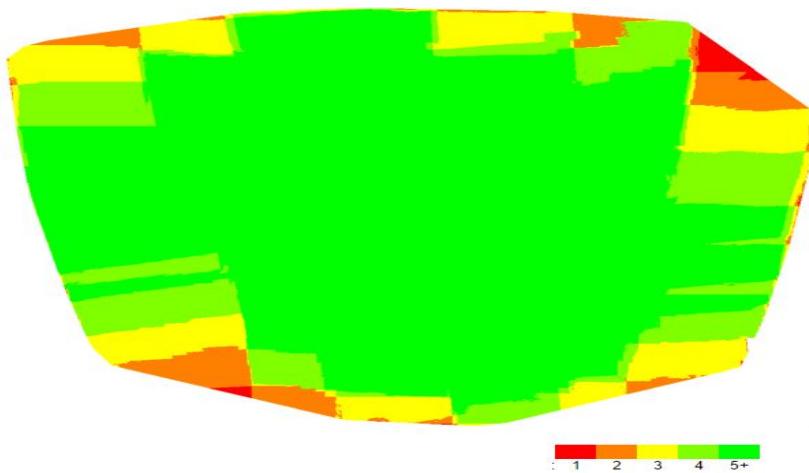


Figura 8. Número de fotografías sobrepuertas en el ortofotomosaico (Mina El Cardonal)

## 4.1 Fotogrametria Aérea con Dron

### 4.1.1 Ortofotomosaicos, Modelos de Elevación y derivados e Índices TGI

Los DTM y los DSM fueron generados directamente del procesamiento de las fotografías tomadas con el Dron DJI Phantom 4 en el software Pix4D Pro para un uso posterior en ArcGIS. En este estudio fue tenido en cuenta principalmente el Modelo Digital de Terreno, ya que de este se derivan características como perfiles topográficos (importantes para el análisis de subsidencia) y mapas de pendiente y curvatura, que permiten identificar zonas de erosión, evidencian las posibilidades de procesamiento que se pueden desarrollar a partir de fotografías aéreas mediante dron. Por otro lado, los DSM son generados mas no tenidos en cuenta en procesamientos adicionales debido a la influencia de la vegetación, como se explicó anteriormente.

El índice TGI es muy importante en este estudio, ya que como se mencionó anteriormente, me permite evidenciar niveles de clorofila asociados a la vegetación y cultivos, sin necesidad de implementar cámaras infrarrojas. De manera que el procedimiento se desarrolla únicamente con las longitudes de ondas del espectro visible (Rojo, Verde y Azul), siendo una buena alternativa para equipos de menor costo que solo cuentan con capacidad de tomar fotografías RGB. En mi caso de estudio, el índice TGI me permitió evidenciar los cambios en los niveles de clorofila y cobertura de la vegetación en el intervalo de tiempo de 2 meses. Cambios asociados en primer lugar, al régimen climático presente en cada toma de fotografías aéreas, con un periodo de verano marcado, combinado con lluvias esporádicas (CAR, 2019) para la segunda toma de fotografías. Hecho que se constata mediante reportes de precipitación (Ver Figuras 49-52) obtenidos en la plataforma VAISALA (estación Lenguazque-La Balsa) de la CAR, en los cuales se observa predominancia seca en comparación a meses de lluvia como abril. Además de testimonios por parte de la comunidad (agricultores y mineros). En segundo lugar, la actividad minera en cuanto a la elaboración de estructuras como malacates, tala de árboles (con el fin de obtener madera para sostener las

galerías), almacenamiento y transporte del carbón y, en tercer lugar, la agricultura llevada a cabo de manera simultánea.

#### 4.1.1.1 Mina El Triunfo

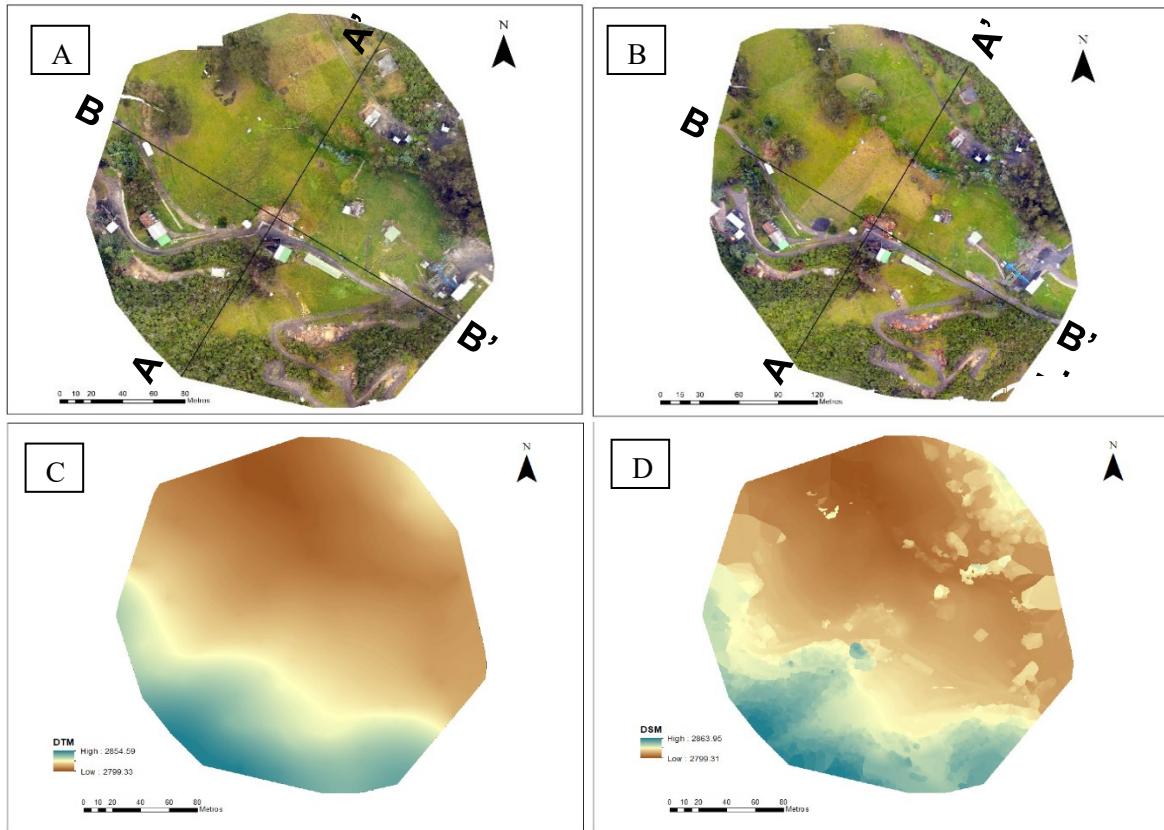


Figura 9. Resultado del procesamiento de las imágenes Mina el Triunfo: A. Ortofotomosaico primera toma de fotografías. B. Ortofotomosaico segunda toma de fotografías. C. Modelo Digital Terrestre (Primera toma). D. Modelo Digital de Superficie (Primera Toma).

Para la mina El Triunfo se generaron dos ortofotomosaicos (Ver Figura 9.A y 9.B), correspondientes a las dos tomas de datos asociadas. A cada uno de los ortofotomosaicos se les generó dos transectas: Transecta A-A' (Suroeste – Noreste) y transecta B-B' (Noroeste – Sureste) a las cuales se asocian los perfiles topográficos generados y discutidos mas adelante. De igual manera, se generaron tanto el DTM (Ver Figura 9.C) como el DSM (Ver Figura 9.D), siendo la altura minima y maxima para el DTM en la primera toma: 2799.33 m y 2854.59 m y para el DSM correspondiente: 2799.31 m y 2863.95 m. Mientras que para la segunda toma las alturas minima y maxima fueron correspondientemente: 2786.88 m y 2856.16 m (DTM) y 2786.88 m y 2867.97 m (DMS) (Ver Figura 30 y 31). Estas funciones permiten tener una idea preliminar de los cambios de altura en la zona de estudio, sin embargo, hay que tener precaución, ya que, el polígono sobre el cual el dron realizo la toma de fotografías en la segunda toma fue diferente, por lo que en ciertos puntos, el rango de imagen captado aumento o disminuyo. Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencia un efecto claro de la eliminación del factor de la vegetación por parte del DTM el cual disminuye la

altura maxima de la primera toma en 9.36 m respecto al DSM y en la segunda toma 11.81 m. Los cambios de alturas se discuten con mayor detalle en la sección 4.1.2.1

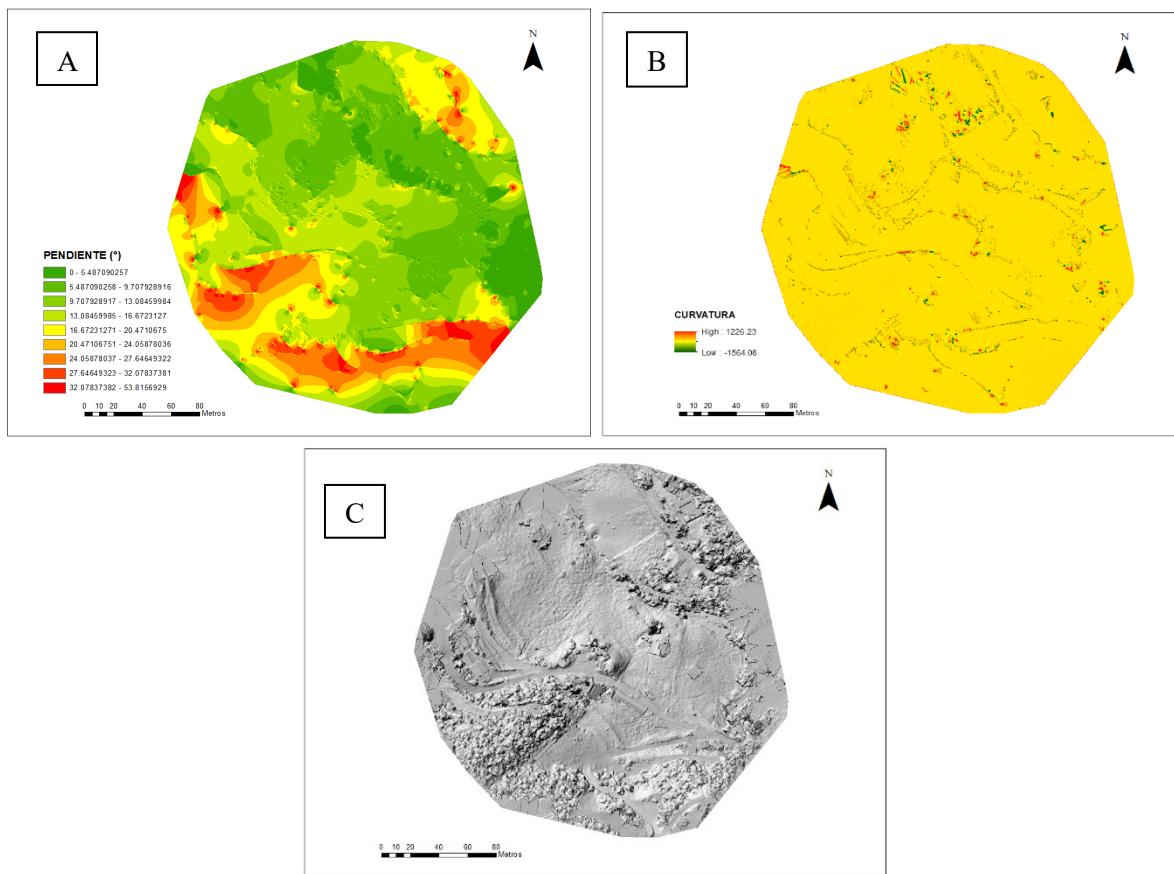


Figura 10. Características topográficas derivadas de DSM y DTM (Primera toma). Mina el Triunfo: **A.** Pendiente **B.** Curvatura **C.** Hillshade derivado del DSM

A partir del DSM asociado a cada toma de fotografías de la mina El Triunfo, con el fin de evidenciar el nivel del detalle que se puede obtener con el debido procesamiento, se utiliza la función Hillshade de ArcGIS aplicada al DSM, el cual me genera un mapa de sombras y de relieve (Ver Figura 10.C y Figura 32) a un nivel de detalle tal que, se puede diferenciar construcciones en la zona oeste e incluso el apilamiento de madera en la intersección entre las dos transectas, la vegetación en la zona Noroeste y vías de acceso.

En relación con los DTM, se utilizaron las funciones de pendiente y curvatura en ArcGIS. La función pendiente permite evidenciar en la primera toma de datos (Ver Figura 10.A), una pendiente máxima de 53.82° asociada principalmente al sector sur y noreste en donde hay mayor vegetación y elevación, mientras que en la zona central se mantienen pendientes bajas entre 0° y 16.67°. En la segunda toma de datos (Ver Figura 33) se observa una pendiente máxima de 54.77° presente de igual manera en la zona sur y noreste de la mina, mientras que en la zona central las pendientes varían entre 0° y 16.32°. Como se puede observar, en el intervalo de tiempo de 2 meses no hay mayor cambio de pendiente, sin embargo, se identifica la zona sur como aquella más propensa a la erosión y posibles deslizamientos; no obstante, la vegetación existente contribuye al afianzamiento del suelo. Respecto a la función de

curvatura (Ver Figura 10.B y Figura 34) en ambas tomas de datos se puede evidenciar a nivel general una tendencia a 0. evidenciando que, en la zona predomina una tendencia lineal de la superficie de estudio (en cuanto a concavidad y convexidad), por lo tanto, debido a esta continuidad, la velocidad de flujo en la zona de estudio será constante.

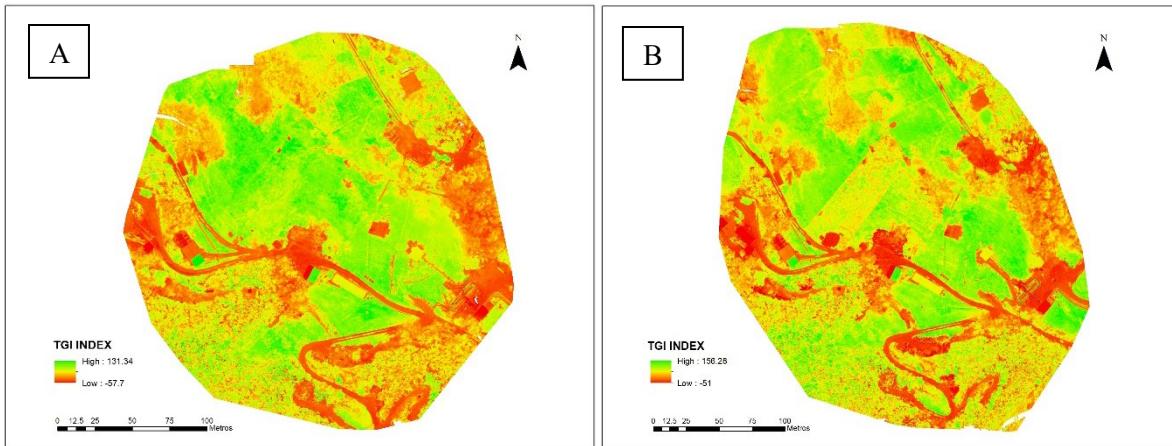


Figura 11. Índice TGI Mina el Triunfo: A. Primer registro fotográfico B. Segundo registro fotográfico

Como ultimo producto resultado del procesamiento de las fotografías obtenidas para la mina El Triunfo se generaron los índices TGI para cada uno de los Ortofotomosaicos. En el índice TGI de la primera toma de datos (Ver Figura 11.A) se evidencia en primer lugar construcciones y vías de acceso en su mayoría con tonalidades rojas (correspondientes a respuestas bajas en cuanto a niveles de actividad clorofílica), sin embargo, debido a que el índice tienen en cuenta únicamente el espectro visible (RGB), algunos techos de edificaciones en la zona central de ortofotomosaico presentan un color verde claro y por lo tanto niveles altos de clorofila que no corresponden realmente. Teniendo en cuenta la salvedad anterior, el índice permite evidenciar vegetación con altos niveles de clorofila en la zona central del ortofotomosaico, acompañada por algunos segmentos de menor nivel de producción clorofílica; asociado principalmente a condiciones hidrometeorológicas correspondientes a verano. Adicionalmente hacia la zona norte, se observa una gran porción de terreno asociada en primer lugar a vegetación y suelos con valores intermedios de producción clorofílica y en segundo lugar a una zona de pastoreo de ganado (evidenciado por la forma rectangular del lote).

Por otro lado, observando el índice TGI para la segunda toma de datos (Ver Figura 11.B) se observa en primer lugar un deterioro de los pastos presentes en la zona central del Ortofotomosaicos; se distingue un lote con claros bordes rectangulares demarcados, asociado posiblemente a pastoreo de ganado y a la rotación constante de los terrenos destinados con este fin, sin embargo, teniendo en cuenta que durante las diferentes visitas realizadas no se observó ganado alguno, posiblemente correspondan a trabajos de adecuación para la mina teniendo en cuenta líneas rectas presentes dentro del lote mencionado; las cuales podrían ser asociadas a algún tipo de transporte de material. Además, el deterioro puede ser marcado aún más por el régimen hidrometeorológico de lluvias esporádicas, pero con remanentes del verano en la fecha correspondiente. Por otro lado, hacia la zona noroeste (Al inicio la

transecta B-B') se observa una disminución de la extensión de árboles existentes, por lo que claramente en la zona se llevan a cabo tala de árboles para la sustentación de las galerías existentes, de hecho, se evidencia una respuesta negativa con respectos a niveles de clorofila a lo que correspondería al apilamiento de madera para las actividades mineras. Respecto al lote en la zona noreste mencionado correspondiente a la primera toma de datos, se observa que dos meses después presenta niveles clorofílicos más altos, por lo que su recuperación se da debido a la rotación de lotes mencionada anteriormente.

Finalmente, hacia la zona sureste se observa una respuesta negativa de niveles clorofílicos debido a la construcción de una estructura conocida como malacate, que en el caso de la segunda toma de datos se observa con mayor claridad debido a la finalización de su construcción en esa fecha. En síntesis, se puede evidenciar como en la mina El Triunfo actividades como el pastoreo y trabajos de adecuación de la mina sumado al régimen hidrometeorológico correspondiente, puede alterar la respuesta clorofílica de la vegetación asociada, evidenciando tanto afectación como recuperación de la vegetación en el intervalo de tiempo del estudio.

