

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL AREA CORRESPONDIENTE A LA  
LAGUNA DE TOTA PARA EL PERIODO 1989-2019.**



Deisy Johanna Rey Díaz  
Ingeniera Topográfica

Universidad Antonio Nariño.  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica.  
Trabajo de Grado  
Bogotá D.C Colombia  
Julio 2020

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL AREA CORRESPONDIENTE A LA  
LAGUNA DE TOTA PARA EL PERIODO 1989-2019.**



Deisy Johanna Rey Díaz  
Ingeniera Topográfica

Andrés Felipe Carvajal Vanegas Dr.

Universidad Antonio Nariño.  
Especialización en Sistemas de Información Geográfica.  
Trabajo de Grado  
Bogotá D.C Colombia  
Julio 2020

NOTA DE ACEPTACIÓN

---

---

---

Firma del Jurado

---

Firma del Jurado

## **AGRADECIMIENTOS**

El presente trabajo de grado lo dedico principalmente a Dios, por ser el inspirador y quien permitió e hizo posible empezar y finalizar este proceso para obtener el título como Especialista en Sistemas de Información Geográfica.

## RESUMEN

Durante el desarrollo del presente documento se realiza un análisis multitemporal de coberturas del área correspondiente al espejo de agua de la Laguna de Tota, ubicada en el departamento de Boyacá, Colombia, considerada como uno de los cuerpos de agua más importantes del país, y cuyo ecosistema ha sufrido una disminución en el área correspondiente al espejo de agua, producto de las diferentes actividades socioeconómicas de la región como la siembra de cultivos de papa y cebolla entre otras, por el uso inadecuado de fertilizantes y otros productos químicos (Gobernación de Boyacá, 2012, p.5). Teniendo en cuenta dichas problemáticas se establece un panorama de comparación en el área de la laguna, entre el año 1989 y el año 2019, transcurridos 30 años. Se describe un método automatizado haciendo uso de dos imágenes Landsat 5 para el año de 1989 y Landsat 8 para el año 2019, mediante una clasificación supervisada con el software Erdas 2014 y posteriormente ArcGis 10.5. Con el procesamiento de dicha información se obtienen las diferentes coberturas y se realiza el cálculo del área correspondiente al espejo de agua de la laguna, y algunas coberturas cercanas a la zona de influencia del cuerpo de agua. Dicha variación física se hace evidente durante el desarrollo de la clasificación, de esta manera al final de este estudio multitemporal se identificaron siete (7) zonas o puntos donde se hace más evidente la disminución del área del espejo de agua de la laguna desde el año en referencia hasta la actualidad, la reducción del área del espejo de agua de la Laguna de Tota, es de 4 Km<sup>2</sup> con un área inicial de 55.8 Km<sup>2</sup> en el año 1989 y un área final de 51.8 Km<sup>2</sup> en el año 2019.

## ABSTRACT

During the development of this document, a multitemporal analysis of coverage of the area corresponding to the water mirror of the Tota Lagoon, located in the department of Boyacá, Colombia, considered one of the most important bodies of water in the country, and whose ecosystem has suffered a decrease in the area corresponding to the mirror of water, product of the different socio-economic activities of the region as the sowing of crops of potato and onion among others, by the inappropriate use of fertilizers and other chemicals (Gobernación de Boyacá, 2012, p.5). Taking into account these problems, a comparison is established in the area of the lagoon, between 1989 and 2019, after 30 years. An automated method is described using two Landsat 5 images for the year 1989 and Landsat 8 for the year 2019, by means of a supervised classification with the Erdas 2014 software and later ArcGis 10.5. With the processing of said information the different coverages are obtained and the calculation of the area corresponding to the mirror of water of the lagoon is made, and some coverages near the zone of influence of the body of water. This physical variation becomes evident during the development of the classification, so at the end of this multitemporal study seven were identified (7) areas or points where it becomes more evident the decrease of the area of the mirror of water of the lagoon from the year in reference to the present, the reduction of the area of the mirror of water of the Lagoon of Tota, is 4 Km<sup>2</sup> with an initial area of 55.8 Km<sup>2</sup> in 1989 and a final area of 51.8 Km<sup>2</sup> in 2019.

