



**Análisis de cambio de coberturas mediante el uso de Google Earth Engine e  
imágenes Landsat en el Lago de Tota en el departamento de Boyacá.**

**David Ernesto Camargo Patiño**

Código: 11792222253

**Universidad Antonio Nariño**

Programa Especialización en Sistemas de Información Geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental y Civil

Bogotá, Colombia

2023



**Análisis de cambio de coberturas mediante el uso de Google Earth Engine e  
imágenes Landsat en el Lago de Tota en el departamento de Boyacá.**

**David Ernesto Camargo Patiño**

Proyecto de grado presentado como requisito parcial para optar al título de:  
**Especialista en sistemas de información geográfica**

Director (a):

Ingeniero Wilmar Jair Gómez Ríos

**Universidad Antonio Nariño**

Especialización en sistemas de información geográfica

Facultad de Ingeniería Ambiental

Bogotá, Colombia

2023



## NOTA DE ACEPTACIÓN

El trabajo de grado titulado

\_\_\_\_\_.

Cumple con los requisitos para optar

Al título de \_\_\_\_\_.

\_\_\_\_\_

Firma del Tutor

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

\_\_\_\_\_

Firma Jurado

Bogotá, Día Mes Año.

## Contenido

	<b>Pág.</b>
1. Preliminares .....	VIII
2. Resumen .....	7
3. Abstract.....	8
4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA .....	9
5. JUSTIFICACION .....	10
6. OBJETIVOS .....	11
6.1 OBJETIVO GENERAL .....	11
6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	11
7. MARCO TEORICO .....	11
8. ESTADO DEL ARTE .....	14
8.1 INTERNACIONAL .....	14
8.2 NACIONAL .....	17
8.3 REGIONAL .....	19
9. METODOLOGIA.....	21
10. RESULTADOS .....	31
11. CONCLUSIONES.....	43
12. RECOMENDACIONES .....	44
13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS .....	45

## Lista de Figuras

Figura 1. Corte de imágenes según área de estudio .....	22
Figura 2 Filtro de fecha y cobertura de nubes.....	23
Figura 3 Bando de imágenes landsat 7.....	24
Figura 4 Procesamiento para bando de imágenes. ....	25
Figura 5 Combinación de imágenes landsat 7 .....	26
Figura 6 Toma de muestras para la clasificación.....	27
Figura 7 Clasificación final de imagen satelital.....	28
Figura 8 Cuantificación de coberturas .....	29
Figura 9 Metodología para clasificación de coberturas .....	30
Figura 11 Corrección de bando imagen landsat 2007.....	37
Figura 12 Cambio de cobertura pastizal o cultivo año 2000 vs 2019 .....	39
Figura 10 Coberturas de suelo año 1986-2019 .....	40
Figura 13 Cambio de cobertura suelo desnudo año 2000 vs 2007 .....	42

## Lista de Tablas

Tabla 1 Imágenes landsat Lago de Tota .....	31
Tabla 2 Clasificación de imágenes landsat Lago de Tota.....	32
Tabla 3 Porcentaje de coberturas .....	35
Tabla 4 Hectáreas de coberturas .....	35
Tabla 5 Porcentajes de aumento y disminución de coberturas .....	41

## 1. Preliminares

*(Dedicatoria)*

*A mi familia que me ha apoyado en el transcurso de mi vida, brindándome su apoyo incondicional, de igual manera a los profesores de la especialización en sistemas de información geográfica, sin ellos el desarrollo de este trabajo no hubiera sido posible.*



## **Agradecimientos**

Primeramente, deseo agradecer a mi familia en especial a mis padres Alix Azucena Patiño y Joselyn Camargo Neira, los cuales con su cariño y apoyo incondicional han ayudado a mi desarrollo como persona y como futuro especialista, también por el acompañamiento que han realizado en todo este proceso para que sea llevado de manera correcta y exitosa.

Agradecer a mi compañera y amiga Diana Ríos quien con su positivismo y apoyo han logrado fortalecerme en los momentos más difíciles, también a mi director Wilmar Jair Gómez quien me ha apoyado con sus tutorías para poder presentarles este documento, de igual manera a todos los docentes de la especialización en sistemas de información geográfica por brindarme los conocimientos apropiados para mi desarrollo como especialista.



## 2. Resumen

El rápido desarrollo del ser humano ha generado consecuencias en el ambiente, por ende, se ha empezado a realizar investigaciones que permitan identificar y solucionar este tipo de problemas. El Lago de Tota es un cuerpo de agua que ha sido afectado en estos últimos años por la sobre explotación en la zona de actividades como la agricultura y la piscicultura, este trabajo tiene como objetivo identificar las de coberturas en diferentes años para de esta manera cuantificar estos cambios que ha sufrido esta zona, para este fin se utilizó la herramienta de Google Earth Engine que mediante el Code Editor permite generar scripts para realizar este tipo de análisis. Se realizó una filtración de imágenes de Landsat desde el año 1986 hasta el 2019, también se tuvo en cuenta el porcentaje de cobertura de nubes para esto. Posteriormente se tomaron 50 muestras de los diferentes tipos de cobertura a analizar, esto permitió realizar un entrenamiento al código para generar una clasificación de las diferentes imágenes mediante el método Random Forest. Teniendo esta clasificación se procede a identificar los cambios de cobertura que tuvieron lugar en la zona de estudio del Lago de Tota. Como resultado se identifica una disminución en las coberturas de agua, bosque y montaña; estas disminuciones se ven representadas en los aumentos de coberturas de pastizales, cultivo, suelo destapado o zona urbana, dando a entender que el desarrollo de actividades antropicas generan este tipo de cambios en la zona del Lago de Tota.

Palabras claves: Sistemas de información geográfica, coberturas de suelo, GEE, Lago de Tota.

### 3. Abstract

The rapid development of human beings has generated consequences in the environment, therefore, research has begun to identify and solve such problems. In recent years, the body of water of Lago de Tota has been affected by the overexploitation in the area of activities such as agriculture and fish farming, this work aims to identify the coverage in different years in order to quantify these changes that this area has suffered, for this purpose the Google Earth Engine tool was used through the Code Editor that allows generating scripts to perform this type of analysis. A filtering of Landsat images from 1986 to 2019 was performed, the percentage of cloud coverage was also taken into account for the study. Subsequently, 50 samples of the different types of coverage to be analyzed were taken, this allowed training the code to generate a classification of the different images using the Random Forest method. With this classification, it is proceeded to identify the changes in coverage that took place in the study area of Lago de Tota. As a result, a decrease in water, forest and mountain coverage is identified; These decreases are represented by increases in pasture, crop, uncovered soil or urban area coverage, this is due to the development of anthropic activities generates this type of change in the Lago de Tota.

Key words: Geographic information systems, land cover, GEE, Lago de Tota.

#### **4. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

Las actividades económicas del ser humano han generado tanto efectos positivos como negativos, hablando de efectos positivos hemos visto mucho avances tecnológicos, científicos, productivos que han permitido mejorar la calidad de vida de las personas, el rápido crecimiento poblacional ha generado que se tenga que avanzar de una manera más rápida, facilitando la vida, aumentando la producción de comida, de bienes y de servicios, sin embargo, también esto genera diferentes efectos negativos en especial al ambiente, cambios de coberturas de suelo, calentamiento global, aumento y disminución de las temporadas de lluvia o sequía, desastres naturales, entre otros. Esto ha generado que el ser humano empiece a analizar todas estas afectaciones que se producen por las actividades antrópicas, para que de esta manera se empiecen a buscar alternativas o procesos que mitiguen los efectos negativos.

Colombia no es un país ajeno a esta situación, hemos visto como todas estas afectaciones han generado desastres en el territorio nacional como inundaciones, pérdida de cultivos, deslizamientos, pérdida de biodiversidad y disminución en los espejos de agua. Enfocándonos en el departamento de Boyacá, en el lago de Tota se ha logrado evidenciar como en estos últimos años se ha deteriorado este cuerpo de agua, la cuenca presenta problemas que generan el deterioro del ecosistema, afectaciones a la calidad del agua del Lago, deterioro de los suelos, afectaciones de los servicios ecosistémicos que presta y la necesidad de su conservación (Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS, 2016).

## 5. JUSTIFICACION

Se han logrado evidenciar los efectos negativos que pueden generar las actividades antrópicas, por esto se ve la necesidad de realizar estudios relacionados con estos efectos que permitan tomar decisiones adecuadas a los problemas que se presentan, en el caso del Lago de Tota no solo es importante por ser un cuerpo de agua, de por si la normativa ambiental ampara la protecciones de estos, sino que también, el lago es una fuente hídrica que abastece a municipios como Tota, Cuitiva, Aquitania y ciudades como Sogamoso, además de que este cuerpo de agua hace parte de la cuenca de ríos que desembocaran en zonas del llano colombiano. También se ha visto el conflicto constate entre las autoridades ambientales, territoriales y productores, ya que, en muchas ocasiones no se ha logrado encontrar consenso para limitar la sobre explotación del territorio. Por esto se ve la necesidad de analizar los efectos negativos que se generan, para que de esta manera se puedan enfocar de una mejor manera los esfuerzos y las decisiones para favorecer el desarrollo sostenible de las comunidades aledañas.

## **6. OBJETIVOS**

### **6.1 OBJETIVO GENERAL**

- Analizar el cambio de coberturas mediante código con la herramienta de Google Earth Engine en la zona del Lago de Tota.

### **6.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

- Recolectar las imágenes Landsat para realizar el análisis de coberturas durante los periodos del año 1986 hasta el año 2019.
- Realizar el entrenamiento del código para generar la clasificación de las imágenes seleccionadas para el análisis.
- Analizar el cambio de coberturas que se ha generado en la zona de estudio.

## **7. MARCO TEORICO**

El trabajo se desarrolla mediante la ayuda de los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los SIG son estructuras físicas, lógicas y organizacionales, con objetivos específicos que posibilitan la modelización de la realidad creando imágenes abstractas de una realidad más compleja permitiendo su estudio, análisis y gestión. La versatilidad de los sistemas de información geográfica, ha posibilitado que su campo de aplicación sea muy amplio, permitiendo su uso en la mayoría de las actividades con una componente espacial (Nuñez, 2012). Estas son herramientas relativamente nuevas que han demostrado proveer un gran soporte a tareas de inteligencia geográfica como es el caso de manejo de tráfico, localización geográfica y planeación urbana (Espinoza-Ramírez et al., 2018). A su vez lo SIG tienen diferentes componentes, una forma distinta de ver el sistema SIG es atendiendo

a los elementos básicos que lo componen. Cinco son los elementos principales que se contemplan tradicionalmente en este aspecto:

- Datos. Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.
- Métodos. Un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.  
Software. Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.
- Hardware. El equipo necesario para ejecutar el software.
- Personas. Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG (Olaya, 2014).