#### 4.1.1.2 Mina El Cardonal

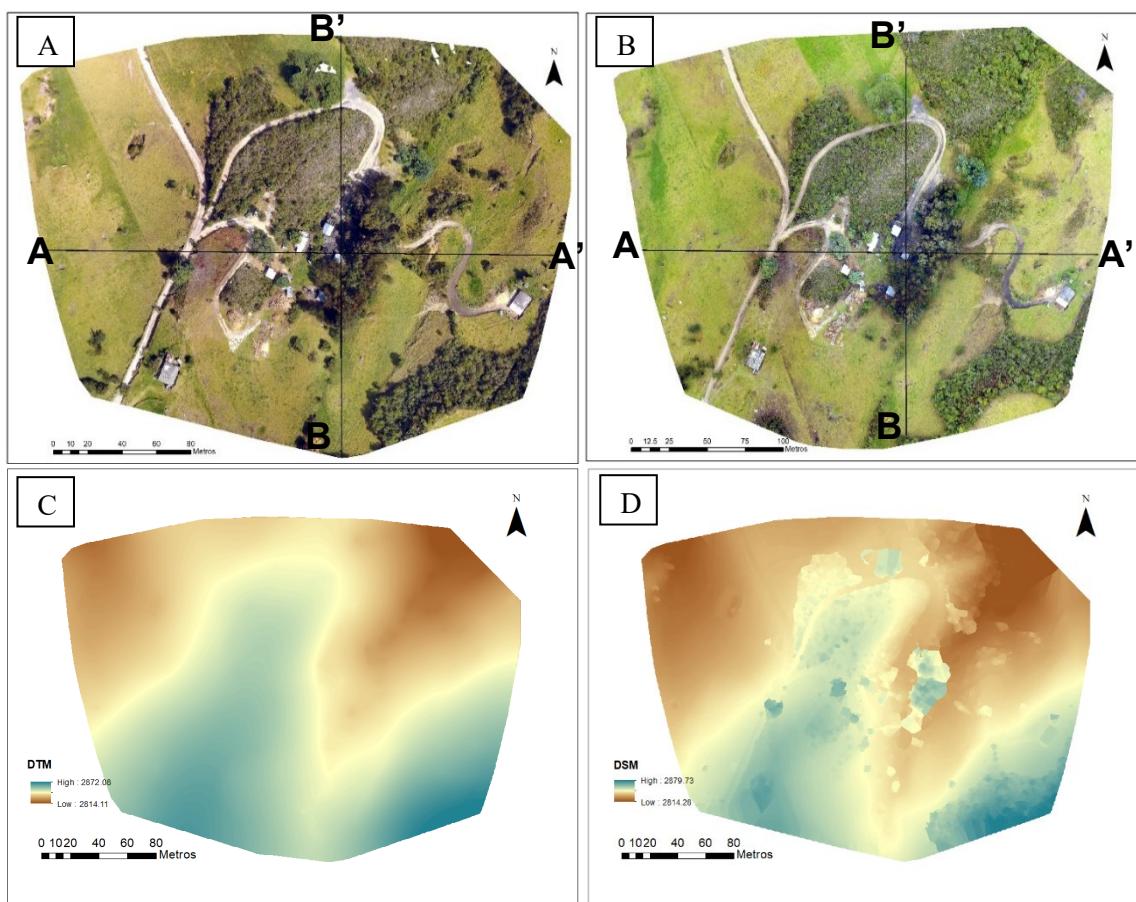


Figura 12. Resultado del procesamiento de las imágenes Mina El Cardonal: A. Ortofotomosaico primera toma de fotografías. B. Ortofotomosaico segunda toma de fotografías. C. Modelo Digital Terrestre (Primera toma). D. Modelo Digital de Superficie (Primera Toma).

En cuanto a la mina El Cardonal, de igual manera se generaron dos ortofotomosaicos (Ver Figura 12.A y 12.B) correspondientes a las dos visitas realizadas. A cada uno de los ortofotomosaicos se les generó dos transectas: transecta A-A' (Oeste – Este) y transecta B-B' (Sur – Norte) sobre las cuales se realizaron los perfiles topográficos correspondientes. Adicionalmente se generaron los DTM (Ver Figura 12.C y Figura 35) y los DSM (Ver Figura 12.D y Figura 36). En el caso del DTM para la primera visita, registra una elevación mínima de 2814.11 m y máxima de 2872.08 m mientras que en la segunda visita registra 2799.72 m como elevación mínima y 2865.64 m como elevación máxima.

Con respecto a los DSM, en la primera visita se registró una altura mínima de 2814.26 m y máxima de 2879.73 m, mientras que en la segunda visita se evidenció una elevación mínima de 2798.94 m y máxima de 2873.98 m. Si bien, en este caso el polígono utilizado como guía para el segundo registro fotográfico con dron no es exactamente el mismo que el polígono utilizado en el primer registro, las diferencias son mínimas, de manera que la magnitud del cambio de alturas registradas a partir de los DTM correspondientes no están asociadas a las diferencias mínimas entre polígonos, siendo sus causas discutidas en la sección 4.1.2. Adicionalmente, se evidencia la correcta eliminación de la cobertura vegetal asociada al

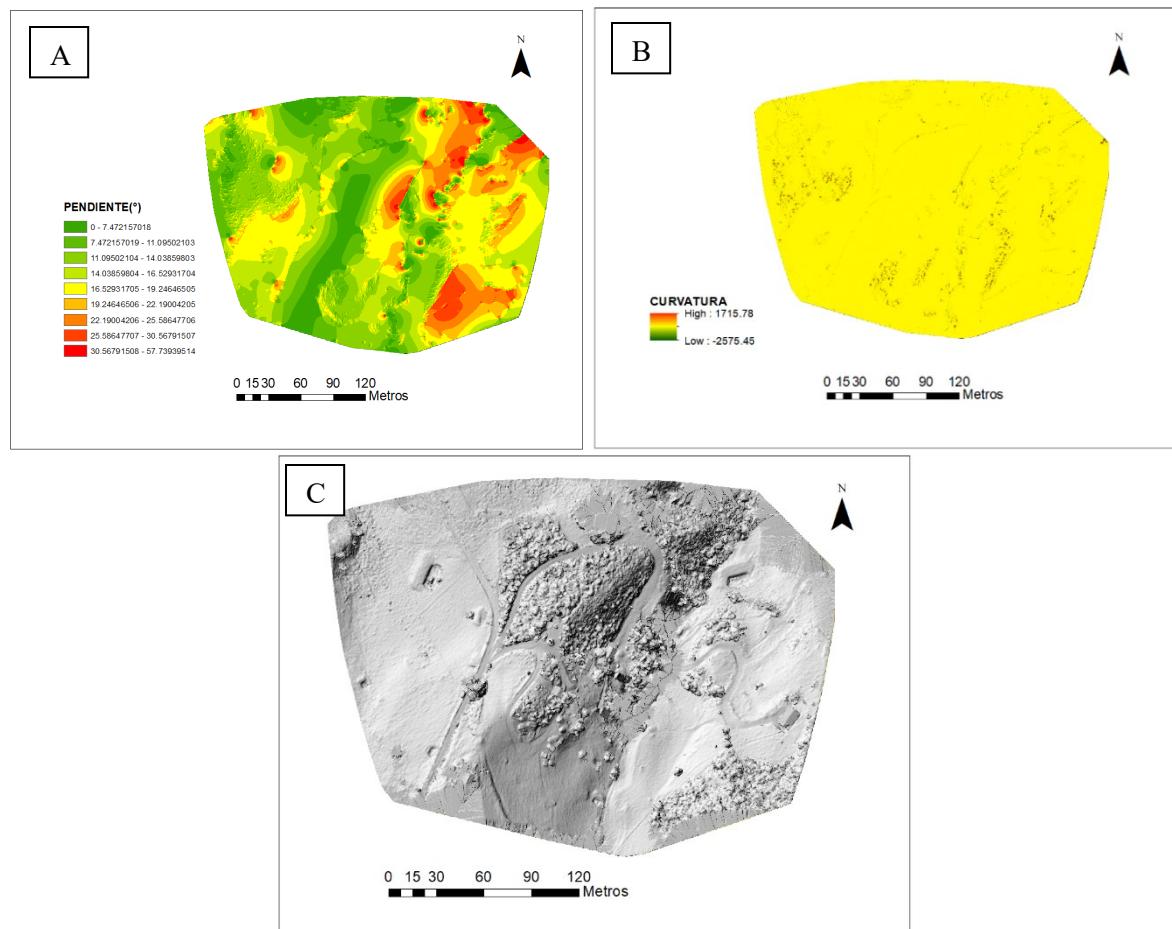


Figura 13. Características topográficas derivadas de DSM y DTM (Primera toma). Mina El Cardonal: **A.** Pendiente **B.** Curvatura **C.** Hillshade derivado del DSM

DSM por parte del DTM, disminuyendo su altura máxima en 7.65 m para la primera visita y en 8.34 m para la segunda.

De igual manera que con la mina El Triunfo, a partir del DSM se genero un mapa de sombras y relieves para las dos tomas de datos (Ver Figura 13.C y Figura 37), los cuales permiten en este caso evidenciar en detalle características tales como: Vias de acceso, construcciones, coberturas vegetales y relieves asociados. Adicionalmente, apartir de los diferentes DTM obtenidos, se utilizan nuevamente las funciones de curvatura y pendiente. En cuanto a la función de pendiente de la primera toma de datos (Ver Figura 13.A) se observa que las pendientes altas ( $16.53^{\circ}$  a  $57.73^{\circ}$ ) se concentran a lo largo de la zona Este, mientras que las pendientes bajas ( $0^{\circ}$  a  $16.53$ ) se concentran en la zona Oeste y Central.

Con respecto a la función pendiente de la segunda toma de datos (Ver Figura 38) se encontró igualmente que las altas pendientes ( $18.2^{\circ}$  a  $61.08^{\circ}$ ) se concentran en la zona Este mientras las bajas pendientes ( $0^{\circ}$  a  $18.2^{\circ}$ ) se concentran en la zona Oeste y Central; permitiendo identificar la zona Este como la zona propensa a erosionarse. Sin embargo, hay diferencias respecto a la función pendiente de la primera toma. Se evidencia un aumento en aproximadamente  $4^{\circ}$  en la pendiente máxima, ademas, pequeños cambios en las bajas pendientes de la zona este principalmente. Adicionalmente, en comparación a la mina El Triunfo, en este caso las altas pendientes se encuentran asociadas tanto a elevaciones altas como bajas. Respecto a los  $4^{\circ}$  de aumento en la función de pendiente, puede estar asociada a procesos erosivos (aunque el intervalo de tiempo es pequeño) o labores de adecuación en la zona. Respecto a la función de curvatura (Ver Figura 13.B y Figura 39) se observa en ambos registros de datos una tendencia a cero de los valores de curvatura, es decir, superficies lineales en las cuales la velocidad de flujo sería constante y tambien la erosión y sedimentación asociada. Sin embargo, en ambos registros se encuentran pequeñas zonas con valores altos y bajos conjuntamente tal como la zona Noroeste, en la cual la variación de la velocidad de un posible flujo de agua en temporada de lluvias sería mayor.

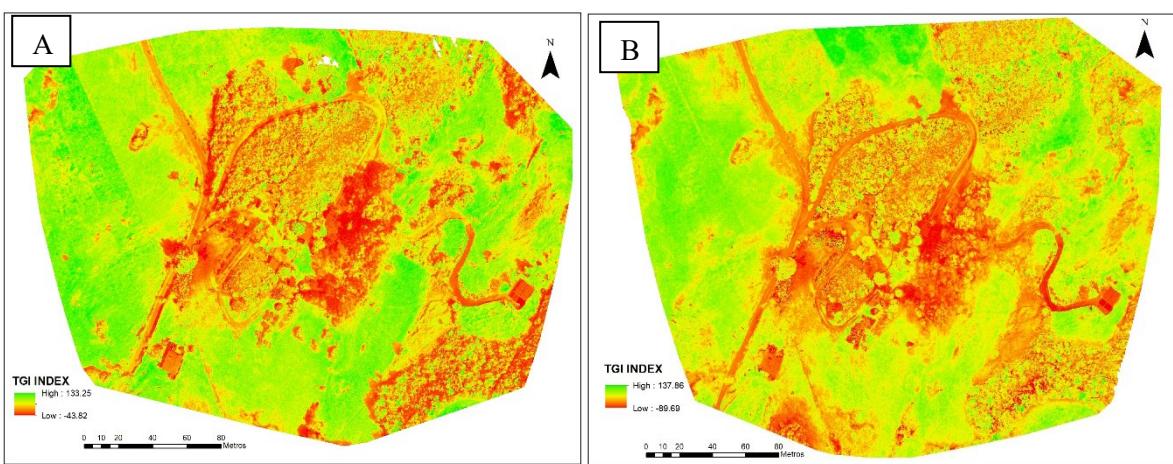


Figura 14. Índice TGI Mina El Cardonal: A. Primer registro fotográfico B. Segundo registro fotográfico

Finalmente, como ultimo producto resultado del procesamiento de las fotografías tomadas por dron en la mina El Cardonal, se generaron los indices TGI correspondientes. Respecto al indice TGI de la primera visita (Ver Figura 14.A) se puede evidenciar nuevamente como las

vias de acceso y construcciones reflejan valores negativos de niveles de clorofila. A diferencia de la mina El Triunfo, en los indices generados no hay presencia de construcciones que sean tomadas como vegetación y por lo tanto reflejen un indice positivo de clorofila.

A nivel general se evidencia coberturas de pastos que reflejan tonalidades verdes, mientras vegetaciones mas altas reflejan tonalidades amarillas y rojas, estas ultimas asociadas principalmente a sombras. En la parte Noroeste de la primera toma de fotografias, se observan dos lotes claramente diferenciados y divididos por una linea recta; el lote de la izquierda evidencia un verde mas oscuro asociado a mayores niveles de clorofila y mejor salud vegetal, mientras el lote de la derecha presenta tonalidades mas amarillentas, asociadas a niveles mas bajos de clorofila. La clara diferenciación de estos dos lotes puede estar asociada a labores de pastoreo y rotación, ya que en esa zona se observo la presencia de ganado. Hacia la zona Sur, a nivel general se observa pastos y vegetación con tonalidades verdes y amarillas leves, sin embargo, en la zona Suroeste se observa una linea recta de tonalidad roja cerca de una construcción, pór lo que podria estar asociada a procesos agricolas o de adecuación del terreno. Adicionalmente en la zona Sureste se observa una zona con tonalidades verdes y rojas, asociadas a vegetación (árboles) y gran cantidad de sombras. Finalmente en la zona Noreste se observan pastos con altos niveles de clofila, mas sin embargo, una zona de rojo intenso asociada a sombras y regiones de tonalidades rojas claramente asociadas a pastos secos.

Por otro lado, respecto al indice TGI correspondiente a la segunda toma de datos (Ver Figura 14.B) se observa un aumento a nivel general de las tonalidades amarrillas en las zonas Este y sur principalmente, evidencia un aumento en la densidad de los pastos secos. Este hecho coincide con el factor hidrometeorologico, teniendo en cuenta que, como se menciono anteriormente la fecha de la segunda toma de datos corresponde un regimen de inicio de lluvias pero con remanentes de verano, de manera que se observa la influencia de este regimen climatico en la zona.

Adicionalmente, un factor que ya no aparece en los indices respecto a la primera toma, es la influencia de las nubes, ya que, como se puede observar en el ortofotomosaico (Ver Figura 12.B) las condiciones permitieron una baja densidad de nubes. En la parte Noroeste se observa que la diferenciación entre los dos lotes identificados en la primera toma de datos ya no es evidente, se observa que el lote de la derecha aumento los niveles de clorofila (aunque tambien se observan areas amarillas-rojas de niveles bajos de clorofila que antes no estaban). Por otro lado, se observa una nueva aparición de dos lotes diferenciados en la zona norte, siendo el lote derecho el mas saludable; nuevamente, debido a las geometrias rectas evidenciadas, puede ser una zona de rotación de pastoreo.

En sintesis, en la mina El Cardonal, se observa principalmente la influencia del factor hidrometeorologico y de pastoreo en la salud vegetacional de la zona de estudio. Se observa ademas, como la presencia de nubes pueden inducir a interpretar niveles bajos de clorofila asociados a la vegetación que realmente no existe.

#### 4.1.1.3 Mina La Vuelta

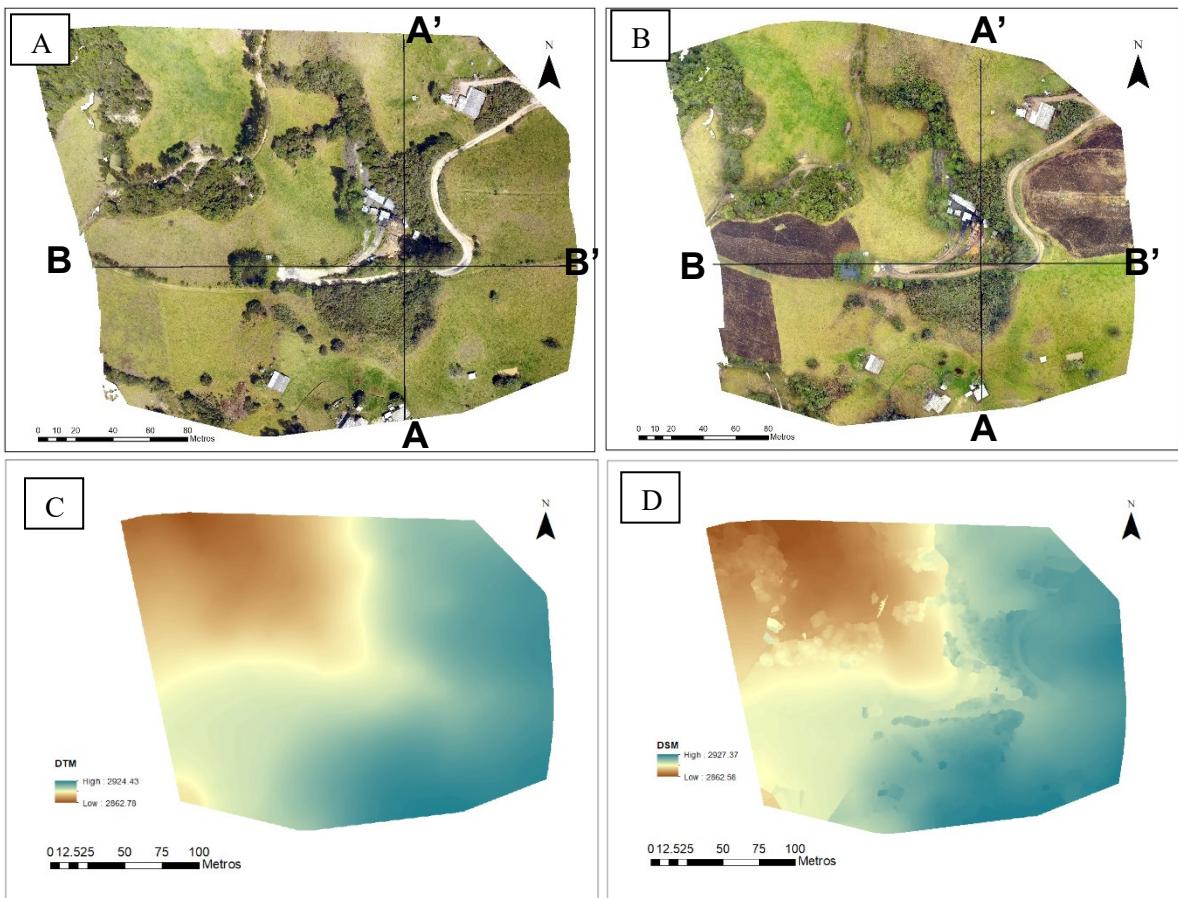


Figura 15. Resultado del procesamiento de las imágenes Mina La Vuelta: **A.** Ortofotomosaico primera toma de fotografías. **B.** Ortofotomosaico segunda toma de fotografías. **C.** Modelo Digital Terrestre (Primera toma). **D.** Modelo Digital de Superficie (Primera Toma).

