

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN MINERA A CIELO
ABIERTO EN EL MUNICIPIO DE DUITAMA A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT 7
Y SENTINEL-2A**



MIREYA PÉREZ UMAÑA

Trabajo de grado presentado como requisito para optar al título de:

**ESPECIALISTA EN
GEOMÁTICA**

**UNIVERSIDAD MILITAR NUEVA GRANADA
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESPECIALIZACIÓN EN GEOMÁTICA
BOGOTÁ, COLOMBIA
JUNIO DE 2018**

ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE LA ZONA DE EXPLOTACIÓN MINERA A CIELO ABIERTO EN EL MUNICIPIO DE DUITAMA A PARTIR DE IMÁGENES LANDSAT 7 Y SENTINEL-2A

TIME SERIES ANALYSIS OF THE OPEN PIT MINE IN THE MUNICIPALITY OF DUITAMA WITH LANDSAT 7 AND SENTINEL-2A IMAGES

Mireya Pérez Umaña. Ingeniera Geóloga, aspirante a Especialista en Geomática
Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia. u3101402@unimilitar.edu.co

Resumen— La información derivada del monitoreo de los impactos ambientales producidos por las explotaciones mineras a cielo abierto, es fundamental para estimar cuantitativamente los cambios ocurridos en los terrenos afectados por esta actividad. El Análisis Multitemporal realizado a partir de imágenes satelitales ópticas de libre adquisición Sentinel-2 y Landsat 7, es una alternativa de bajo costo para monitorear cambios de coberturas de terrenos alterados por actividades mineras. Este artículo muestra la utilidad del análisis de cambios en áreas de coberturas, mediante el método de clasificación supervisada, y mediante el cálculo del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) para dos tiempos diferentes, en el sector de explotación de Caliza en el municipio de Duitama, Boyacá. El cambio en las diferentes categorías definidas en la clasificación supervisada, mostró un aumento del 62,3% del área de la cantera en el periodo 2000 – 2018. La detección de cambios con el Índice de Vegetación permitió identificar y cuantificar el área donde se ha restaurado el terreno mediante la revegetalización como medida de mitigación por parte de los titulares mineros. El análisis multitemporal en áreas mineras utilizando imágenes de mediana resolución de acceso libre, es una herramienta rápida, de bajo costo para el monitoreo de impactos ambientales en áreas mineras.

Palabras clave— Clasificación Supervisada, NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada), explotación a Cielo abierto, Detección de cambios

Abstract— The information derived from the monitoring of environmental impacts produced by open-pit mining operations is essential to quantify the changes that have occurred in the lands affected by this activity. The Multitemporal Analysis made from optical satellital images of free acquisition Sentinel-2 and Landsat 7, is a low cost alternative to monitor land cover changes altered by mining activities. This article shows the usefulness of the analysis of changes in areas of coverage, by means of the supervised classification method, and by calculating the

Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) for two different times, in the exploitation of Limestone in the municipality of Duitama, Boyacá. The change in the different categories defined in the supervised classification showed an increase of 62,3% in the area of the quarry in the period 2000 - 2018. The change detection method, allows the quantification of the areas

restored in reclaim zones of mine land through revegetation as a mitigation measure performed by the mine owners. Multitemporal analysis in mining areas using medium resolution free access images is a fast and low cost tool for monitoring environmental impacts in mining areas. Key words—Supervised Classification, NDVI (Normalized Difference Vegetation Index), Open Pit mining, Change Detection.

I. INTRODUCTION

Las zonas con actividad minera a cielo abierto generan impactos en el medio ambiente, tales como alteración de paisaje, deterioro en la calidad del aire, alteración de fuentes hídricas, impactos sociales, entre otros. Dentro de estos, el cambio de coberturas del suelo es la alteración más visible en los terrenos intervenidos. Con el monitoreo a partir de análisis multitemporal de imágenes satelitales ópticas de acceso libre, se puede evaluar cuantitativamente los cambios de cobertura ocurridos a través del tiempo y se puede determinar cómo afecta el uso del suelo el desarrollo de las actividades mineras.

El incremento en la demanda de materiales de construcción, como el cemento, conlleva a un aumento en las áreas donde se explotan materias primas para su fabricación, entre ellas el mineral caliza. Igualmente el uso de la caliza en otras industrias como la siderúrgica ha incrementado sus áreas de explotación.

En el departamento de Boyacá existen depósitos de caliza, que por su ubicación estratégica cerca a otros yacimientos como hierro y carbón permitieron el desarrollo de industrias como la siderúrgica y cementera.

Por lo anterior, se destaca la importancia de desarrollar proyectos mineros que integren aspectos técnicos junto con aspectos ambientales en cada etapa de su avance. Por esto, es necesario conocer a profundidad los efectos de las explotaciones a cielo abierto, en el medio ambiente y comunidades vecinas, con el fin de contar con un inventario de los terrenos afectados, y monitorear los cambios infringidos en estos.

El objetivo principal del Análisis Multitemporal elaborado

en el presente artículo, fue determinar el cambio de coberturas en el área minera de la cantera de explotación de Caliza localizada en el municipio de Duitama, durante los años 2000 y 2018, aprovechando el acceso a fuentes de información libre y disponibles en la actualidad, tales como las imágenes ópticas Landsat y Sentinel.

La información derivada del Análisis Multitemporal, puede utilizarse como base en la construcción de un inventario de coberturas para la zona minera evaluada, y a partir de este, formular los planes de restauración requeridos como compensación por parte de los proyectos mineros ante las autoridades minera y ambiental.

A partir del análisis realizado, se elaboraron los mapas temáticos para las coberturas de los años 2000 y 2018 del área de la cantera, para luego cuantificar el cambio ocurrido en dicho periodo de tiempo. Los mapas se obtuvieron mediante el método de clasificación supervisada, a partir de la definición de clases según las firmas espectrales definidas en los campos de entrenamiento.

El artículo se organizó en cuatro secciones así: la sección del Marco Teórico describe los conceptos básicos de minería a cielo abierto, las aplicaciones de análisis de imágenes Landsat y Sentinel para la clasificación de coberturas de terreno, y las aplicaciones de análisis de los Índices de Vegetación para detectar cambios de coberturas en diferentes tiempos en áreas mineras.