Teniendo esto en cuenta los SIG se volvieron una herramienta fundamental para el análisis del territorio, uno de estos sistemas que ha tomado mucha relevancia últimamente es Google Earth Engine (GEE), el cual es una plataforma basada en la nube para el análisis geoespacial a escala planetaria que trae las capacidades informáticas masivas de Google para influir en una variedad de alto impacto problemas sociales que incluyen deforestación, sequía, desastres, enfermedades, seguridad alimentaria, agua control del clima y protección del medio ambiente (Franceschini & Mehwish, 2022), otra definición de GEE es la que encontramos directamente en la página de google donde se indica que es una plataforma de geomática basada en la nube que permite a los usuarios visualizar y analizar imágenes de satélite de nuestro planeta. Los científicos y las organizaciones sin ánimo de lucro utilizan Google Earth Engine para llevar a cabo estudios de teledetección remota, predecir brotes de enfermedades, gestionar recursos naturales, etc. Los estudiantes pueden acceder a esta información para participar en los debates y convertirse en



científicos de datos (Google, 2023). Este software entre varios elementos tiene el Code Editor el cual es un entorno de desarrollo integrado en línea, donde se juntan todos los elementos. Aquí es donde el usuario puede, a través de código de trabajo (“scripts”), llamar a los datos, procesar y visualizarlos de manera virtual con los servidores de Google, teniendo así sus resultados e información en la nube (Perilla & Mas, 2020), esta herramienta es donde se desarrollara el código que permitirá realizar el análisis de coberturas. Su código se basa en el lenguaje de Javascript, el cual es un lenguaje de programación o de secuencias de comandos que permite implementar funciones complejas en páginas web, cada vez que una página web hace algo más que mostrar información estática para que el usuario únicamente vea el contenido, muestra oportunas actualizaciones de contenido, mapas interactivos, animación de Gráficos 2D/3D, desplazamiento de máquinas reproductoras de vídeo, etc., probablemente JavaScript está involucrado (Ramírez, 2020). Mediante estos scripts se permite analizar los diferentes datos que tiene GEE entre estos encontramos las imágenes satelitales, Una imagen satelital es el resultado que se obtiene del capturar la radiación emitida o reflejada por la superficie de la tierra mediante un sensor colocado a bordo de un satélite artificial. Existen diferentes tipos de imágenes satelitales las cuales poseen varias características como colores, resolución, elevación, etc (P. Sánchez, 2012).

Existen varios sensores que generan las imágenes satelitales, uno de los más reconocidas son las imágenes Landsat la cual es una misión que consta de diferentes satélites que se han enviado para analizar el planeta, con respecto a su historia, antes de 1972, la idea de utilizar datos de satélite para la vigilancia terrestre, la cartografía o la exploración era un concepto visionario. Hecho que da origen al Programa Landsat, el cual se constituye en

una serie de misiones de observación de la tierra por satélite gestionadas conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS) (Ariza Alexander, 2013). Desde 1972, el programa Landsat ha estado monitoreando continuamente la Tierra, para ahora proporcionar 50 años de resolución espacial media, multiespectral y digital (Wulder et al., 2022). Es mediante este tipo de herramientas que se desarrolla el presente proyecto.

## **8. ESTADO DEL ARTE**

### **8.1 INTERNACIONAL**

A nivel internacional encontramos trabajos como el de Sukhdeep Singh llamado “Remote sensing and GIS based analysis of temporal land use/land cover and water quality changes in Harike wetland ecosystem, Punjab, India”. En este realizaron análisis de los cambios de uso y coberturas de suelo, tomando en cuenta la disminución de la calidad de los humedales, este trabajo se realizó mediante mapas topográficos del ministerio de ciencia y tecnología del gobierno de India a escalas 1:50000 y 1:250000, también se utilizaron datos satelitales de LISS-IV, la cual es una cámara multiespectral de alta resolución que opera en tres bandas espectrales (Singh et al., 2020).

También a nivel internacional hay trabajos como “Potencial del acervo de imágenes Landsat disponible en Google Earth Engine para el estudio del territorio mexicano”, en este los investigadores buscaron la cantidad de imágenes que tiene GEE para generar un acervo de todo el país y para que fuera utilizado en investigaciones posteriores. En el estudio se lograron identificar 89649 imágenes disponibles para el país, sin embargo esta cantidad de imágenes no estaban distribuidas entre los años, por ejemplo

para el año 1972 solo se encontraron 9 imágenes, mientras que para otros se encontraba un mayor número de imágenes (Solórzano et al., 2020).

En China se realizó un estudio titulado “Study of Land Cover Change in the City with the Fastest Economic Growth in China (Hefei) from 2000 to 2020 Based on Google Earth Engine Platform”, en este caso los autores realizaron un análisis de aumento de cobertura urbana en la ciudad de Hefei, dado que el crecimiento económico de este país ha generado cambios de cobertura en su mismo territorio. Para esto utilizaron la herramienta GEE. Se escogieron 719 imágenes de sentinel desde el 2000 hasta el 2020 y se realizó la clasificación mediante el método Random Forest, se encontró que hubo un aumento en áreas construidas donde se pasó de 419,72 km<sup>2</sup> a 1530,20 km<sup>2</sup> y la cobertura vegetal disminuyó un 16,61% (Gränzig et al., 2021).

Se encontraron otros trabajos como “A 15-year spatio-temporal analysis of plant  $\beta$ -diversity using Landsat time series derived Rao’s Q index” en el cual realizan un análisis temporal de 15 años de diversidad  $\beta$  utilizando la diversidad Raós Q basados en imágenes landsat en la región del Himalaya occidental del valle de Doon, Uttarakhand, India (Khare et al., 2021).

Para Latinoamérica se encontraron trabajos como el de Tobias Gräzing el cual se titula “Mapping the fractional coverage of the invasive shrub *Ulex europaeus* with multi-temporal Sentinel-2 imagery utilizing UAV orthoimages and a new spatial optimization approach”, en este los autores utilizan ortoimágenes tomadas con vehículos aéreos no tripulados (UAV) e imágenes satelitales Sentinel-2 y 3 para realizar un mapeo de coberturas de la especie invasora de *Ulex europaeus*. Para este fin realizaron una metodología de 3 pasos, el primero es la clasificación de cobertura terrestre con

ortoimágenes de UAV, en segundo lugar reducían el cambio espacial de los mapas de coberturas de UAV y las imágenes Sentinel y como tercer y último paso identificaron las fechas óptimas de adquisición de las imágenes satelitales para estimar la distribución real de *Ulex europaeus* (Gränzig et al., 2021).

Existen otros trabajos como el titulado “Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua”, en este los autores realizaron revisiones de artículos científicos, tesis y libros, teniendo en como temática estudios de coberturas con imágenes satelitales o VANT (vehículos aéreos no tripulados). En el artículo se concluye que las imágenes satelitales son ideales para estudios que abarquen extensiones grandes (km), en cambio los VANT son mejores para el análisis de áreas más pequeñas (Veneros et al., 2020).

Otra investigación relacionada con el análisis de coberturas es el titulado “Assessing the Impacts of Land Use/Land Cover Changes on Water Resources of the Nile River Basin, Ethiopia” Este estudio investigó las tendencias del cambio climático y el uso de la tierra/cambio en la cobertura de la tierra en la cuenca del río Nilo. Las tendencias climáticas se analizaron mediante la prueba de Mann-Kendall, la prueba del estimador de pendiente de Sen y un método innovador de análisis de tendencias. El cambio de uso de la tierra/cobertura terrestre (LULC) se examinó utilizando Landsat Thematic Mapper (TM) y Landsat Enhanced Thematic Mapper (ETM+) con una resolución de 30 m durante 2012–2022. Los resultados revelaron que la superficie de tierras forestales y arbustivas disminuyó en un 5,18 y un 2,39 %, respectivamente. Por su parte, la superficie de pastizales, cultivos, asentamientos y cuerpos de agua aumentó un 1,56, 6,18, 0,05 y 0,11%, respectivamente. Se observó una tendencia significativamente creciente en la precipitación

en Gondar ( $Z = 1,69$ ) y Motta ( $Z = 0,93$ ) estaciones. Sin embargo, la tendencia fue decreciente en las estaciones Adet ( $Z = -0,32$ ), Dangla ( $Z = -0,37$ ) y Bahir Dar. La tendencia de la temperatura aumentó en todas las estaciones. Los cambios significativos en el uso de la tierra/cobertura de la tierra pueden ser causados por actividades inducidas por el hombre en la cuenca (Gedefaw et al., 2023).

## 8.2 NACIONAL

En Colombia, se encuentran artículos como el de Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia (Achicanoy et al., 2018), donde los autores realizan un análisis del cambio de cobertura urbana y vegetal mediante imágenes de diferentes procedencias como lo son ortomosaicos procedente de entidades gubernamentales como la infraestructura de datos espaciales para el distrito capital (IDECA), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC), entre otros. También se utilizan sensores remotos como Landsat 5, para el análisis de coberturas se trataron las imágenes en cuestión, clasificando las coberturas basados en el método de Corine Land Cover.

Se evidencian trabajos enfocados a las metodologías de clasificación de coberturas como el elaborado por Vargas “REVISIÓN DE METODOLOGÍAS PARA LA CLASIFICACIÓN DE LAS COBERTURAS DE LA TIERRA”, en este trabajo se realiza un análisis de las diferentes metodologías de clasificación de coberturas, en este caso la autora formuló unos criterios generales, teniendo en cuenta aspectos como flexibilidad, descripción clara de las clases, adaptabilidad, originalidad, facilidad de manejo, entre

otros. Teniendo esto en cuenta se evaluaron metodologías como: el sistema de clasificación de la cobertura de la tierra de la FAO (LCCS-FAO2000), Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra del Servicio Geológico de los Estados Unidos “A land use and land cover classification system for use with remote sensor data” (USGS – SUSG), Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra de la Agencia Europea del Medio Ambiente (AEMA) o European Environment Agency (EEA) - CORINE (Coordination of information of the Environment) Land Cover (CLC2000), Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra Global Land Cover (GLC 2000) basado en la metodología de la FAO y el Sistema de clasificación de la cobertura de la tierra del Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales (IDEAM), el Instituto Geográfico Agustín Codazzi (IGAC) y la Corporación Autónoma Regional del río Grande de la Magdalena - CORINE (Coordination of information of the Environment) Land Cover adaptado para Colombia (Vargas, 2020). Teniendo esto en cuenta se concluye que el sistema de clasificación más completo y con mayor nivel de cumplimiento es el sistema de clasificación CORINE Land Cover desarrollado por la EEA, esto se evidencia más porque es una metodología que se ha adaptado para diferentes países, entre estos Colombia.

También se han encontrado trabajos como “Erosion and progradation in the Atrato River delta: A spatiotemporal analysis with Google Earth Engine”(Vélez-Castaño et al., 2021), esta es una investigación que muestra cómo se utilizó GEE para encontrar cambios en la erosión y la progradación del delta del Río Atrato, en este compararon 2 metodologías una con delimitación con código y la otra con delimitación manual. Encontraron que, si bien la delimitación con código logra identificar partes que en una delimitación manual no

se identifican los resultados no varían mucho, esto da a entender que GEE permite una mejor clasificación de las imágenes satelitales.

Pero GEE puede ser utilizado para otro tipo de estudios como en el artículo “Implementación y evaluación del cambio de temperatura por erupciones volcánicas usando Google Earth Engine: Volcán Galeras Nariño – Colombia”, en este se indica que si bien el monitoreo de volcanes se hace con sensores sísmicos, también se podría encontrar cambios en la temperatura superficial de estos, así que mediante GEE analizaron el cambio de temperatura de la superficies del volcán Galeras mediante con ayuda de datos satelitales de MODIS, se encontraron aumentos en la temperatura desde noviembre de 2009 hasta el 2010, sin embargo, se indica que para complementar de una mejor manera este tipo de estudios se debería incorporar otros análisis como de cambios de cobertura, geomorfología, humedad entre otros (Luna & Medina, 2020).

### **8.3 REGIONAL**

A nivel regional se encontraron trabajos como “Formulación de protocolo de control y seguimiento del retamo espinoso para (*Ulex europaeus*) para el municipio de Duitama” (Rios, 2022). La autora aparte de definir acciones a realizar para el control del retamo espinoso, en su metodología muestra la recolección de información respecto a la ubicación de zonas de retamo espinoso en el municipio de Duitama, identificando coberturas de esta especie, esto lo hace mediante datos recolectados por GBIF el cual es una base de datos que contiene información de referencia de especies de flora y fauna, también se utilizan aplicaciones SIG como lo son Avenza Maps y Fields área las cuales permiten georreferenciar y generar entidades para poder manejarlos posteriormente en

software SIG como Arcgis, de esta manera se generaron mapas con las coberturas de esta especie y en qué zonas de la ciudad se ubican.