## TABLA DE CONTENIDO

1.	INTRODUCCION .....	10
2.	OBJETIVOS .....	11
2.1	OBJETIVO GENERAL .....	11
2.2	OBJETIVOS ESPECIFICOS .....	11
3.	MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	12
3.1	IMÁGENES LANDSAT .....	12
3.2	CLASIFICACION POR TELEDETECCION .....	12
3.3	DETECCION DE CAMBIOS .....	13
3.4	CAMBIOS MULTITEMPORALES EN LAS COBERTURAS .....	14
3.5	ESTADO DEL CONOCIMIENTO .....	16
3.5.1	Contexto Internacional .....	16
3.5.2	Contexto Nacional .....	17
4.	METODOLOGIA .....	20
4.1	LOCALIZACIÓN .....	20
4.2	PREPARACION DE LAS IMÁGENES .....	21
4.3	PREPARACION IMAGEN LANDSAT 8 DE TRABAJO: .....	22
4.4	ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIBANDA IMAGEN LANDSAT 8: .....	23
4.5	PROCEDIMIENTO CLASIFICACIÓN SUPERVISADA .....	27
4.6	REPROYECTAR AL SISTEMA DE REFERENCIA ADECUADO .....	36
5.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	45
6.	CONCLUSIONES .....	60
7.	BIBLIOGRAFÍA .....	61

## LISTA DE TABLAS

Tabla 1 Matriz varianzas y covarianzas Landsat 8- 2019.....	23
Tabla 2 Matriz de Correlación Imagen Landsat 8-2019 Fuente: Propia.....	25
Tabla 3 Calculo OIF por Bandas Imagen Landsat 8-2019 Fuente: Propia.....	26
Tabla 4 Matriz de grado de exactitude.....	32
Tabla 5 Calculo Índice Kappa.....	33
Tabla 6 Matriz de Varianzas y Covarianzas Imagen Landsat 5-1989 .....	38
Tabla 7 Matriz de Correlación Imagen Landsat 5 -1989. ....	39
Tabla 8 Cuadro de áreas por Coberturas Imagen Landsat 5, año 1989. Fuente: Propia...	44
Tabla 9 Resultados Comparativos de Coberturas por Año, ArcGis 10.5 .....	46
Tabla 10 Distribución de zonas zonificación POMCA Vs Análisis multitemporal .....	50
Tabla 11 Distribución de Tipos de uso y características del territorio Fuente:POMCA ..	50
Tabla 12 Cuadro de coordenadas Puntos Geográficos de Variación.....	51
Tabla 13 Tabla de Clasificación grado de afectación Fuente: (Mateus, 2013).....	54
Tabla 15 Tipos de Coberturas existentes en los puntos geográficos con mayor variación según el análisis multitemporal 1989-2019 .....	56

## LISTA DE FIGURAS

Figura. 1 Localización General Laguna de Tota. Fuente: Elaboración Propia.....	20
Figura. 2 Imagen Landsat Descargada Año 2019 Fuente: <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> .....	21
Figura. 3 Imagen Landsat Descargada Año 1989 Fuente. <a href="https://earthexplorer.usgs.gov/">https://earthexplorer.usgs.gov/</a> .....	21
Figura. 4. Elaboración del layer stack. Fuente: Propia .....	22
Figura. 5 Procedimiento Fuente: Propia .....	22
Figura. 6 Procedimiento Fuente: Propia .....	23
Figura. 7 Procedimiento Fuente: Propia .....	24
Figura. 8 Procedimiento Fuente: Propia .....	24
Figura. 9 Visualización OIF Imagen Lantsad 8-2019 Fuente: Propia .....	26
Figura. 10 Procedimiento Fuente: Propia .....	27
Figura. 11 Procedimiento Fuente: Propia .....	28
Figura. 12 Procedimiento Fuente: Propia .....	28
Figura. 13 Procedimiento Fuente: Propia .....	29
Figura. 14 Procedimiento Fuente: Propia .....	29
Figura. 15 Procedimiento Fuente: Propia .....	30
Figura. 16 Procedimiento Fuente: Propia .....	30
Figura. 17 Procedimiento Fuente: Propia .....	30
Figura. 18 Procedimiento Fuente: Propia .....	31
Figura. 19 Procedimiento Fuente: Propia .....	31
Figura. 20 Procedimiento Fuente: Propia .....	33
Figura. 21 Procedimiento Fuente: Propia .....	34
Figura. 22 Procedimiento Fuente: Propia .....	34
Figura. 23 Procedimiento Fuente: Propia .....	35
Figura. 24 Procedimiento Fuente: Propia .....	36
Figura. 25 Procedimiento Fuente: Propia .....	36
Figura. 26 Procedimiento Fuente: Propia .....	37