En la sección de Materiales y Datos, se definió el área de estudio que comprende el polígono de la explotación de caliza, en los municipios de Duitama, cuya cantera es visible en las imágenes satelitales con resoluciones espaciales de 30 metros y 10 metros respectivamente. Además, se describen las especificaciones técnicas de las imágenes Landsat 7 y Sentinel-2A utilizadas, y las fuentes de donde se descargaron las imágenes de libre acceso correspondientes a los años 2000 y 2018.

La sección de metodología describe el tratamiento digital de las imágenes, el recorte del área de interés y el flujo de trabajo seguido en la clasificación supervisada para la generación de los mapas de cobertura vegetal para los años 2000 y 2018. Igualmente se describe la metodología utilizada para obtener los mapas de Índices de Vegetación para los dos años, y la extracción de diferencias de áreas en los cambios detectados en este periodo de tiempo.

Por último, en la sección de resultados se describe el porcentaje de área que sufrió cambios de cobertura en las zonas de explotación y los cambios de usos de terrenos dentro del área minera a medida que avanzó el desarrollo de los trabajos mineros.

II. MARCO TEÓRICO

A continuación se describen los sistemas de explotación de yacimientos, que se utilizan en la actualidad para la extracción de materiales de construcción, como la caliza. También se muestran varios casos de estudio donde se aplican tecnologías

con sensores remotos, para el monitoreo de zonas mineras en diferentes países. Por último, se explican los conceptos de clasificación supervisada para imágenes ópticas, aplicados para obtener los mapas de coberturas de terreno. Así como las definiciones y ecuaciones utilizadas para calcular los índices de vegetación para determinar la presencia y estado de la vegetación de las zonas mineras.

A. Métodos de Explotación a Cielo Abierto

Los métodos de explotación son aquellos en los que para extraer minerales se debe remover roca y una capa de suelo. Existen diferentes métodos de explotación de depósitos, bajo tierra y a cielo abierto. La explotación a cielo abierto es una alternativa económica y rentable, ya que se tiene acceso inmediato al mineral y solo se necesita remover la capa vegetal que cubre el depósito (Theilmann, 2013). Por lo general, el método a cielo abierto ofrece una recuperación de mineral alta, pero los impactos en el paisaje generados son mayores a aquellos generados por explotaciones subterráneas.

Las explotaciones de caliza por lo general consisten en canteras no muy profundas comparadas con las excavaciones para otros minerales. Sin embargo, estas explotaciones se expanden gradualmente con el tiempo. En estas se abren vías en los taludes de las montañas, mediante la construcción de terrazas ascendentes o descendentes, de forma que se tenga acceso para la maquinaria y personal.

El desarrollo de un proyecto minero, comprende tres etapas principales. La etapa de exploración, donde se identifican las áreas potenciales ricas en determinado mineral; la etapa de explotación, donde se extrae el mineral; y la etapa de cierre y abandono de minas. Los impactos ambientales generados por esta actividad deben ser evaluados en todo su espectro para la correcta formulación de planes de recuperación de los terrenos afectados por las explotaciones. Los impactos causados deben mitigarse desde la etapa de exploración, durante la explotación y luego de finalizada la actividad minera.

Según los lineamientos actuales de la autoridad minera, para la presentación de Programas de Trabajos y Obras -PTO, todos los proyectos mineros deben incluir dentro de sus planeamientos, un capítulo para la restauración de los terrenos desde el comienzo, durante y al finalizar las explotaciones. Para el diseño de los programas de restauración se puede utilizar como base, los mapas de coberturas de diferentes tiempos, antes, durante y al finalizar la explotación.

B. Monitoreo de Áreas Mineras a partir de sensores remotos

Con la disponibilidad de imágenes satelitales de acceso libre en diferentes portales de organizaciones que ofrecen la posibilidad de descargar información de diferentes sensores de cualquier área del planeta, se ha incrementado el uso de las técnicas de percepción remota para monitorear áreas mineras, y evaluar la influencia de las explotaciones a cielo abierto en el medio ambiente. A continuación se describen varios casos de

estudio donde el análisis de datos de imágenes satelitales, se utiliza como base para el monitoreo de áreas mineras y su influencia en el medio ambiente.

En la explotación a cielo abierto de lignito en Belchatow, Polonia, se realizó un estudio de detección de cambios y modelamiento en 2D de los terrenos aledaños a la mina, a partir del análisis de diferentes combinaciones de bandas de las imágenes Sentinel-2A/2B. Se aplicó corrección atmosférica en el tope de la atmosfera (TOA) a las imágenes ortorectificadas Nivel 1C, y utilizaron diferentes combinaciones de bandas para obtener clasificación de coberturas, de uso de suelo, y detección de cambios. La metodología se basó en las composiciones de color natural RGB, en el (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) NDVI y en la combinación en falso color Infrarrojo (Wajs, 2018).

Aunque no se trata del mismo mineral evaluado en el presente artículo, se puede replicar la aplicación de análisis de diferentes composiciones de bandas de imágenes Sentinel-2 para obtener los cambios de coberturas en las áreas mineras y los terrenos circundantes, en la explotación de caliza evaluada.

Otro ejemplo del uso de imágenes satelitales en el monitoreo de zonas mineras, es el análisis Multitemporal de imágenes Landsat en áreas de explotación de oro en Serra Tepequém en Brazil. Aquí se utilizaron técnicas de clasificación automatizada en una serie de imágenes Landsat 7, con el objeto de mapear y monitorear la evolución de áreas degradadas por las actividades mineras en el período de doce años desde 1987 hasta 1999. Los resultados demostraron que los mapas obtenidos con el análisis multitemporal de imágenes Landsat son una base confiable para el monitoreo de la evolución de zonas de degradación del suelo a través del tiempo (Almeida-Filho, C., & Melo, 2000).