Finalmente en cuanto a la mina La vuelta, se generaron nuevamente dos ortofotomosaicos (Ver Figura 15.A y 15.B) con sus transectas correspondientes: transecta A-A' (Sur – Norte) y transecta B-B' (Oeste – Este), sobre las cuales se realizaron los perfiles topográficos discutidos en la sección 4.1.3. Ademas, se generaron los DTM (Ver Figura 15.C y Figura 40) y DSM (Ver Figura 15.D y Figura 41) asociados a cada visita realizada. Respecto al DTM correspondiente a la primera toma de datos, se registra una altura minima de 2862.78 m y una altura maxima de 2924.43 m mientras el DSM correspondiente evidencia una altura minima de 2862.58 m y una altura maxima de 2927.37 m. Por otro lado, el DTM correspondiente a la segunda toma de datos evidencia una altura minima de 2844.58 m y una altura maxima de 2910.82 m mientras el DSM correspondiente evidencia una altura minima de 2844.57 m y una altura maxima de 2914.07 m. De igual manera que las minas del El Triunfo y El Cardonal, los poligonos utilizados como referentes para la toma de fotografias aereas mediante dron varian entre si, evidenciando mayor o menor cobertura en ciertas areas, de manera que, el cambio de altura drastico observado (la altura maxima respecto al DTM disminuye aproximadamente 13.61 m y la altura minima disminuye 18.2 m en el

intervalo de tiempo del estudio) está asociado en parte al cambio de cobertura por parte de los polígonos, sin embargo, sera discutido en detalle en la sección 4.1.2.3

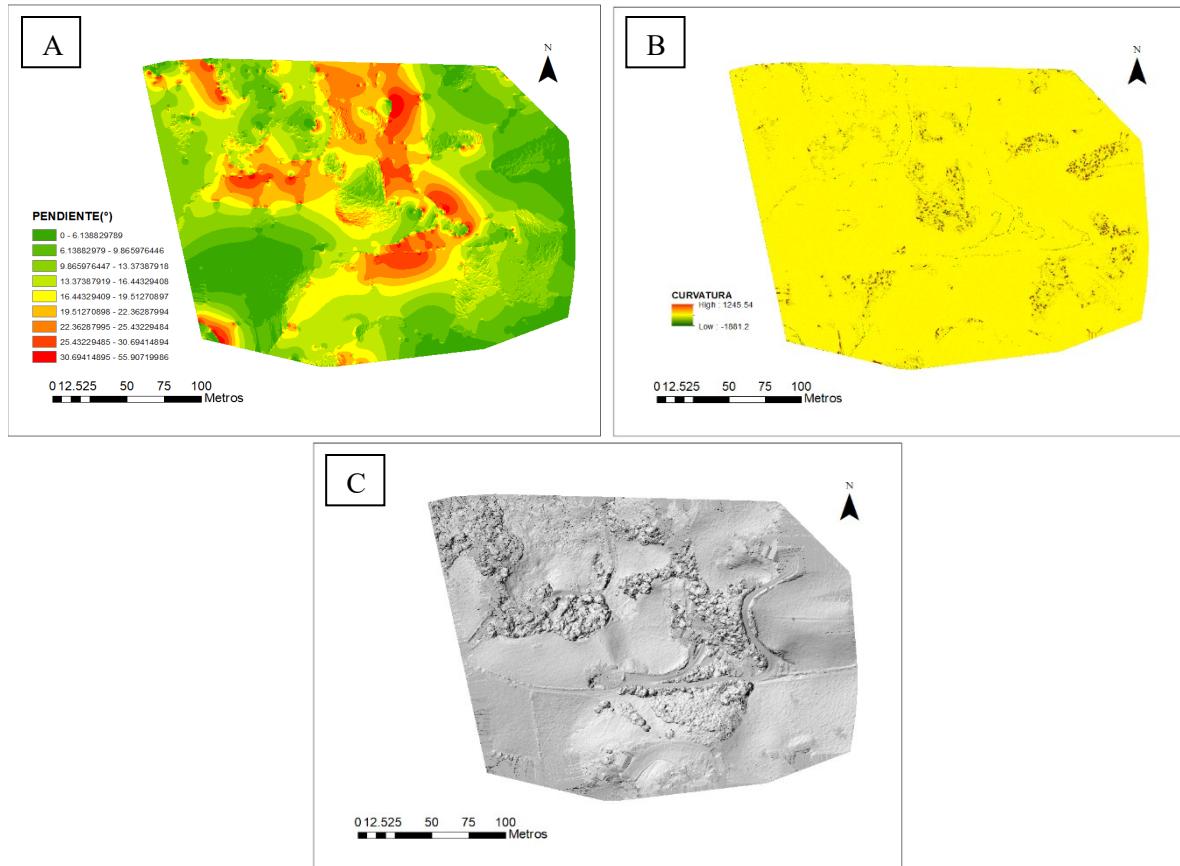


Figura 16. Características topográficas derivadas de DSM y DTM (Primera toma). Mina La Vuelta: **A.** Pendiente **B.** Curvatura **C.** Hillshade derivado del DSM

De igual manera que con las minas El Triunfo y El Cardonal, se utilizó la función Hillshade de ArcGIS para generar el mapa de sombras y relieve para cada toma de datos correspondiente (Ver Figura 16.C y Figura 42). Permitiendo evidenciar en detalles características como vías de acceso, coberturas vegetales y relieves asociados, permitiendo una visión complementaria con respecto al índice TGI generado. Igualmente, a partir de los DTM correspondiente a cada toma de datos se utilizaron las funciones de pendiente y curvatura. Con respecto a la función pendiente de la primera toma de datos (Ver Figura 16.A) se observa que las pendientes altas ( $16.44^\circ$  a  $55.90^\circ$ ) se ubican en la zona Norte, Noroeste y un pequeño sector en el Sur, mientras las pendientes bajas ( $0^\circ$  a  $16.44^\circ$ ) se encuentran circundantemente a las pendientes altas. Respecto a la función de pendiente de la segunda toma de datos (Ver Figura 43) se observa de igual manera que las pendientes altas ( $16.72^\circ$  a  $60.89^\circ$ ) se concentran en las mismas zonas respecto a la primera toma de datos y de igual manera las pendientes bajas ( $0.017^\circ$  a  $16.72^\circ$ ). Se puede evidenciar que las altas pendientes se concentran tanto en elevaciones bajas como altas, además, se observa un aumento de pendiente de  $5^\circ$  aproximadamente en zonas donde hay presencia de vegetación alta y alrededor de infraestructuras asociadas a la minería.

Finalmente, se generaron las funciones de curvatura (Ver Figura 16.B y Figura 44) correspondiente para cada toma de datos apartir de los DTM. A nivel general se puede evidenciar en ambos registros una tendencia de los valores a cero, es decir, superficies lineales. Se observan algunas valores negativos y positivos, correspondientes a superficies convexas y concavas hacia arriba respectivamente, sin embargo, en muy pequeña proporción respecto a la tendencia linea, por lo tanto en general, los cambios de velocidad de flujo y la erosión asociada seran pocos.

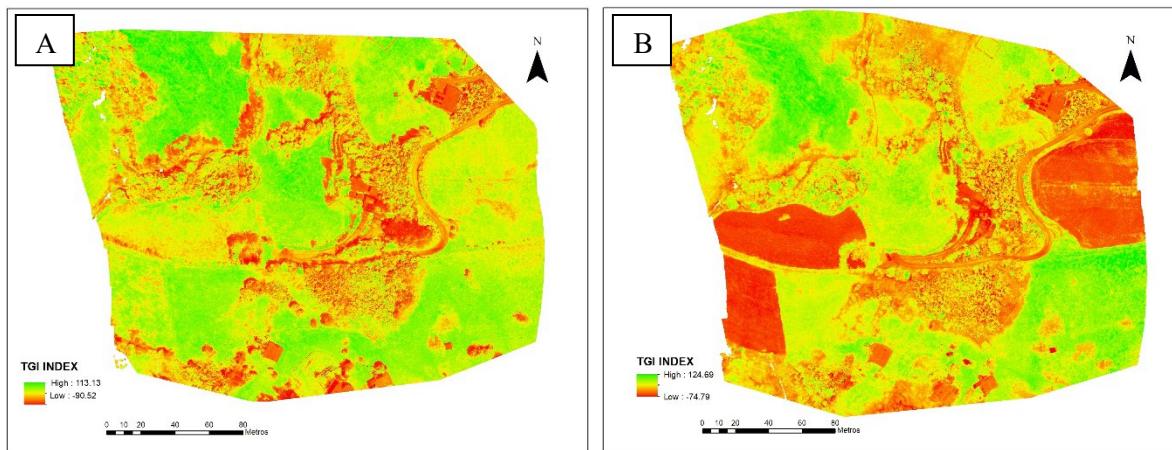


Figura 17. Índice TGI Mina La Vuelta: A. Primer registro fotográfico B. Segundo registro fotográfico

Por otro lado, nuevamente se generaron los índices TGI correspondientes a las dos tomas de datos realizadas. Respecto al índice TGI asociado a la primera visita (Ver Figura 17.A) se puede observar como las coberturas correspondientes a vías de acceso, construcciones (asociadas a la minería y de carácter residencial) y sombras presentan valores negativos. Se observa a nivel general coberturas de pasto con altos niveles de producción clorofílica pero también zonas afectadas con tonalidades amarillentas, tal como se puede evidenciar en la zona Suroeste, en donde se identifica claramente dos lotes diferenciados, el lote del lado izquierdo evidencia valores más bajos de producción clorofílica respecto al lote del lado derecho, además, las geometrías rectas evidencian que los lotes son destinados a labores de agricultura o pastoreo. Adicionalmente, hacia la zona Este se puede delimitar otro lote con pastos de niveles altos e intermedios de producción clorofílica. Respecto al índice TGI de la segunda toma de datos (Ver Figura 17.B) se puede observar en primer lugar una disminución de valores negativos en zonas con presencia de vegetación alta asociados principalmente a sombras, ya que en esta fecha las condiciones climáticas posibilitaron la eliminación de este factor.

La característica más evidente en este segundo registro es la aparición de grandes zonas con valores negativos (tonalidades rojas) asociados a lotes destinados a cultivos, lotes que anteriormente fueron mencionados y corresponden a aquellos que en la primera toma de fotos evidenciaban menor salud vegetal, de manera que se evidencia la rotación de lotes destinada a cultivos. Por otro lado, hacia la zona Norte y Central se evidencia una disminución de la producción clorofílica de las coberturas vegetales respecto a la primera toma de datos, hecho asociado al factor hidrometeorológico y el fuerte verano desarrollado durante los días anteriores. Adicionalmente, hacia la zona Norte se evidencia que durante estos dos meses se

talaron arboles posiblemente con el fin de tener material para la sustentación de las galerías, teniendo en cuenta que la mina está en constante crecimiento y expansión. En síntesis, en la mina La Vuelta se puede evidenciar la constante alteración de la salud de vegetación (incluyendo recuperación y desgaste) potenciada por factores como el régimen climático, actividades agrícolas (teniendo en cuenta la rotación de lotes y tiempos de cultivo) y el mantenimiento de la infraestructura minera respecto a la tala de árboles.

#### 4.1.2 Análisis de subsidencia

Como se mencionó anteriormente, se generaron varias transectas a lo largo de los ortofotomosaicos para evidenciar si en el periodo de dos meses hubo cambios significativos de elevación en las minas estudiadas. Los perfiles topográficos se generaron a partir de los DTM obtenidos, de manera que reflejan el cambio de elevación con respecto al terreno, eliminando el factor de la vegetación presente. Se generaron dos transectas con el fin de tener dos trayectos de comparación y así, una visión general de la zona de estudio. Adicionalmente, teniendo en cuenta que las áreas de cobertura o polígonos utilizados como referencia para la toma de fotografías aéreas cambiaron entre toma de datos, se procuró trazar las transectas en áreas presentes en ambos polígonos y con buena superposición de imágenes. De manera que las transectas generadas son idénticas tanto en longitud como orientación en ambos ortofotomosaicos. El análisis de los perfiles topográficos se realizó cualitativamente mas no cuantitativamente, ya que como se observa a continuación, se obtuvieron cambios de elevación absoluta del orden de 15 metros en algunos casos, cambios de elevación que considerando el intervalo de tiempo entre la toma de datos no son asociados a procesos de subsidencia sino a los errores propios asociados al sistema GPS (descritos en el marco teórico) utilizado por el dron. De manera que, el análisis se realiza a partir de la elevación relativa, teniendo en cuenta que para cada transecta se tienen dos puntos de control y por lo tanto permite evidenciar cambios del perfil topográfico correspondiente a la morfología del sector.

##### 4.1.2.1 Mina El Triunfo

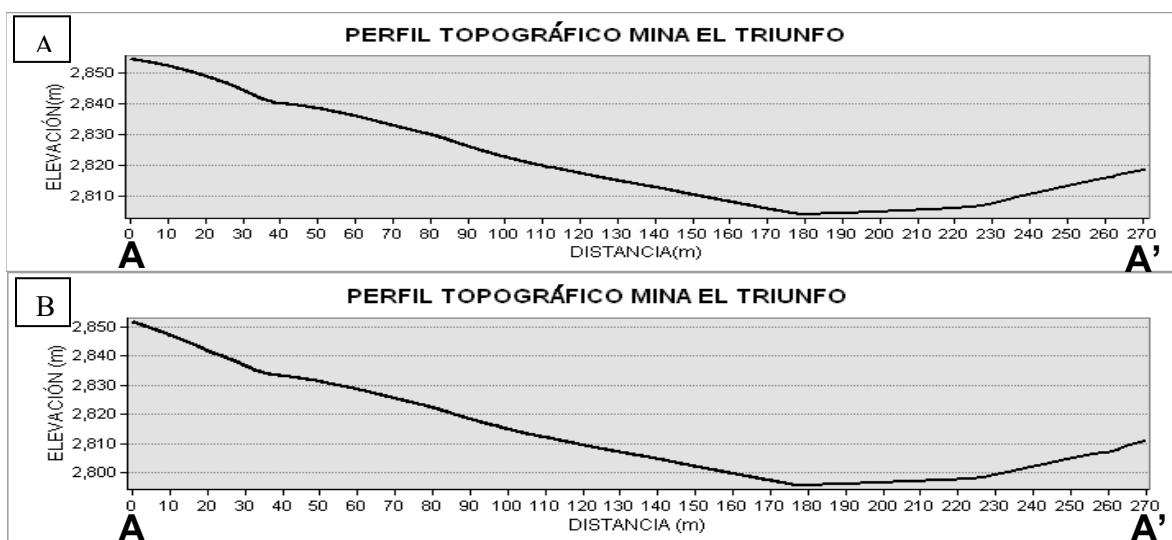


Figura 18. Perfiles Topográficos A-A' Mina El Triunfo: A. Primer Registro. B. Segundo Registro.

En cuanto a las transectas A-A' generadas para ambas tomas de datos (Ver Figura 18A y 18B), cubren una longitud de 270 metros a lo largo de la dirección Suroeste-Noreste. De acuerdo con los puntos de control (inicio y final de las transectas) se evidencia una diferencia de elevación entre 5 a 10 metros (asociados al alto grado de imprecisión del GPS) entre los perfiles topográficos. Por otro lado, los perfiles topográficos indican que la geomorfología del sector no varía; sin embargo, en los extremos del perfil topográfico de la segunda toma de datos se observa descenso que podría interpretarse como asentamiento del suelo (terreno). No obstante, es necesario considerar que, la sobreposición de imágenes fotográficas es óptima en el sector central, mientras que lateralmente presenta cobertura parcial; por lo que las diferencias de elevación son discutibles.

En relación con las transectas B-B' las cuales tienen una extensión de 260 metros a lo largo de la dirección Noroeste-Sureste (Ver Figura 19.A y 19.B), se observa una diferencia de elevación entre los puntos control (inicio y final de la transecta) de 5 a 6 metros asociados nuevamente a imprecisión del GPS. En este caso los perfiles en los puntos de 0 a 70 metros no se sobreponen perfectamente debido a la cantidad de imágenes sobreuestas en los bordes como se explicó antes, hecho evidenciado igualmente en los puntos de 240 a 260 metros. Sin embargo, en la zona central donde hay optima sobreposición de imágenes se observa asentamiento del perfil de la segunda toma de datos en el tramo entre los puntos de 130 metros y 200 metros, tramo en el cual de acuerdo con los ortofotomosaicos se encuentran las galerías de la mina. De manera que el asentamiento observado puede estar asociado directamente con la actividad minera llevada a cabo.