Figura. 27 Procedimiento Fuente: Propia .....	38
Figura. 28 Procedimiento Fuente: Propia .....	39
Figura. 29 Procedimiento Fuente: Propia .....	40
Figura. 30 Procedimiento Fuente: Propia .....	41
Figura. 31 Procedimiento Fuente: Propia .....	41
Figura. 32 Procedimiento Fuente: Propia .....	42
Figura. 33 Procedimiento Fuente: Propia .....	43
Figura. 34 Procedimiento Fuente: Propia .....	43
Figura. 35 Procedimiento Fuente: Propia .....	45
Figura. 36 Grafica Comparativa de Áreas por Coberturas, año 2019-1989 .....	46
Figura. 37 Grafica comparativa área del espejo de agua del Lago Fuente: Propia.....	47
Figura. 38 Localización General Puntos de Variación, Espejo de Agua del Lago de Tota. Fuente: Propia .....	48
Figura. 39 Mapa de Zonificación de La Cuenca del Lago de Tota.....	49
Figura. 40 Localización General Variación, Espejo de Agua del Lago de Tota Año 1989 - 2019. Fuente: propia .....	52
Figura. 41 Localizacion casco urbano de Aquitania con respect a los puntos A y B. Fuente: Google Earth .....	53
Figura. 42 Sectores de mayor variación (A,B,C,D) en el análisis multitemporal 1989- 2019 sobre Mapa de Coberturas del suelo Laguna de Tota Fuente. (Mateus, 2013).	55
Figura. 43 Registros fotográficos sector A y B Fuente: Google Earth .....	57
Figura. 44 Registros fotográficos sector D Fuente: Google Earth.....	58

## 1. INTRODUCCION

Los municipios abastecidos por la Laguna de Tota son Firavitoba, Cuitiva, Tota, Aquitania, Iza y Sogamoso, por lo tanto, son las comunidades que se ven directamente relacionados con todo lo relacionado a la Laguna, para el caso de estudio de este documento en la variación y disminución del área que ha sufrido el cuerpo de agua en los últimos 30 años. Dentro de los conflictos ambientales más graves que presenta la Laguna de Tota está la disminución del área espejo de agua de la Laguna (Gobernación de Boyacá, 2012), tema en el que se centra el desarrollo de este documento. Esta laguna es reserva de aproximadamente un 13.55% del agua en Colombia y una de las cuencas más importantes de la región, ésta representa el abastecimiento de agua para consumo de las poblaciones de la región de aproximadamente 250.000 habitantes, alrededor del 20% de la población de departamento de Boyacá (CONPES, 2014 P.10). Es de mencionar que la contaminación de los cuerpos de agua puede generar procesos de eutrofización, caso particular el de la Laguna, lo que favorece la disminución de la capacidad de almacenamiento de agua y de ésta manera a la pérdida del área del espejo de agua (CONPES, 2014 P.13). En el presente documento se busca identificar el área de dicho espejo de agua para los años de 1989 y 2019 y poder analizar los cambios que éste ha sufrido en dicho periodo de tiempo.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

---

2.1.1. Evaluar la variación del área correspondiente a la lámina de agua de la Laguna de Tota en el departamento de Boyacá, para el periodo de 1989 a 2019, utilizando imágenes Landsat.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECIFICOS**