Otro caso de estudio evaluado, fue el análisis de detección de cambios mediante la clasificación basada en objetos en el área de la explotación a cielo abierto de Pingshuo, en la provincia de Shanxi, China, donde se elaboró un monitoreo a escala local y se identificaron cambios en un intervalo de tiempo corto. Solo que aquí se utilizaron imágenes RapidEye y SPOT 7 de Alta resolución espacial, 4 metros y 4.27 metros (Miaolin Zhang, Wei Zhou, & Yifan Li, 2017).

En Colombia, la aplicación de índice espectral para la identificación de zonas de canteras, se realizó mediante la extracción del índice, Soil Composition Index SCI de dos imágenes Landsat 7 y Landsat 8. Se obtuvo la clasificación de coberturas y detección de cambios para la zona minera Mondoñedo, Cundinamarca, donde en un período de doce años se incrementó el área de suelo desnudo en un 300 por ciento. (Rojas Montero, 2016).

De igual forma, para las regiones con explotaciones de oro de aluvión, el análisis de series de tiempo de imágenes Landsat 7 y 8 permitió el monitoreo continuo de la degradación de suelo por explotación (Acosta Díaz; Ferreira Borda, 2017). El documento, Explotación de Oro de Aluvión Evidencias a partir de percepción remota, elaborado en colaboración de la Oficina de Las Naciones Unidas UNODC, el Ministerio de Justicia y

del Derecho, y otras entidades estatales, delinea una metodología para el monitoreo de pérdidas de coberturas mediante la detección de cambios a partir de índices espectrales.

C. Clasificación Supervisada y aplicaciones en áreas mineras

La clasificación digital de imágenes 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. La clasificación supervisada se basa en la selección manual de muestras de píxeles dentro de la imagen, que son representativas de una determinada categoría o clase. Luego, 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 (Chuvieco, 1995). Para 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 obtiene 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.

La aplicación de este método de clasificación para el análisis multitemporal en áreas con explotación a cielo abierto se evidencia en el caso de la mina de Belchatow (Wajs, 2018), donde se generaron mapas de coberturas del área minera y se evaluaron los cambios en las coberturas del terreno en diferentes años, a partir del análisis de imágenes Sentinel-2A / 2B.

Asimismo, como lo indican (Weitao Chen, Lizhe Wang, Haixia He, & Xianju Li, 2018) en su artículo sobre la importancia de la clasificación de coberturas de tierra y uso del suelo en áreas mineras, la elaboración precisa de una Clasificación de Coberturas de Tierra en Áreas Mineras (LCCMA por sus siglas en inglés) es clave para entender los impactos en el geo-ambiente a nivel regional. Sin embargo, los autores hacen énfasis en el uso de imágenes satelitales de alta resolución, al menos de 4m de resolución espacial, como insumo base para la interpretación de coberturas de tierra en áreas mineras a una escala detallada, estas imágenes no son de acceso libre por lo que es difícil obtenerlas. Además el proceso de clasificación detallada conlleva mucho tiempo y debe ser realizada por profesionales expertos en el tema. Para esto, desarrollaron una metodología automatizada para acelerar el proceso de clasificación.

Por otro lado, es necesario tener en cuenta las limitaciones encontradas por varios investigadores al generar LCCMA en áreas mineras mediante el uso de imágenes Landsat TM de resolución media. La principal es que se mezclan varios elementos de las áreas mineras en una sola clase o categoría, lo que afecta la precisión de la cartografía resultante. En varios estudios con imágenes Landsat, la precisión de la clasificación

de coberturas en áreas mineras alcanzó solo el 60% (Weitao Chen, Lizhe Wang, Haixia He, & Xianju Li, 2018).

De igual manera, se debe considerar los factores que afectan la clasificación LCCMA, según Weitao Chen, Lizhe Wang, Haixia He, & Xianju Li, (2018) son: la presencia de entidades tridimensionales del terreno, tales como las excavaciones o pits, vías internas, botaderos de estéril. Desde el punto de vista de paisaje, las áreas mineras se dividen en montículos, taludes inclinados, terrazas, pie de talud, terreno plano seco, terreno plano húmedo. El segundo factor es la alta variabilidad de las clases, ya que la actividad minera cambia las coberturas constantemente; y el último factor es la homogeneidad espectral espacial de las entidades.

D. Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada –NDVI

Los índices se utilizan para discriminar diferentes coberturas vegetales, a partir de su comportamiento radiométrico. Al comparar la firma espectral de vegetación sana, vegetación seca y suelo, se puede determinar el estado de la vegetación o la ausencia de esta. Así, las áreas con suelo descubierto, como las zonas mineras, presentan una curva plana y no muestra una gran variación espectral para diferentes longitudes de onda. La vegetación seca presenta una menor variación entre las bandas del rojo y del IR cercano, respecto a la variación presentada para estas dos bandas en la vegetación sana (Chuvienco, 1995).

La evaluación de este índice en las explotaciones mineras, permite determinar el cambio en la cobertura vegetal a través de los años, y el aumento del área de suelo descubierto. Esto lo demostró (Wajs, 2018) quien desarrolló una metodología para el monitoreo de cambios de cobertura con base en el Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada.

III. MATERIALES Y DATOS

Para el desarrollo del presente artículo, se seleccionó como área de estudio una cantera activa de explotación de caliza localizada en el municipio de Duitama, Boyacá. Como insumos para el estudio se adquirieron dos imágenes ópticas de los satélites Landsat 7 y Sentinel-2, disponibles para descarga libre. Para el procesamiento de las imágenes y elaboración de los mapas, se utilizaron los softwares Geomática 2016 y ArcGIS 10.5.

A. Localización del área de estudio

El área de estudio de la explotación minera de caliza a cielo abierto está localizada en la zona central del departamento de Boyacá. El área incluye parte de la zona rural de los municipios de Duitama, y Santa Rosa de Viterbo (Figura 1). El polígono tiene un área de 1,480 hectáreas y hace parte del título minero otorgado para la explotación de caliza desde el año de 1991, según información consultada en la página de Catastro Minero Colombiano –CMC de la Agencia Nacional de Minería.