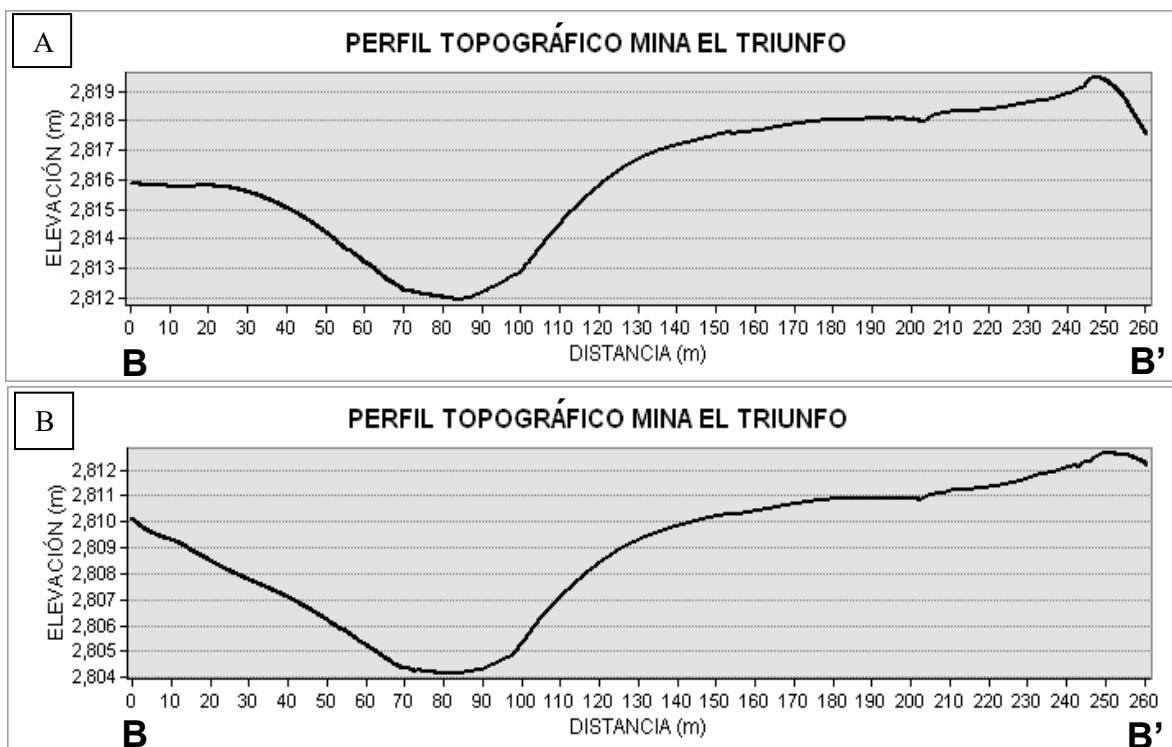


Figura 19. Perfiles Topográficos B-B' Mina El Triunfo: A. Primer Registro. B. Segundo Registro.

#### 4.1.2.2 Mina El Cardonal

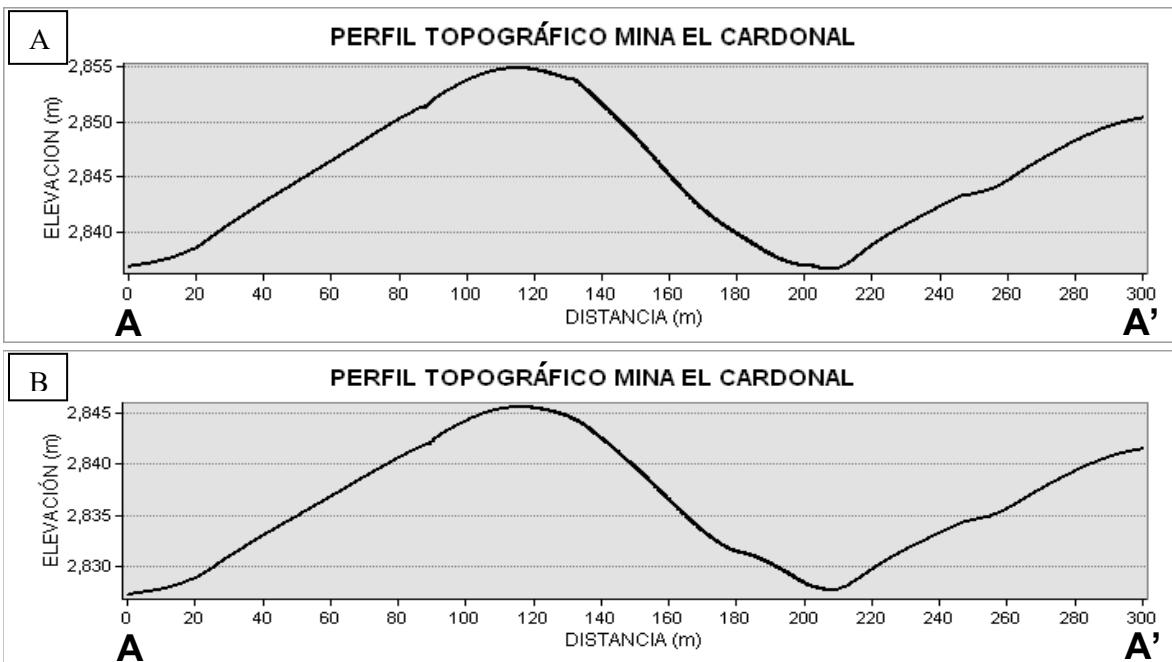


Figura 20. Perfiles Topográficos A-A' Mina El Cardonal: A. Primer Registro. B. Segundo Registro.

Las transectas A-A' cubren una longitud de 300 metros a lo largo de la dirección Oeste-Este (Ver Figura 20A y 20B). De acuerdo con los puntos inicial y final de las transectas, se puede observar una diferencia de elevación de entre 9 a 11 metros como resultado directo de la imprecisión del GPS. Adicionalmente, a nivel general los perfiles topográficos evidencian en el sector de estudio una morfología invariable, determinada por la superposición perfecta de ambos perfiles topográficos a lo largo de gran parte de la transecta. Sin embargo, en la zona central (distancia de 160 a 220 metros) se evidencia levantamiento del terreno en el perfil topográfico de la segunda toma de datos (Ver Figura 20B). Levantamiento que teniendo en cuenta el intervalo de tiempo del estudio no estaría asociado con procesos geológicos sino con el manejo antrópico de la zona, ya que en el tramo mencionado se ubican las galerías de la mina, por lo que material estéril depositado y/o carbón esperando para ser transportado podrían dar una lectura positiva de levantamiento.

Respecto a las transectas B-B' que tienen una extensión aproximada de 240 metros a lo largo de la dirección Sur-Norte (Ver Figura 21A y 21B) se observa una diferencia de altura entre 8 y 10 metros a partir de los puntos de control (inicio y final de la transecta). En los extremos de los perfiles topográficos se evidencia variación de alturas (asentamiento al inicio y levantamiento al final) que si bien pueden ser un indicio de los procesos dinámicos que ocurren en la zona, son asociados principalmente a la cantidad de fotografías sobreuestas en los bordes como se explicó anteriormente. Por otro lado, de igual manera que las transectas A-A' (Ver Figura 20A y 20B), el perfil de la segunda toma de datos permite identificar una zona de levantamiento entre los puntos de 70 a 130 metros, correspondiente a la misma zona cuyo levantamiento estaría asociado a un manejo antrópico en las transectas A-A'.

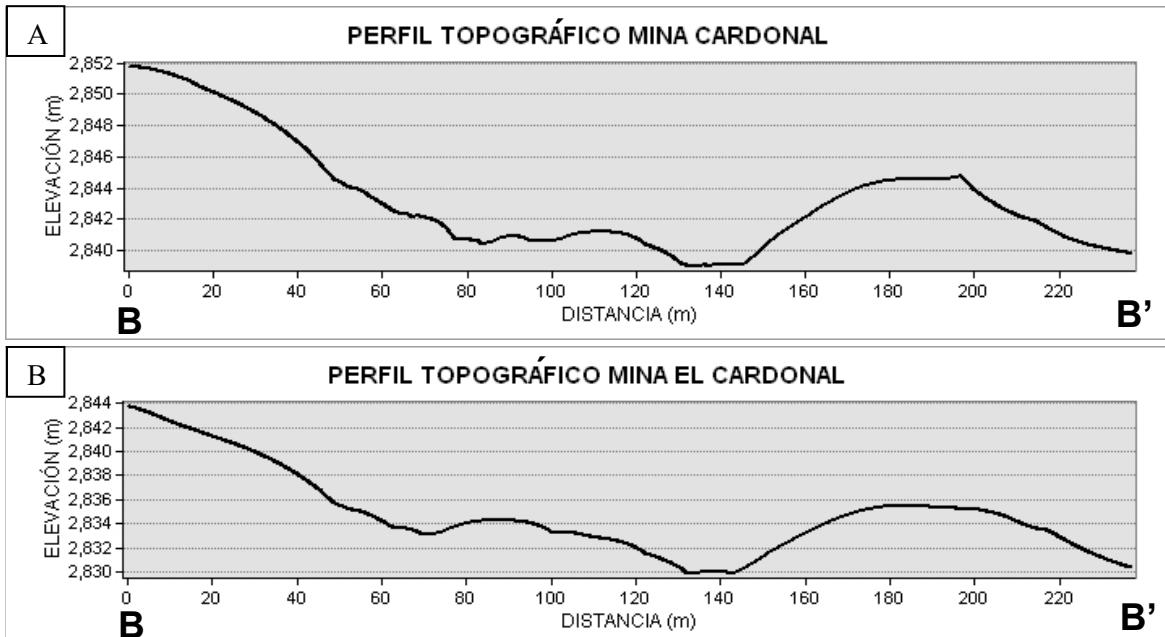


Figura 21. Perfiles Topográficos B-B' Mina El Cardonal: A. Primer Registro. B. Segundo Registro.

#### 4.1.2.3 Mina La Vuelta

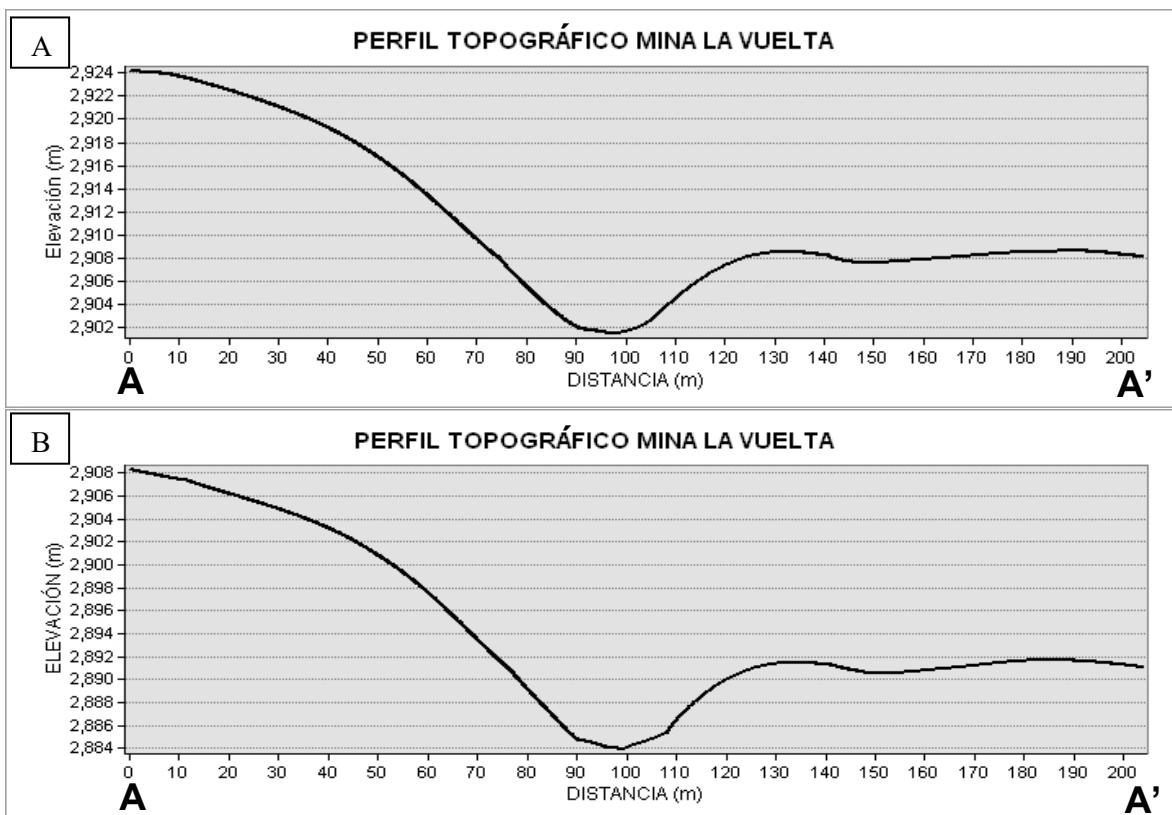


Figura 22. Perfiles Topográficos A-A' Mina La Vuelta: A. Primer Registro. B. Segundo Registro.

Las transectas A-A' cubren una extensión de aproximadamente 205 metros a lo largo de la dirección Sur-Norte (Ver Figura 22A y 22B). De acuerdo con el punto inicial y final de las transectas, se observa una diferencia de altura de entre 16 a 18 metros asociados al factor de error correspondiente al GPS. A nivel general, se evidencia que los dos perfiles topográficos representan de manera similar la morfología de la zona, sin embargo, entre los puntos de 30 a 90 metros se observa en el perfil topográfico de la segunda toma de datos levantamiento, mientras de 105 a 120 metros aproximadamente se observa asentamiento en relación con primer perfil topográfico. Si bien son procesos que pueden estar llevándose a cabo asociados a la agricultura y minería desarrollada en la zona, es necesario considerar factores de error como diferencias mínimas de cobertura entre las transectas generadas.

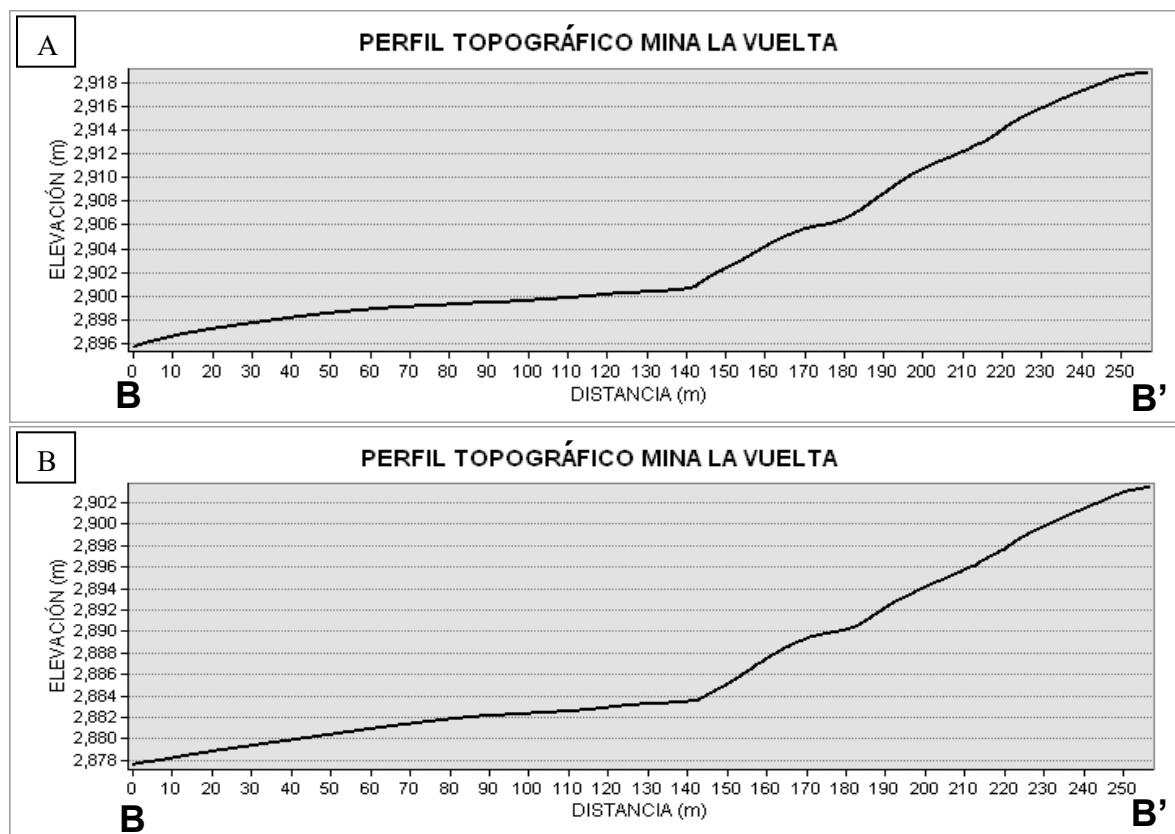


Figura 23. Perfiles Topográficos B-B' Mina La Vuelta: A. Primer Registro. B. Segundo Registro.

En relación con los perfiles topográficos B-B' que se extienden 260 metros a lo largo de la dirección Oeste-Este (Ver Figura 23A y 23B) se evidencia una diferencia de altura entre los puntos de control (inicio y final de la transecta) de 15 a 18 metros asociados a la imprecisión del GPS. A nivel general, comparando los dos perfiles topográficos se observa una buena representación morfológica de la zona; el perfil topográfico de la segunda toma de datos permite determinar asentamiento del terreno entre el inicio de la transecta y 60 metros después, sin embargo, hay que tener en cuenta que la zona descrita se ubica en el borde del polígono donde la sobreposición de imágenes no es la mejor. Adicionalmente, en el rango entre 160 y 190 metros se observa levantamiento que de acuerdo con el ortofotomosaico (Ver Figura 15B) corresponde a carreteable, de manera que se asocia a imprecisión del equipo.

## 4.2 Análisis Imágenes Satelitales Sentinel 2A

### 4.2.1 Clasificación No Supervisada

A partir de las imágenes satelitales de Sentinel 2A disponibles abiertamente, se seleccionaron aquellas en las cuales los Municipios de Lenguazaque y Guachetá eran totalmente visibles y presentaban poca nubosidad. Teniendo en cuenta lo anterior, se utilizaron dos imágenes satelitales con un intervalo de 3 años entre ellas, siendo la primera imagen tomada el 10 de Enero del 2016 y la segunda imagen el 3 de Febrero del 2019. El procesamiento de las imágenes se desarrolló en el software PciGeomatica mediante la herramienta Focus; en primer lugar, si bien las imágenes satelitales utilizadas incluyen a los Municipios del estudio, se generaron máscaras con los respectivos archivos shapes de los Municipios para eliminar toda información no necesaria. Posteriormente, se desarrolló una Clasificación No Supervisada mediante el algoritmo K-Means para cada uno de los Municipios en las imágenes satelitales obtenidas. Adicionalmente, se aplicó al resultado de la Clasificación No Supervisada un filtro 3x3 de moda para evitar tener zonas sin valores asociados. La clasificación se realizó con un máximo de 16 bandas, sin embargo, de forma manual se modificaron y agruparon las diferentes coberturas para posteriormente generar el producto cartográfico final en ArcGIS.