---

2.2.2 Identificar el área del espejo de agua de la Laguna de Tota en los años 1989 y 2019.

2.2.1 Analizar los cambios en las áreas del espejo de agua para los años 1989 y 2019.

### **3. MARCO TEORICO Y ESTADO DEL CONOCIMIENTO**

#### **3.1 IMÁGENES LANDSAT**

---

Las imágenes Landsat son caracterizadas por la variedad de bandas que las componen, 7 y 1 pancromática. Estas imágenes son clasificadas en 2 tipos: Landsat 7 (sensor ETM+ ) y Landsat 5 (sensor TM); ambas están compuestas por 7 bandas multiespectrales que van desde el visible hasta el infrarrojo medio, con una resolución de 30 metros, en la mayoría de ellas. Sin embargo, la diferencia entre estos dos tipos radica en que las Landsat 7 poseen una banda pancromática de 15 metros y en el caso de la banda termal, aumenta la resolución de 120 a 60 metros. Cada escena cubre un área de 180\*175 Km<sup>2</sup>. Dentro de las principales aplicaciones de estas imágenes están la identificación y clasificación de las distintas coberturas que existen en la superficie terrestre (construcciones, zonas verdes, cultivos, cuerpos de agua etc.), determinación de humedad del suelo, clasificación de la vegetación, mapas hidrotermales y estudios multitemporales, entre otros. (Geosoluciones).

#### **3.2 CLASIFICACION POR TELEDETECCION.**

---

La clasificación por teledetección es determinada como un proceso bastante amplio, donde se es necesario tener en cuenta muchos factores. Dentro de dichos factores determinar el proceso de clasificación debe ser en lo posible el más adecuado, realizar la selección de muestras de entrenamiento adecuadas para la zona y la imagen a trabajar, realizar el mejor preprocesamiento de imágenes, que sea preciso y además optimo, determinar las características, determinar el enfoque de clasificación apropiado,

clasificación posterior procesamiento y evaluación de precisión, es decir realizar la validación de muestras determinadas por su nivel digital como las tomadas in situ. Además tener clara la necesidad del usuario o el fin de la investigación, la escala del área de estudio, la condición económica y las habilidades y experiencia de los analistas son entre otros factores importantes que influyen en la selección de datos de detección remota, el diseño del procedimiento de clasificación y la calidad de los resultados de la clasificación, están dados al éxito de acuerdo a la correcta determinación de dichos factores y/o aspectos.(Lu & Weng, 2007,P.824).

### **3.3 DETECCION DE CAMBIOS**

---

Para crear una imagen de detección de cambios se utilizan diferentes algoritmos especiales a dos distintas imágenes de satélite de la misma zona, tomadas en momentos distintos, para el caso en estudio se utilizaron dos imágenes Landsat 5 y 8, del año 1989 y 2019, respectivamente. El software examina todo y cada uno de los píxeles de las dos imágenes, para determinar qué valores de pixel han cambiado, y al realizar la determinación de factores como la selección de muestras, la escala, y la definición de coberturas a comparar, entre otras, se estiman las variaciones existentes en ambas imágenes. En la mayoría de los casos, el área modificada se resalta en color. Este procedimiento se utiliza normalmente para mapear automáticamente extensas zonas e identificar cambios como nuevos edificios, carreteras, urbanizaciones y desastres naturales como inundaciones, aluviones, cambios de áreas, cambios en el uso del suelo como cultivos y a nivel urbano, la extensión de ciudades etc, de este modo se identifican también cambios radicales e importantes, como la

transformación en zonas de bosques en zonas de cultivo, y como en este caso particularmente en los cuerpos de agua como ríos y lagunas. (Saquis, 2016)