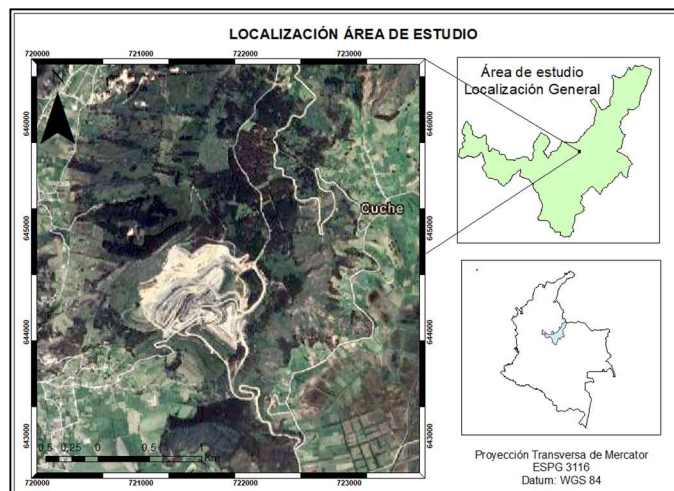


Figura 1. Localización de la cantera de explotación de Caliza. Municipio de Duitama. Fuente: Elaboración propia, con imágenes obtenidas de Google Earth Pro, Junio 2017.

B. Geología Regional

Dentro del área de estudio afloran rocas del Paleozoico hasta depósitos del Cuaternario, de origen aluvial. La formación Cuche del Paleozoico, conformada por limolitas y arcillolitas violetas y verdosas. A esta formación la suprayace cuatro miembros calcáreos de la Formación Tibasosa, que es de donde se extrae la caliza de la cantera objeto de estudio.

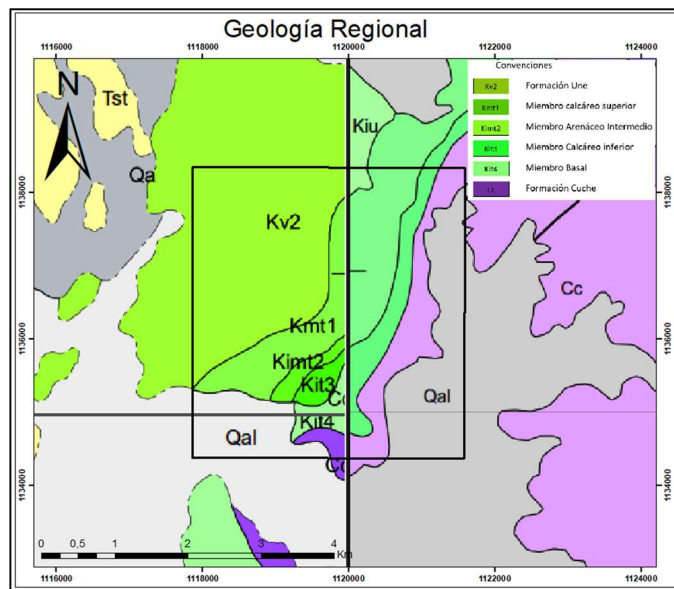


Figura 2. Geología regional del área de explotación. Fuente: Elaboración propia, con información de la Plancha 172 Paz de Río y Plancha 171 Duitama, del Ingeominas, 2001.

Las rocas de la formación Tibasosa, tienen un gran potencial económico, ya que están compuestas por cuatro miembros que contienen bancos de caliza económicamente explotables así: miembro basal (Kit4), conglomerados limolitas y arenisca; miembro calcáreo inferior (Kit3), shales calizas arenosas y

areniscas; miembro arenáceo intermedio (Kimt2) shales y arenisca; y el miembro calcáreo superior (Kmt1) shales, caliza lumaquéllica y areniscas, ver Figura 2.

La caliza en esta región contiene entre un 85,3% y 96,39% de carbonato de calcio CaCO₃, por lo que se puede utilizar además de la industria del cemento, en la industria del papel, en la producción de soda y como cal agrícola para corregir la acidez de los suelos (Ulloa, Rodriguez, & Rodriguez, 2001).

C. Adquisición de Imágenes

Las imágenes utilizadas para el Análisis Multitemporal, corresponden a dos productos Landsat 7 y Sentinel-2. La imagen Landsat 7 se descargó del portal web del United States Geological Survey (USGS) Earth Explorer (USGS, 2018). La imagen Sentinel se descargó del sitio web Scientific Hub de la European Space Agency ESA (ESA, 2018).

TABLA I
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS IMAGEN LANDSAT 7

Landsat ID	LE07_L1TP_007056_20000316_20170213_01_T1		
Producto			
Spacecraft ID	Landsat 7		
No. de bandas	7		
Adquisición	1989-12-23		
Sensor ID	TM		
Procesamiento	L1TP		
Path / Row	007 / 56		
Rango espectral (µm)	Bandas	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (metros)
	B1 (Azul)	0.45-0.52	30
	B2 (Verde)	0.52-0.60	30
	B3 (Rojo)	0.63-0.69	30
	B4 (IRC)	0.77-0.90	30
	B5 (IR1)	1.55-1.75	30
	B7 (IR2)	2.09-2.35	30
	B8(Pancrom)	0.52 – 0.90	15
Resolución temporal	16 días		
Resolución radiométrica	8 Bits		

Se seleccionó la imagen del satélite Landsat 7, lanzado en marzo de 1998. El sensor ES ETM+ del satélite proporciona información en siete bandas espectrales, tres de ellas en el espectro visible, una en el infrarrojo cercano, dos en el infrarrojo medio y una en el infrarrojo termal. La Tabla 1 muestra las especificaciones de la imagen Landsat 7 utilizada en el análisis.

La imagen adquirida en diciembre de 2000, muestra el área de estudio luego de 9 años de comenzar la explotación. Se seleccionó la imagen de satélite Sentinel-2A, ya que la información obtenida con el sensor MSI (Multi-Spectral Instrument) proporciona imágenes multispectrales de una resolución espacial alta y con una resolución temporal de cinco días de periodo de revisita para la zona del Ecuador. Además registra información en cuatro bandas con una resolución espacial de 10 m.