Las coberturas tenidas en cuenta para la Clasificación No Supervisada fueron: Bosques (áreas de poca actividad humana y poca intervención, distinguidas por una tonalidad más oscura y textura frondosa (Torres, 2018), vegetación herbácea (asociada directamente con actividades relacionadas con ganadería mas no destinadas con ese fin, como mantenimiento de animales), pasto seco (asociado a la rotación de lotes con fines agrícolas y ganaderos), agricultura (zonas con gran actividad agrícola en las imágenes correspondientes, diferenciadas del pasto seco por su extensión y agrupación en determinadas zonas), construcciones (incluyendo cabeceras municipales, centro poblados e infraestructura asociada a la minería y agricultura principalmente) y finalmente cuerpos de agua presentes.

#### 4.2.1.1 Municipio de Lenguazaque

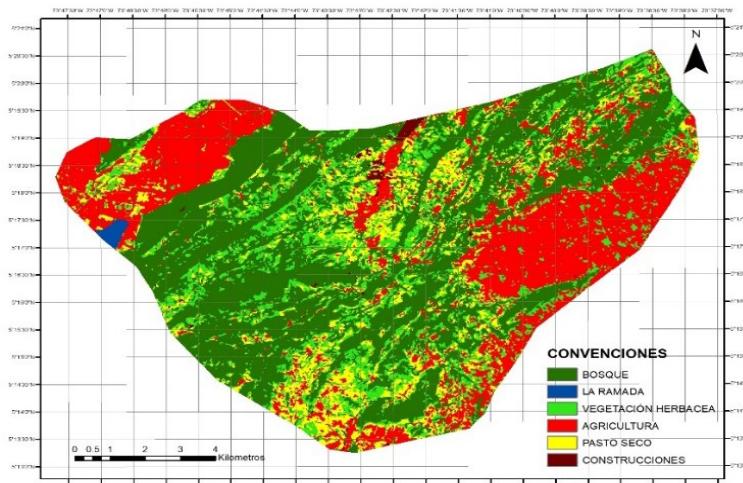


Figura 24. Clasificación No Supervisada Municipio de Lenguazaque. 10 de Enero del 2016

La Clasificación No Supervisada correspondiente al año 2016 (Ver Figura 24) respecto a las coberturas y extensiones correspondientes (Ver Tabla 2) evidencian 6163.12 hectáreas de bosque y 2657.63 hectáreas de vegetación herbácea distribuidas a lo largo del municipio. Además, 3864.24 hectáreas dedicadas a la agricultura principalmente al noreste y noroeste del municipio mientras que las 1700.62 hectáreas de pasto seco se concentran a lo largo de la zona central. Finalmente se evidencia una extensión del cuerpo de agua “La Ramada” de 48.76 hectáreas y 102.44 hectáreas asociadas a construcciones con la cabecera municipal en la zona norte.

COBERTURA	EXTENSION (HECTAREAS)
BOSQUE	6163.12
LA RAMADA	48.76
VEGETACIÓN HERBACEA	2657.63
AGRICULTURA	3864.24
PASTO SECO	1700.62
CONSTRUCCIONES	102.44

Tabla 2. Extensión de las coberturas en el Municipio de Lenguazaque 2016

Por otro lado, para el año 2019 (Ver Figura 25 y Tabla 3) se evidencia una disminución de las coberturas de bosque y vegetación herbácea en un 7.46% (5735.21 hectáreas totales) y 47.31% (1804 hectáreas totales) respectivamente en relación con el año 2016. Adicionalmente, se observa un aumento en las coberturas de agricultura del 20.13% (4838.41 hectáreas totales), 13.20% de pasto seco (1959.45 hectáreas totales), 1.67% de La Ramada (49.59 hectáreas totales) y 31.77% de construcciones (150.15 hectáreas totales).

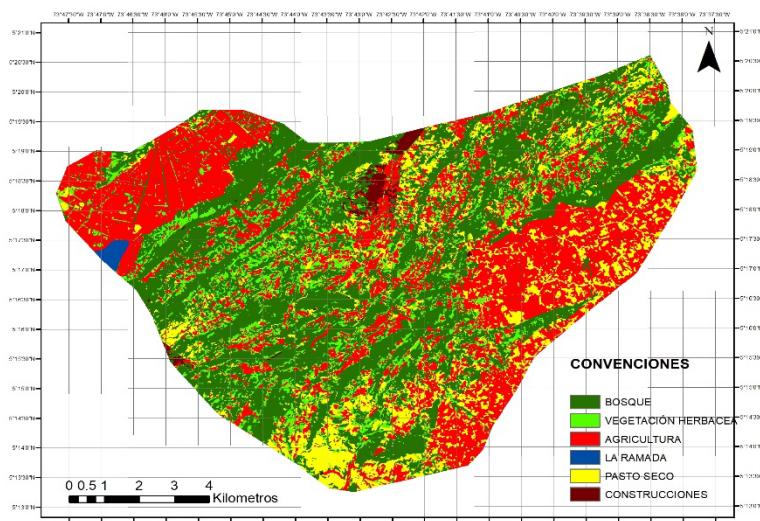


Figura 25. Clasificación No Supervisada Municipio de Lenguazaque. 3 de Febrero del 2019

COBERTURA	EXTENSION (HECTAREAS)
BOSQUE	5735.21
LA RAMADA	49.59
VEGETACIÓN HERBACEA	1804
AGRICULTURA	4838.41
PASTO SECO	1959.45
CONSTRUCCIONES	150.15

Tabla 3. Extensión de las coberturas en el Municipio de Lenguazaque 2019

La disminución de la cobertura de bosque puede estar asociada directamente con los usos condicionados aprobados por la alcaldía municipal, mediante los cuales se brinda licencias de uso gradual con diferentes fines como agropecuarios (Alcaldía Municipal de Lenguazaque, 2000), siempre y cuando se recupere el bosque eliminado temporalmente; hecho sustentado por la aparición de zonas dedicadas a la agricultura en el lado noreste del municipio en donde de acuerdo con la Clasificación No Supervisada del 2016 había bosque. Adicionalmente, se observan nuevas coberturas asociadas a la agricultura en donde antes había vegetación herbácea, por lo tanto, se evidencia la disminución de este último. Respecto al pasto seco, al estar ligado directamente con la rotación de lotes asociados a fines agropecuarios, un aumento de los lotes destinados con este fin generara igualmente un aumento de pasto seco, sin embargo, el aumento puede estar propiciado por un régimen climático de verano más marcado. Finalmente se evidencia un aumento de hectáreas construidas asociadas al crecimiento de industrias como la minería (mayor cantidad de hornos y parqueaderos) y la agricultura, además, de manera simultánea se generan nuevas vías de acceso y viviendas como resultado del desarrollo de estas industrias.

#### 4.2.1.2 Municipio de Guachetá

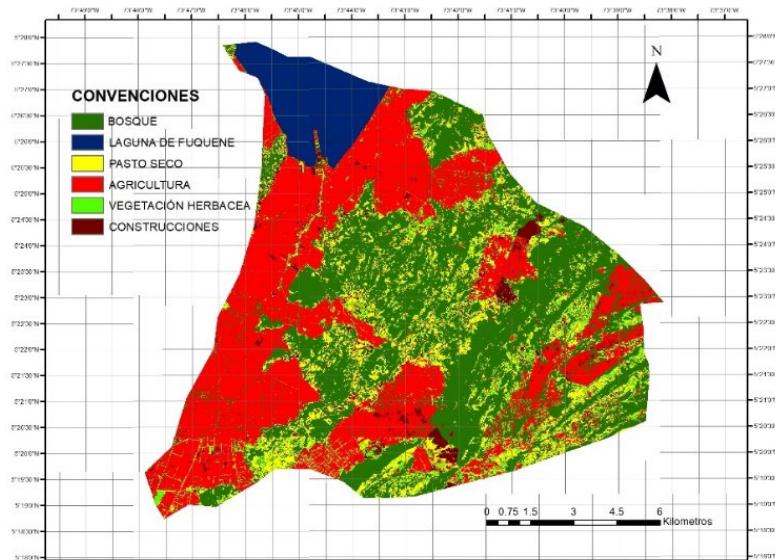


Figura 26. Clasificación No Supervisada Municipio de Guachetá. 10 de Enero del 2016

La clasificación No Supervisada del Municipio de Guachetá para el año 2016 y sus respectivas coberturas (Ver Figura 26 y Tabla 4) evidencian 5761.3 hectáreas de bosque y 642.99 hectáreas de vegetación herbácea, además, 5613.01 hectáreas de agricultura concentrada principalmente en la zona norte y oeste del municipio y 1726.46 hectáreas de pasto seco en zonas circundantes a la cobertura de agricultura. Finalmente se registran 565.68 hectáreas correspondientes a construcciones (asociadas al casco urbano, actividades agropecuarias e industrias mineras) y 1215.16 hectáreas asociadas a la zona sur de la Laguna de Fúquene. Hacia la zona sur de la Figura 26 se evidencia un borde demarcado a lo largo del municipio, generado debió a que para la clasificación del municipio de Guachetá se tuvieron que unir dos imágenes, por lo que el empalme no fue totalmente exacto, para estudios más profundos se debe hacer correcciones atmosféricas, sin embargo, no es el caso.

COBERTURA	EXTENSION (HECTAREAS)
BOSQUE	5761.3
LAGUNA DE FUQUENE	1215.16
VEGETACIÓN HERBACEA	642.99
AGRICULTURA	5613.01
PASTO SECO	1726.46
CONSTRUCCIONES	565.68

Tabla 4. Extensión de las coberturas en el Municipio de Guachetá 2016

Por otro lado, para el año 2019 (Ver Figura 27 y Tabla 5) se evidencia únicamente la disminución de las hectáreas de bosque en 13.99% (5053.84 hectáreas totales) y de la Laguna de Fúquene en 1.04% (1202.54 hectáreas totales). Mientras que coberturas como la vegetación herbácea, agricultura, pasto seco y construcciones aumentaron en 22.94% (834.45 hectáreas totales), 6.15% (6004.21 hectáreas totales), 0.13% (1728.71 hectáreas totales) y 19.28% (700.85 hectáreas totales) respectivamente.

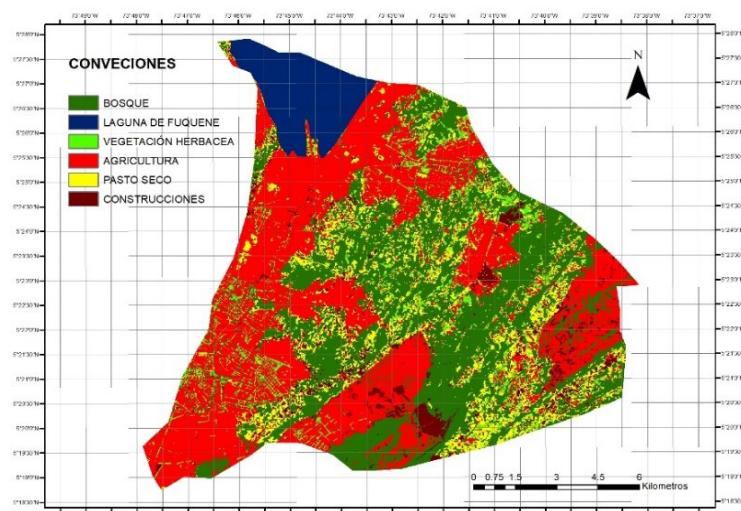


Figura 27. Clasificación No Supervisada Municipio de Guachetá. 3 de Febrero del 2019

COBERTURA	EXTENSION (HECTAREAS)
BOSQUE	5053.84
LAGUNA DE FÚQUENE	1202.54
VEGETACIÓN HERBACEA	834.45
AGRICULTURA	6004.21
PASTO SECO	1728.71
CONSTRUCCIONES	700.85

Tabla 5. Extensión de las coberturas en el Municipio de Guachetá 2019

Respecto a la disminución de la extensión de la cobertura bosque en cerca de 700 hectáreas puede estar asociada directamente con la política de producción directa por parte de la Alcaldía Municipal de Guachetá (2000) en la cual avala la desaparición temporal de bosque con fines de producción industrial tal como en el Municipio de Lenguazaque siempre y cuando haya una recuperación posterior de este. Teniendo en cuenta lo anterior, puede explicarse el aumento en cerca de 400 hectáreas de las zonas destinadas a la agricultura y de igual manera el aumento de la cobertura de pasto seco asociada con la rotación de las zonas destinadas a la industria agropecuaria. Por otro lado, se evidencia una disminución de la cobertura de la Laguna de Fúquene que de acuerdo con la Figura 27 estaría asociada a un aumento de la vegetación herbácea y actividad agrícola en los límites del cuerpo de agua. Adicionalmente, se evidencia un aumento de la vegetación herbácea en áreas donde antes había pasto seco, asociado posiblemente a lotes que dejaron de pertenecer a la industria agropecuaria.

Finalmente, se evidencia un aumento en la cobertura de construcciones de 135 hectáreas aproximadamente; observando, por ejemplo, mayor cantidad y expansión de parqueaderos y hornos destinados a la industria del carbón en la zona sur del municipio, expansión de la cabecera municipal y mayor infraestructura vial.

#### 4.2.2 Índice NDVI

De igual manera que la Clasificación No Supervisada desarrollada anteriormente, se utilizaron las imágenes Sentinel 2A con un intervalo de 3 años de diferencia correspondientes a los municipios de Lenguazaque (Ver Figura 45 y 46) y Guachetá (Ver Figura 47 y 48) para calcular el índice NDVI a partir de la bandapectral del rojo y del infrarrojo. Si bien no se puede desarrollar a cabo un análisis cuantitativo preciso teniendo en cuenta que los índices evidencian valores significativamente diferentes (asociado a la necesidad de llevar acabo correcciones tal como la atmosférica) entre el intervalo de tiempo dispuesto, se puede llevar a cabo un análisis cualitativo que permita evidenciar las diferentes coberturas descritas en el análisis de la sección 4.2.1.

#### 4.2.2.1 Municipio de Lenguazaque

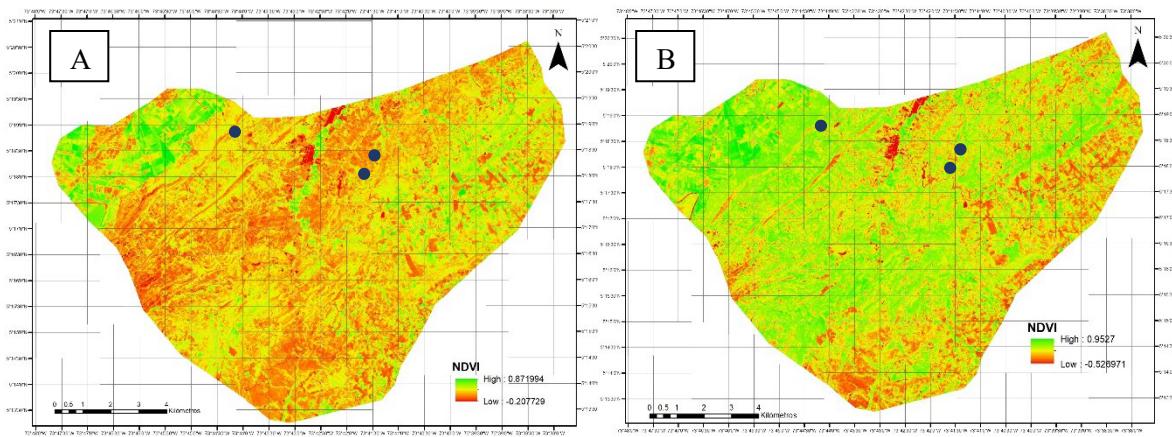


Figura 28. Índice NDVI Municipio de Lenguazaque y marcadores minas estudiadas. A. 10 de Enero del 2016 B. 3 de Febrero del 2019

El índice NDVI correspondiente al año 2016 (Ver Figura 28.A) evidencia un valor de reflectancia máximo de 0.88 y un valor mínimo de -0.20, hecho por el que se observa la predominancia de valores negativos (ya que el rango de valores es menor y estos se concentran en la zona negativa) mientras que el índice NDVI del año 2019 (Ver Figura 28.B) evidencia un valor máximo de reflectancia de 0.95 y mínimo de -0.53, de manera que al tener un rango más amplio de valores, se obtiene una imagen que resalta de mejor forma las diferentes zonas. De acuerdo con el índice NDVI del año 2019 se evidencia en primer lugar dos zonas de valores negativos predominantes. La primera en el Sur, bien diferenciada por la Clasificación No Supervisada (Ver Figura 25) y descrita como pasto saco y la segunda en el Este, asociada a la rotación de lotes destinados la agricultura e igualmente bien diferenciada en la Clasificación No Supervisada correspondiente. Adicionalmente, en el Norte se observan dos zonas de reflectancia baja clasificadas como construcciones (parqueaderos y/o hornos asociados a la industria del carbón) y finalmente valores altos a lo largo del municipio que de acuerdo con la imagen RGB (Ver Figura 46) se pueden identificar como cobertura de bosque y agricultura; coberturas confirmadas por la Clasificación No Supervisada.

Si bien el índice NDVI del año 2016 evidencia mayores zonas de reflectancia baja como se explicó anteriormente, resalta de igual manera las zonas descritas anteriormente. Zonas evidenciadas correctamente en la Clasificación No Supervisada correspondiente (Ver Figura 24). De manera que de acuerdo con los índices NDVI desarrollados se confirman las coberturas descritas en la sección 4.2.1.1.