### **3.4 CAMBIOS MULTITEMPORALES EN LAS COBERTURAS**

De acuerdo al “Análisis espacial cuantitativo de la transformación de humedales continentales en Colombia”; -“En Colombia se verificó esta tendencia y se estimó que casi una cuarta parte de la superficie de humedales ha sido transformada a otro tipo de coberturas terrestres” (Mazón, Sánchez, 2016, P.4), a pesar de que la Laguna de Tota no está considerada como un humedal, se tomó como base esta investigación como punto de referencia para poder entender y determinar los factores que inciden en el cambio de coberturas, y en particular en cuerpos de agua. Dentro de los humedales que han sufrido importantes cambios a lo largo del tiempo se encuentra el Altiplano de Bogotá donde se reportó una pérdida de aproximadamente del 97 % de área de humedales en el siglo XX. (Marina Mazón, Dionys Sánchez, 2016, P.87). El Instituto Humboldt en apoyo con otras entidades realizó un importante análisis de las actividades que tienen mayor impacto sobre los humedales, mostrado a través de mapas en escala 1:100.000 publicados en los años 2005 y 2012, estos resultados fueron muy importantes en lo referente a los promotores de cambio, dichos mapas fueron elaborados con la utilización de imágenes satelitales de los años 2000, 2005 a 2009 y 2010, por lo que la temporalidad de los cambios de algunas zonas no es la misma que para otras, dependiendo de la imagen insumo, este análisis pretendía resolver dos grandes cuestionamientos de los cambios en los humedales: ¿Cuánto? y ¿Por qué ocurre la variación?. Dentro de los múltiples resultados de este análisis se determinaron

que las principales actividades humanas responsables de la pérdida de áreas de humedal en Colombia están relacionadas a la actividad agropecuaria: ganadería, agricultura y deforestación para ampliación de la frontera agrícola. La suma de las áreas intervenidas por estas actividades alcanza más del 90 % en toda el área transformada de los humedales del país. Se resalta también la afectación por minería en la clase de humedal permanente abierto, como otro de los factores incidentes sobre los cambios presentados en los humedales, la cual es la segunda actividad con mayor impacto en la pérdida de área de esta clase de humedal: 2544 ha (26 %). ( Mazón, Sánchez, 2016. P.100), otras de las variables que se tuvieron en cuenta como factor incidente en la problemática de la disminución del área de humedales, estuvo dada por la relación entre pobreza y violencia de las zonas cercanas o aledañas a los humedales, que son variables tan complejas como importantes para tener en cuenta y de estudiar con mayor profundidad.

## 3.5 ESTADO DEL CONOCIMIENTO

### 3.5.1 Contexto Internacional

En el contexto internacional en el año 2011, (Bresciani, Luigi Boschetti, & Claudia Giardino, 2011) basados en imágenes satelitales, utilizaron para evaluar la concentración de LST y chl-a en dos importantes lagos italianos, Garda con 370 km<sup>2</sup> y Trasimeno con 128 km<sup>2</sup> de superficie, cuyas temporalidades fueron: para Garda (2004-2010) y para Trasimeno (2005-2009); ambos con imágenes MERIS y MODIS, los resultados de este análisis de la concentración de chl-a multitemporal derivada de MERIS reveló que en el lago de Garda el crecimiento del fitoplancton generalmente alcanza sus valores máximos entre el final del invierno y el comienzo de la primavera, mientras que el lago Trasimeno en cambio, los picos de chl-a se alcanzan en agosto.

Más tarde en el año 2012, (M. Stefouli, 2012) desarrolló para el Lago Ohrid, el más grande de ex República Yugoslava de Macedonia, con una superficie total de 348.8 km<sup>2</sup> y una captación total de 2,340 km<sup>2</sup> y una profundidad máxima de 285 m (promedio 164 m), por medio de imágenes satelitales de distinta resolución, es decir MERIS/ENVISAT y LANDSAT, con el MERIS pudieron extraer parámetros de calidad del agua del lago, como la claridad, mientras que las con las imágenes Landsat con temporalidad de 25 años, permitieron realizar los análisis de superficie hidráulica y su extensión. Para muestras cuya temporalidad era de (más de 27 años) de imágenes satelitales muestran tendencias significativas sobre el medio ambiente, las condiciones del lago y sus alrededores. El estudio ayudó en: la definición de un concepto para el uso conjunto de diferentes observaciones satelitales de resolución para el soporte de gestión ambiental del lago., como

resultado final se estableció una base de datos ambientales basada en Geomática para parámetros seleccionados del lago Ohrid, como base del SIG basado en la web para obtener resultados disponibles para la comunidad científica en general.