TABLA 2
ESPECIFICACIONES TÉCNICAS IMAGEN SENTINEL-2

Sentinel ID	S2A_MSIL1C_20180317T151701_N0206_R125_T18NY		
Product	M_20180317T184033		
Spacecraft ID	Sentinel-2A		
No. de bandas	13		
Adquisición	2018-03-17		
Sensor ID	MSI		
Procesamiento	Level 1C		
Path / Row	007 / 56		
Rango espectral (µm)	Bandas	Longitud de onda (µm)	Resolución Espacial (m)
	B1 (Aerosol)	0.443	60
	B2 (Azul)	0.490	10
	B3 (Verde)	0.560	10
	B4 (Red edge)	0.665	10
	B5 (VNIR)	0.705	20
	B6 (VNIR)	0.740	20
	B7 (VNIR)	0.783	20
	B8 (VNIR)	0.842	10
	B8A (VNIR)	0.865	20
	B9 (SWIR)	0.945	60
	B10 (SWIR Cirrus)	1.375	60
	B11 (SWIR)	1.610	20
	B12 (SWIR)	2.190	20
Resolución radiométrica	16 Bits		

La información obtenida con Sentinel-2 permite realizar caracterización de coberturas con gran detalle. Sentinel-2 recopila información en 13 bandas espectrales en los rangos del espectro visible y del infrarrojo cercano (VNIR) y en el espectro de ondas cortas (SWIR) (Wajs, 2018) ver Tabla 2.

IV. METODOLOGÍA

Para obtener el análisis Multitemporal de la zona de estudio se diseñó un flujo de trabajo, que incluye el análisis de cambios de coberturas y el análisis del cambio en el NVDI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada) para el área de explotación y en sus alrededores. Para el análisis de cambios de coberturas, se tomó como guía, la metodología CORINE (Coordination of Information on the Environment) Land Cover 1990, que define un flujo de trabajo para obtener el inventario de coberturas de la tierra. La versión para Colombia Corine Land Cover –CLC permite la clasificación, caracterización y comparación de diferentes coberturas a partir de la interpretación de imágenes satelitales de mediana resolución para la elaboración de mapas temáticos de coberturas a diferentes escalas. En la Figura 3, se muestra el flujo de trabajo seguido, adaptado de la metodología CLC para Colombia a escala 1:100.000 para elaborar la clasificación de coberturas del área de interés. También se incluye el método seguido para el tratamiento de las imágenes, selección de herramientas de procesamiento de datos, selección de algoritmos para clasificación supervisada de coberturas, algoritmo para cálculo del índice de Vegetación NDVI, y el algoritmo para la detección de cambios en el índice de vegetación.

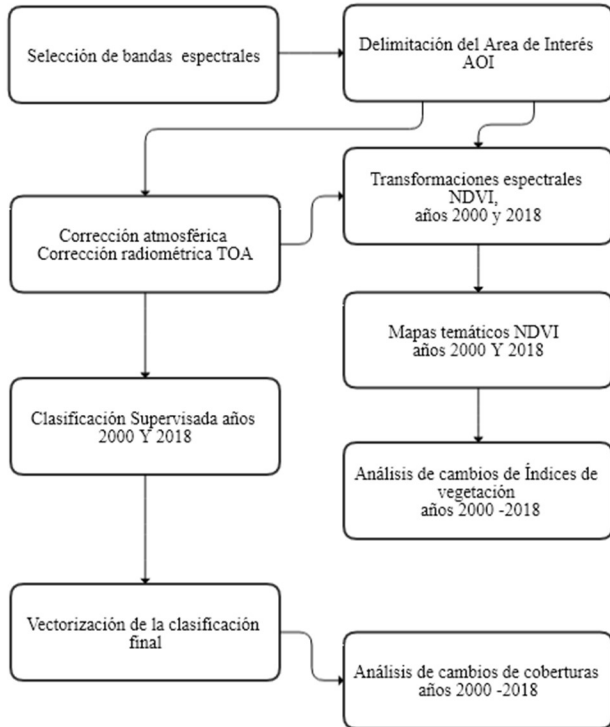


Figura. 3. Flujo de procesos seguidos para la elaboración de los mapas temáticos de coberturas y NDVI de los años 2000 y 2018. Fuente: Elaboración propia.

A. Selección de bandas

De la imagen Landsat 7 se seleccionaron las bandas de trabajo B1 azul (450 -520 nm), B2 Verde (520 – 600 nm), B3 (rojo) (630 – 690 nm), y B5 (Infrarrojo cercano) con una resolución espacial de 30 m.

TABLA 3
BANDAS SELECCIONADAS PARA EL PROCESAMIENTO DIGITAL DE IMÁGENES

LANDSAT 7	SENTINEL-2A
B1 (450 -520 nm)	B2 (490 nm)
B2 (520 – 600 nm)	B3 (560 nm)
B3 (630 – 690 nm)	B4 (665nm)
B4 (760 – 900 nm)	B8 (842 nm)
B5 (1550-1750 nm)	B11(1620 nm)

De la imagen Sentinel-2A se seleccionaron las bandas B2 (490 nm), B3 (560 nm), B4 (665 nm) y B8 (842 nm) que tienen una resolución espacial de 10 m. La Tabla 3 muestra la comparación entre las bandas seleccionadas de los dos satélites para el desarrollo del flujo de trabajo.

B. Procesamiento Digital de Imágenes

Dentro del tratamiento digital de las imágenes se incluyen la calibración radiométrica, la corrección atmosférica y el realce de las imágenes Landsat y Sentinel mediante el software Geomatica V. 2016. Se hizo una fusión (*pansharpened*) de la banda pancromática con las bandas multispectrales de la imagen Landsat 7 para mejorar la resolución espacial de estas últimas y así generar una clasificación más detallada.

A la imagen Sentinel-2A se realizó la corrección atmosférica y radiométrica, al final se obtuvo una imagen nueva con los valores de reflectancia para continuar con el proceso de clasificación. Luego se hizo el recorte del área de estudio con la herramienta *clipping* del software Geomática, Figura 4.