Ya más específicamente en el Lago de Tota se han hecho diversas investigaciones enfocadas en las fuentes de contaminación que han degradado este espejo de agua, entre estas el sector piscícola, una estas investigaciones es la de “Estimación de los desperdicios generados por la producción de trucha arcoíris en el lago de Tota, Colombia”, en esta se realiza un cálculo de la cantidad de residuos que ha generado la actividad económica de la piscicultura en este cuerpo de agua, para esto se realizó una estimación de la cantidad de comida ingresada para el desarrollo de la trucha arcoíris que es la especie que se produce en esta zona, con esto se realizaron las estimaciones de toneladas de desechos generadas por esta especie, para el año 2020 se estima una acumulación de 8.712 toneladas de desechos, en sus conclusiones indican que todos estos desechos incrementan la disminución de la profundidad del lago (Torres-Barrera & Grandas-Rincón, 2017).

Estudios de cobertura como el titulado “El efecto de los cambios en la cobertura vegetal sobre la respuesta hidrológica de la subcuenca Los Pozos”, Caro-Camargo y Velandia-Tarazona (2019) evaluaron el impacto de cambio de cobertura en la respuesta hidrológica de la subcuenca “los Pozos” en el municipio de Aquitania, bajo el modelo de simulación hidrológica SWAT, la cual es una herramienta que sirve para la toma de decisiones por ejemplo para la protección de la ronda hídrica y posibles planes de acción para conservación del cuerpo de agua (Caro-Camargo & Velandia-Tarazona, 2019).

Hay otros enfocados al sector minero energético como el titulado “Análisis de cobertura y defectología de un oleoducto usando herramientas SIG” el trabajo describe el análisis de la cobertura y defectología de un oleoducto, de acuerdo con las normas NIO, partiendo de

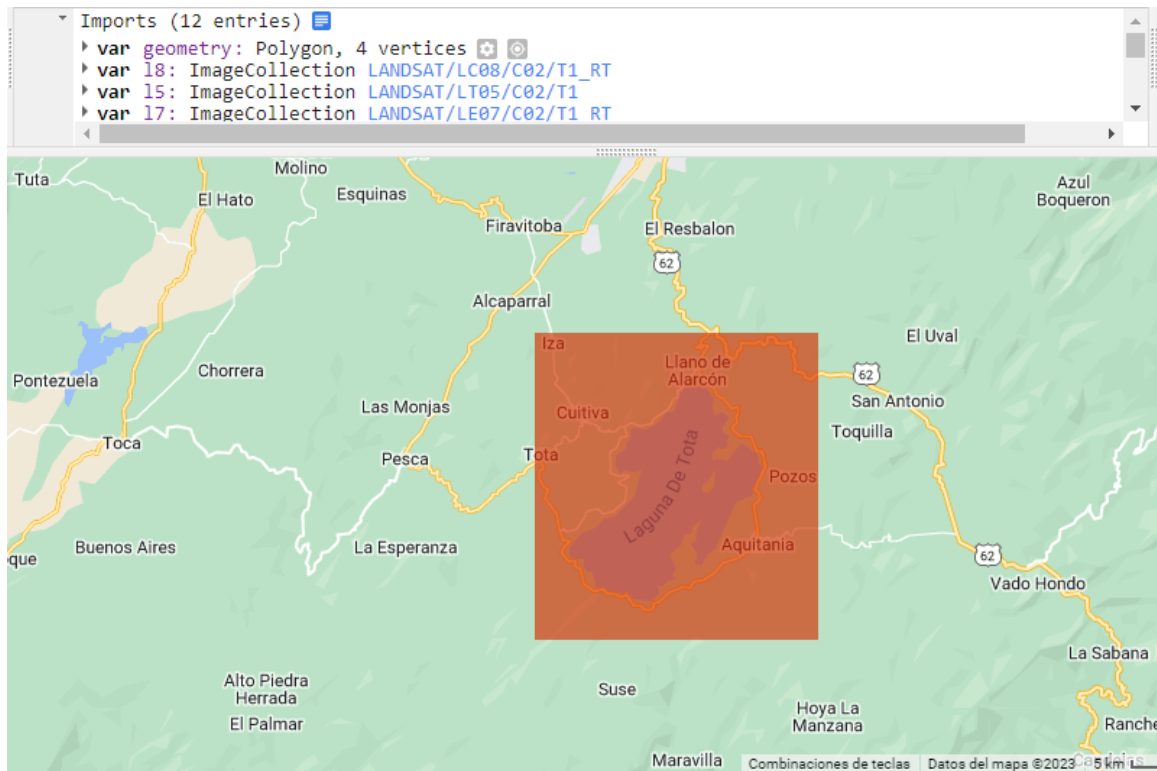


información disponible previamente tan solo en hojas de cálculo, haciendo uso de herramientas de sistemas de información geográfica. Iniciando con la creación de una base de datos geográfica la cual permite georeferenciar los puntos donde se ha ubicado el oleoducto, se finaliza con la publicación de mapas temáticos con el fin de que los usuarios puedan visualizar la información de una manera fácil y no requieran conocimientos de algún software, permitiéndole a los usuarios internos de la empresa estar actualizados con el proceso que se está llevando a cabo en campo y la calidad con la que se está realizando el oleoducto (Cortés, 2016).

## **9. METODOLOGIA**

Para realizar el análisis mediante la herramienta de GEE se utilizaron imágenes landsat 5, 7 y 8; esto para obtener un análisis temporal de 1986 a 2019. Mediante el code editor se incorporaron las diferentes colecciones de landsat y se definió un área de estudio (geometría de 4 vértices), en este caso la zona del Lago de Tota y sus municipios aledaños.

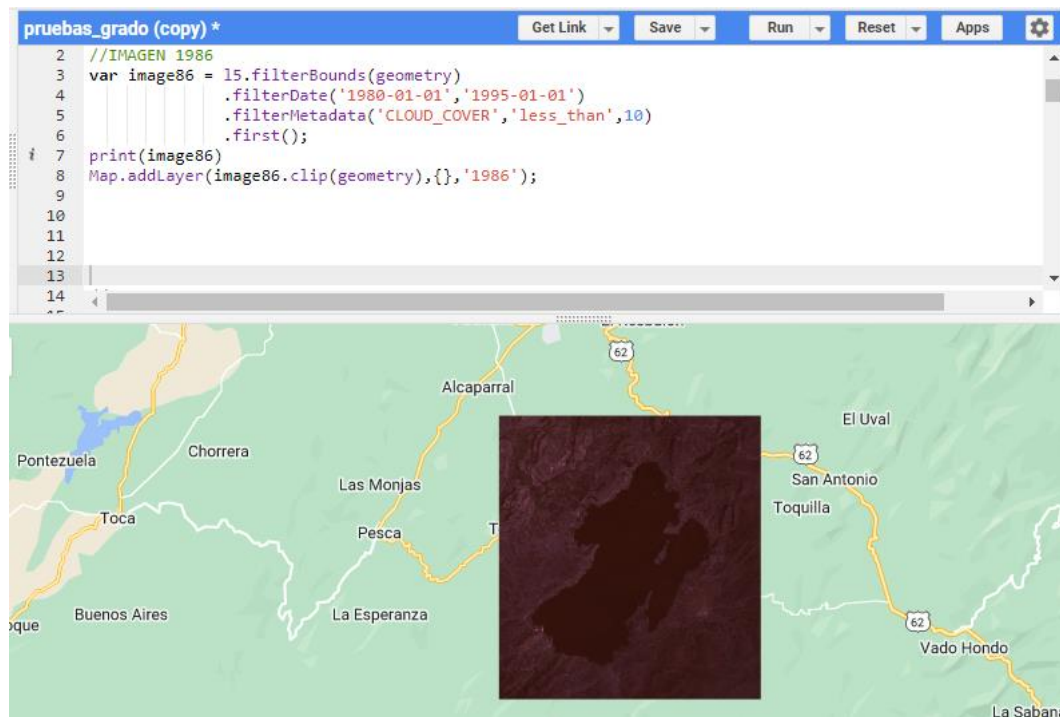
**Figura 1.** Corte de imágenes según área de estudio



Nota. Fuente: Autor.

Enseguida para realizar la selección se limitó la cobertura de nubes inferior a 10% que tienen las imágenes, ya que estas pueden afectar el proceso. Los efectos atmosféricos en las imágenes satelitales distorsionan la información disponible y originan errores en la estimación de las variables biofísicas provenientes de los datos espectrales (L. A. P. Sánchez et al., 2018).

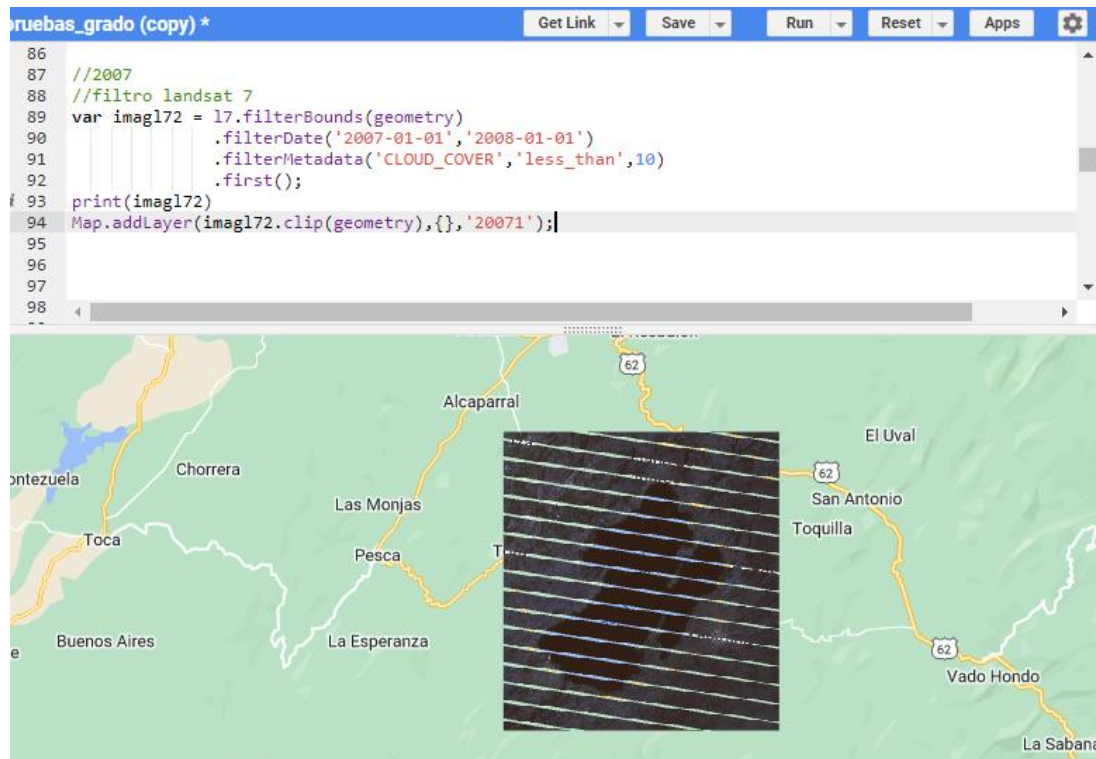
**Figura 2** Filtro de fecha y cobertura de nubes



Nota. Fuente: Autor.

Durante la obtención de las imágenes puede que algunas presenten problemas de bandeado, En el año 2002 el sensor del Landsat 7 presentó una falla. Este daño origina en todas las imágenes capturadas una pérdida de datos de al menos 22%. Esto genero huecos en forma de líneas paralelas diagonales en las imágenes. Teniendo esto en cuenta se requiere realizar un tratamiento a estas imágenes(González Velázquez, 2018). En este caso las imágenes de 2007 y 2012 presentan este problema.

