

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN MINERA Y  
QUEMA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO EN LA LOCALIDAD DE CIUDAD  
BOLÍVAR, BOGOTÁ D.C.

JULIANA MARÍA VELANDIA NUÑEZ

MIGUEL ÁNGEL PINZÓN ROJAS

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERIA AMBIENTAL Y CIVIL

ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

BOGOTA D.C.

2022

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN MINERA Y  
QUEMA DE CARBÓN A CIELO ABIERTO EN LA LOCALIDAD DE CIUDAD  
BOLÍVAR, BOGOTÁ D.C.

JULIANA MARÍA VELANDIA NUÑEZ

MIGUEL ÁNGEL PINZÓN ROJAS

PROYECTO DE GRADO

Presentado como requisito para optar al título de especialista en sistemas de información  
geográfica

Director

Andrés Felipe Carvajal Vanegas, Dr.

UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO

FACULTAD DE INGENIERIA XXXX

ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

BOGOTA D.C.

2022

## *Agradecimientos*

A Dios primeramente por darnos la vida y a nuestros familiares por el apoyo para seguir formándonos como Especialistas en lo que nos apasiona.

*“Vida antes que muerte. Fuerza antes que debilidad. **Viaje antes que destino**” B. Sanderson.*

## Contenido

<b>1. Introducción</b>	7
<b>2. Marco teórico y Estado del conocimiento</b>	9
2.1. Minería y quema de carbón a cielo abierto	10
2.2. Tipo de investigación	11
<b>3. Objetivos</b>	14
3.1. Objetivo general	14
3.2. Objetivos específicos	14
<b>4. Metodología</b>	15
<b>5. Resultados y discusión</b>	18
5.1. Adquisición y preparación de la información	18
5.2. Verificación de campo	26
5.3. Presentación de imágenes multitemporales	29
<b>6. Conclusiones</b>	32
<b>7. Recomendaciones</b>	33
<b>Bibliografía</b>	34

## Índice de Ilustraciones

Ilustración 1 Composición de bandas multiespectrales, fuente autores 2022 .....	18
Ilustración 2 Recorte del área de estudio, fuente autores 2022 .....	19
Ilustración 3 Re proyección y ajuste de tamaño de imágenes, fuente autore 2022. ....	19
Ilustración 4 Rescalar imágenes de 16 bits a 8 bits, fuente autores 2022 .....	20
Ilustración 5 Uso de Arcpy para determinar matrices en imágenes, fuente autores 2022....	20
Ilustración 6 Resultado de matrices por ArcPy, fuente autores 2022.....	21
Ilustración 7 Resultado de OIF de imágenes, fuente autores 2022 .....	21
Ilustración 8 Resultado Pan Sharpen imágenes 2014 - 2021, fuente autores 2022 .....	22
Ilustración 9 Clasificación supervisada de imágenes ERDAS, fuente autores 2022.....	23
Ilustración 10 Áreas de coberturas imagen Landsat 8 2021, fuente autores 2022 .....	23
Ilustración 11 Áreas de cobertura imagen Landsat 8 2014, fuente autores 2022.....	23
Ilustración 12Confrontación Puntos de validación, fuente autores 2022 .....	24
Ilustración 13 Reporte de exactitud temática ERDAS Imagine, fuente autores 2022.....	24
Ilustración 14 Clasificación supervisada de imágenes ArcGIS Pro, fuente autores 2022....	25
Ilustración 15 Reporte de exactitud temática ArcGIS Pro, fuente autores 2022.....	26
Ilustración 16 Zona de estudio, fuente autores 2022 .....	27
Ilustración 17Soporte fotográfico de visita, Fuente: Los Autores 2022 .....	28
Ilustración 18 Mapa de zonificación de afectación del suelo de la localidad de Ciudad Bolívar año 2014, fuente autores.....	29
Ilustración 19 Mapa de zonificación de afectación del suelo de la localidad de Ciudad Bolívar año 2021, fuente autores.....	30
Ilustración 20 Comparación a través del tiempo de las imágenes 2014 y 2021 .....	30
Ilustración 21 Mapa de zonificación multitemporal en la afectación del suelo de la localidad de Ciudad Bolívar 2014-2021 .....	31

## **Índice de Tablas**

Tabla 1 información de imagenes Satelitales landsat 8 Fuente: USGS 2022.....	18
Tabla 2 Clasificación de coberturas, fuente autores 2022 .....	22
Tabla 3 Clasificación de coberturas ArcGIS Pro, fuente autores 2022 .....	25

## 1. Introducción

Las actividades mineras y de aprovechamiento de materiales naturales han venido incrementando en Colombia, generando controversia entre las entidades gubernamentales y la población aledaña respecto a los índices e información que se cruza entre el desarrollo económico del país respecto a las afectaciones ambientales y sociales (Reina, 2008). Bogotá siendo la capital del país, cuenta con una extensión de 201.966 hectáreas de las cuales el 76.5 % es rural y el 23.5% urbana, y presenta 21 zonas compatibles para realizar procesos de explotación minera, la mayoría ubicados en las zonas rurales (Chaves, 2018). La ciudad se encuentra dividida en 20 localidades donde 3 presentan actividades mineras siendo Ciudad Bolívar la principal localidad de explotación donde actualmente se encuentra ubicado el parque minero industrial de Mochuelo (Garzón Tovar, 2013).

Por medio de análisis de imágenes satelitales se pueden determinar las afectaciones ambientales en un territorio específico, esto se debe a la composición general de los sensores satelitales y toda aquella información derivada de diversas metodologías y análisis (J. M. Moreira, 2009). Los análisis de imágenes multitemporales pueden lograr cuantificar el daño ambiental de una actividad antrópica que se desarrolla a una escala industrial, principalmente en los componentes geomorfológicos y posibles desarrollos de contaminación a fuentes hídricas (Calixto Rodríguez, 2018). Por otra parte, uno de los instrumentos más comunes para determinar afectaciones ambientales es la combinación de bandas multiespectrales, que según su combinación se pueden establecer factores cualitativos con el fin de hacer un análisis cuantitativo, lo que conlleva la priorización de componentes para realizar los respectivos programas de mitigación y/o control (Yari, 2018).

Las áreas de explotación minera en la localidad de Ciudad Bolívar han venido en incremento conforme al crecimiento exponencial de la población pues desde los años cincuenta Ciudad Bolívar, por sus características geológicas, ha sido un territorio estratégico para el sector minero, especialmente en extracción de piedra, arena y arcilla. Las canteras, que eran fuentes de trabajo y de material de construcción, aceleraron los procesos de urbanización en la localidad, así como la consolidación de medianas industrias de explotación, ejemplo de esto, es la llegada de la cementera mexicana CEMEX y la empresa suiza Holcim.

Con el propósito de regular la actividad económica de estas empresas durante la alcaldía de Luis Eduardo Garzón, por medio del artículo 327 del Decreto 190 de 2004, se buscó la creación de los Parques Mineros Industriales, zonas de la ciudad para desarrollar actividad minera bajo parámetros de sostenibilidad ambiental. (Corredor Pérez, Sua Serrato, & Cardenas Ruiz, 2022)

La minería dentro de Ciudad Bolívar ha ayudado a través de los años a el desarrollo económico y social en la región se han tenido estudios donde se revelo los aumentos en la inversión y en la producción de múltiples productos extraídos de la tierra adicional ha ayudado a la reducción de la pobreza, el aumento del índice de desarrollo humano, una disminución del desempleo, por otro lado desafortunadamente, en la práctica dicha sostenibilidad no existe, lo que existe es un conflicto socioambiental en las ladrilleras por la desmedida explotación de los recursos naturales que afecta el suelo, el aire, el agua y la seguridad alimentaria del sector rural y urbano de la localidad. por lo que se hace necesario establecer cuál ha sido la mayor afectación e incidencia de las zonas de extracción, incluido actividades adicionales como la quema de carbón orgánico a cielo abierto y deforestación de la capa vegetal (Salamanca, 2014).