Para el año 2014 (Komeil Rokni 1, 2014) realizó una investigación basada en un análisis multitemporal del Lago Urmia ubicado en Irán, y catalogado como el vigésimo lago más grande y el segundo lago hiper salino más grande (antes de septiembre de 2010) en el mundo. Cuerpo de agua que ha sufrido de una disminución de las aguas superficiales y al aumento de la salinidad, se modelaron los cambios espacio-temporales del lago Urmia en el período 2000-2013 utilizando las imágenes multi-temporales Landsat 5-TM, 7-ETM + y 8-OLI y los resultados indicaron una tendencia decreciente intensa en la superficie del lago Urmia en el período 2000-2013, especialmente entre 2010 y 2013, cuando el lago perdió aproximadamente un tercio ( $1425 \text{ km}^2$ ) de su superficie en comparación con el año 2000. El cambio total del lago durante el período de tiempo fue de unos  $2805 \text{ km}^2$ , como conclusión el autor establece que es muy probable que el lago pierda toda su superficie de agua en el futuro cercano.

### **3.5.2 Contexto Nacional**

En Colombia se han realizado diferentes estudios relacionados a estudios multitemporales para analizar y comparar cambios en las diferentes coberturas de zonas específicas de estudio. Como estudios y casos de referencia relacionados a la temporalidad y cambios de cuerpos de agua anteriormente se han generado diferentes trabajos de investigación, tal es el caso de (Mateus, 2013) quien quiso analizar, el cambio de cobertura y determinar su impacto en la desecación del Lago de Tota, con fotografías aéreas pancromáticas y una

imagen satelital Spot, en la Subcuencas del Lago de Tota ubicada entre los municipios de Sogamoso, Tota, Cuitiva, Iza y Aquitania en el departamento de Boyacá, cuyo periodo de evaluación fue de 15 años, entre 1995 y 2010. Los resultados de dicho estudio se presentaron en dos mapas, por un lado, el Mapa de Cobertura del suelo 1995 y 2010 y por otro lado el Mapa de Impacto de la Cobertura y uso del suelo en la desecación del Lago Tota. , por otro lado en el año 2015 (Ing. MORENO, 2015) realizó un análisis multispectral mediante imágenes Landsat, presentando mediante un buffer de trabajo de 10km alrededor de la laguna de Tota, para la cual realizó un sinergismo en tres bandas y de esta forma pudo determinar el mejor uso para su análisis. Como resultado de esta investigación el autor obtuvo las respectivas firmas espectrales por tipo de cobertura, las áreas de cultivos, vegetación natural herbácea, Páramos, Bosques, cuerpos de agua, sombras y nubes, para identificar que tan apto se encontraba el suelo para la agricultura, analizó el índice de Humedad de la zona, determinando la geolocalización de los diferentes cuerpos de agua cercanos a la laguna y el de la laguna.

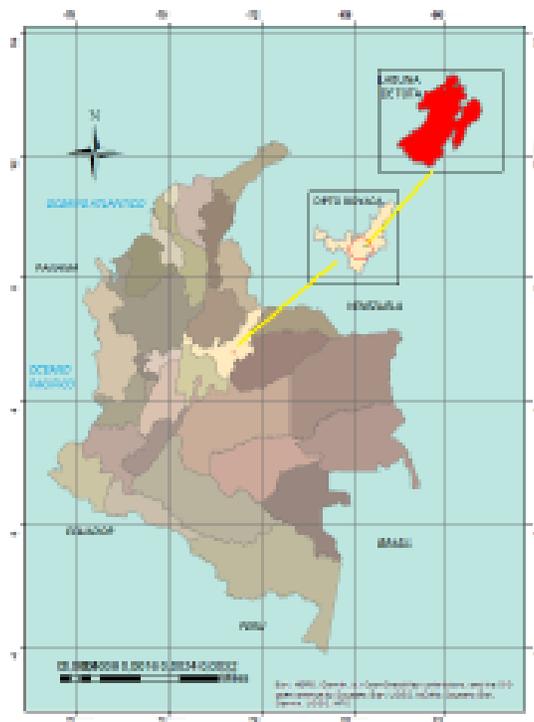
Como estudio a fin a la perdida de área del espejo de agua, en ese mismo año (BUSTOS & ADRIANA LISETH GONZÁLEZ MAHECHA, 2015) realizó el análisis de la pérdida del espejo de agua de la Laguna de Fúquene, ubicada en el departamento de Cundinamarca, mostrando los grandes cambios eco sistémicos, utilizaron imágenes satelitales Landsat del año 1985 y del año 2015, a partir de las cuales determinaron diferentes coberturas para establecer la detección de cambios del área correspondiente a la lámina de agua, además analizaron variables tales como la precipitación, temperatura y evaporación a lo largo de los mismos años, con el fin de observar algunos cambios producto del cambio climático y