#### 4.2.2.2 Municipio de Guachetá

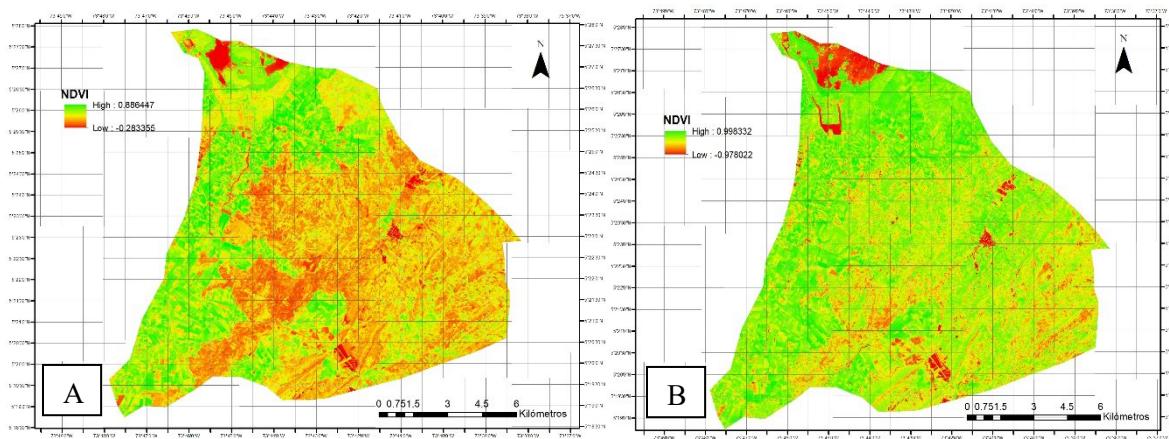


Figura 29. Índice NDVI Municipio de Guachetá. A. 10 de Enero del 2016 B. 3 de Febrero del 2019

De acuerdo con el índice NDVI correspondiente al año 2016 (Ver Figura 29.A) se observa un valor de reflectancia máximo de 0.88 y un valor mínimo de -0.28, evidenciando un rango menor de valores tal como en el caso del índice NDVI del municipio de Lenguazaque para el mismo año (Ver Figura 28.A). Por otro lado, el índice NDVI del año 2019 evidencia un valor máximo de reflectancia de 0.99 y un valor mínimo de -0.98. En primer lugar, se observa en ambos índices valores bajos de reflectancia en la zona Norte asociados a la turbidez presente en la Laguna de Fúquene. Adicionalmente, en ambos índices se observan 3 zonas (Sur, Norte y parte central del municipio) con los valores de reflectancia más bajos que de acuerdo con las Clasificaciones No Supervisadas correspondientes (Ver Figura 26 y 27) corresponden a la cabecera municipal y construcciones tales como parqueaderos y hornos de carbón.

Finalmente se observa que los valores más altos asociados al índice NDVI son correctamente representados en la Clasificación No Supervisada y corresponden efectivamente a coberturas de bosque y vegetación herbácea, mientras que los valores negativos son asociados a la cobertura de pasto seco. De acuerdo con los índices NDVI desarrollados se puede determinar la correcta clasificación de coberturas descritas en la sección 4.2.1.2.

## 5. Conclusiones

De acuerdo con el procedimiento llevado a cabo y los diferentes productos obtenidos del procesamiento de las imágenes satelitales y fotografías aéreas en los intervalos de tiempo correspondientes, se logró evidenciar en primer lugar en un intervalo de tiempo de dos meses, la alteración de las coberturas presentes en diferentes minas asociadas a la explotación de carbón en el municipio de Lenguazaque. El índice TGI permitió identificar satisfactoriamente cambios en las coberturas asociados a procesos tales como: ganadería, agricultura, tala de árboles y adecuaciones de la infraestructura necesaria para el desarrollo de la actividad minera llevada a cabo en estas zonas.

Dentro de los cambios observados, se evidencia principalmente el aumento y/o disminución de la salud de la vegetación en zonas dedicadas a la agricultura y rotación de ganado; alteraciones que, si bien pueden estar asociadas a los procesos mencionados anteriormente, son además potenciadas por el régimen climático de verano presente durante el estudio. Adicionalmente, se determinó una disminución de los árboles presentes, debido a que en las minas donde se realizó el estudio, constantemente generan nuevas galerías y requieren material para la sustentación de estas. Por otro lado, mediante las funciones de pendiente y curvatura generadas, se logró identificar zonas propensas a erosión y las velocidades de flujo asociadas; funciones que como se esperaba no cambiaron significativamente en el intervalo de tiempo de dos meses. En síntesis, las fotografías aéreas obtenidas a partir del dron DJI Phantom 4 y su correspondiente procesamiento (índice TGI y funciones complementarias) permitieron evidenciar la evolución y alteración de las coberturas (en cuanto a salud de la vegetación) principalmente debido a las actividades antrópicas desarrolladas y el régimen climático, sin embargo, teniendo en cuenta que el intervalo de tiempo del estudio es pequeño, con el fin de evidenciar si las zonas en las que se presenta aumento y/o disminución de la salud de la vegetación se mantienen, es necesario realizar un análisis durante un mayor intervalo de tiempo, para así, poder determinar concretamente zonas ambientalmente afectadas.

Adicionalmente, de acuerdo con los perfiles topográficos obtenidos a partir de las fotografías aéreas con dron, se logró confirmar que esta tecnología emergente se postula como alternativa válida a la hora de realizar levantamientos topográficos y análisis preliminares de subsidencia. Teniendo en cuenta lo anterior, se evidencio que la morfología representada por los perfiles topográficos en ambos registros de datos fue muy similar, hecho que habla muy bien del dron, al no generar cambios abruptos de la morfología asociada en un intervalo de tiempo tan pequeño, lo cual nos permitió realizar un análisis relativo y de inspección de cambios en las alturas. Obteniendo zonas que en el segundo registro de datos evidencian levantamiento o asentamiento en relación con el primer registro; si bien los cambios evidenciados pueden corresponder realmente a la evolución morfológica de la zona, el análisis realizado no es absoluto, teniendo en cuenta que el intervalo de tiempo asociado es pequeño y además se tienen factores de error asociados principalmente al GPS utilizado por el dron y al procedimiento desarrollado.

Por otro lado, no se pudo realizar un análisis cuantitativo preciso de los perfiles topográficos, ya que, al no utilizar estaciones en tierra como puntos de control, se generaron cambios de altura con un rango aproximado de 5 a 18 metros entre los registros de datos, lo cual teniendo en cuenta el intervalo de tiempo no es posible de ninguna manera y tomado por lo tanto como factor de error. En síntesis, los perfiles topográficos obtenidos a partir de las fotografías aéreas con dron permitieron realizar un acercamiento inicial a la identificación de zonas en las que posiblemente se estarían llevando a cabo procesos de levantamiento o asentamiento del terreno, con un proceso de toma de datos mucho más rápido en comparación a las estaciones topográficas convencionales. Sin embargo, como se mencionó anteriormente, el procedimiento del dron no es eficaz por sí solo, para poder realizar un análisis absoluto es

necesario complementar la información con los datos proporcionados por las estaciones topográficas en tierra.

Con respecto a los índices NDVI y clasificaciones no supervisadas generadas para los municipios de Lenguazaque y Guachetá a partir de imágenes Sentinel 2A, permitieron evidenciar de manera cualitativa y cuantitativa, un desarrollo positivo (económicamente hablando) a lo largo del intervalo de 3 años (2016-2019) de las regiones estudiadas. Evidenciado por el aumento de las coberturas asociadas a zonas destinadas a la agricultura y ganadería, y al aumento de la infraestructura asociada a la minería. Sin embargo, el aumento de estas coberturas ha tenido como consecuencia una disminución de los bosques y un aumento de las zonas afectadas (en relación con la salud de la vegetación), por lo tanto, el procedimiento realizado permite tener una idea general de la evolución de las coberturas en los dos municipios estudiados, para así a futuro y con clasificaciones adicionales, plantear medidas de recuperación ambiental en caso tal que, coberturas como bosques no sean recuperadas como es establecido por las Alcaldías Municipales correspondientes en los Esquemas de Ordenamiento Territorial (2000).

En síntesis, el proyecto llevado a cabo permitió evidenciar como desde una escala local (fotografías aéreas mediante dron) y una escala regional (imágenes satelitales de los municipios), se puede analizar el cambio de coberturas asociados a los procesos antropocéntricos llevados a cabo, y así generar un análisis completo que en tenga en cuenta la evolución de las zonas estudiadas en ambas escalas espaciales.

## 6. Referencias

- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2017). *Carbón, el padrino minero de Colombia*, Tomado de [https://www.anm.gov.co/?q=carbon\\_el\\_padrino\\_minero\\_de\\_colombia\\_boletin\\_prensa](https://www.anm.gov.co/?q=carbon_el_padrino_minero_de_colombia_boletin_prensa)
- Agencia Nacional de Minería (ANM) (2018). *Informe de Producción por Minerales Primer Trimestre 2018*. Tomado de <https://www.anm.gov.co/?q=content/informe-de-produccion-por-minerales-primer-trimestre-2018>
- Alcaldía, municipio de Guachetá (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial del Municipio de Guachetá-Cundinamarca*.
- Alcaldía, municipio de Guachetá (Sin Fecha). *Nuestro Municipio*. Tomado de <http://www.guacheta-cundinamarca.gov.co/municipio/nuestro-municipio>
- Alcaldía, municipio de Lenguazaque (2000). *Esquema de Ordenamiento Territorial – acuerdo que adopta el plan*.
- Alcaldía, municipio de Lenguazaque (2015). *Plan de Desarrollo Municipal de Lenguazaque-Cundinamarca*.
- Ambiotec, U. T. (2006). *Elaboración de los estudios de diagnóstico prospectiva y formulación para la cuenca hidrográfica de los ríos Ubaté y Suárez (Departamento de Cundinamarca)*. Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca CAR. Bogotá DC: Informe de la Fase de Diagnóstico contrato de consultoría.
- Basterra, I. (2011). Cátedra De Fotointerpretación. *Universidad nacional del nordeste. Buenos Aires*.
- Bonneval, H. (Sin Fecha), *1a PART: FONAMENTS DE FOTOGRAMETRIA*.
- Casella, E., Rovere, A., Pedroncini, A., Stark, C. P., Casella, M., Ferrari, M., & Firpo, M. (2016). Drones as tools for monitoring beach topography changes in the Ligurian Sea (NW Mediterranean). *Geo-Marine Letters*, 36(2), 151-163.
- Cely Sierra, E. S. (2016). *Caracterización geológica y fisicoquímica de los carbones explotados por la Empresa INTERCARBON MINING SAS*. (tesis inédita de pregrado). Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Sogamoso, Colombia.
- Corporación Autónoma Regional de Cundinamarca (CAR) (2019). *Boletín Meteorológico Jurisdicción CAR*. Tomado de: <https://www.car.gov.co/uploads/files/5ca21fe12690d.pdf>
- Fernández-Lozano, J., & Gutiérrez-Alonso, G. (2016). Aplicaciones geológicas de los drones. *Revista de la Sociedad Geológica de España*, 29(1), 89-105.
- Gómez, J., Álvarez, O., y Cruz, R (2005). *Procesamiento de imágenes Landsat para la evaluación regional de estructuras con potencial gasopetrolífero*. Centro de Investigación y Desarrollo del Petróleo Washington 169, Cerro, Ciudad de la Habana, Cuba

González, M. E. P., & Rodríguez, M. P. G. (2013). Aplicaciones de la teledetección en degradación de suelos. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, (61).

Gutiérrez, M. A. (2005). Clasificación no supervisada de coberturas Vegetales sobre imágenes digitales de sensores Remotos: “landsat–etm+”. *Revista Facultad Nacional de Agronomía Medellín*, 58(1), 2611-2634.

Hunt Jr, E. R., Doraiswamy, P. C., McMurtrey, J. E., Daughtry, C. S., Perry, E. M., & Akhmedov, B. (2013). A visible band index for remote sensing leaf chlorophyll content at the canopy scale. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 21, 103-112.

Macedo-Cruz, A., Pajares-Martinsanz, G., & Santos-Peñas, M. (2010). Clasificación no supervisada con imágenes a color de cobertura terrestre. *Agrociencia*, 44(6), 711-722.

McKinnon, T., & Hoff, P. (2017). Comparing RGB-based vegetation indices with NDVI for drone based agricultural sensing. *Agribotix, LLC, AGBX021-17*.

McLaughlin, D., & Arce, M. (1975). *Mapa geológico del área Zipaquirá (Zona IV)*. INGEOMINAS. Bogotá.

Montoya, D. & Reyes, G. 2003. *Memoria explicativa Plancha 209. Zipaquirá (Departamento de Cundinamarca)*. INGEOMINAS. Bogotá.

Olynik, M. C. (2002). Temporal characteristics of GPS error sources and their impact on relative positioning. *University of Calgary: Calgary, Canada*.

Ortiz, A. A., Melgarejo, O. J. R., Álvarez, P. K. S., & León-Rincón, H. (2018). Uso de índices espectrales derivados de sensores remotos para la caracterización geomorfológica en zonas insulares del Caribe colombiano. *Perspectiva Geográfica: Revista del Programa de Estudios de Posgrado en Geografía*, 23(1), 6.

Paruelo, J. M. (2008). La caracterización funcional de ecosistemas mediante sensores remotos. *Revista Ecosistemas*, 17(3).

Quirós Rosado, E. M. (2014). *Introducción a la fotogrametría y cartografía aplicadas a la ingeniería civil*.

Rodríguez, P., Ardila, C., (1999). *Impacto socioeconómico y ambiental de la pequeña minería del carbón en los municipios de Zipaquirá, Nemocón, Cogua, Suesca, Tausa, Sutatausa, Cucunubá y Lenguazaque*. (tesis inédita de pregrado). Escuela Superior de Administración Pública. Bogotá D.C, Colombia.

Rokni, K., Ahmad, A., Selamat, A., & Hazini, S. (2014). Water feature extraction and change detection using multitemporal Landsat imagery. *Remote sensing*, 6(5), 4173-4189.

Rudas, G., Hawkins, D., & Sánchez, S. T. (2014). *La minería de carbón a gran escala en Colombia: impactos económicos, sociales, laborales, ambientales y territoriales*. Friedrich-Ebert-Stiftung.

- Sabins, J., y Floyd, F. (2007). *Remote sensing: principles and interpretation* (3rd ed). Waveland Press, Long Grove, Ill
- Schenk, T. (1997). Towards automatic aerial triangulation. *ISPRS Journal of Photogrammetry and remote Sensing*, 52(3), 110-121.
- Servicio Geológico Mexicano (SGM) (2014). *¿Qué es el Carbón Mineral?* Tomado de: <https://www.gob.mx/cms/uploads/attachment/file/157798/Que-es-el-carbon-mineral.pdf>
- Sexton, J. O., Urban, D. L., Donohue, M. J., & Song, C. (2013). Long-term land cover dynamics by multi-temporal classification across the Landsat-5 record. *Remote Sensing of Environment*, 128, 246-258.
- Sobrino, J. A. S. (2006). Introducción a la fotogrametría. Madrid: ETSI.
- Suh, J., & Choi, Y. (2017). Mapping hazardous mining-induced sinkhole subsidence using unmanned aerial vehicle (drone) photogrammetry. *Environmental Earth Sciences*, 76(4), 144.
- Torres, A., Rocha, J., Melo, D., & Peña, R. (2015). *El Carbón en Colombia ¿Quién Gana, ¿Quién Pierde? Minería, Comercio Global y Cambio Climático*. Centro de Estudios para la Justicia Social Tierra Digna, Bogotá, Colombia.
- Torres. D. (2018) Estimación Cualitativa de la Susceptibilidad de los Suelos a la Erosión Mediante Técnicas de Teledetección y de la Ecuación Universal de la Perdida de Suelos (EUPS) en el Municipio de Floresta, Boyacá. (tesis inédita de pregrado). Universidad de los Andes. Bogotá D.C, Colombia.
- Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote sensing of Environment*, 8(2), 127-150.
- Turvey, C. G., & McLaurin, M. K. (2012). Applicability of the Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) in index-based crop insurance design. *Weather, Climate, and Society*, 4(4), 271-284.
- Ulloa, C., & Rodríguez, E. (1991). *Memoria explicativa de la Plancha 190-Chiquinquirá*. INGEOMINAS, Bogotá, 26p.
- Viloria, J. (1998). *La economía del carbón en el Caribe colombiano*. Documentos de Trabajo Sobre Economía Regional y Urbana; No. 4. Centro de Investigaciones Económicas del Caribe Colombiano, Cartagena de Indias, Colombia.
- Wacaster, S. (2007). *The mineral industry of Colombia*. United States Geological Survey minerals yearbook.
- Wang, Q., Adiku, S., Tenhunen, J., & Granier, A. (2005). On the relationship of NDVI with leaf area index in a deciduous forest site. *Remote sensing of environment*, 94(2), 244-255.

## 7. Anexos

### DTM Mina El Triunfo

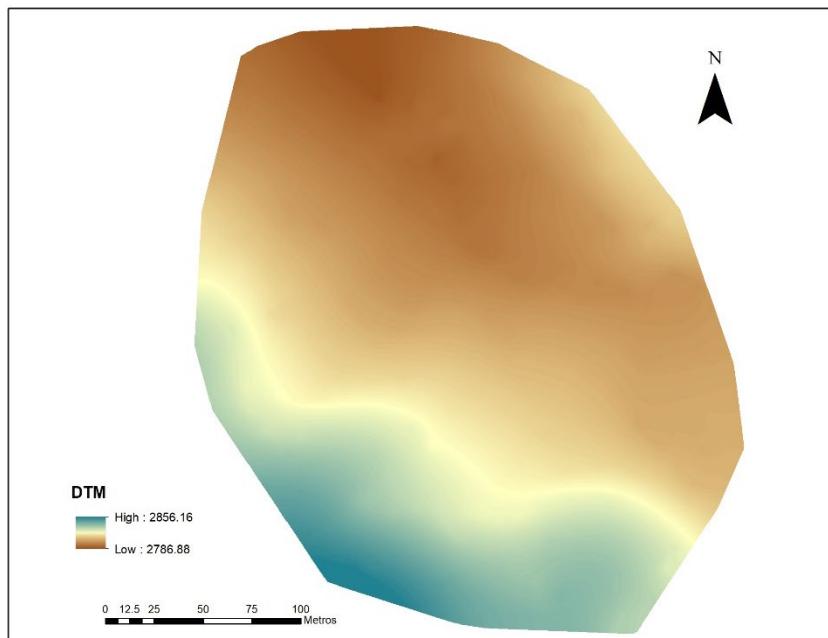


Figura 30. Modelo Digital Terrestre (Segunda Toma) Mina El Triunfo.

### DSM Mina El Triunfo

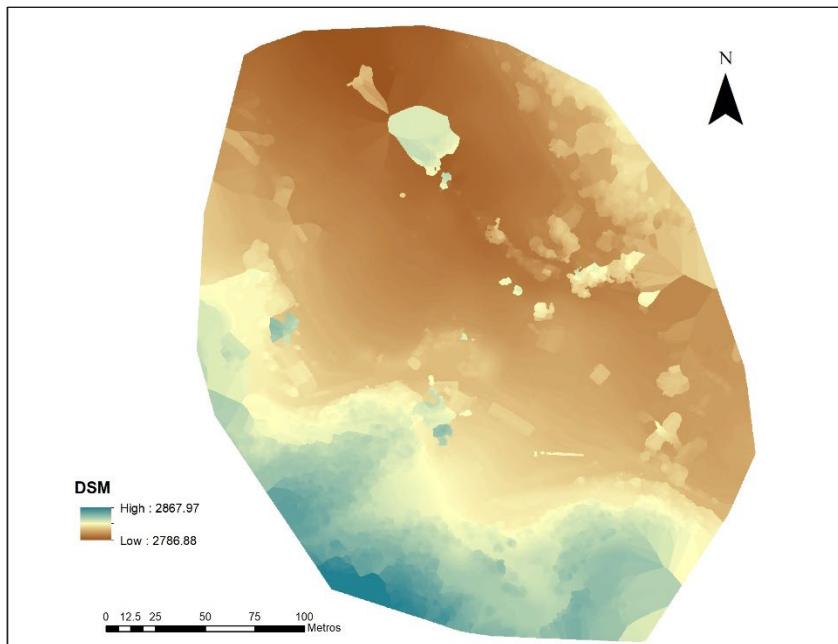


Figura 31. Modelo Digital de Superficie (Segunda Toma) Mina El Triunfo.