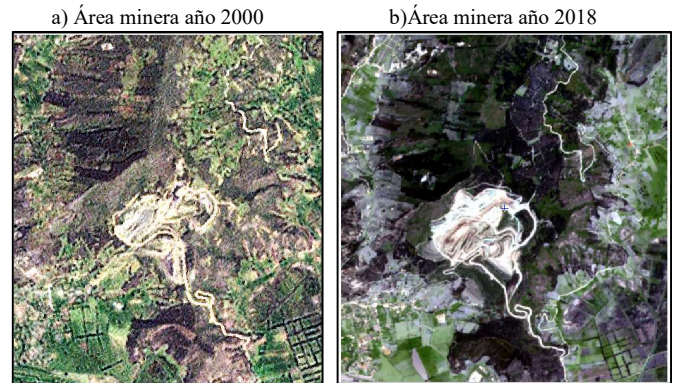


Figura. 4. a) Recorte del área de estudio, luego del proceso de fusión de las bandas multispectrales y la banda pancromática de la imagen Landsat 7, RGB: 321. b) Imagen Sentinel-2A composición color natural, RGB: 432.

C. Clasificación supervisada

Con el propósito de identificar los tipos de cobertura presentes en el área de explotación y en los alrededores de esta, en los años 2000 y 2018, se seleccionaron muestras dentro y fuera de la zona de cantera, y se definieron seis categorías para clasificar las coberturas encontradas en el área minera y sus alrededores así: pastos, urbano, bosque, cultivos, suelos y canteras. Para seleccionar los campos de entrenamiento, se utilizó la composición RGB mostrada en la Figura 5.

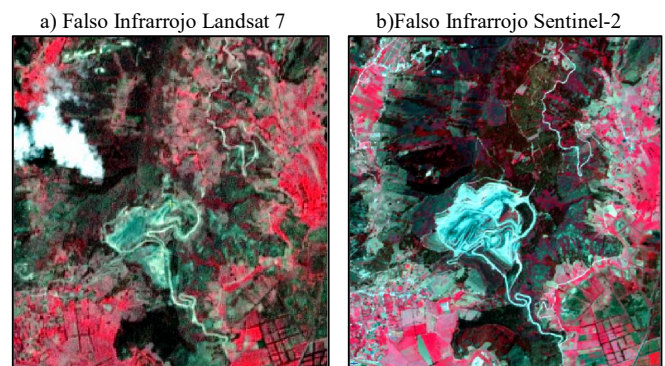


Figura. 5. a) Sentinel 2, composición RGB: 432. b) Landsat 7, composición RGB: 843. Utilizadas para definir campos de entrenamiento en la clasificación supervisada.

Ya que para realizar la clasificación de coberturas se contó con imágenes de mediana resolución, 10 m para Sentinel-2 y 15 m para Landsat 7, las categorías creadas solo definen las coberturas donde la vegetación muestra firmas espectrales bien diferenciadas. La creación de categorías más detalladas dentro del área de explotación, tal como lo demostró (Weitao Chen, Lizhe Wang, Haixia He, & Xianju Li, 2018), en su estudio, no es posible ya que se necesitan imágenes de alta resolución.

Estas categorías se simplificaron ya que el objetivo primordial del análisis es determinar el avance de las áreas utilizadas para la explotación minera. La categoría de suelos incluye aquellas zonas con suelos desnudos y con escasa vegetación.

D. Cálculo de Índice de Vegetación –NDVI

El Índice de Vegetación Normalizada NDVI se utilizó para determinar las áreas con coberturas de vegetación en la cantera. Se calculó el NDVI solo para el área activa de la cantera para los años 2000 y 2018 y se determinó el porcentaje del cambio del índice dentro de la explotación activa. A partir de este cambio se puede establecer qué sectores dejaron de ser explotados y cuales han sido revegetalizados y restaurados. El cálculo del índice NDVI se obtiene de la ecuación (1),

$$NVDI_{i,j} = (ND_{i,j,IR} - ND_{i,j,R}) / (ND_{i,j,IR} + ND_{i,j,R}) \quad (1)$$

Para las imágenes Landsat y Sentinel corresponde a las bandas:

$$NVDI_{i,j} = (ND_{IR} - ND_{rojo}) / (ND_{IR} + ND_{rojo})$$

Una vez obtenido el NDVI para los dos años de estudio, se calculó el cambio aplicando el algoritmo de detección de cambios del software Geomática. Con este algoritmo se efectúa la sustracción de los valores de los píxeles, en este caso NDVI, de las dos imágenes. Para determinar el cambio, se calcula el vector de cambios de un píxel. Esto es, el vector que resulta de unir la posición espectral de un píxel en dos fecha distintas (Fernández Ruiz, 2017).

El cambio se determina al evaluar la detección mediante el cálculo del factor por defecto y el factor por exceso. Esto son los cambios verdaderos en los píxeles, aquellos que se detectan como cambios pero que no los son, y aquellos que no son detectados. El factor de exceso detecta incorrectamente zonas de cambio que no lo son y el factor por defecto indica el error por omisión cometido, es decir las zonas de cambio que no son detectadas automáticamente. (Fernández Ruiz, 2017)

V. ANÁLISIS Y RESULTADOS

Los resultados en esta sección corresponden a los cambios en áreas obtenidos a partir de la comparación de la clasificación supervisada para las categorías definidas, y los cambios en el área según el índice de vegetación obtenido para el área de la explotación.

A. Cambio de área de coberturas

Según los resultados obtenidos a partir de la clasificación supervisada, para el área de la cantera y sus alrededores, para el año 2000, la explotación minera comprendía un área de 51,6 hectáreas, Figura 6.

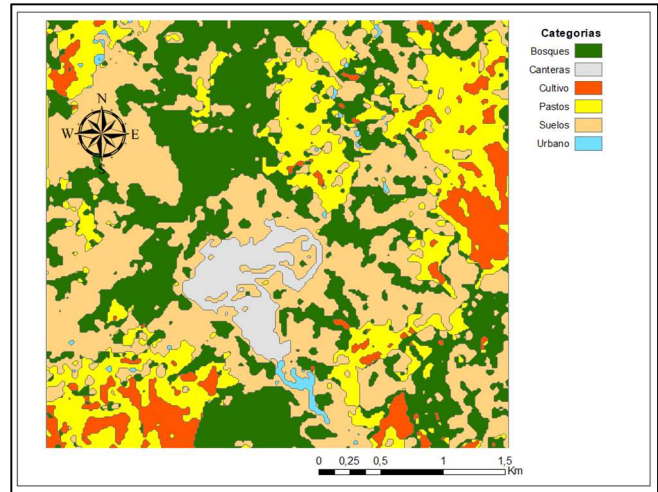


Figura 6. Mapa de coberturas del área de la explotación minera para el año 2000. Fuente: Elaboración propia.