su incidencia sobre dicho ecosistema, como resultado de este estudio se determinaron las áreas del espejo de agua para los diferentes años, determinando la disminución de 1.001 Ha del año 1985 al año 2000, es decir un 53.7% y del año 2000 al 2015 en 392 Ha equivalente al 45.4%, el autor de esta investigación basado en cifras de referencias externas concluyó que según ésta la laguna contaba con 3.042 Ha para el año 1947, lo cual le permitió concluir que el área de la lámina de agua de laguna ha disminuido al año 2015 en un 84%, y estableció a partir del análisis de las demás variables que la disminución del ecosistema se ha dado por la intervención antrópica desmedida en prácticas agropecuarias y al mal manejo de residuos que conllevan a la contaminación del ecosistema.

## 4. METODOLOGIA

### 4.1 LOCALIZACIÓN

La laguna de Tota se encuentra ubicada dentro de los Municipios de Aquitania, Cuitiva y Tota, ubicados a su vez en la Cordillera Oriental al norte del Departamento de Boyacá, dentro del rectángulo formado por las coordenadas (con origen Bogotá, Gauss Central) X: 1°115.243 -1°142.300 Y: 1°147.993 -1°173.478. Hidrográficamente se encuentra entre las Subcuencas de los Ríos Chicamocha y Suárez; a la primera pertenece el sector Sur-Sureste del municipio y al segundo el sector Norte-Noroccidente; posee altitudes que van desde los 2.600 hasta los 4.000 metros sobre el nivel medio del mar (Figura 1).(Gobernación de Boyacá, 2012 p.7) .



*Figura. 1 Localización General Laguna de Tota. Fuente: Elaboración Propia*

## 4.2 PREPARACION DE LAS IMÁGENES

Se realizó la obtención de las imágenes Landsat 8 y 5 de forma gratuita mediante la página: <https://earthexplorer.usgs.gov/> ( Figura. 2, Figura. 3), y los principales parámetros de búsqueda se relacionan con el nombre de la zona Laguna de Tota y bajo porcentaje de nubosidad con el fin de obtener como resultado una imagen de alta calidad.

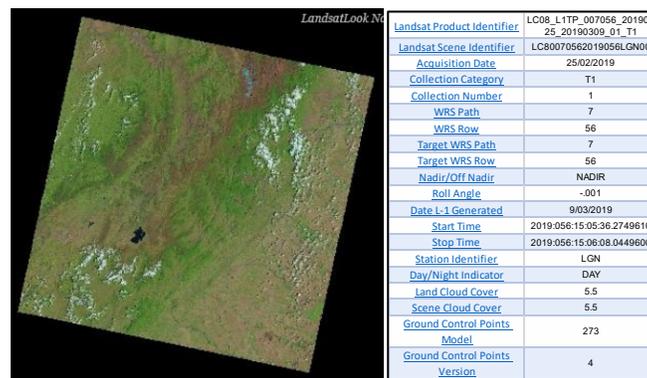


Figura. 2 Imagen Landsat Descargada Año 2019 Fuente: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