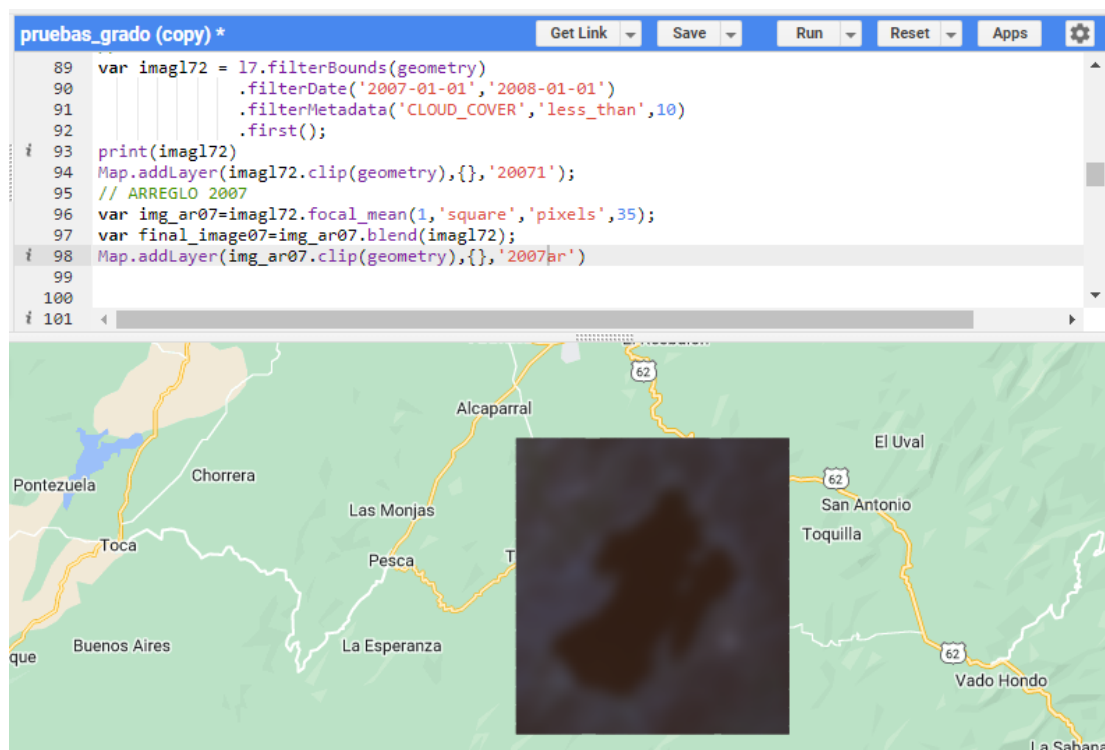
**Figura 3** Bando de imágenes landsat 7.



Nota. Fuente: Autor.

Para este arreglo es necesario utilizar la herramienta focalMean, esta herramienta permite rellenar esas zonas de bando que tiene la imagen con el cálculo promedio de los pixeles cercanos, esto se hace bajo varias iteraciones, para cubrir el bando de esta imagen se requirieron de 35 iteraciones para que de esta manera se completa la imagen.

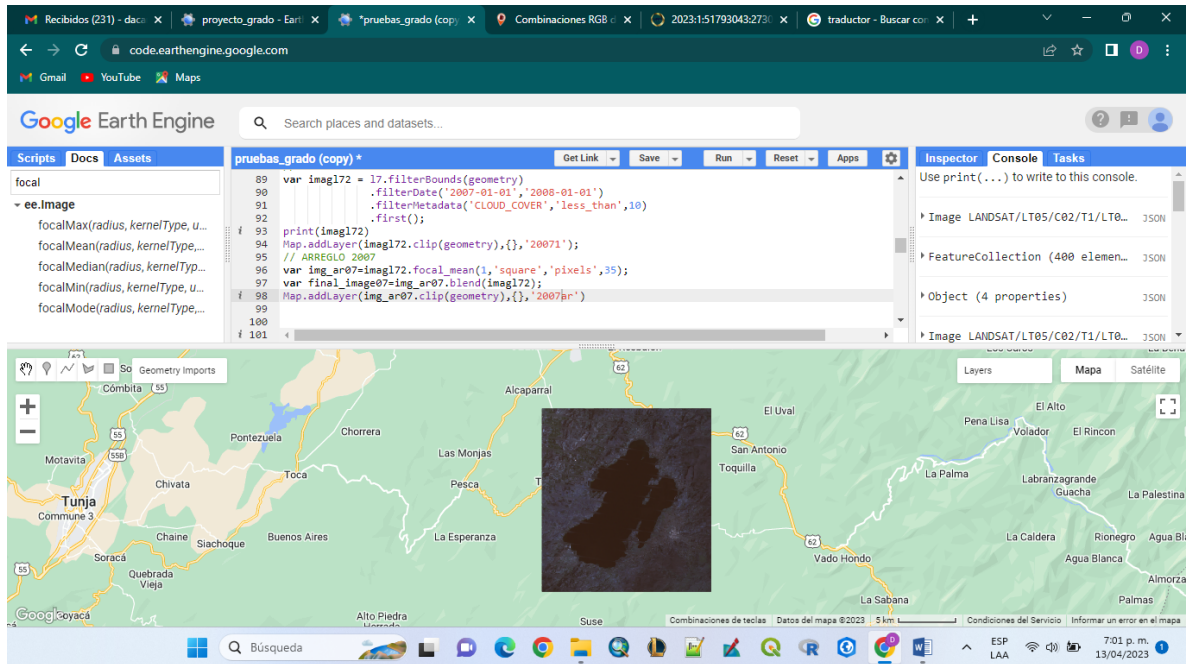
**Figura 4** Procesamiento para bandeado de imágenes.



Nota. Fuente: Autor.

Sin embargo, la imagen del proceso anterior puede generar un efecto de enfoque en la imagen, para esto mediante la herramienta blend se realiza una mezcla entre la imagen desenfocada y la imagen original para obtener una imagen con un detalle similar a la original.

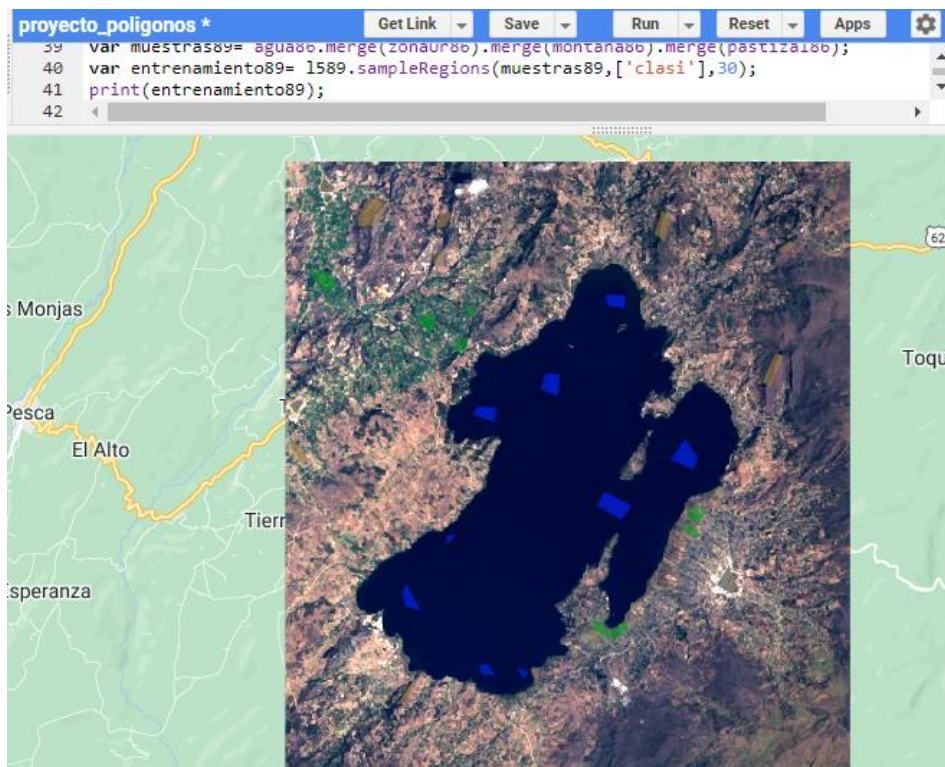
**Figura 5** Combinación de imágenes landsat 7



Nota. Fuente: Autor.

Teniendo las imágenes se realizó una toma de muestras de diferentes coberturas, como lo son zonas urbanas o tierra desnuda (esto comprende los municipios cercanos al Lago y zonas que no presentan alguna cobertura vegetal), agua (hace referencia al Lago de Tota), pastizales o cultivos (incorpora los cultivos de cebolla que son los que predominan en la zona) y Montaña o bosque (que comprende las zonas montañosas y zonas con vegetación frondosa alrededor de los municipios). Mediante la geometría de polígono se tomaron diferentes muestras para cada tipo de cobertura.

**Figura 6** Toma de muestras para la clasificación.

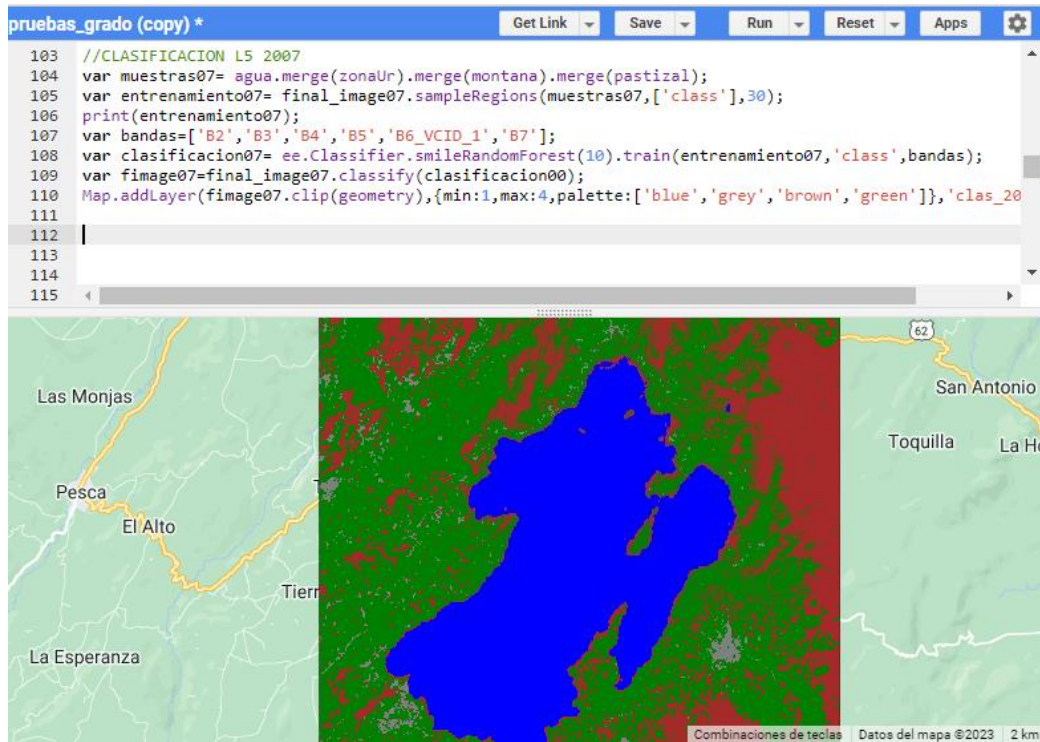


Nota. Fuente: Autor.