## **2. Marco teórico y Estado del conocimiento**

Los emprendimientos mineros a gran escala constituyen en América Latina una de las más importantes industrias extractivas. De acuerdo con los datos del Observatorio de Conflictos Mineros de América Latina (OCMAL) en nuestro continente existen 160 proyectos mineros implicados en 136 conflictos que afectan a un conjunto de 178 comunidades. Los países en donde se registran la mayor cantidad de proyectos mineros en conflicto son: Colombia con 30, Argentina con 28, Perú con 23, Chile con 20, Brasil con 21 y México con 12 (Comelli, Hadad, & Petz, 2010)

Ejemplo en México en el tiempo la megaminería en Zacatecas ha generado diversos impactos ambientales negativos. En principio ha significado una disputa territorial y competencia con la producción agrícola respecto al acceso a la tierra en términos de superficie y al agua en términos de volumen. Así como la contaminación del suelo con los millones de toneladas de desechos sólidos y la de fuentes de agua subterránea y superficial originados por los métodos de barrenación, molienda y lixiviación en la extracción y beneficio de la explotación minera. Los megaproyectos mineros en manos de empresarios nacionales y extranjeros han propiciado como tendencia un deterioro paulatino en la producción de alimentos para los zacatecanos, al ver mermada tanto la superficie agrícola y los rendimientos de cosecha en los espacios donde se asentó la megaminería. (Lopez, 2016)

La clasificación de la Cubierta del Suelo (LCCS) tiene como objetivo principal, la definición de una clasificación de referencia para responder a la necesidad de estandarización o recopilación armonizada de datos y desarrollar un enfoque integrado común para todos los aspectos de la cobertura del suelo. Esto implica una metodología que es aplicable a cualquier escala, y que es integral en el sentido de que cualquier cubierta de tierra identificada en cualquier parte del mundo puede adaptarse fácilmente. (JANSEN, 2005)

Para entrar en contexto del marco teórico que define los conceptos básicos para hacer el “análisis multitemporal de la zona de explotación minera y quema de cielo abierto en la localidad de ciudad bolívar a partir de sensores remotos”, se debe hacer referencia a los parques mineros establecidos en el POT, la localización del proyecto y el método de análisis.

## 2.1. Minería y quema de carbón a cielo abierto

El parque minero industrial el Mochuelo es la zona reconocida por medio de los diferentes Planes de Ordenamiento Territorial – POT, el cual confiere determinados polígonos del territorio distrital como zona de explotación minera para la extracción de materiales pétreos y arcillas, que deben ser supervisados por los diferentes entes de control distrital y las demás autoridades ambientales a nivel nacional, para garantizar la adecuada explotación de los recursos (Torres, 2016).

En la determinación de antecedentes se deben tener en cuenta todos aquellos estudios realizados sobre la zona de afectación y/o casos similares de afectación, estudios de sistemas de información geográfica al sector minero de arcillas e informes de las entidades gubernamentales que en ejercicio de sus funciones participan de manera directa o indirecta en los controles ambientales de los sectores de extracción minera en Bogotá.

Inicialmente se contempla el Plan Ambiental Local 2020-2024 de Ciudad Bolívar (PAL) donde se encuentra un diagnóstico general ambiental, el cual establece una priorización de acciones ambientales y su respectiva formulación, documento base que incluye las actividades de las diferentes entidades distritales con presencia en la localidad, incluidas las instancias de planeación, consultoras, asesoras en materia ambiental en la localidad de Ciudad Bolívar entre los años 2020-2024 (Secretaria Distrital de Gobierno, 2020).

Los cambios ambientales producidos por las actividades antrópicas pueden ser monitoreados mediante el análisis de imágenes satelitales, metodología basada en establecer logaritmos computarizados y aspectos visuales determinados por los sensores, determinando y cuantificando el cambio de la cobertura vegetal y las afectaciones a diversos factores ambientales (Lange González, 2018).

## 2.2. Tipo de investigación

En teledetección, existen dos grandes enfoques para la extracción de información temática de interés, según se parta del diseño experimental para extraer principios teóricos a partir de él (modelos inductivos o empíricos) o estimaciones a partir de analizar las relaciones teóricas entre los componentes de un determinado problema (modelos deductivos o teóricos) (Leonhart, 2019)

Cabe resaltar que el procesamiento digital ha sido una técnica que se ha utilizado a través del tiempo pues es la vista del ser humano es un receptor de un sin fin de información captando la radiación electromagnética proveniente de los múltiples objetos, pero el ojo humano posee limitación en cuanto a la percepción de energía de la radiación y sus tipos, lo que lo restringe, en definitiva incapaz de observar imágenes de cualquier otro tipo o observar radiación diferente a los de los rangos visibles. (Chuvienco, 1995)

A través del tiempo se dan múltiples métodos de análisis una de ellas es la clasificación digital de imágenes que consiste en generar nuevas imágenes a partir de las primeras, donde los niveles digitales -ND se organizan en categorías de información según el análisis realizado, esta clasificación se basa en la selección manual de píxeles dentro de la imagen, que son significativas en una determinada clase o categoría, después mediante algoritmos de selección, se programa el software para que utilice estas áreas de entrenamiento como referencia para clasificar la totalidad de píxeles de la imagen. (Chuvienco, 1995)

Para llegar hacer la selección de clases existen varios métodos para asociar los píxeles así, el método de máxima verosimilitud, el método de clasificación por paralelepípedos, y el método de distancia mínima, como resultado se obtendrá una cartografía del inventario de las clases objeto del estudio, condensando la información multiespectral en un mapa temático y tablas estadísticas, que definen la localización y ofrecen un inventario superficial de las categorías de interés. (Chuvienco, 1995)

Para Chuvieco se hace una denominación de índices espectrales con operaciones aritméticas entre las bandas con el objetivo de destacar alguna variable de interés tal como: Agua, vegetación, minerales, etc... Esto es utilizado en dos escenarios:

- 1) Mejorar la clasificación de cubiertas con comportamiento reflectivo muy distinto en esas dos bandas 8 y 4, por ejemplo, para realzar suelos y vegetación en el visible e infrarrojo cercano.
- 2) Para reducir el efecto del relieve en la caracterización espectral de distintas coberturas (Chuvieco, 1995)

El uso de los índices espectrales es común para la clasificación de coberturas vegetales; el comportamiento radiométrico de la vegetación en las regiones del espectro correspondientes a la banda roja (RED= 0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ) y la banda del infrarrojo cercano (NIR= 0,7 a 1,1  $\mu\text{m}$ ), los múltiples contrastes entre estas dos bandas la vegetación que presenta condiciones sanas, ya que cuando la vegetación tiene algún tipo de estrés, enfermedad, transformación, su reflectividad es menor en el infrarrojo cercano, aumentando comparablemente en la región de la banda roja, por lo que el contraste entre ambas bandas en estas condiciones sería menor (CHUVIECO, 2010), se dirá que cuanto mayor sea la diferencia entre las reflectividades de la banda NIR – RED (espectroscopia infrarroja cercana o espectroscopia) mayor vigor vegetal presenta la cobertura observada.

Estudios previos realizados en la localidad de Ciudad Bolívar han determinado por medio de análisis multitemporal los pasivos ambientales pertenecientes a las entidades gubernamentales desde el año 1940 hasta el 2005, los cuales determinaron carencias de procesos de recuperación y restauración en los procesos mineros, que generarían gastos superiores a los recaudados por conceptos de regalías a las actividades mineras, lo que conlleva a que se hayan generado procesos deficientes de inspección, vigilancia y control (Diana Patricia Lozano Zafra, 2008).

La fotointerpretación es una de las principales técnicas en los sistemas de información geográficos que busca identificar los elementos que componen la superficie terrestre en estudio, la caracterización e identificación de los elementos se determinan por componentes de absorbancia y reflectancia que estos emiten al contacto con la longitud de onda emitida

por la luz solar, lo que puede determinar los perfiles de tonalidad, contraste, patrón y/o textura (G, 1999).

Las localidades de Ciudad Bolívar y Usme ubicadas en el sur de la ciudad de la sabana de Bogotá presentan composiciones geomorfológicas similares favoreciendo las actividades industriales para la fabricación de ladrillos y vitrificados, en la mayoría de su territorio predominan los suelos arcillosos, areniscas y gravas correspondientes a la formación Micénica y Pliocena (Morales, 2009).

Algunas modificaciones en las coberturas vegetales se deben a procesos naturales como lo son las desertificaciones, inundaciones, heladas, olas de calor, temporadas de lluvias entre otros factores, los cuales no son asociados a las actividades industriales y urbanísticas, no obstante, estas afectaciones pueden ser clasificadas por modelamiento en sistemas de información geográfica (G. K. TRIPATHY, 2007).

Las zonas pobladas aledañas al sector minero pueden tener varias afectaciones a la salud de los habitantes, por ende las empresas deben realizar un seguimiento y restauración del territorio producto de la extracción de los materiales, que conlleven a mejorar la calidad ambiental y de salud de la población, las entidades de control debe hacer el respectivo seguimiento de las antiguas zonas de explotación y el avance de restauración respectivo, este tipo de actividades se pueden desarrollar mediante diversos programas de acceso libre, basados en sistemas de información geográfica (Sri Maryati, 2011).