Los resultados para el año 2018 muestran que se amplió el área de explotación a 83,73 hectáreas. El área de explotación aumentó en 32,15 hectáreas en el periodo evaluado de 18 años, Figura 7. Los cambios en el área de las categorías de coberturas definidas, se muestran en la Tabla 4.

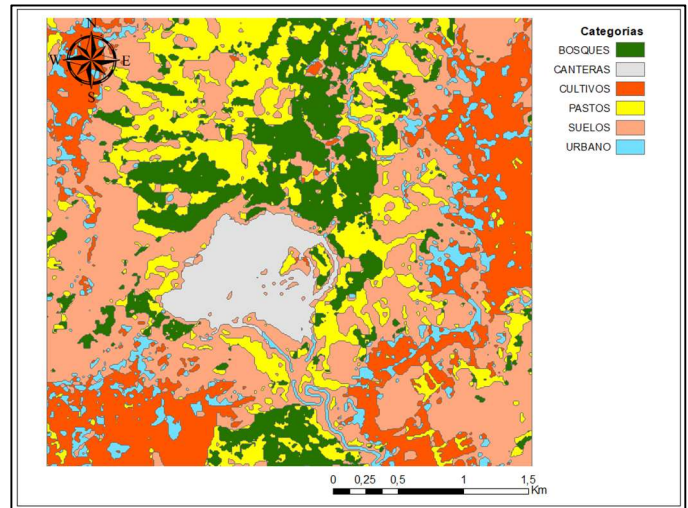


Figura 7. Mapa de coberturas del área de la explotación minera para el año 2018. Fuente: Elaboración propia.

TABLA 4
CAMBIO DE ÁREAS DE COBERTURAS AÑOS 2000-2018

Categoría	Área (ha) Año 2018	Área (ha) Año 2000	Diferencia áreas (ha)	Porcentaje Cambio (%)
Bosques	212,09	471,27	-259,18	-55
Canteras	83,73	51,58	32,15	62,3
Cultivos	311,71	121,99	189,73	155,5
Pastos	243,83	303,15	-59,32	-19,6
Suelos	572,59	521,40	51,19	9,8
Urbano	52,89	9,32	43,57	467,5

La categoría de bosques se redujo en 259, 18 hectáreas, al igual que la categoría de pastos, se redujo en 59,32 hectáreas. Las categorías de cultivos, suelos y urbano, mostraron un incremento en el área de cobertura. La Figura 8, muestra el cambio en porcentaje de las áreas de las categorías de coberturas definidas en la clasificación supervisada.

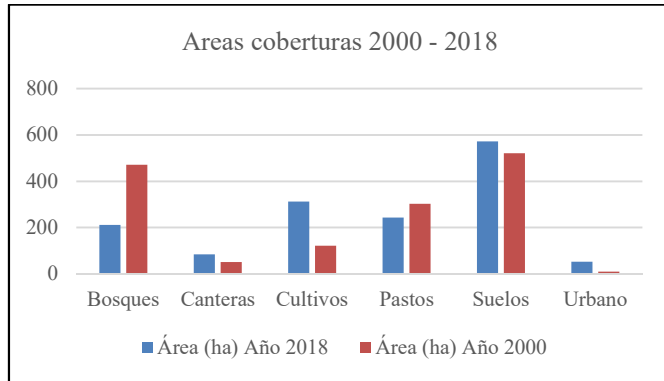


Figura 8. Valor de áreas en hectáreas de las categorías definidas para el análisis de clasificación supervisada. Fuente: Elaboración propia.

B. Detección de cambios a partir del NDVI

Los mapas obtenidos para el índice de vegetación NDVI, Figura 9, para los años 2000 y 2018, muestran las áreas en color verde que corresponden a los valores más bajos del índice. El valor del índice incrementa desde el verde, al amarillo, naranja hasta el rojo que es el valor más alto. Este valor define con claridad el área de explotación minera ya que está completamente desprovista de vegetación, y la roca aflora en superficie, mostrando los valores más bajos para el índice.

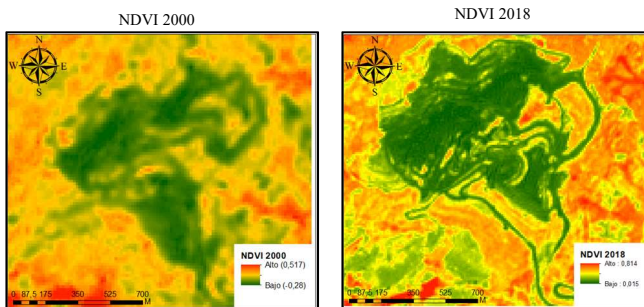


Figura 9. Mapas de índice NDVI, el valor del índice dentro de la cantera arrojó los valores más bajos, ya que no existe vegetación. Fuente: Elaboración propia.

La Figura 10, muestra el mapa elaborado con la detección del cambio en el índice NDVI. El color rojo en el mapa de detección de cambios corresponde al área con mayor cambio en porcentaje de índice. Se calculó el NDVI solo para el área activa de la cantera para los años 2000 y 2018 y se determinó el porcentaje del cambio del índice dentro de la explotación activa. A partir de este cambió se puede establecer que sectores dejaron de ser explotados y cuales sectores han sido revegetalizados y restaurados.