Con las muestras de las coberturas se procedió a realizar la clasificación con el método Random Forest, el cual es una técnica de aprendizaje supervisado que genera múltiples árboles de decisión sobre un conjunto de datos de entrenamiento: los resultados obtenidos se combinan a fin de obtener un modelo único más robusto en comparación con los resultados de cada árbol por separado (Espinosa-zúñiga, 2020). Los arboles de decisión son un método de minería de datos comúnmente utilizados para establecer sistemas de clasificación basados en múltiples variables o para desarrollar algoritmo de predicción para una variable objetivo. Este método clasifica una población en segmentos en forma de rama que construyen un árbol invertido con un nodo raíz, nodos internos y nodos de hoja

(M. García, 2018). Posteriormente se asigna una paleta de colores para cada una de las coberturas.(M. García, 2018)(M. García, 2018)

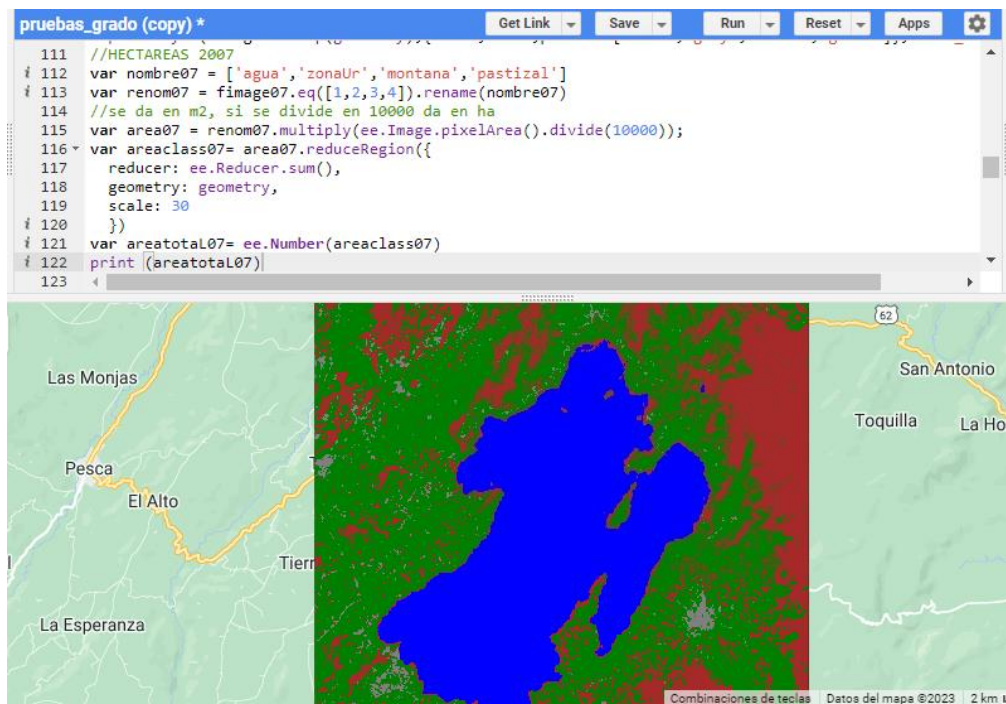
**Figura 7** Clasificación final de imagen satelital



Nota. Fuente: Autor.

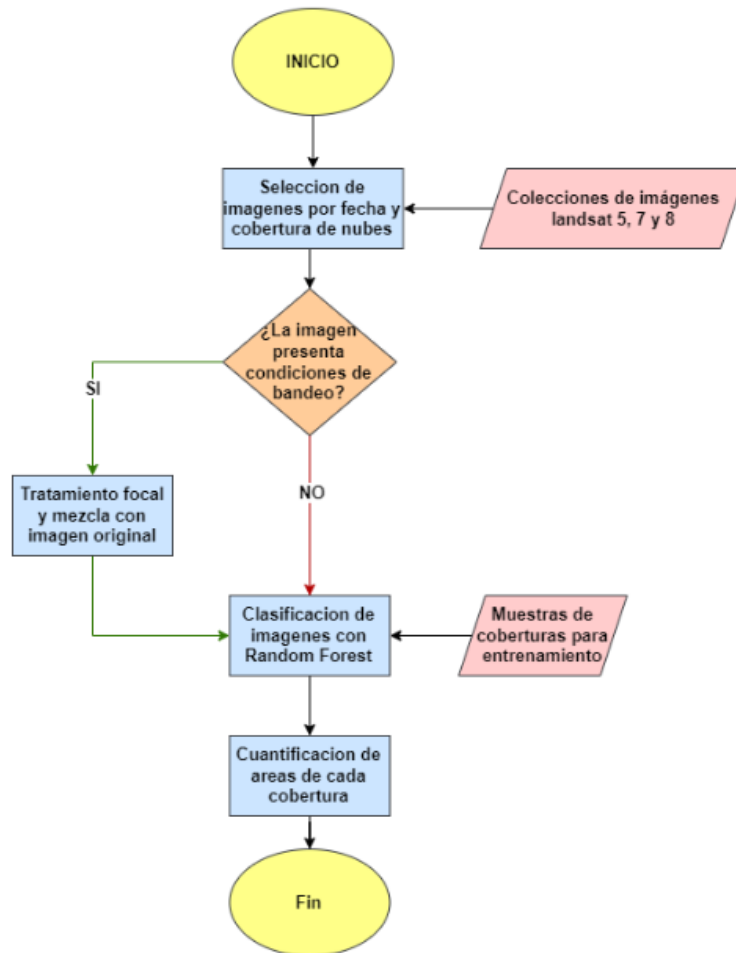
Al realizar la clasificación se cuantificó el número de píxeles que pertenecen a cada tipo de cobertura en la imagen, dando como resultado el área de cada cobertura en hectáreas.



**Figura 8** Cuantificación de coberturas

Nota. Fuente: Autor.

Este mismo proceso se repitió para todas las imágenes seleccionada, posteriormente se analizaron las disminuciones o aumentos de cada una de las coberturas en cuestión, de esta manera se procedió a realizar el análisis de los resultados.





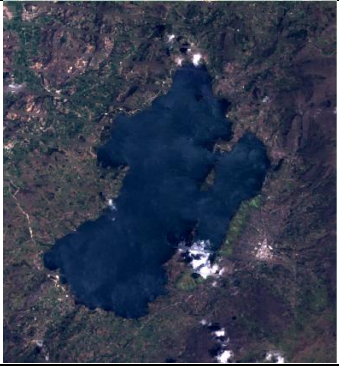


**Figura 9** Metodología para clasificación de coberturas

Nota. Fuente: Autor.

## 10. RESULTADOS

Se obtuvieron 7 imágenes diferentes de 1986 a 2019 (Tabla 1).