### **3. Objetivos**

#### 3.1. Objetivo general

Determinar el cambio de las coberturas de la tierra en la zona rural de Ciudad Bolívar (Bogotá D.C.), por actividades mineras y quema de carbón natural a cielo abierto durante el periodo 2014-2021

#### 3.2. Objetivos específicos

- Identificar las coberturas de la tierra en la zona rural de Ciudad Bolívar (Bogotá D.C.) desde 2014 al 2021 para realizar un análisis mediante las imágenes de sensores remotos del cambio de las coberturas en la localidad de Ciudad Bolívar de forma multitemporal a partir de interpretación visual.
- Analizar el cambio de las coberturas de la tierra en la zona rural de Ciudad Bolívar (Bogotá D.C.) asociado con actividades mineras y quema de carbón natural a cielo abierto durante el periodo 2014-2021

#### 4. Metodología

Para la metodología de trabajo es importante destacar que dentro del programa CORINE (Coordination of information on the environment) que es patrocinado y/o promovido por la Comisión de la Comunidad Europea tuvo lugar el proyecto de cobertura de la tierra “CORINE Land Cover” 1990 (CLC90) (IGAC, 2022).

Esta metodología presenta detalles para hacer el inventario de la cobertura de la tierra. La base de datos de Corine Land Cover Colombia (CLC) permite hacer una descripción, caracterización, clasificación con el fin de comparar las características de la cobertura de la tierra, mediante la interpretación a partir de la utilización de imágenes de satélite de resolución media (Landsat), para la construcción de mapas de cobertura a diferentes escalas (IGAC, 2022).

El esquema Corine Land Cover tiene las siguientes etapas:

- Adquisición y preparación de la información
- Análisis e interpretación de las coberturas
- Verificación de campo
- Control de calidad y generación de la capa temática escala 1:100.000. (IGAC, 2022)

Este método también incluye especificaciones de procesamiento de imágenes, la elección de las herramientas de procesamiento de datos, la elección del algoritmo de clasificación supervisada de la cubierta terrestre, el algoritmo de detección de cambios en el índice de vegetación NDVI se hizo cargando las bandas 8 y 4 en ArcMap 10.8 y luego mediante la herramienta Raster Calculator de Spatial Analyst se hizo la ecuación para hallar el índice NDVI.

##### Adquisición y preparación de la información

Las imágenes Landsat utilizadas se encuentran con acceso libre en varios portales y también en el IGAC, algunas de las características más relevantes de estas imágenes es que la frecuencia de adquisición de 16 días, tienen una capacidad por km<sup>2</sup> de 35.000 km<sup>2</sup>, y la más importante es que está en forma digital la cual permite un mejor procesamiento de la información.

Otras de las herramientas de apoyo fueron cartográfica básica, mapas temáticos de cobertura del territorio y la utilización de otros sensores remotos, información de usos de suelos y coberturas, adicional apoyo de información de artículos con información de minería en Ciudad Bolívar.

Luego que se adquirieron según el método se ortorrectificar que es básicamente transformar la imagen en una proyección ortogonal para eliminar la inclinación de elementos por efecto del relieve (IGAC, 2022).

a) Análisis e interpretación de las coberturas

La interpretación y procesamiento digital de las imágenes se realizó principalmente con el software ERDAS y con Arcgis

b) Verificación de campo

A veces este método exige una visita a campo con el fin de corroborar el procesamiento para esta se deben seleccionar unas zonas piloto teniendo en cuenta la diversidad de las coberturas, lo establece de la siguiente forma:

- Ser representativos de la región biogeográfica en la que se encuentra la zona piloto, y de ser posible que en él se encuentren todas las unidades de paisaje de la región biogeográfica.
- Contar con buenas posibilidades de acceso y garantizar la seguridad de los intérpretes y acompañantes para el control de campo.

Este trabajo tiene como propósitos la aclaración de las dudas del proceso de interpretación de coberturas en computador y/o la adaptación de la nomenclatura a una determinada zona de estudio.

c) Control de calidad y generación de la capa temática escala 1:100.000

Para este punto es la revisión, seguimiento y corrección del proceso como tal, con el propósito de garantizar la calidad geométrica, temática y topológica de la base de datos del proyecto.

La metodología desarrollada para el proceso de control de calidad temática comprende dos procedimientos que se aplican para la revisión y corrección de las planchas interpretadas. El



primer procedimiento comprende la revisión de la plancha interpretada en formato análogo a partir de la observación de la imagen Landsat respectiva, dispuesta en formato impreso, con apoyo de las fotografías aéreas más recientes existentes para la zona interpretada. (IGAC, 2022)

## 5. Resultados y discusión

La cronología de los resultados expuestos se presenta conforme a los lineamientos metodológicos y su misma secuencia de presentación.

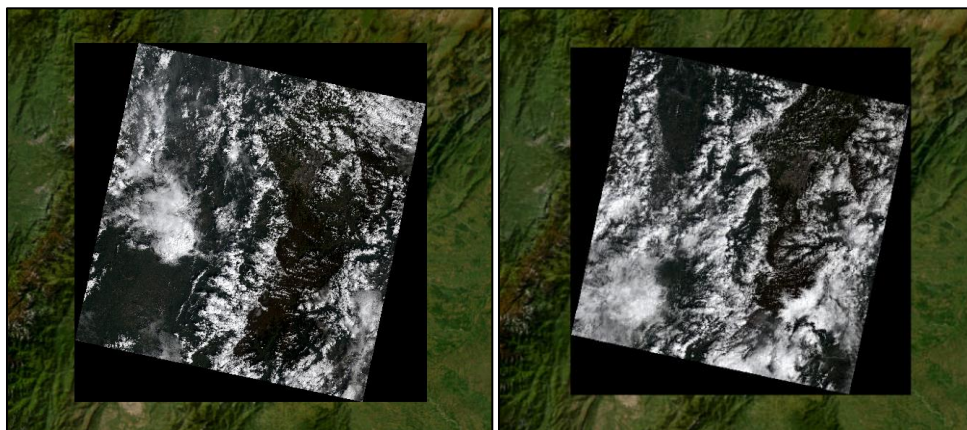
### 5.1. Adquisición y preparación de la información

Las imágenes satelitales fueron extraídas de la base de datos del Servicio Geológico de los Estados Unidos – USGS, para lo cual se investigaron las imágenes de los satélites Modis, Landsat y AVHRR, las cuales fueron seleccionadas únicamente las imágenes satelitales pertenecientes al Landsat 8 por la baja cantidad de nubes presente en la zona de estudio.

Nombre	Fecha de información	Formato
LC08_L1TP_008057_20140101_20170427_01_T1	2014-01-01	GEOTIFF
LC08_L1TP_008057_20211003_20211013_01_T1	2021-10-03	GEOTIFF

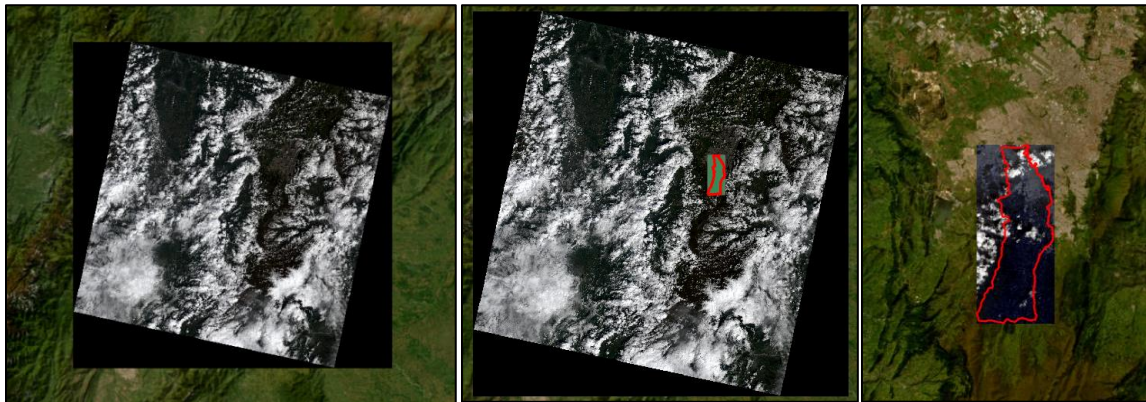
*Tabla 1 Información de imágenes Satelitales landsat 8 Fuente: USGS 2022*

Los archivos descargados en la plataforma del USGS, contenían las imágenes de las bandas de la 1 hasta la 11, por lo cual inicialmente se realizó una compilación de las bandas multiespectrales que comprendes desde la banda 1 hasta la banda 7, la compilación de las bandas se realizó por medio de la herramienta *Composite bands* de ArcGIS Pro, la cual nos arrojaba una imagen multi espectral de 30 metros con 16 bits.