## Hillshade Mina El Triunfo

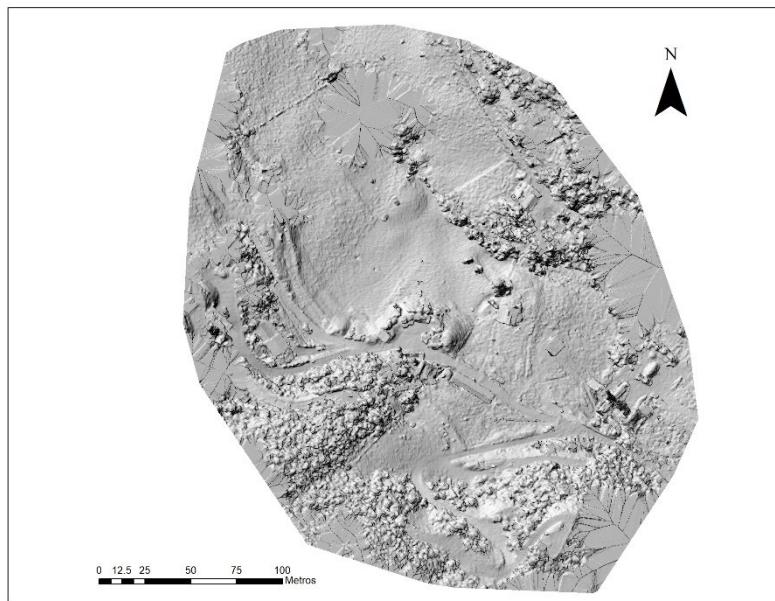


Figura 32. Hillshade Mina El Triunfo a partir del DSM (Segunda Toma).

## Función Pendiente Mina El Triunfo

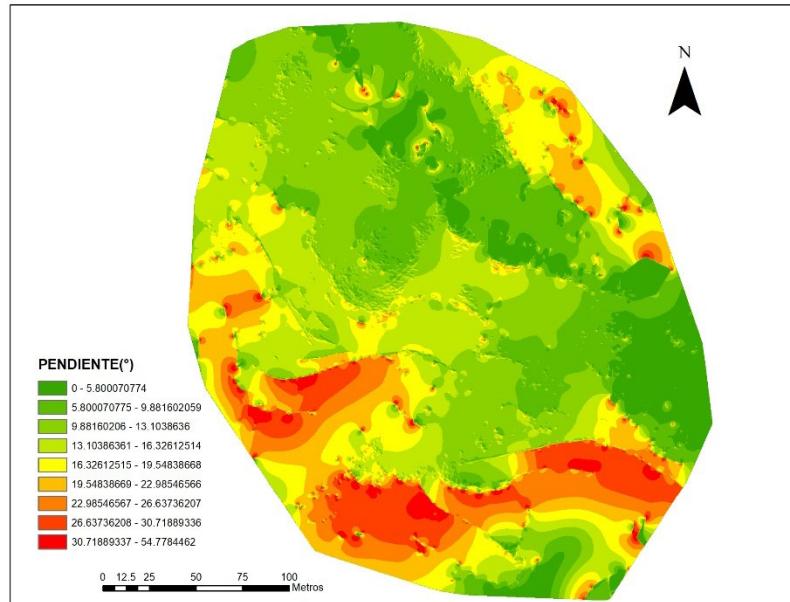


Figura 33. Pendiente Mina El Triunfo (Segunda Toma).

## Función Curvatura Mina El Triunfo

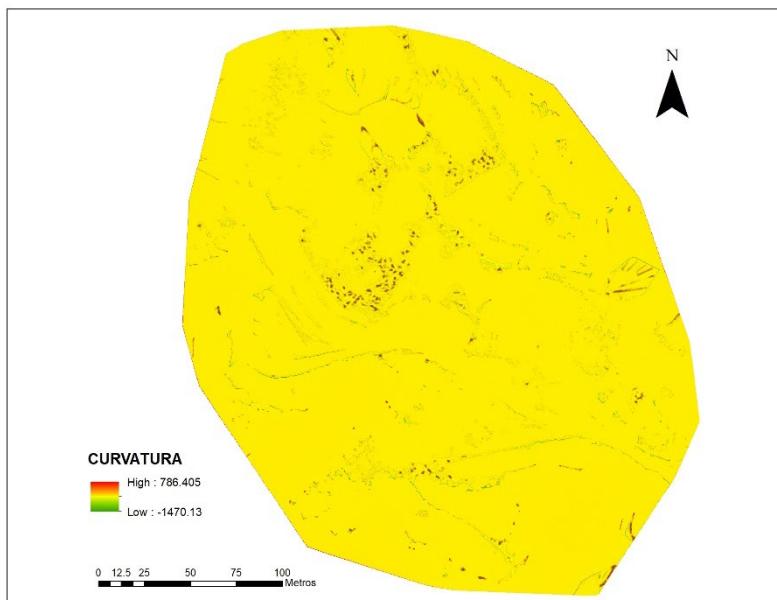


Figura 34. Curvatura Mina El Triunfo (Segunda Toma).

## DTM Mina El Cardonal

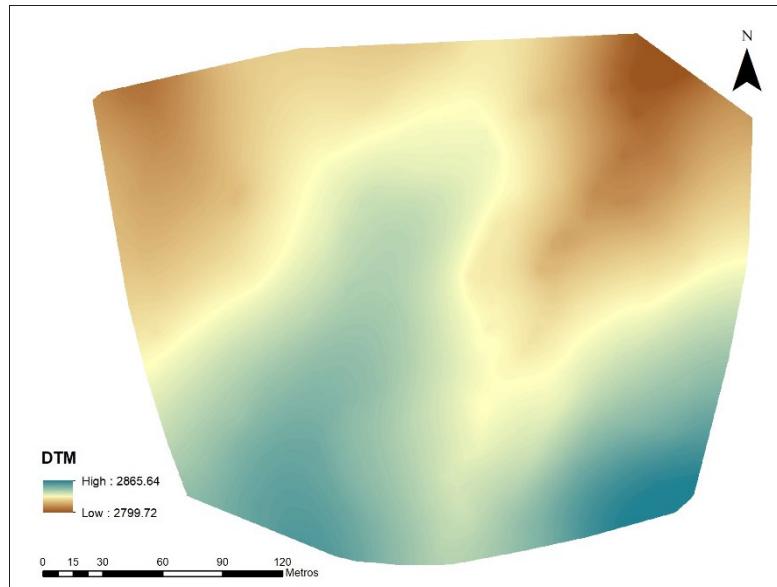


Figura 35. Modelo Digital Terrestre (Segunda Toma) Mina El Cardonal

## DSM Mina El Cardonal

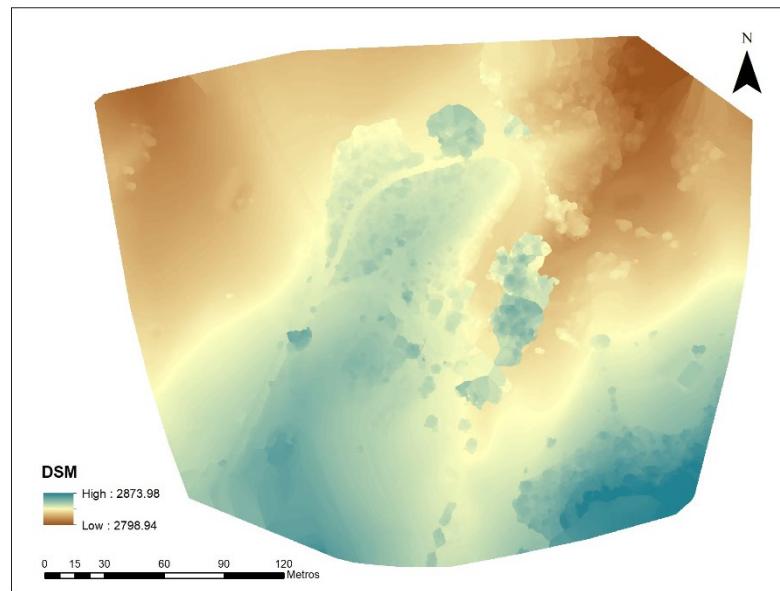


Figura 36. Modelo Digital de Superficie (Segunda Toma) Mina El Cardonal

## Hillshade Mina El Cardonal

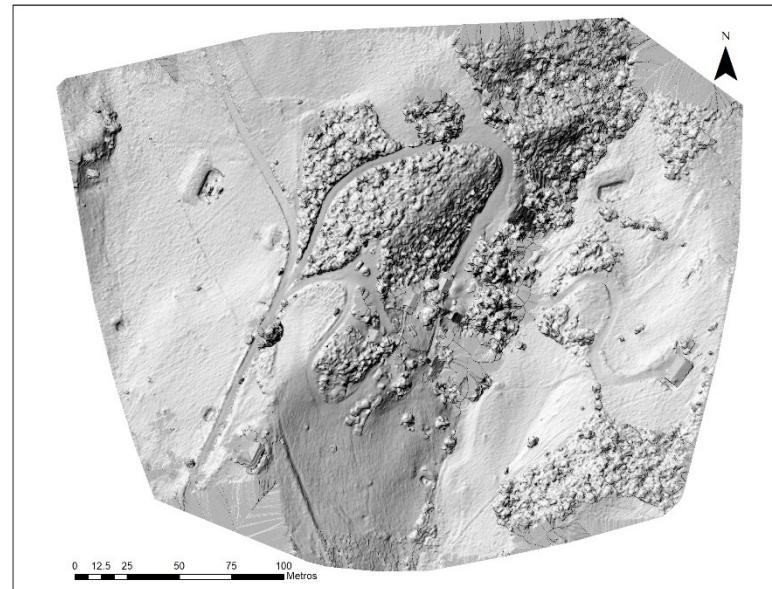


Figura 37. Hillshade Mina El Cardonal a partir del DSM (Segunda Toma).

## Función Pendiente Mina El Cardonal

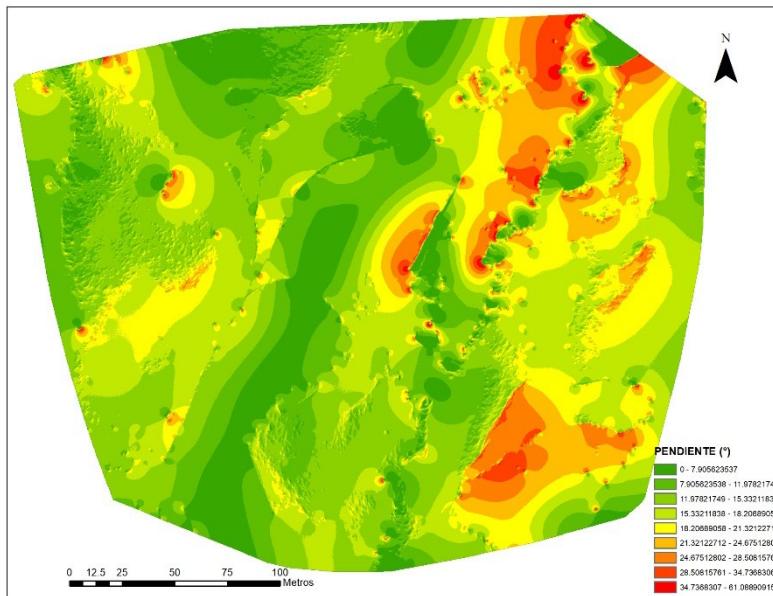


Figura 38. Pendiente Mina El Cardonal (Segunda Toma).

## Función Curvatura Mina El Cardonal

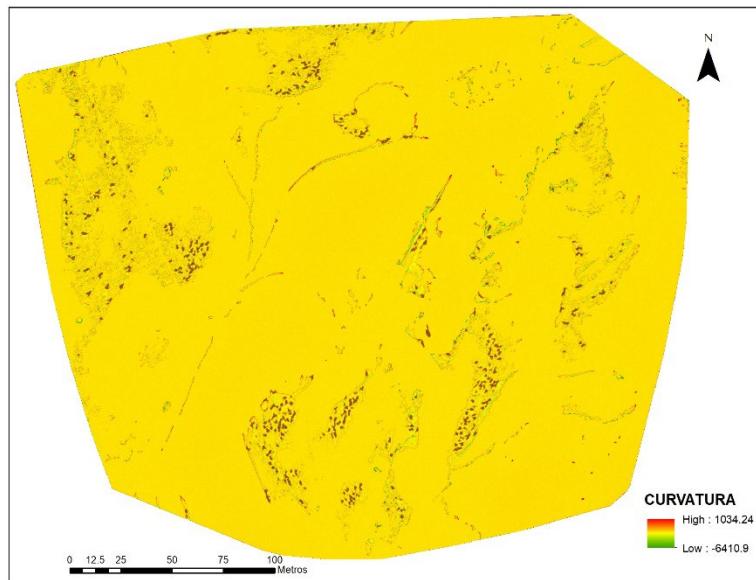


Figura 39. Curvatura Mina El Cardonal (Segunda Toma).

## DTM Mina La Vuelta

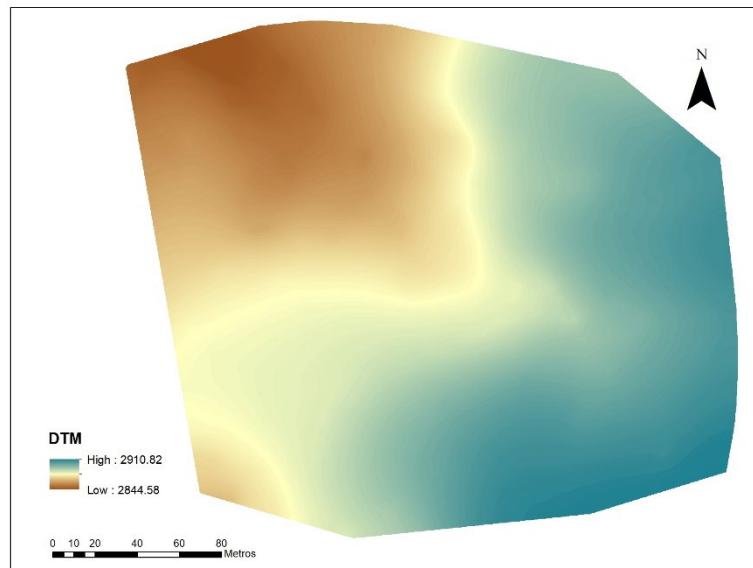


Figura 40. Modelo Digital Terrestre (Segunda Toma) Mina La Vuelta

## DSM Mina La Vuelta

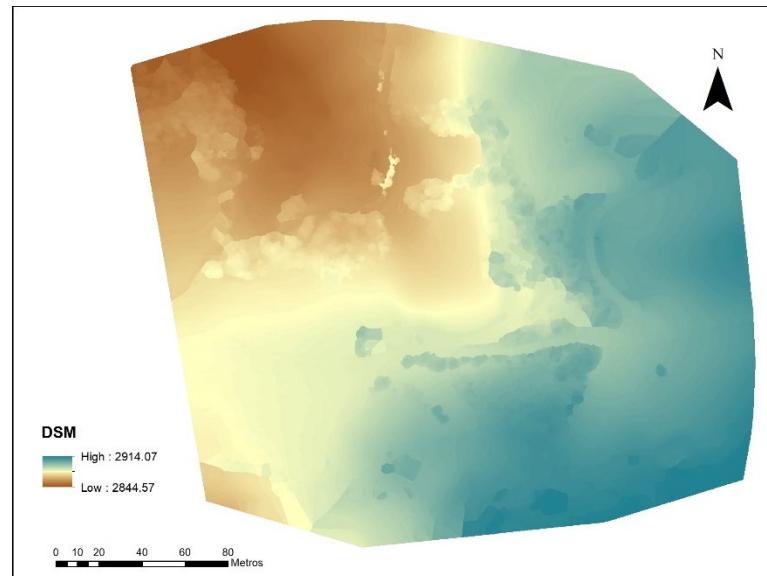


Figura 41. Modelo Digital de Superficie (Segunda Toma) Mina La Vuelta

## Hillshade Mina La Vuelta

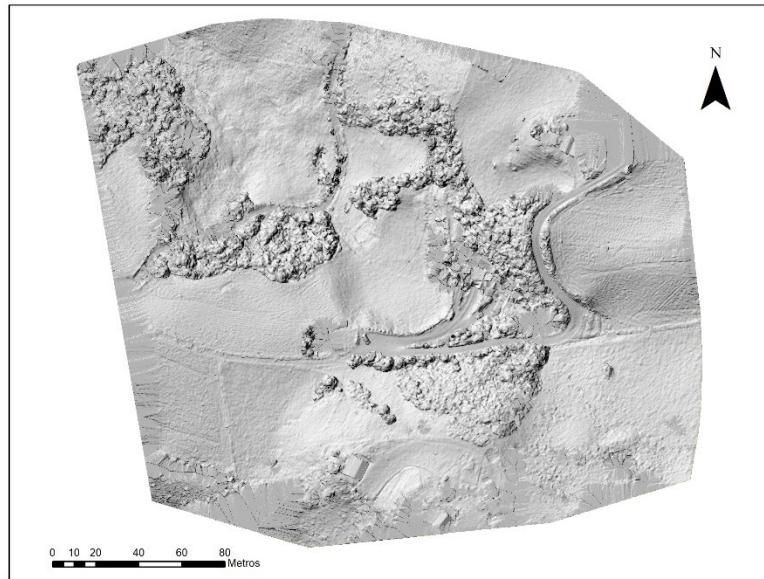


Figura 42. Hillshade Mina La Vuelta a partir del DSM (Segunda Toma)

## Función Pendiente Mina La Vuelta

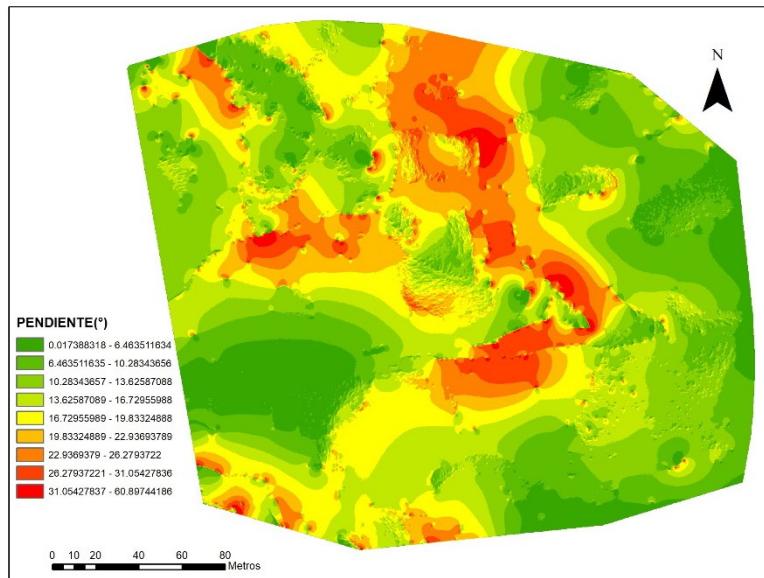


Figura 43. Pendiente Mina La Vuelta (Segunda Toma).