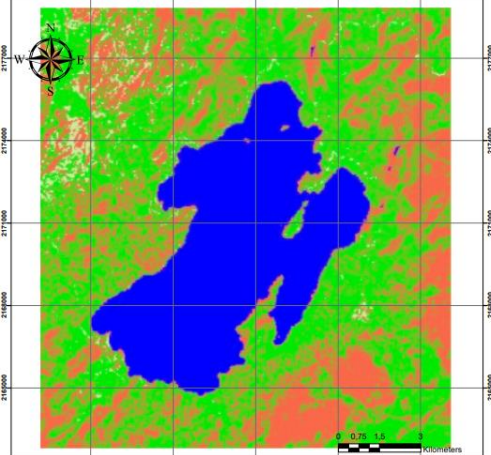

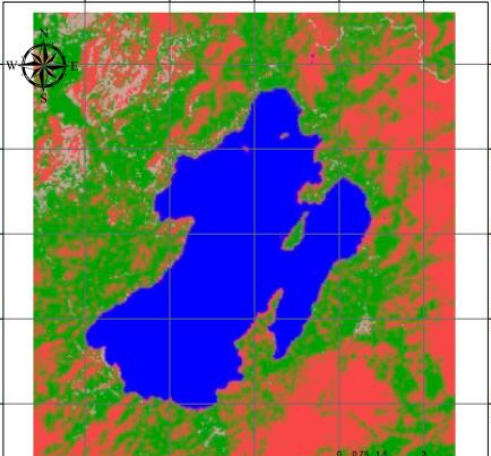

**Tabla 1** Imágenes landsat Lago de Tota

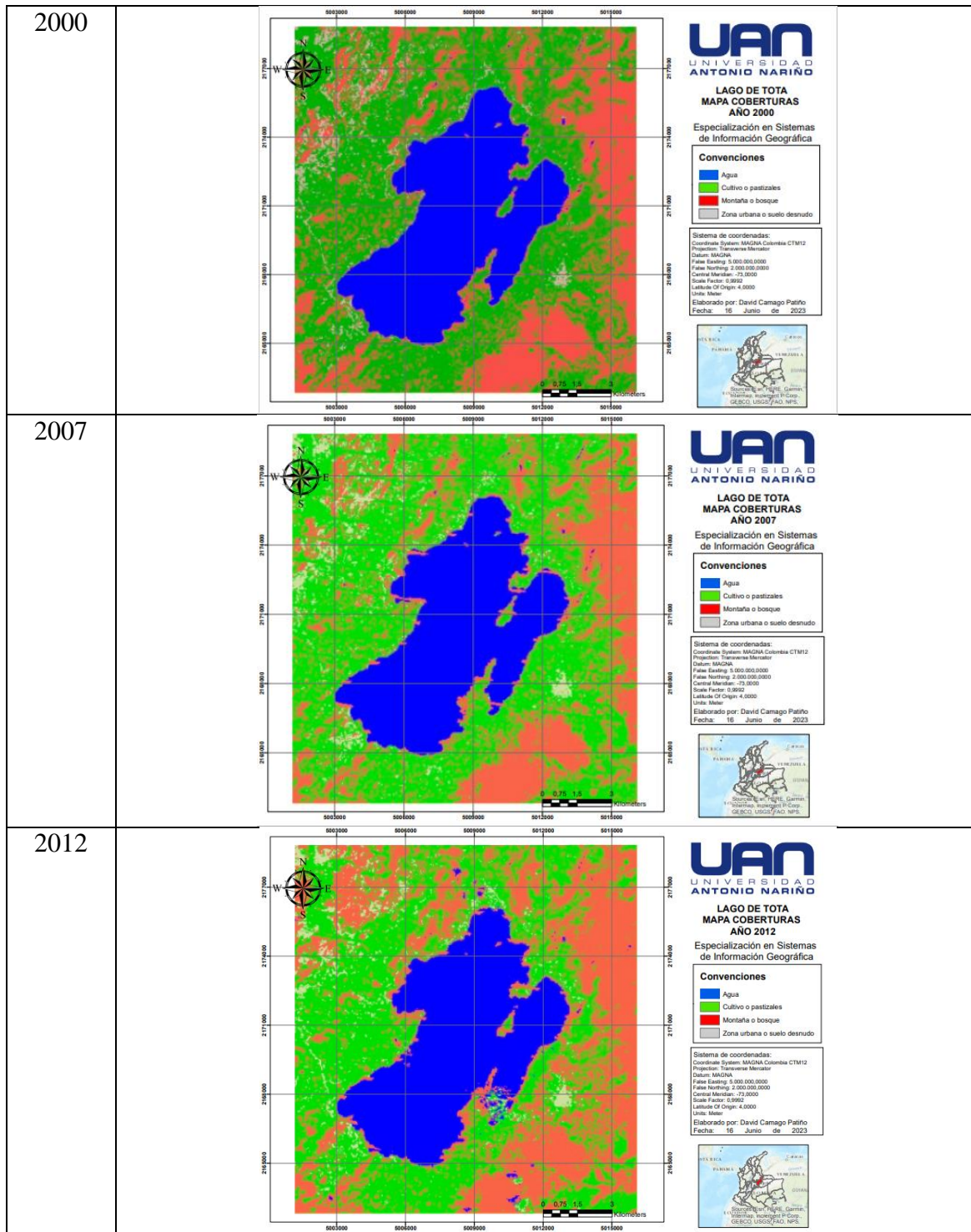
1986	1989	2000
		
2007	2012	2016
		
<b>2019</b>		
		

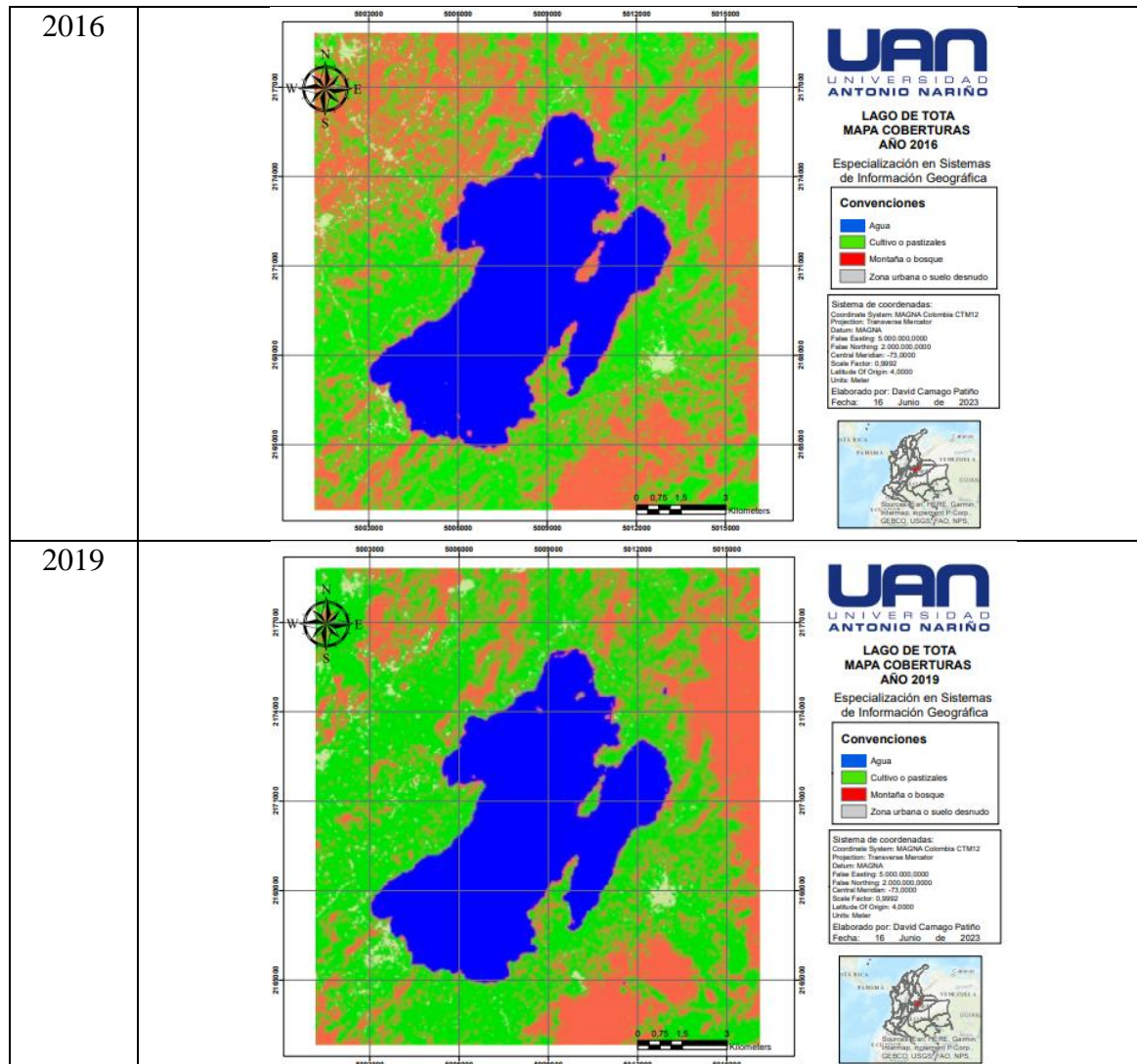
Nota. Fuente: Autor.

Se realizó la clasificación de coberturas para las 7 imágenes landsat que cumplen con los criterios de filtro, el resultado de la clasificación para cada una de esta se ve en la Tabla 2, para la cobertura de agua se le asignó un color azul, la de pastos o cultivos un color verde, montaña o bosque un color marrón-rojizo y finalmente la zona urbana o suelo desnudo se le asignó un color gris.

**Tabla 2** Clasificación de imágenes landsat Lago de Tota

Año	Salida grafica
1986	 <div data-bbox="998 703 1161 1155" style="float: right; width: 200px;"> <p><b>UAN</b> UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO</p> <p><b>LAGO DE TOTA</b> <b>MAPA COBERTURAS</b> <b>AÑO 1986</b></p> <p>Especialización en Sistemas de Información Geográfica</p> <p><b>Conveniones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">■</span> Agua</li> <li><span style="color: green;">■</span> Cultivo o pastizales</li> <li><span style="color: red;">■</span> Montaña o bosque</li> <li><span style="color: gray;">■</span> Zona urbana o suelo desnudo</li> </ul> <p><small>Sistema de coordenadas: Coordenada System: MAGNA Colombia CTM12 Proyeccion: Transverse Mercator Datum: MAGDA False Easting: 5.000.000.0000 False Northing: 2.000.000.0000 Central Meridian: -73.0000 Scale Factor: 0.9992 Latitude Of Origin: 4.0000 Units: Meter Elaborado por: David Camargo Patiño Fecha: 16 Junio de 2023</small></p>  </div>
1989	 <div data-bbox="998 1186 1161 1638" style="float: right; width: 200px;"> <p><b>UAN</b> UNIVERSIDAD ANTONIO NARIÑO</p> <p><b>LAGO DE TOTA</b> <b>MAPA COBERTURAS</b> <b>AÑO 1989</b></p> <p>Especialización en Sistemas de Información Geográfica</p> <p><b>Conveniones</b></p> <ul style="list-style-type: none"> <li><span style="color: blue;">■</span> Agua</li> <li><span style="color: green;">■</span> Cultivo o pastizales</li> <li><span style="color: red;">■</span> Montaña o bosque</li> <li><span style="color: gray;">■</span> Zona urbana o suelo desnudo</li> </ul> <p><small>Sistema de coordenadas: Coordenada System: MAGNA Colombia CTM12 Proyeccion: Transverse Mercator Datum: MAGDA False Easting: 5.000.000.0000 False Northing: 2.000.000.0000 Central Meridian: -73.0000 Scale Factor: 0.9992 Latitude Of Origin: 4.0000 Units: Meter Elaborado por: David Camargo Patiño Fecha: 16 Junio de 2023</small></p>  </div>





Nota. Fuente: Autor.

Después de correr los scripts generados anteriormente se tienen calculadas unas áreas de coberturas en hectáreas y los porcentajes correspondientes con respecto a los diferentes años de las imágenes analizadas, dando como resultado las tablas 3 y 4.

**Tabla 3** Porcentaje de coberturas

<b>Año</b>	<b>Agua</b>	<b>Montaña o Bosque</b>	<b>Pastizal o cultivo</b>	<b>Zona urbana o suelo desnudo</b>
1986	22,7%	48,6%	24,5%	4,2%
1989	22,4%	48,5%	23,2%	6,0%
2000	22,4%	52,7%	21,8%	3,2%
2007	22,6%	52,5%	18,1%	6,7%
2012	22,6%	47,3%	23,3%	6,8%
2016	22,4%	44,0%	25,0%	8,6%
2019	22,3%	44,4%	26,9%	6,3%

Nota. Fuente: Autor.

En la Tabla 3, se observa una disminución de la cobertura de montaña o bosque, sin embargo, esta es la que más predomina en todos los años, no siendo inferior al 44 %. En cuanto a la cobertura de agua esta se mantiene entre un 22,7 % y un 22,3 %, lo que significa que no ha presentado muchos cambios durante el paso del tiempo. Las coberturas de pastizales o cultivos y de zona urbana o suelo desnudo presentan un comportamiento similar, donde ambas presentan rangos más amplios de porcentajes de 18,1 % a 26,9 % y de 3,2 % a 8,6 % respectivamente.

**Tabla 4** Hectáreas de coberturas

<b>Año</b>	<b>Agua</b>	<b>Montaña o Bosque</b>	<b>Pastizal o cultivo</b>	<b>Zona urbana o suelo desnudo</b>
1986	5421	11605	5855	1010
1989	5356	11581	5531	1424
2000	5344	12579	5210	758
2007	5395	12551	4335	1.610
2012	5388	11308	5566	1629
2016	5346	10518	5965	2062
2019	5338	10613	6431	1509

Nota. Fuente: Autor.

Las coberturas de la zona del Lago pueden verse afectadas por diferentes factores, las variables explicativas del cambio de la cobertura y uso del suelo, incluyen factores directos, es decir, actividades o decisiones humanas, en el nivel local que directamente impactan la cobertura del suelo y factores subyacentes que impulsan los factores directos, ya sea operando a nivel local o un nivel regional o global y generalmente asociados con procesos demográficos, socioeconómicos, socioculturales, institucionales y naturales o de localización (Wanumen-Mesa et al., 2020). Actividades socio económicas como los monocultivos de cebolla y otros como lo menciona Jaramillo-García et al, (2020), los cuales aumentan cada vez más la frontera agrícola, demográficos donde se aumenta la zona urbana, esto genera que se modifiquen coberturas de bosque o que inclusive se empiece a secar el espejo de agua del Lago.

Esto puede verse reflejado en los valores de las diferentes coberturas, por ejemplo, cuando se observa la cobertura de agua, se nota una disminución desde su valor en el año 1986, disminuyendo de 5421 ha a 5338 ha en 2019. Este cambio se ve más evidente en la transición de 2012 a 2016 donde la cobertura disminuye de 5338 a 5346. Por otra parte, hay algunos valores intermedios en los cuales esta cobertura aumenta con respecto a años anteriores como lo son del 2000 y 2007, esto puede deberse a el proceso de tratamiento de imagen con la herramienta focalMean, ya que esta utiliza el valor medio de los pixeles cercanos, por ende, puede generar algunos valores de pixel que hagan que este tipo de cobertura aumente, en especial en los bordes del lago, esto haciendo referencia a la Figura 11.



**Figura 10** Corrección de bandeo imagen landsat 2007.

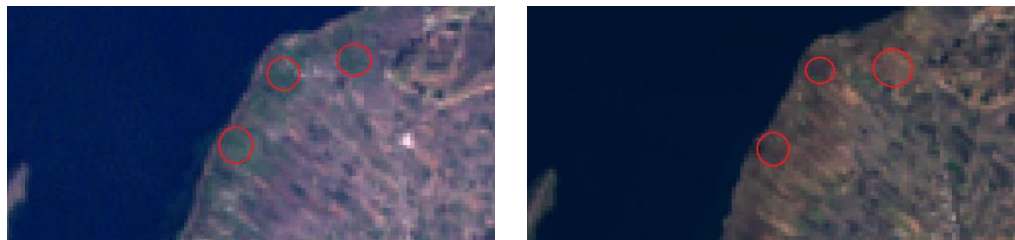


Nota. Fuente: Autor.

En cuanto a la cobertura de montaña o bosque se puede observar un comportamiento parecido al del agua, es bien sabido que por cuestiones de desarrollo agrícola y expansión urbana se generan variaciones en las coberturas y usos del suelo y su valoración es un aspecto que debe ser considerado para la elaboración de planes de desarrollo de las entidades municipales (C. A. García & Culma Tamara, 2022). El componente de bosque es el más afectado, este en especial es el que hace variar al tipo de cobertura durante los años del análisis, si bien hay años en los que aumentan como el 2000 y 2019, 12579 ha y 10613 ha respectivamente, la tendencia que se observa es a la disminución de este tipo de cobertura.