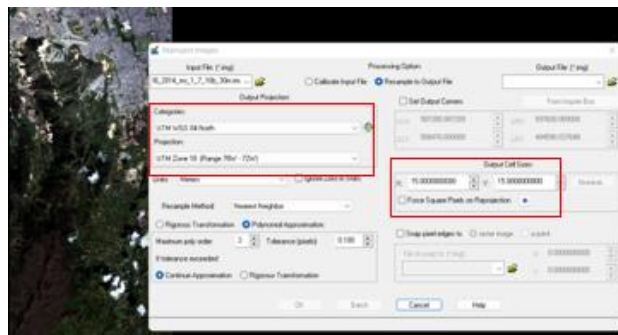
*Ilustración 1 Composición de bandas multiespectrales, fuente autores 2022*

Las imágenes multiespectrales fueron recortadas por un polígono georreferenciado, el cual comprendía en su totalidad el área de estudio, el recorte permitió agilizar el análisis de la información por el sistema y fue le mismo polígono utilizado para recortar las imágenes pancromáticas correspondientes a la banda 8 del satélite.



*Ilustración 2 Recorte del área de estudio, fuente autores 2022*

Las imágenes recortadas por Arcgis Pro, fueron trasladadas al programa Imagine ERDAS, para identificar las zonas con afectaciones, donde inicialmente fue necesario realizar una reproyección, ajustándolo al sistema de coordenadas UTM WGS 84 zona 18N, esta herramienta nos permite de igual forma ajustar el tamaño de las celdas de salida y transformar la imagen de un tamaño de 30 metros por 30 metros a un tamaño de 15 metros por 15 metros



*Ilustración 3 Re proyección y ajuste de tamaño de imágenes, fuente autore 2022.*

Las imágenes re proyectadas fueron re escaladas de su tamaño unsigned 16 bits a unsigned 8 bits, por medio de la herramienta *Rescale*.

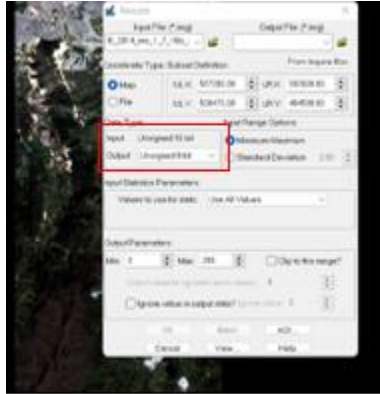


Ilustración 4 Rescalar imágenes de 16 bits a 8 bits, fuente autores 2022

Las imágenes multiespectrales deben ser analizadas para obtener el índice de factor óptimo – OIF, este índice determina la combinación adecuada para para de las bandas de las imágenes para posterior funcionarla con la banda pancromática y obtener los resaltes necesarios.

La determinación del OIF se realizó por medio de Excel teniendo en cuenta los datos que de las imágenes de 15 metros a 8 bits trabajados en Arcgis Pro con la herramienta de ArcPy.

La herramienta de Python en ArcGIS Pro, nos permitió por medio de la programación, establecer las matrices de varianza, covarianza y correlación de las imágenes trabajadas, estos resultados pueden ser exportados a matrices de Excel y determinar el OIF.

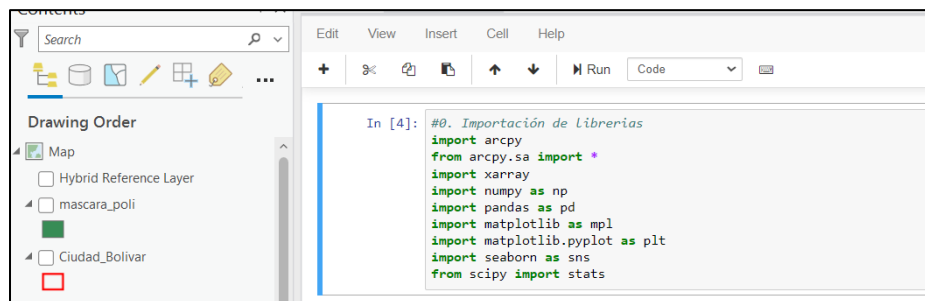


Ilustración 5 Uso de Arcpy para determinar matrices en imágenes, fuente autores 2022

```

In [13]: #9. cálculo de la matriz de covarianza
df.cov()

Out[13]:
      band1  band2  band3  band4  band5  band6  band7
band1 12025.871459 12136.728827 12145.129186 12214.578241 10784.639141 11310.298304 11875.038813
band2 12136.728827 12248.905091 12257.525592 12328.054342 10883.534447 11415.611368 11985.652133
band3 12145.129186 12257.525592 12267.489298 12338.321711 10896.586488 11427.563990 11996.235630
band4 12214.578241 12328.054342 12338.321711 12411.414615 10952.157570 11494.962003 12068.000792
band5 10784.639141 10883.534447 10896.586488 10952.157570 9778.175188 10169.666757 10651.115942
band6 11310.298304 11415.611368 11427.563990 11494.962003 10169.666757 10668.945452 11187.919233
band7 11875.038813 11985.652133 11996.235630 12068.000792 10651.115942 11187.919233 11742.563761

In [13]: #9. cálculo de la matriz de covarianza
df.cov()

Out[13]:
      band1  band2  band3  band4  band5  band6  band7
band1 12025.871459 12136.728827 12145.129186 12214.578241 10784.639141 11310.298304 11875.038813
band2 12136.728827 12248.905091 12257.525592 12328.054342 10883.534447 11415.611368 11985.652133
band3 12145.129186 12257.525592 12267.489298 12338.321711 10896.586488 11427.563990 11996.235630
band4 12214.578241 12328.054342 12338.321711 12411.414615 10952.157570 11494.962003 12068.000792
band5 10784.639141 10883.534447 10896.586488 10952.157570 9778.175188 10169.666757 10651.115942
band6 11310.298304 11415.611368 11427.563990 11494.962003 10169.666757 10668.945452 11187.919233
band7 11875.038813 11985.652133 11996.235630 12068.000792 10651.115942 11187.919233 11742.563761

```

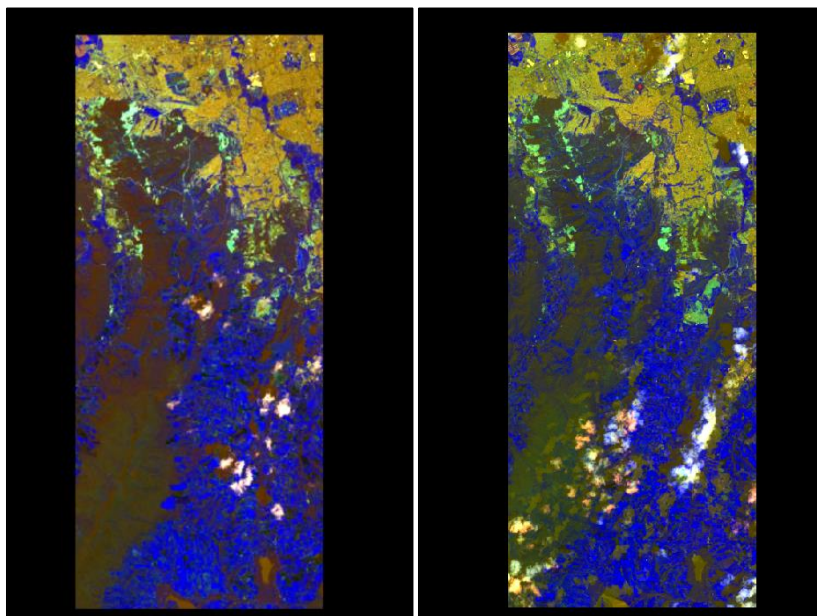
Ilustración 6 Resultado de matrices por ArcPy, fuente autores 2022

El cálculo de índice del factor optimo- OIF, es el realizado sobre todas las posibles combinaciones de las bandas, este cálculo se realizó por medio de Excel , determinando la la combinación de bandas espectrales más adecuada siendo esta la (1-4-5), el cálculo se realizó teniendo en cuenta la matriz de correlación y la desviación estándar.