## Función Curvatura Mina La Vuelta

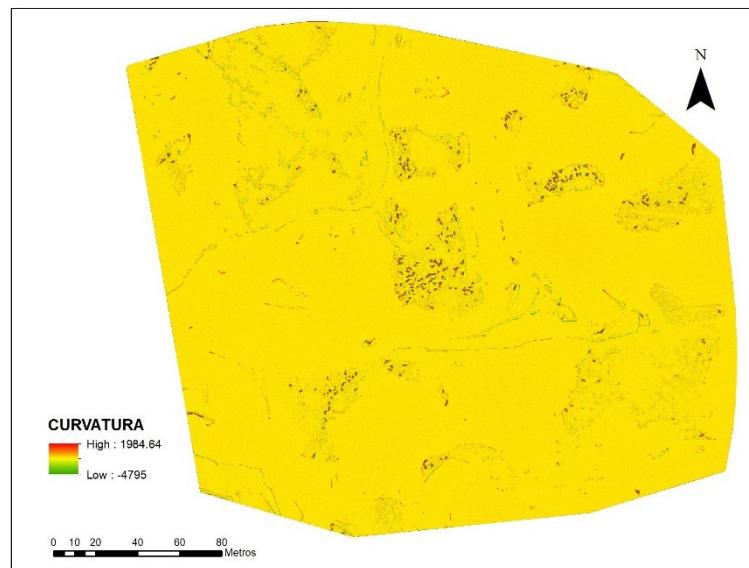


Figura 44. Curvatura Mina La Vuelta (Segunda Toma).

## Municipio de Lenguazaque 2016

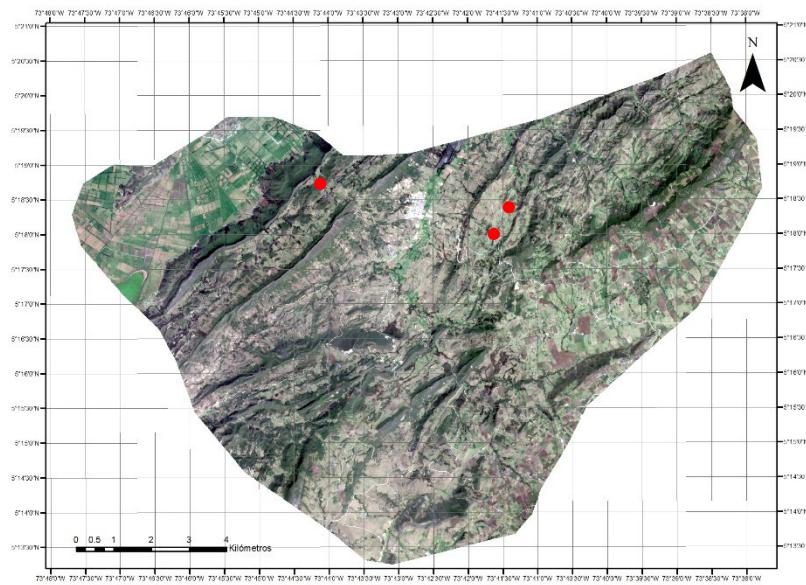


Figura 45. Composición RGB Municipio de Lenguazaque. 10 de Enero del 2016 y marcadores de la localización de las minas estudiadas

## Municipio de Lenguazaque 2019

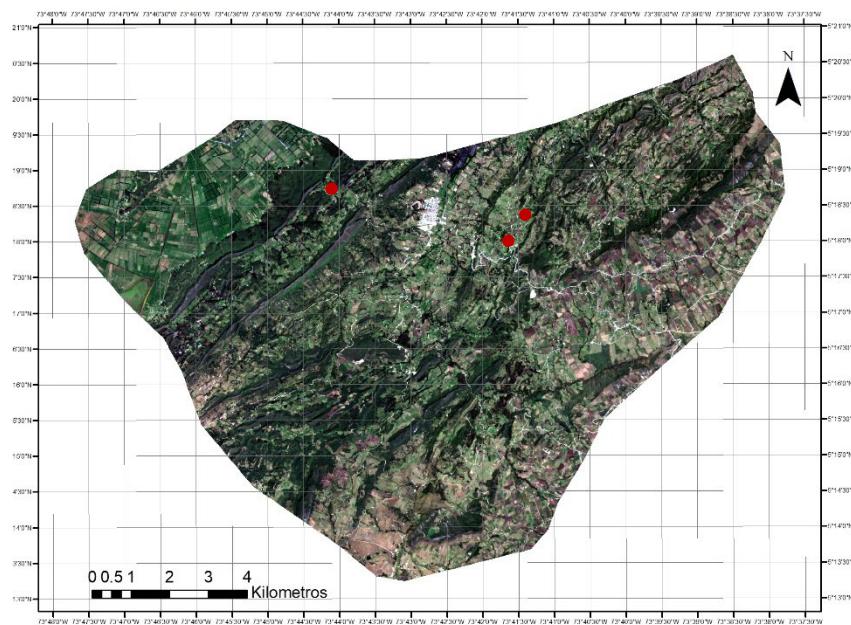


Figura 46. Composición RGB Municipio de Lenguazaque y marcadores de la localización de las minas estudiadas. 3 de Febrero del 2019.

## Municipio de Guachetá 2016

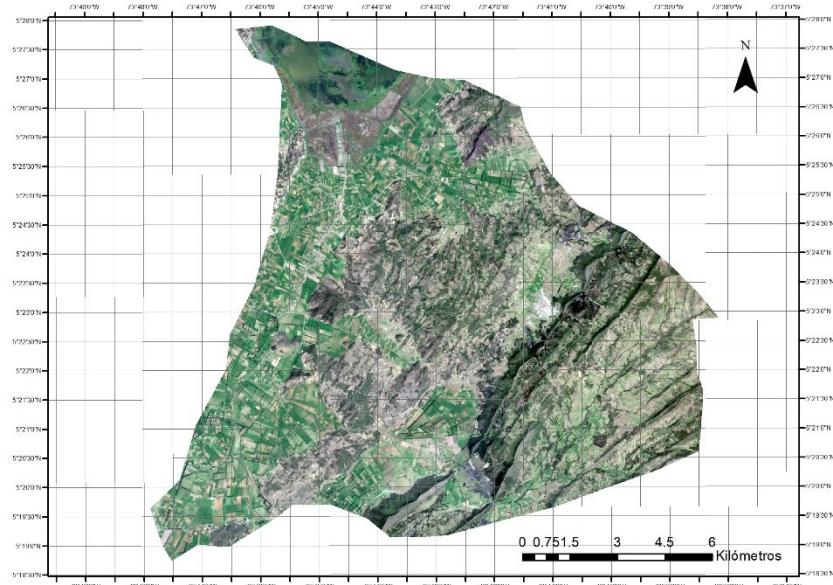


Figura 47. Composición RGB Municipio de Guachetá. 10 de Enero del 2016

## Municipio de Guachetá 2019

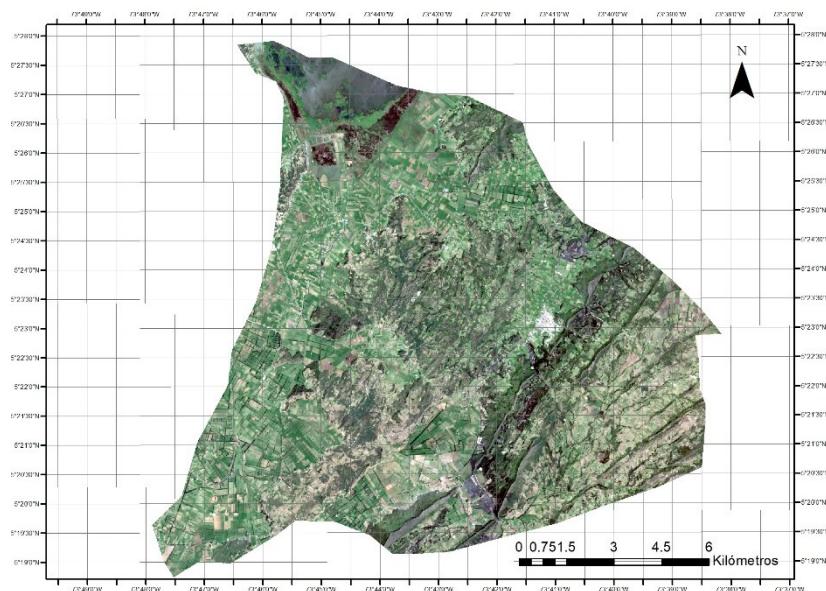


Figura 48. Composición RGB Municipio de Guachetá. 3 de Febrero del 2019.

## Información Meteorológica Estación Lenguazque-La Balsa. Enero 2019

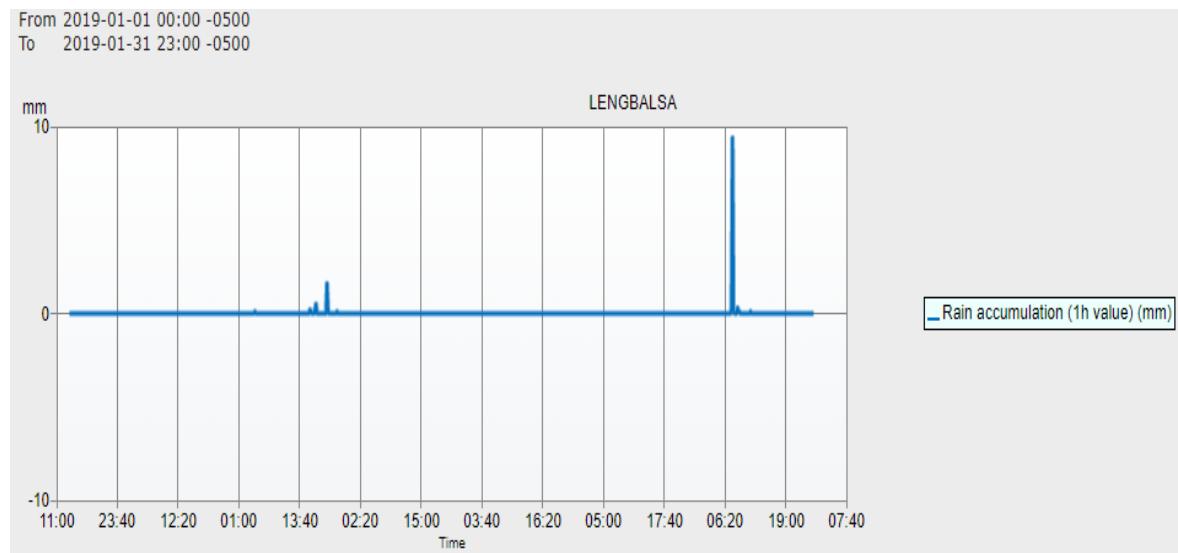


Figura 49. Registro de precipitación del municipio de Lenguazque (Enero 1 – Enero 31). Tomado de la CAR

## Información Meteorológica Estación Lenguazaque-La Balsa (Datos Incompletos). Febrero 2019

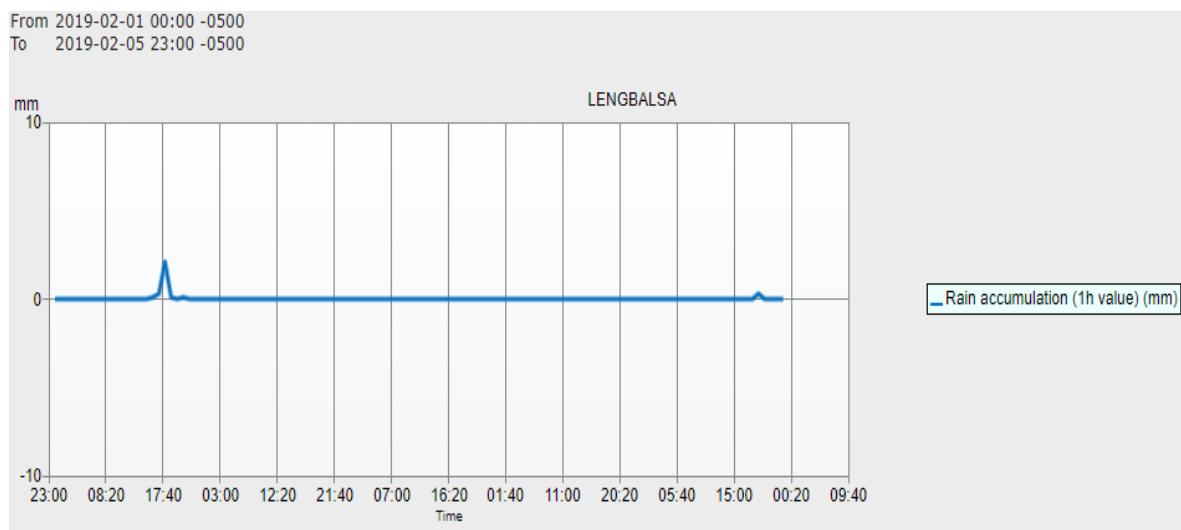


Figura 50. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Febrero 1 – Febrero 5). Tomado de la CAR

## Información Meteorológica Estación Lenguazaque-La Balsa (Datos Incompletos). Marzo 2019

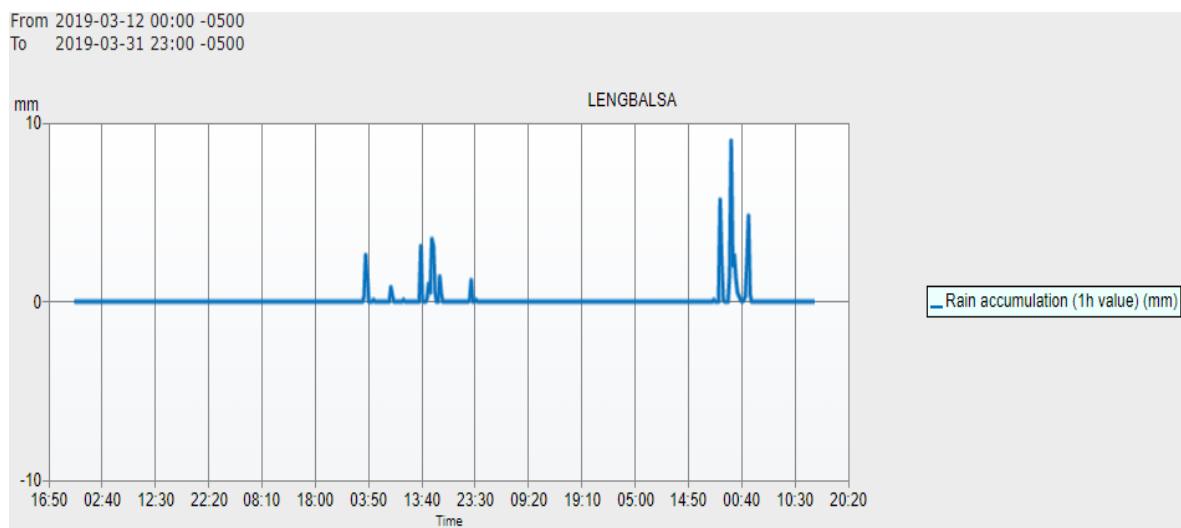


Figura 51. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Marzo 12 – Marzo 31). Tomado de la CAR

## Información Meteorológica Estación Lenguazaque-La Balsa. Abril 2019

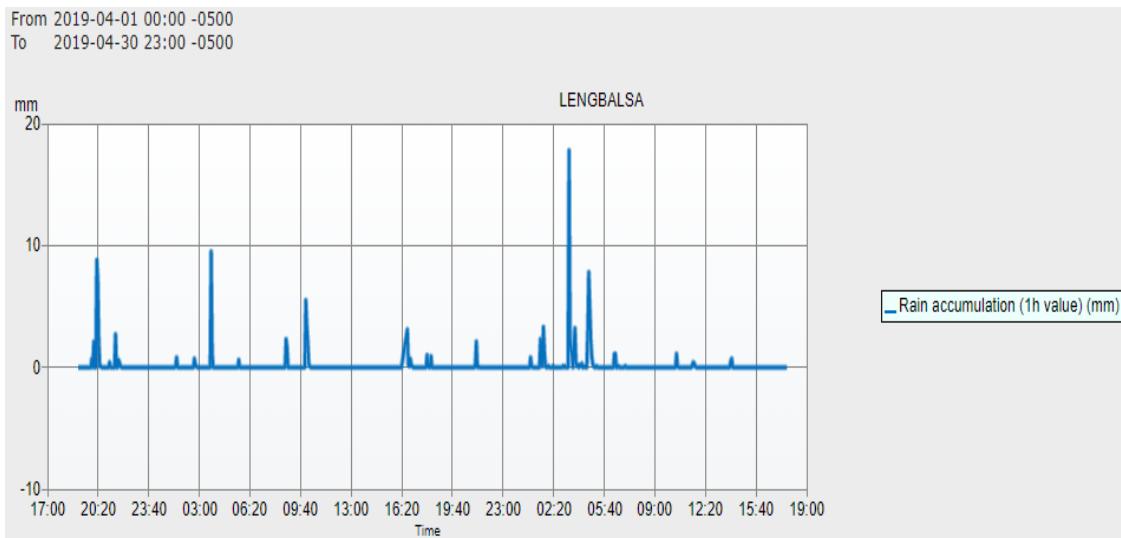


Figura 52. Registro de precipitación del municipio de Lenguazaque (Abril 1 – Abril 30). Tomado de la CAR