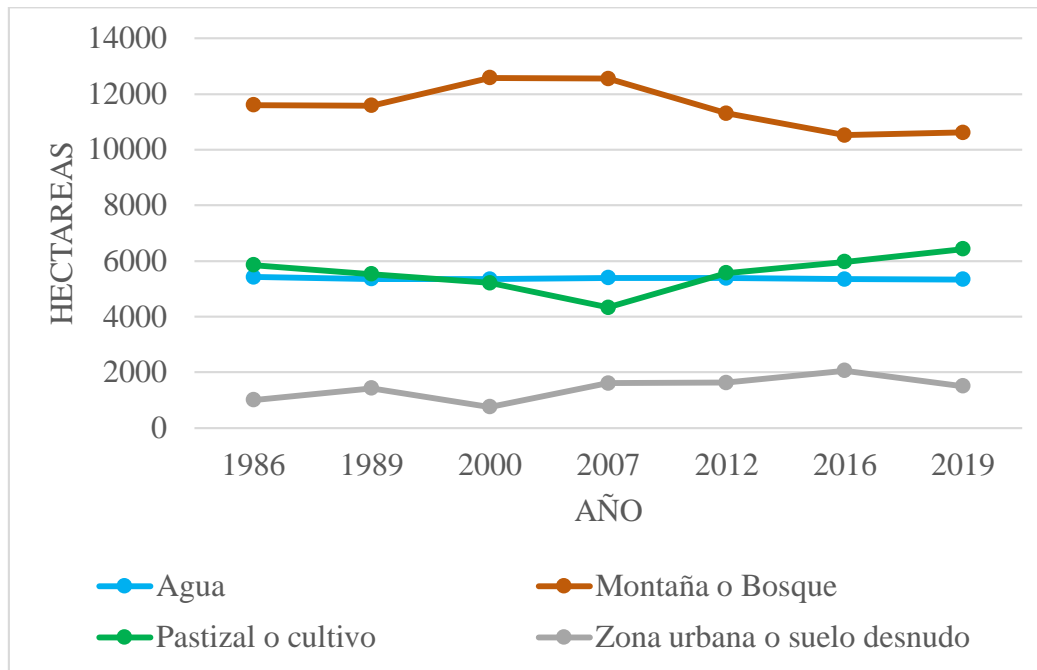
Haciendo referencia a la cobertura de pastos y cultivos este aumenta a través del tiempo, pasa de tener 5855 ha en 1986 a 6431 ha en 2019, esto se debe al aumento de las actividades económicas relacionadas con los cultivos de cebolla y la ganadería, ambas actividades se desarrollan en nuestro país modificando las coberturas naturales de una zona en especial, según Sanabria (2019) se indica que la causa más importante de esa reducción del recurso hídrico es la expansión de la frontera agrícola en los páramos donde nacen y discurren los afluentes del lago. Ganaderías y cultivos destruyen la vegetación paramuna reduciendo la capacidad del ecosistema para almacenar agua, recargar los acuíferos y alimentar los afluentes del lago de Tota, esto puede verse relacionado con la disminución de la cobertura de montaña o bosque y con la disminución del espejo del agua en el Lago dado por el aumento de cobertura de pastizal y cultivo en el mismo trabajo se hace referencia a la laguna de Fuquene donde Las causas del deterioro son la expansión de terrenos laguna adentro, la contaminación de sus aguas, ésta última generada por las actividades ganaderas y de industrias lácteas que vierten sus desechos al curso hídrico. Esta laguna ya perdió gran parte de su espejo de agua y es uno de los ecosistemas más similares al lago de Tota, por tanto, es un ejemplo claro del impacto que genera el exceso de nutrientes en un cuerpo de agua. Esto último haciendo referencia a las afectaciones que se dan por los agroquímicos de los cultivos cercanos al lago y los residuos de la piscicultura que se manejan en la zona (Sanabria, 2019).

**Figura 11** Cambio de cobertura pastizal o cultivo año 2000 vs 2019



Nota. Fuente: Autor.

Se logra observar en las imágenes un cambio de cobertura donde en el 2000 se presentaban unos colores verdes más oscuros, pudiendo hacer referencia a vegetación nativa y frondosa en esa época, en 2019 se ve un verde más claro y se logra observar perdida de esa cobertura frondosa, parte de este terreno pasó a ser utilizado para cultivar cebolla dentro del municipio de Aquitania, siendo este el municipio más cercano a la ronda del Lago. Se encuentra cebolla en la franja inundable de la ribera del lago y en tierras pantanosas que se tuvieron que adecuar para recibir el cultivo. En cuanto a la ribera del lago, debemos recordar que la laguna ha retrocedido, y por lo tanto despejado tierras nuevas, que se han incorporado poco a poco a la agricultura (Raymond, n.d.).

**Figura 12** Coberturas de suelo año 1986-2019

Nota. Fuente: Autor.

En la Figura 10 se puede observar que la cobertura de Montaña o Bosque es la que más predomina en el periodo de años analizados, las coberturas de agua y pastizales o cultivo mantienen unos resultados similares entre sí, observándose que el pastizal o cultivo presento una leve disminución en el año 2007, sin embargo, esta logra aumentar desde el periodo 2007 a 2019, concordando con la disminución de la cobertura de montaña o bosque. Finalmente, la cobertura de zona urbana o suelo desnudo es la que menor cantidad de hectáreas tiene con respecto a las otras coberturas analizadas.

De igual manera se ve la necesidad de identificar los porcentajes de aumento y disminución de cada una de las coberturas de cada una de las imágenes, como se muestra en la Tabla 5 a continuación.

**Tabla 5** Porcentajes de aumento y disminución de coberturas

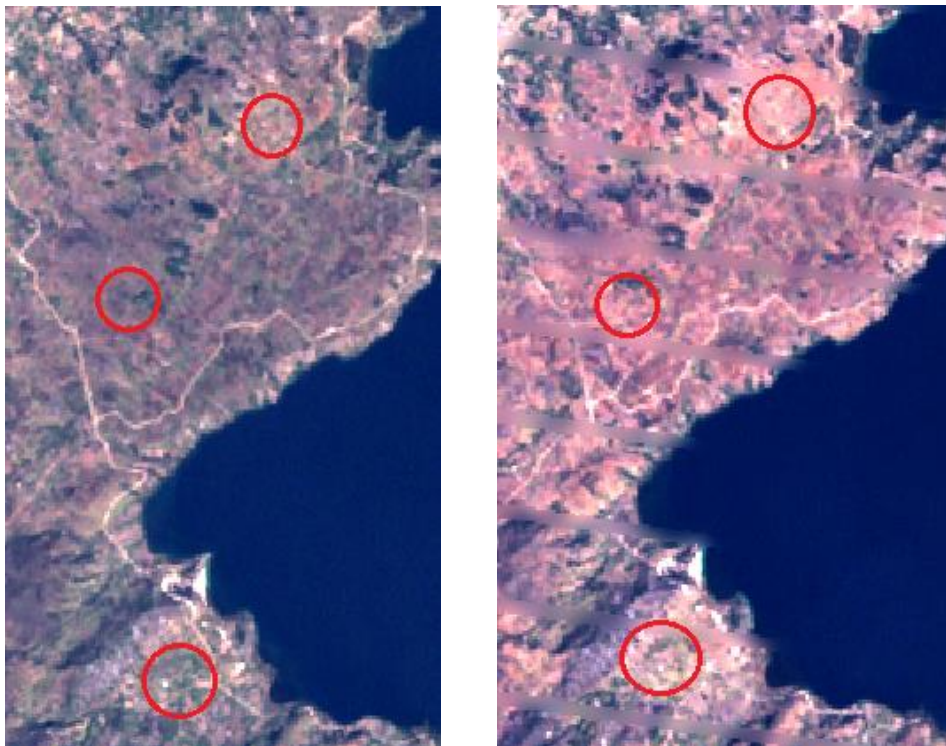
Año	Agua	Montaña o Bosque	Pastizal o cultivo	Zona urbana o suelo desnudo
1986-1989	-1,2%	-0,2%	-5,5%	41,0%
1989-2000	-0,2%	8,6%	-5,8%	-46,8%
2000-2007	1,0%	-0,2%	-16,8%	112,4%
2007-2012	-0,1%	-9,9%	28,4%	1,2%
2012-2016	-0,8%	-7,0%	7,2%	26,6%
2016-2019	-0,1%	0,9%	7,8%	-26,8%

Nota. Fuente: Autor.

En la tabla 5 se observa un comportamiento de disminución (valores negativos) con las coberturas de agua y montaña o bosque, donde los valores obtenidos presentan una leve reducción esto no es tan representativo en el caso de cobertura de agua, ya que, la cantidad de área que ocupa esta no es tan grande como las hectáreas de montaña o bosque las cuales presenta disminuciones más significativas.

Con respecto a la cobertura de zona urbana o suelo desnudo se logra evidenciar de manera general un aumento de la misma, haciendo referencia al crecimiento urbano de los municipios de la zona, también por el crecimiento cobertura de suelo desnudo, ya que por las mismas dinámicas de la zona en diferentes años se ven cambios abruptos de esta. Uno de los aumentos más representativos se observa en el periodo 2000 a 2007 donde se muestra un aumento del 112,4 %.

**Figura 13** Cambio de cobertura suelo desnudo año 2000 vs 2007



Nota. Fuente: Autor.

En la imagen 13 se observan algunos cambios de cobertura abruptos donde la tierra desnuda empieza a tomar más área en el año 2007, Al costado sur de la laguna existe una playa de arenas blancas muy frecuentada por bañistas y personas que practican deportes acuáticos. Generalmente su temperatura no supra los 12° C. Este lugar turístico se llama Playa Blanca y pertenece al municipio de Tota. En playa Blanca se ofrecen los siguientes servicios: como de restaurantes, alquiler de parrillas para asados familiares, zonas de camping, servicio de lancha y de motos acuáticas, senderismo, alquiler de cuatrimotos, entre otros. (Zorro & Cely, 2018). Al ser un sitio turístico en estos años se debieron empezar a realizar las adecuaciones para prestar este tipo de servicios a los turistas que visitan la zona.

## 11. CONCLUSIONES

- Se lograron obtener las imágenes landsat en los periodos 1986 a 2019 teniendo en cuenta criterios como el porcentaje de cobertura de nubes obteniendo 7 imágenes para los años evaluados, con el fin de realizar el análisis de cobertura mediante la metodología random forest , si bien estas imágenes son unas de las mas utilizadas para analisis SIG se observaron algunos problemas de bandeo que dificultan los geoprocesamientos y el analisis de los años 2007 y 2012.
- En cuanto al entrenamiento a pesar de ser imágenes de la misma zona se vio la necesidad de tomar muestras con poligonos de cada uno de los años analizados, ya que, la no hacerlo esto puede generar interpretaciones erroneas de las coberturas.
- Teniendo en cuenta el estudio realizado y de acuerdo a los datos obtenidos es evidente que hay disminución en la cobertura de agua donde para el año 1986 se contaba con 5421 ha en contraste con el año 2019 que arrojó un valor de 5338 ha, un comportamiento similar se presenta con la cobertura de montaña o bosque, la cual pasa de tener 11605 ha en 1986 a 10612 ha en el año 2019; caso contrario pasa con la cobertura de pastizal o cultivo donde se observa un aumento de 5855 ha (1986) a 6431 ha (2019), de igual manera, la zona urbana o suelo desnudo aumento de 1010 ha (1986) a 1509 (2019), que de acuerdo a la literatura investigada estos procesos pueden deberse al aumento de cultivos como la cebolla en areas cercanas al Lago

de Tota y a la expansion demografica que se ha dado en los ultimos años en la zona.