Bandas	Combinaciones de las bandas Landsat (RGB)			Suma desviación	Suma coeficiente correlacion	OIF
1	1	2	3	67.44749	2.971508	22.69806778
2	1	2	4	68.52689	2.946431	23.25759198
3	1	2	5	70.55884	1.988464	35.48409224
4	1	2	6	64.17184	2.617776	24.51387743
5	1	2	7	62.44156	2.766859	22.56766969
6	1	3	4	68.37806	2.945944	23.21091643
7	1	3	5	70.41001	2.033449	34.62590407
8	1	3	6	64.02301	2.651654	24.14455657
9	1	3	7	62.29273	2.773237	22.46210115
10	1	4	5	71.48941	1.958941	36.49390666
11	1	4	6	65.10241	2.642351	24.63806285
12	1	4	7	63.37213	2.771864	22.86264045
13	1	5	6	67.13436	1.968054	34.1120518
14	1	5	7	65.40408	1.865841	35.05340487
15	1	6	7	59.01708	2.623922	22.49193383
16	2	3	4	68.45964	2.958193	23.14238456
17	2	3	5	70.49159	2.037433	34.5982371
18	2	3	6	64.10459	2.668944	24.01870927
19	2	3	7	62.37431	2.789686	22.35889989
20	2	4	5	71.57099	1.966344	36.39800055
21	2	4	6	65.18399	2.66306	24.47710153
22	2	4	7	63.45371	2.791732	22.72915523
23	2	5	6	67.21594	1.980498	33.93890829
24	2	5	7	65.48566	1.877444	34.88022013
25	2	6	7	59.09866	2.648831	22.31122333
26	3	4	5	71.42216	2.038148	35.042676
27	3	4	6	65.03516	2.723757	23.87700518
28	3	4	7	63.30488	2.824929	22.40937029
29	3	5	6	67.06711	2.086667	32.14078241
30	3	5	7	65.33683	1.956113	33.40135769
31	3	6	7	58.94983	2.716393	21.70151005
32	4	5	6	68.14651	2.031352	33.54736648
33	4	5	7	66.41623	1.908728	34.79606838
34	4	6	7	60.02923	2.284135	26.28094662
35	5	6	7	62.06118	2.103595	29.50243749

Ilustración 7 Resultado de OIF de imágenes, fuente autores 2022

Una vez determinada la mejor combinación, se procede a realizar la fusión de las imágenes multiespectrales con la pancromática, el proceso se realiza por medio de la ERDAS Imagine con la herramienta *Pan Sharpen*.



*Ilustración 8 Resultado Pan Sharpen imágenes 2014 - 2021, fuente autores 2022*

Aunque la combinación de OIF, dio similar para ambas imágenes la clasificación supervisada de las imágenes se realizó de forma independiente, teniendo en cuenta 9 coberturas, las cuales 3 corresponden a diferentes tipos de erosión principalmente por actividades de minería y elaboración de cerámicas y arcillas.

<b>TIPO DE COBERTURA</b>	<b>COLOR</b>
Construcciones	Gris
Zonas arbóreas	Verde Oscuro
Cultivos/ poco arbolado	Verde olivo
Sombras	Negro
Nubes	Blanco
Zona minera Arcillas	Naranja
Zona minera Pétreos	Rojo
Erosión del suelo por actividades antrópicas	Amarillo
Quema de Carbón	Café

*Tabla 2 Clasificación de coberturas, fuente autores 2022*



La supervisión de las imágenes fue trabajada desde la herramienta de *Supervised* de ERDAS Imagine, el resultado de cada imagen refleja un estimado significativo de las afectaciones en el suelo, según su año de estudio.

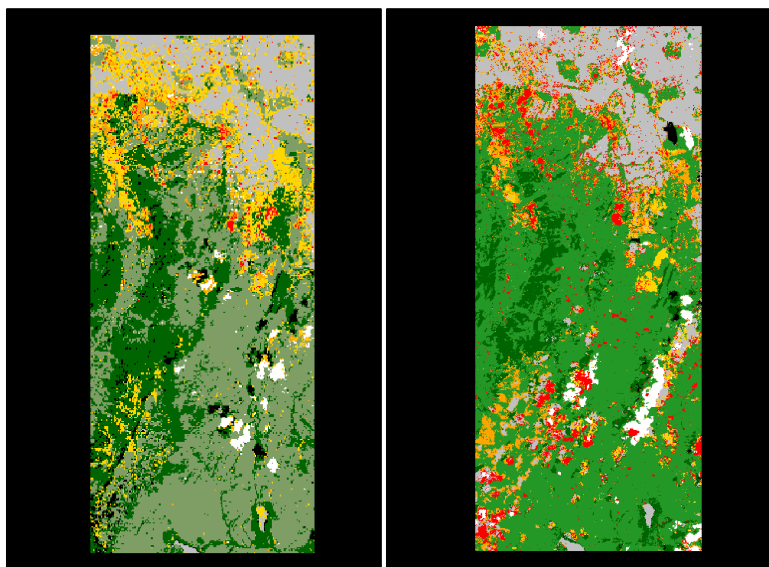


Ilustración 9 Clasificación supervisada de imágenes ERDAS, fuente autores 2022

Para determinar las áreas según la supervisión asistida, en la tabla de atributos de cada imagen se le adiciona el campo de cálculo de áreas y se define la unidad de medida en hectáreas, teniendo así los siguientes resultados:

2021_supervised.img								
Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names	Area
0	0		0	0	0	0	0 Unclassified	0
1	178342		0.753	0.753	0.753	1	1 Construcciones	4012.69
2	106515		0	0.392	0	1	1 bosque	2396.59
3	595569		0.141	0.596	0.149	1	1 Cultivos	13400.3
4	3713		0	0	0	1	1 Sombras	83.5425
5	71918		1	0	0	0	1 ZMa	1618.16
6	34515		1	0.843	0	1	1 ZMb	776.587
7	27497		1	1	1	1	1 Nubes	618.683
8	77105		1	0.647	0	1	1 ZMc	1734.86
9	2403		0.647	0.165	0.165	1	1 carbon	54.0675

Ilustración 10 Áreas de coberturas imagen Landsat 8 2021, fuente autores 2022

2014_supervised.img								
Row	Histogram	Color	Red	Green	Blue	Opacity	Class_Names	Area
0	0		0	0	0	0	0 Unclassified	0
1	116051		0.753	0.753	0.753	1	1 Construcciones	2611.09
2	459714		0.494	0.62	0.396	1	1 Cultivos	10343.3
3	26969		0	0	0	1	1 Sombras	606.789
4	297761		0	0.392	0	1	1 Zonas verdes	6699.47
5	18172		1	1	1	1	1 Nubes	408.861
6	11650		1	0	0	0	1 ZMa	262.119
7	35206		1	0.647	0	1	1 ZMb	792.117
8	132346		1	0.843	0	1	1 ZMc	2977.72
9	397		0.627	0.322	0.176	1	1 Quema_c	8.9323

Ilustración 11 Áreas de cobertura imagen Landsat 8 2014, fuente autores 2022

Debido que se presentan variedad en la identificación de pixeles el crecimiento de las áreas por la presencia de nubes en la imagen del año 2022 se hace necesario validar la clasificación del programa por la generación de puntos de validación de forma aleatoria.

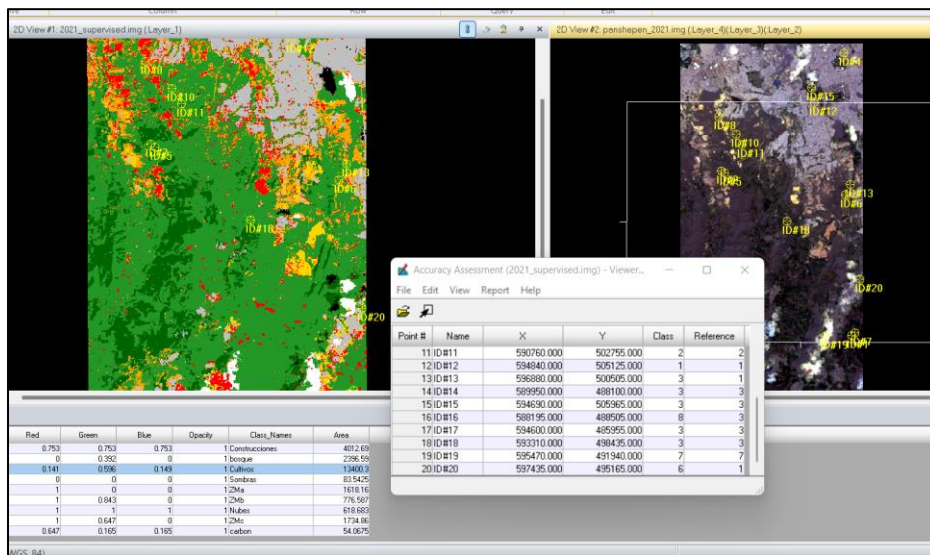


Ilustración 12 Confrontación Puntos de validación, fuente autores 2022

La evaluación de los puntos dio un porcentaje de acierto 65%, lo cual genera poca confiabilidad en la imagen y el sistema de generación de áreas realizadas por el sistema, con el fin de convalidar los datos se realizó una nueva clasificación supervisada disminuyendo la cantidad de coberturas desde ArcGIS Pro.