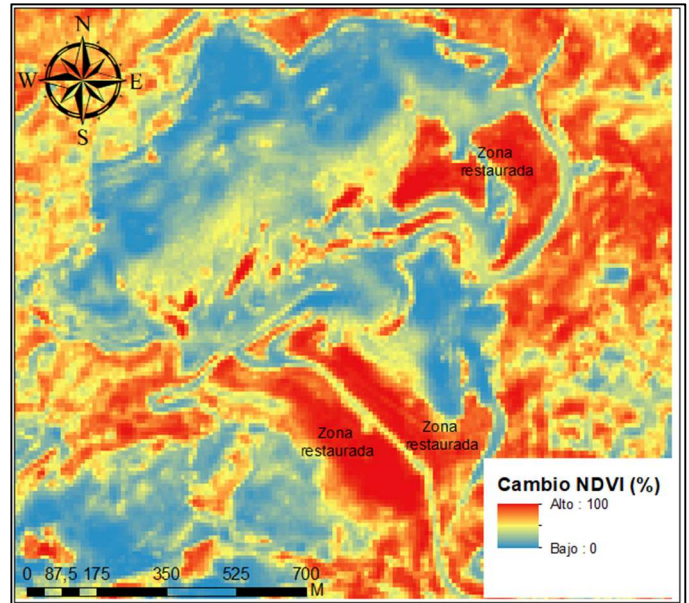


Figura 10. Mapa de cambios en el índice NDVI dentro del área de explotación. Fuente: Elaboración propia

Las áreas con color rojo dentro de la cantera corresponden a las áreas restauradas. En azul se observa la parte activa de la cantera, estas áreas están actualmente en explotación. Con la detección de cambios del índice NDVI, es posible monitorear las áreas dentro de las explotaciones donde se ha terminado la extracción y están bajo programas de restauración de acuerdo con los términos de referencia del Plan de Trabajos y Obras aprobado por la autoridad Minera.

VI. CONCLUSIONES

A partir del análisis de cambios de coberturas para los años 2000 y 2018 en la explotación de caliza, se determinó un aumento en el área de la cantera de 32,15 hectáreas, que corresponde a un 62,3%.

La cobertura de Bosques se redujo durante el periodo analizado, con una pérdida del 55 % en su extensión original. Según las imágenes analizadas, este cambio se produjo principalmente por el cambio de uso de suelo por zonas de cultivos. También se determinó un cambio por uso de suelos, posiblemente para la preparación de cultivos.

Según el cálculo del índice de vegetación, dentro del área de la cantera, se determinó que la zona norte sufrió una expansión, sin embargo también se evidenció que en el sector suroccidental se restauraron 17,2 hectáreas de terreno.

Mediante el uso de técnicas de monitoreo con sensores remotos, y con imágenes de acceso libre, es posible realizar un seguimiento a través del tiempo de las zonas de explotación minera a cielo abierto, y así proporcionar información útil tanto a las comunidades como a entidades gubernamentales, sobre las alteraciones sufridas en el medio ambiente, y evidenciar que se

esté cumpliendo con los planes de mitigación presentados ante las entidades gubernamentales.

Las áreas con menor índice NDVI, concuerdan con la información geológica de la zona, donde la extracción se hace en las calizas del Miembro Calcáreo Superior de la Formación Tibasosa.

REFERENCIAS

Almeida-Filho, R., C., E., & Melo, Y. (2000). Use of Landsat-TM Time-Series for Monitoring Erosion Features in Areas of Gold Exploration, Serra Tepequém, Roraima State, Brazilian Amazon. *International Archives of Photogrammetry and Remote Sensing*.

Chunzhu Guan, Baolin Zhang, Jiannan Li, & Junling Zhao. (2017). Temporal and spatial changes of land use and landscape in a coal mining area in xilingol grassland. *IOP Conference Series: Earth & Environmental Science*, 54(1), 1.

USGS. (2018). *USGS*. Obtenido de USGS: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Coulter, L. L., Stow, D. A., Tsai, Y., Ibanez, N., Shih, H., Kerr, A., Mensah, F. (2016). Classification and assessment of land cover and land use change in southern Ghana using dense stacks of landsat 7 ETM imagery. *Remote Sensing of Environment*, 184, 396.

Etter, A., McAlpine, C., & Possingham, H. (2008a). Historical patterns and drivers of landscape change in colombia since 1500: A regionalized spatial approach. *Annals of the Association of American Geographers*, (1), 2. Retrieved from <http://ezproxy.umng.edu.co:2048/login?url=http://search.ebscohost.com/ezproxy.umng.edu.co/login.aspx?direct=true&db=edsjrs&AN=edsjrs.25515096&lang=es&site=eds-live>

ESA. (2018). *Copernicus Open Access Hub*. Obtenido de Copernicus Open Access Hub: <https://scihub.copernicus.eu/>

Fernández Ruiz, L. A. (2017). Métodos de detección de cambios en teledetección. *Métodos de detección de cambios en teledetección*. ETSI. Geodésica, Topográfica y Cartográfica.

Miaolin Zhang, Wei Zhou, & Yifan Li. (2017). The analysis of object-based change detection in mining area: A case study with Pingshuo coalmine. *International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing & Spatial Information Sciences*, 42(2/W7), 1017.

Rojas Montero, D. A. (2016). Análisis multitemporal de imágenes Landsat para la identificación de áreas de canteras por índices ubicadas en el sector Mondoñedo del municipio de Mosquera - Cundinamarca años 2003 - 2015.

Theilmann, J. M. (2013). Strip and surface mining. *Salem Press Encyclopedia*.

Ulloa, C., Rodriguez, E., & Rodriguez, G. (Marzo de 2001). Geología de la Plancha 172 Paz de Río. *Memoria Explicativa, escala 1:100.000*. Bogotá, D.C., Colombia: INGEOMINAS.

Wajs, J. (2018a). First experience with remote sensing methods and selected sensors in the monitoring of mining areas - a case study of the Belchatow open cast mine. *E3S Web of Conferences*, 29, 1.

Weitao Chen, Lizhe Wang, Haixia He, & Xianju Li. (2018). A review of fine-scale land use and land cover classification in open-pit mining areas by remote sensing techniques. *Remote Sensing*, 10

Wu, B., Fang, C., Yu, L., Huang, X., & Zhang, Q. (2016). A fully automatic method to extract rare earth mining areas from landsat images. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 82(9), 729.