## 12. RECOMENDACIONES

- Teniendo en cuenta que la colección de imágenes landsat pueden presentar problemas de bandeo para algunos años, se recomienda observar otro tipo de imágenes que no presenten este tipo de interferencias, con mayor resolución como por ejemplo las imágenes Sentinel.
- Al realizar el entrenamiento del script se presentan algunas limitaciones como lo son el número de entidades que puede analizar Google Earth Engine, ya que este límite es de 5000, al tratarse píxeles de imagen es muy común cometer el error de realizar muestreos con polígonos grandes y esto genera que el mismo código no sea capaz de llevarse a cabo con éxito, por ende, es recomendable escoger muy bien las muestras de las coberturas para que el software realice una buena clasificación.
- Se recomienda utilizar otros métodos para el procesamiento de imágenes, si bien se lograron corregir los problemas de bandeo de las imágenes de 2007 y 2012, además en la imagen clasificada del año 2012 se puede observar la presencia de nubes que toman una clasificación de zona urbana o suelo desnudo, es ideal buscar un método que elimine este tipo de ruidos. Esto pudo influir a la hora de realizar la clasificación de las coberturas es necesario explorar otras herramientas de Google Earth Engine que permitan arreglar estos problemas que se pueden presentar a la hora de utilizar imágenes satelitales.



### 13. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- Achicanoy, J. A., Rojas-Robles, R., & Sánchez, J. E. (2018). Análisis y proyección de las coberturas vegetales mediante el uso de sensores remotos y Sistemas de Información Geográfica en la localidad de Suba, Bogotá-Colombia Land cover vegetation analysis and projection through remote sensing and Geographic Informa. *Gestión y Ambiente*, 21(1), 41–58. [http://dx.doi.org/10.15446/ga.v20n2.\\_\\_\\_\\_\\_](http://dx.doi.org/10.15446/ga.v20n2._____)
- Ariza Alexander. (2013). Descripción y Corrección de Productos Landsat 8 LDCM (Landsat Data Continuity Mission). *Centro de Investigación y Desarrollo En Información Geográfica Del IGAC -CIAF*, 46.
- Caro-Camargo, C. A., & Velandia-Tarazona, J. E. (2019). The effect of changes in vegetation cover on the hydrological response of the sub-basin los Pozos. *DYNA (Colombia)*, 86(208), 182–191. <https://doi.org/10.15446/dyna.v86n208.74115>
- Cortés, A. (2016). *ANÁLISIS DE COBERTURA Y DEFECTOLOGIA DE UN OLEODUCTO USANDO HERRAMIENTAS SIG*. 147(March), 11–40.
- Espinosa-zúñiga, J. (2020). *Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito Application of Random Forest and XGBoost algorithms based on a credit card applications database*. XXI(número 3), 16.
- Espinoza-Ramírez, A., Nakano, M., Sánchez-Pérez, G., & Arista-Jalife, A. (2018). Geographic information systems and their analysis applied in crime areas in Mexico City. *Informacion Tecnologica*, 29(5), 235–243. <https://doi.org/10.4067/S0718-07642018000500235>
- Franceschini, G. A., & Mehwish. (2022). *Introducción al curso de Google Earth Engine*. 21(6), 937–947. <http://adsabs.harvard.edu/abs/2012AGUFM.U31A..04G>
- García, C. A., & Culma Tamara, M. F. (2022). Multitemporal Analysis of Urban Expansion in the Municipality of Madrid, Cundinamarca, between 1977 and 2020. *Tecnura*, 26(73), 49–66. <https://doi.org/10.14483/22487638.19385>
- García, M. (2018). Análisis de Sensibilidad Mediante Random Forest. *Escuelta Técnica Superior Ingenieros Industriales (UPM)*, 104.

- Gedefaw, M., Denghua, Y., & Girma, A. (2023). Assessing the Impacts of Land Use/Land Cover Changes on Water Resources of the Nile River Basin, Ethiopia. *Atmosphere*, 14(4). <https://doi.org/10.3390/atmos14040749>
- González Velázquez, A. (2018). *Desarrollo de una aplicación para la reparación de huecos (gapfilling) de imágenes satelitales Landsat 7 ETM+*. 48. <https://repositorioslatinoamericanos.uchile.cl/handle/2250/2819018%0Ahttps://rei.iteso.mx/handle/11117/5723>
- Google. (2023). *Google Earth Engine – Google Earth Education*. [https://www.google.com/intl/es\\_in/earth/education/tools/google-earth-engine/#:~:text=Google Earth Engine es una,de satélite de nuestro planeta](https://www.google.com/intl/es_in/earth/education/tools/google-earth-engine/#:~:text=Google Earth Engine es una,de satélite de nuestro planeta).
- Gränzig, T., Fassnacht, F. E., Kleinschmit, B., & Förster, M. (2021). Mapping the fractional coverage of the invasive shrub *Ulex europaeus* with multi-temporal Sentinel-2 imagery utilizing UAV orthoimages and a new spatial optimization approach. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, 96(August 2020). <https://doi.org/10.1016/j.jag.2020.102281>
- Jaramillo-García, D. F., Rodríguez-Sosa, N., Salazar-Salazar, M., Hurtado-Montaño, C. A., & Rondón-Lagos, M. (2020). Contaminación del Lago de Tota y Modelos Biológicos para estudios de Genotoxicidad. *Ciencia En Desarrollo*, 11(2), 65–83. <https://doi.org/10.19053/01217488.v11.n2.2020.11467>
- Khare, S., Latifi, H., & Rossi, S. (2021). A 15-year spatio-temporal analysis of plant  $\beta$ -diversity using Landsat time series derived Rao's Q index. *Ecological Indicators*, 121, 107105. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2020.107105>
- Luna, N., & Medina, J. (2020). Implementación y evaluación del cambio de temperatura por erupciones volcánicas usando Google Earth Engine: Volcán Galeras Nariño - Colombia. *Risti*, 41(1), 437–448. <https://www.proquest.com/openview/a44d67c88cfaada24469aeffd16148e/1?pq-origsite=gscholar&cbl=1006393>
- Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible (MADS). (2016). *Contabilidad Ambiental y Económica para el Agua: Caso Piloto para la Cuenca del Lago de Tota*. 1–78. <https://www.corpoboyaca.gov.co/cms/wp-content/uploads/2016/05/Informe-cuenta-del-agua-Lago-Tota-.pdf>
- Nuñez, V. (2012). *Los Sistemas de Información Geográfica Los Sistemas de*

*Información Geográfica*. 789–804.

- Olaya, V. (2014). *Sistemas de Información Geográfica*.
- Perilla, G. A., & Mas, J. F. (2020). Google Earth Engine - GEE: A powerful tool linking the potential of massive data and the efficiency of cloud processing. *Investigaciones Geograficas*, 101, 0–2. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Ramírez, C. G. (2020). Desarrollo de aplicaciones web utilizando JavaScript. *Universidad Politécnica de Sinaloa Programa Académico de Ingeniería En Informática*, 1–67.
- Raymond, P. (n.d.). *El Lago de Tota ahogado en cebolla. I*, 180.
- Rios, D. (2022). *FORMULACIÓN DE PROTOCOLO DE CONTROL Y SEGUIMIENTO DEL RETAMO ESPINOSO (Ulex europaeus L.) PARA EL MUNICIPIO DE DUITAMA, BOYACÁ. 8.5.2017, 2003–2005*. <https://www.who.int/news-room/fact-sheets/detail/autism-spectrum-disorders>
- Sanabria, L. (2019). *FACTORES CAUSANTES DE DETERIORO DEL LAGO DE TOTA, ASOCIADOS CON ACTIVIDAD AGROINDUSTRIAL. UNA REVISION BIBLIOGRAFICA*.
- Sánchez, L. A. P., Pellat, F. P., Mota, J. L. O., Sandoval, B. F., Menez, M. M., Ortiz Solorio, C. A., & García, A. E. (2018). Atmospheric corrector in Landsat images. *Terra Latinoamericana*, 36(4), 309–321. <https://doi.org/10.28940/terra.v36i4.232>
- Sánchez, P. (2012). La teledetección enfocada a la obtención de mapas digitales. *Universidad de Cuenca*, 60.
- Singh, S., Bhardwaj, A., & Verma, V. K. (2020). Remote sensing and GIS based analysis of temporal land use/land cover and water quality changes in Harike wetland ecosystem, Punjab, India. *Journal of Environmental Management*, 262(July 2018), 110355. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110355>
- Solórzano, J. V., Gallardo-Cruz, J. A., & Peralta-Carreta, C. (2020). The potential of the available Landsat imagery in Google Earth Engine for the study of the Mexican territory. *Investigaciones Geograficas*, 101, 0–2. <https://doi.org/10.14350/rig.59821>

- Torres-Barrera, N. H., & Grandas-Rincón, I. A. (2017). Estimación de los desperdicios generados por la producción de trucha arcoíris en el lago de Tota, Colombia. *Corpoica Ciencia y Tecnología Agropecuaria*, 18(2), 247–255. [https://doi.org/10.21930/rcta.vol18\\_num2\\_art:631](https://doi.org/10.21930/rcta.vol18_num2_art:631)
  
- Vargas, Y. (2020). *Revisión de metodologías para la clasificación de las coberturas de la tierra*. 63. [https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15420/1/VargasYenifer\\_2020\\_MetodologiasClasificacionCoberturas.pdf](https://bibliotecadigital.udea.edu.co/bitstream/10495/15420/1/VargasYenifer_2020_MetodologiasClasificacionCoberturas.pdf)
  
- Vélez-Castaño, J. D., Betancurth-Montes, G. L., & Cañón-Barriga, J. E. (2021). Erosion and progradation in the Atrato River delta: A spatiotemporal analysis with Google Earth Engine. *Revista Facultad de Ingeniería*, 99, 83–98. <https://doi.org/10.17533/udea.redin.20200688>
  
- Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López-Morales, F. (2020). Application of remote sensors for the analysis of vegetation cover and water bodies. *Idesia*, 38(4), 99–107. <https://doi.org/10.4067/S0718-34292020000400099>
  
- Wanumen-Mesa, A. M., López-Camacho, R., & Rodríguez-Eraso, N. (2020). Are agricultural landscapes dynamic or stable? Case study in Lake Tota (Boyacá, Colombia). *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 29(1), 207–223. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v29n1.70014>
  
- Wulder, M. A., Roy, D. P., Radeloff, V. C., Loveland, T. R., Anderson, M. C., Johnson, D. M., Healey, S., Zhu, Z., Scambos, T. A., Pahlevan, N., Hansen, M., Gorelick, N., Crawford, C. J., Masek, J. G., Hermosilla, T., White, J. C., Belward, A. S., Schaaf, C., Woodcock, C. E., ... Cook, B. D. (2022). Fifty years of Landsat science and impacts. *Remote Sensing of Environment*, 280(July), 113195. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2022.113195>
  
- Zorro, D., & Cely, X. (2018). CARACTERIZACIÓN DEL SECTOR TURÍSTICO DEL MUNICIPIO DE TOTA EN EL MARCO DEL CONVENIO INTERINSTITUCIONAL ENTRE LA ADMINISTRACIÓN MUNICIPAL Y LA UPTC. *Energies*, 6(1), 1–8. <http://journals.sagepub.com/doi/10.1177/1120700020921110%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.reuma.2018.06.001%0Ahttps://doi.org/10.1016/j.arth.2018.03.044%0Ahttps://reader.elsevier.com/reader/sd/pii/S1063458420300078?token=C039B8B13922A2079230DC9AF11A333E295FCD8>