ACCURACY TOTALS						
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy	
Unclassified	0	0	0	---	---	
Construcciones	4	3	2	50.00%	66.67%	
bosque	2	2	2	100.00%	100.00%	
Cultivos	9	11	8	88.89%	72.73%	
Sombras	0	0	0	---	---	
ZMa	0	1	0	---	---	
ZMb	2	1	0	0.00%	0.00%	
Nubes	3	1	1	33.33%	100.00%	
ZMc	0	1	0	---	---	
carbon	0	0	0	---	---	
<b>Totals</b>	<b>20</b>	<b>20</b>	<b>13</b>			
Overall Classification Accuracy =		65.00%				
----- End of Accuracy Totals -----						

Ilustración 13 Reporte de exactitud temática ERDAS Imagine, fuente autores 2022



La nueva clasificación contempla las siguientes clasificaciones de coberturas:

TIPO DE COBERTURA	COLOR
Construcciones	Gris
Zonas arbóreas	Verde Oscuro
Sombras	Negro
Nubes	Blanco
Suelo con afectación minera	Naranja
Quema de Carbón	Café
Cuerpos de agua	Azul

Tabla 3 Clasificación de coberturas ArcGIS Pro, fuente autores 2022

La clasificación supervisada es una de las funciones preestablecidos en ArcGIS Pro con su herramienta *Classification Wizard* ubicada en la cinta de trabajo de *Imagery*, el tipo de clasificación fue basada en píxeles, con una temática estándar NLCD 2010 y un método de aproximación de vecino mas cercanos *K-Nearest Neighbor*.

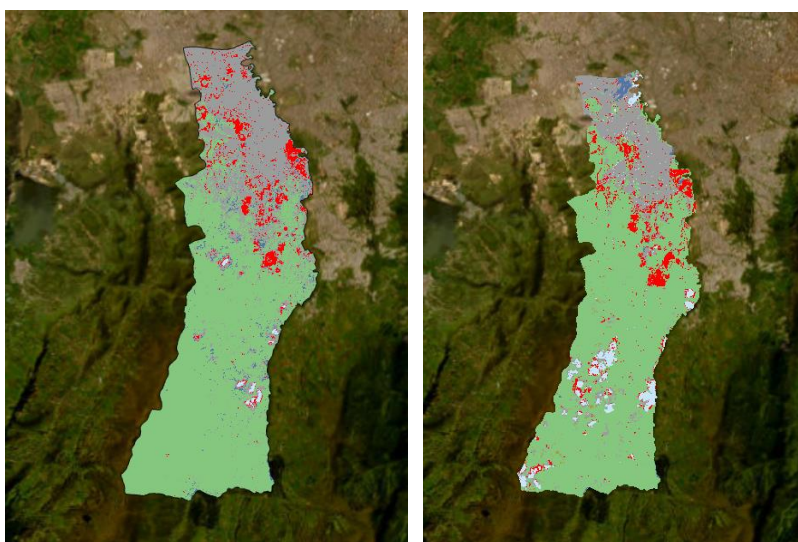


Ilustración 14 Clasificación supervisada de imágenes ArcGIS Pro, fuente autores 2022

Para validar la corrección de información se realiza la matriz de confusión con una aleatoriedad de 50 puntos, generando una clasificación de la imagen de un 84.28%, debido a la nubosidad que presentan las imágenes satelitales en el sector se estima que los porcentajes de confiabilidad deben varían entre estos rangos, por lo cual se procede a realizar el análisis de coberturas desde ArcGIS Pro, debido a que este último presenta un 19.28 % más en la asociación de los datos.

OBJECTID *	ClassValue	C_10	C_20	C_30	C_41	C_50	C_90	Total	U_Accuracy	Kappa	
1	1	C_10	2	6	2	0	0	10	0,2	0	
2	2	C_20	0	10	0	0	0	10	1	0	
3	3	C_30	0	0	8	0	0	10	0,8	0	
4	4	C_41	0	0	0	20	0	20	1	0	
5	5	C_50	0	1	0	0	9	10	0,9	0	
6	6	C_90	0	0	0	0	0	10	1	0	
7	7	Total	2	17	10	20	9	12	70	0	0
8	8	P_Accuracy	1	0,588235	0,8	1	1	0,833333	0	0,842857	0
9	9	Kappa	0	0	0	0	0	0	0	0,8075	

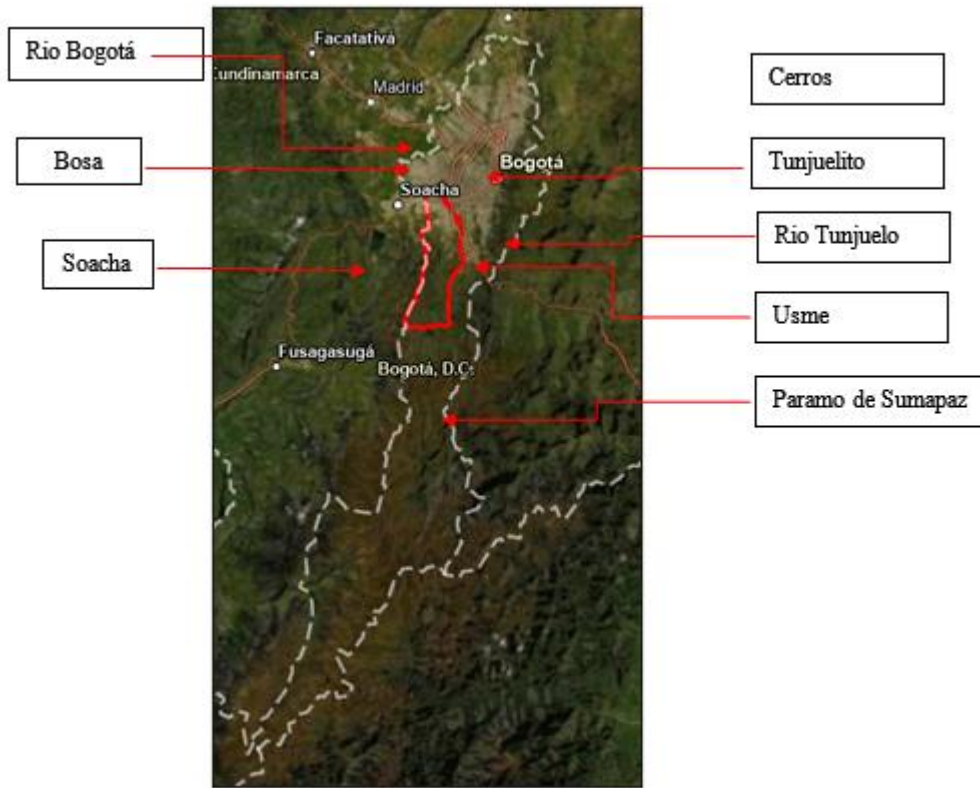
*Ilustración 15 Reporte de exactitud temática ArcGIS Pro, fuente autores 2022*

La presentación de la información se realiza por medio de salidas graficas que están validadas en la presentación de las imágenes multitemporales juntos con la estimación del crecimiento de las áreas en la afectación del suelo producto de actividades de extracción minera.

## 5.2. Verificación de campo

La zona de estudio se encuentra ubicada la capital, una zona geomorfológicamente interesante cubierta en gran parte por los cerros orientales, Bogotá se encuentra dividida políticamente por veinte localidades con su principal río denominado el río Bogotá, para mayor determinación del área de selección ya que este corresponde a la localidad 19 de Ciudad Bolívar que cuenta con componentes urbanos y rurales en el sur de la ciudad.

Ciudad Bolívar cuenta con un sistema hídrico principal perteneciente al río Tunjuelo, colinda con la localidad de Tunjuelito al norte, al oriente con la localidad de Usme, al occidente con la localidad de Bosa y al sur con de municipio de Soacha.



*Ilustración 16 Zona de estudio, fuente autores 2022*

Para la identificación de las zonas expuestas por minería, se realizaron 6 visitas en campo, realizadas tanto en la zona urbana como en la zona rural, las cuales tenían como objetivo verificar las condiciones analizadas desde las imágenes satelitales para validar, la exposición del suelo y su adecuada clasificación.







*Ilustración 17 Soporte fotográfico de visita, Fuente: Los Autores 2022*

Una vez verificadas las actividades en terreno, algunas de las áreas de impacto ambiental como la quema de carbón eran de áreas menores a los 1200 m<sup>2</sup>, lo que dificultó la lectura por parte de los satélites y su respectiva clasificación.

En el trabajo de campo se evidenciaron diferentes tipos de coberturas donde se evidenció los diferentes tipos de coberturas presentes en el área de estudio y para obtener mejor precisión en los resultados se hizo dos veces el mismo procedimiento de selección y clasificación de coberturas por los programas ERDAS IMAGINE y ARCGIS PRO, el resultado de reporte de coberturas con mayor precisión fue el generado por ARCGIS PRO con un 84% de aceptación por lo cual los resultados fueron presentados por medio de este modelo.

Por último una vez realizado el análisis de la información se pudo consultar las áreas de afectación las cuales reflejaron un crecimiento durante el periodo del año 2014 hasta el 2021 con un porcentaje de 24,9% que es equivalente a 140.48 hectáreas, según los análisis de las

imágenes en el año 2014 la localidad de Ciudad Bolívar presentaba un área de afectación minera de 422.7 hectáreas explotadas y para el año 2021 tenía un total de 563.18 hectáreas

### 5.3. Presentación de imágenes multitemporales

La caracterización y zonificación de las coberturas presentes en la localidad y de acuerdo a los resultados expuestos en el número 5.1. del presente capítulo, se presentan como documentos anexos los cuales contienen la siguiente información:

Para el mapa de zonificación en el 2014:

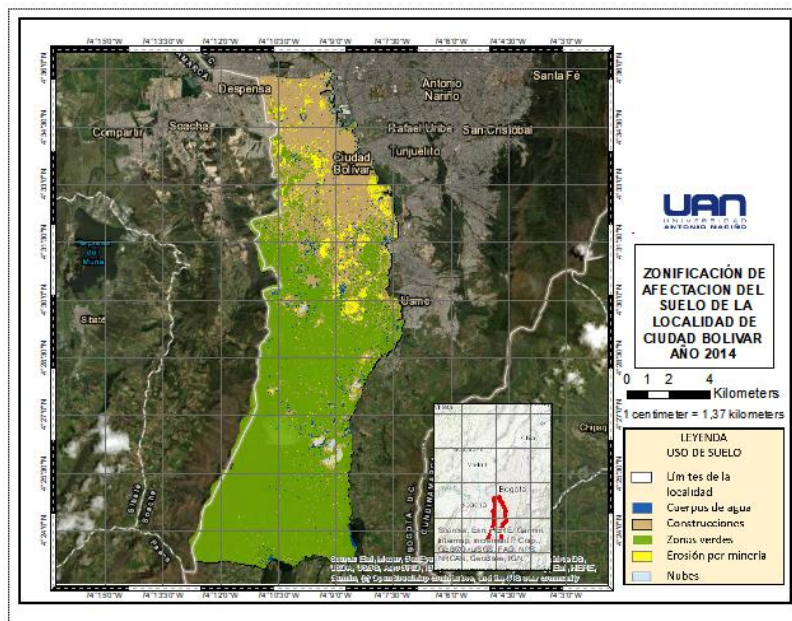


Ilustración 18 Mapa de zonificación de afectación del suelo de la localidad de Ciudad Bolívar año 2014, fuente autores



Para el mapa de zonificación en el 2021:

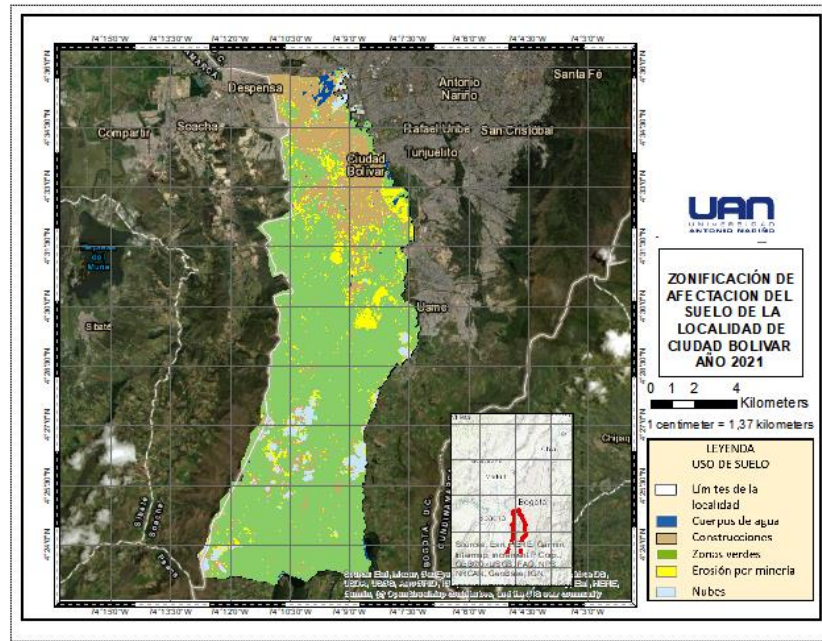


Ilustración 19 Mapa de zonificación de afectación del suelo de la localidad de Ciudad Bolívar año 2021, fuente autores

Comparación de los dos mapas en perspectiva, donde se evidencia un cambio significativo entre las dos imágenes.

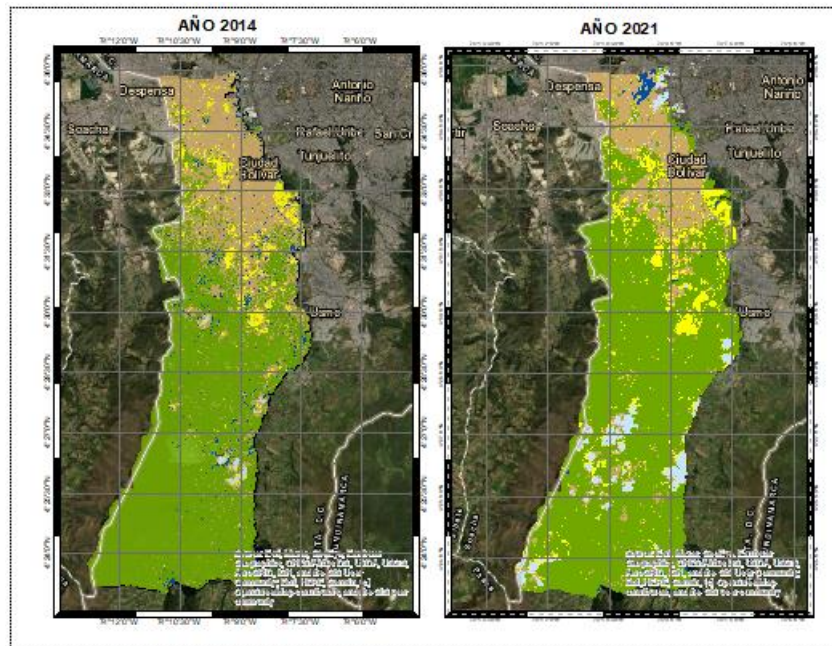


Ilustración 20 Comparación a través del tiempo de las imágenes 2014 y 2021

Por ultimo el mapa de zonificación multitemporal donde muestra las principales diferencias:

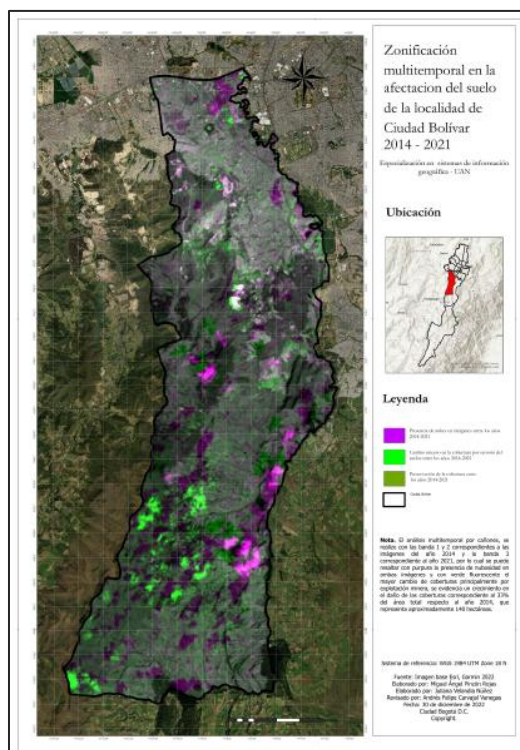


Ilustración 21 Mapa de zonificación multitemporal en la afectación del suelo de la localidad de Ciudad Bolívar 2014-2021

## **6. Conclusiones**

Del análisis multitemporal aplicado en la localidad de Ciudad Bolívar para la minería a cielo abierto, haciendo una comparación del año 2014 a 2021, se concluye que el análisis muestra una variación aproximada del 24.9%, teniendo una variación de 422.7 hectáreas explotadas a 563.18 hectáreas respectivamente a través del tiempo.

A manera de conclusión se pudo verificar que los usos suelo tuvieron un cambio en los 8 años, estas variaciones influyen directamente sobre los demás usos del suelo, aunque se determina en el paisaje que la zona más dominante en la zona son las zonas verdes,

Se puede decir que la clasificación supervisada es una herramienta muy efectiva para la identificación de coberturas en sitios de grandes superficies, este método permite reducir costos para la ejecución de cualquier proyecto y manteniendo la calidad de la interpretación.

Aunque se determinó con las imágenes el aumento significativo de minería en la localidad de Ciudad Bolívar hay que resaltar que en este análisis influyen varios factores como la diferencia de escala en las que se hacen las múltiples capturas, los insumos y metodologías usadas; esto hace que muchos de los procesos de estandarización y posible homogenización de la información dificulte la ejecución.

Se puede empezar a partir de estos resultados diseñar planes de mitigación, socialización con los mismos mineros para concientización de las afectaciones por parte de esta actividad y como mitigar el daño sin dejar de hacer su actividad pero con datos exactos y sabiendo en donde son las principales afectaciones.



## **7. Recomendaciones**

Hay que tener en cuenta que este proyecto se centró en la identificación de cambio de coberturas por explotación minera a cielo abierto, pero puede ser aplicada en la identificación de zonas de protección ambiental, conflictos de uso del suelo, zonas de reserva vial, Zonas de expansión urbana, entre otras.

Se determino después del análisis que las explotaciones son en zonas muy pequeñas y para tener mayor precisión en las áreas se debería hacer un levantamiento con drone, así se tendría mayor precisión.

Se debería establecer en los planes de ordenamiento territorial los nuevos usos del suelo haciendo una proyección de poblacional, teniendo en cuenta las áreas de invasión, las áreas de protección y sobre todo el páramo de Sumapaz.

## Bibliografía

Alcaldía Local de Ciudad Bolívar . (2019). *PLAN AMBIENTAL LOCAL DE CIUDAD BOLÍVAR VERSIÓN ACTUALIZADA 2019-2020*.

ambiente, M. d. (2020). *El ambiente es de todos*. Obtenido de [https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/885-plantilla-areas-planeacion-y-seguimiento-33#:~:text=Las%20Corporaciones%20Aut%C3%B3nomas%20Regionales%20y%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20\(CAR\)%20son,y%20propender%20por%20el%20desarr](https://www.minambiente.gov.co/index.php/component/content/article/885-plantilla-areas-planeacion-y-seguimiento-33#:~:text=Las%20Corporaciones%20Aut%C3%B3nomas%20Regionales%20y%20de%20Desarrollo%20Sostenible%20(CAR)%20son,y%20propender%20por%20el%20desarr)

Calixto Rodríguez, I. C. (2018). *Evaluación de daños ambientales por minería a cielo abierto en un lecho fluvial en Colombia, usando imágenes multiespectrales*. Manizales : Universidad de Manizales.

Chaves, E. A. (2018). *Caracterización de vivienda y población de la zona rural de Bogotá D.C*. Bogotá: Secretaria Distrital de Planeación.

Chuvieco, E. (1995). *FUNDAMENTOS DE TELEDETECCION ESPACIAL*. España: EDICIONES RIALP S.A.

CHUVIECO, E. (2010). *Teledetección Ambiental - Nueva Edición Actualizada*. Madrid: Ariel.

Comelli, M., Hadad, M., & Petz, M. (12 de Octubre de 2010). Hacia un desarrollo (in)sostenible en América Latina.El caso de la minería a cielo abierto en la Argentina. *Revista de critica social*, págs. 133-138.

Corredor Pérez, J. A., Sua Serrato, C., & Cardenas Ruiz, L. (13 de 04 de 2022). ¿Por qué le siguen sacando la piedra a la montaña? *Sin Comillas*.

Diana Patricia Lozano Zafra, J. F. (2008). *Aproximación a la cuantificación de pasivos ambientales relacionados con la minería en la Localidad de Ciudad Bolívar – Bogotá D.C. mediante el análisis multitemporal de fotografías aéreas e imágenes satelitales*. Bogotá: Grupo de Investigación Terrae. Geología Ambiental.

G, V. (1999). *Guía Técnica para la zonificación de la susceptibilidad y la amenaza por movimientos en masa*. Bogotá: Instituto Geografico Agustin Codazzi - IGAC.

G. K. TRIPATHY, T. K. (2007). *Monitoring of desertification process in Karnataka state of India using multi-temporal remote sensing and ancillary information using GIS*. Karnataka: International Journal of Remote Sensing,.

- Garzón Tovar, L. N. (2013). *Análisis preliminar de los impactos ambientales y sociales generados por la minería de arcillas a cielo abierto en la vereda El Mochuelo Bajo, Ciudad Bolívar, Bogotá D.C., estudio de caso*. Bogotá D.C.: Pontificia Universidad Javeriana.
- IGAC. (18 de Septiembre de 2022). IGAC. Obtenido de IGAC: <http://www.ideam.gov.co/web/ecosistemas/metodologia-corine-land-cover#:~:text=La%20base%20de%20datos%20de,de%20cobertura%20a%20diferentes%20escalas>.
- J. M. Moreira, I. R.-C. (2009). *SISTEMA INTEGRADO DE GESTIÓN Y CONSULTA DEL CATÁLOGO DE INFORMACIÓN RASTER DE LA RED DE INFORMACIÓN AMBIENTAL DE ANDALUCÍA (REDIAM)* . Andalucía : Teledetección XIII Congreso.
- Lange González, G. A. (2018). *Análisis multitemporal de la deforestación y cambio de la cobertura del suelo de la ciudad de Puerto Ayora – Santa Cruz mediante el uso de la teledetección y sistemas de información geográfica*. Guayaquil: Universidad de Guayaquil.
- Morales, J. F. (2009). *La relación de la geología y las aguas subterráneas*. Bogotá: Grupo de investigación de geología ambiental TERRAE.
- Peñuela, F. A. (2011). *Restauración Ambiental de las Zonas de mayor Riesgo en la Ciudad de Bogotá*. Bogotá D.C.: Universidad Distrital Francisco Jose de Caldas.
- Reina, M. C. (2008). *La minería en Colombia: impacto socioeconómico y fiscal*. Bogotá: ASOMINEROS.
- Salamanca, C. E. (2014). *transformaciones socioespaciales en el área rural de la localidad Ciudad Bolívar, Bogotá D.C. (1997-2010)*. Bogotá: Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
- Secretaria Distrital de Gobierno. (2020). *Plan Ambiental Local 2020 -2024*. Bogotá: Secretaria Distrital de Gobierno.
- Sri Maryati, H. S. (2011). *GIS Database Template for Environmental Management of Mining in Indonesia*. Fukuoka: Journal of Geographic Information System.
- Torres, I. C. (2016). *INVESTIGACIÓN, DESARROLLO E INNOVACIÓN EN LADRILLERAS DEL PARQUE MINERO INDUSTRIAL EL MOCHUELO ESTUDIO DE CASO: LADRILLERA LAS CANTERAS S.A*. Bogotá: Clepzidra UAC.

- Yara Molina, M. (2019). *Seguimiento a las responsabilidades ambientales del contratista en la ejecución de las obras para la adecuación de la Quebrada Limas- parte baja*. Bogota: Universidad Distrital Fransisco Jose de Caldas.
- Yari, C. E. (2018). *Análisis del Servicio de Fiscalización Ambiental del Gobierno Regional Arequipa Sobre los Instrumentos de Gestión Ambiental Correctivos (IGAC): Métodos de Evaluación de Impactos Ambientales, Presentados en el Proceso de Formalización Minera; Arequipa 2014*. Arequipa: Universidad Católica de Santa María.