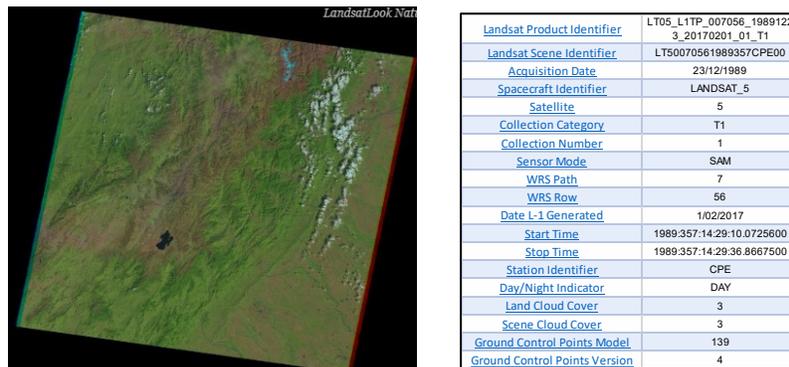


Figura. 3 Imagen Landsat Descargada Año 1989 Fuente. <https://earthexplorer.usgs.gov/>

### 4.3 PREPARACION IMAGEN LANDSAT 8 DE TRABAJO:

Una vez descargada la imagen se debe realizar un Layer stack para las bandas 1 a la 7 de la imagen, y de igual manera para la banda 8 como pancromática (Figura. 4):

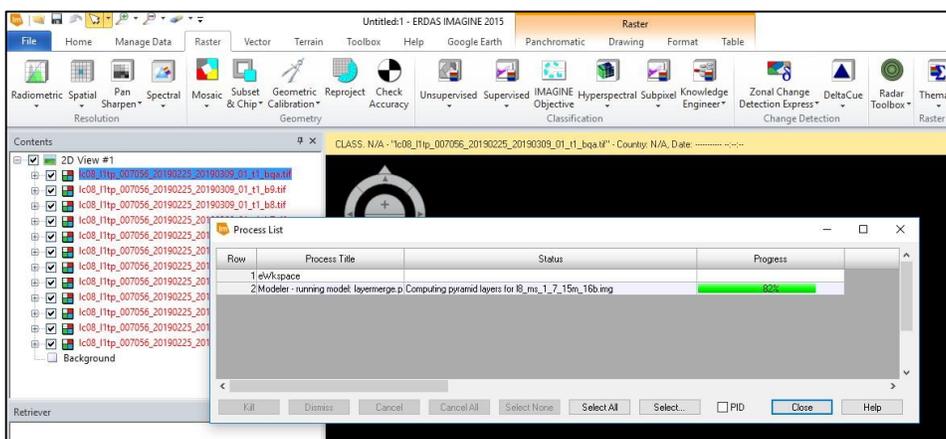


Figura. 4. Elaboración del layer stack. Fuente: Propia

Luego se reproyectó dicha imagen realizando también un recorte en tamaño de pixel de 15m tanto la combinada como de la pancromática (Figura. 5).

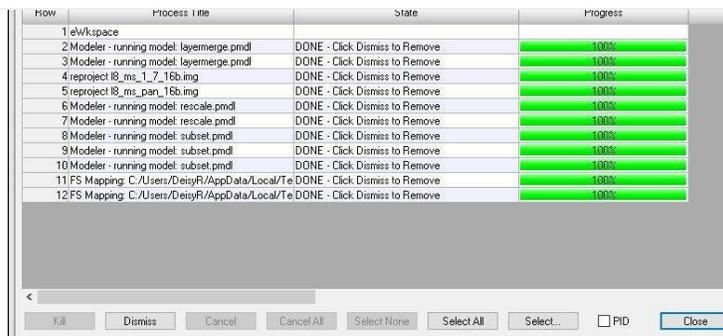


Figura. 5 Procedimiento Fuente: Propia

#### 4.4 ANÁLISIS ESTADÍSTICO MULTIBANDA IMAGEN LANDSAT 8:

Una vez procesada la información con los anteriores pasos para el análisis Multibanda se pudieron procesar los datos desde un modelo automatizado (Figura. 6), en dichos modelos se programó mediante las funciones que posee el software Erdas.

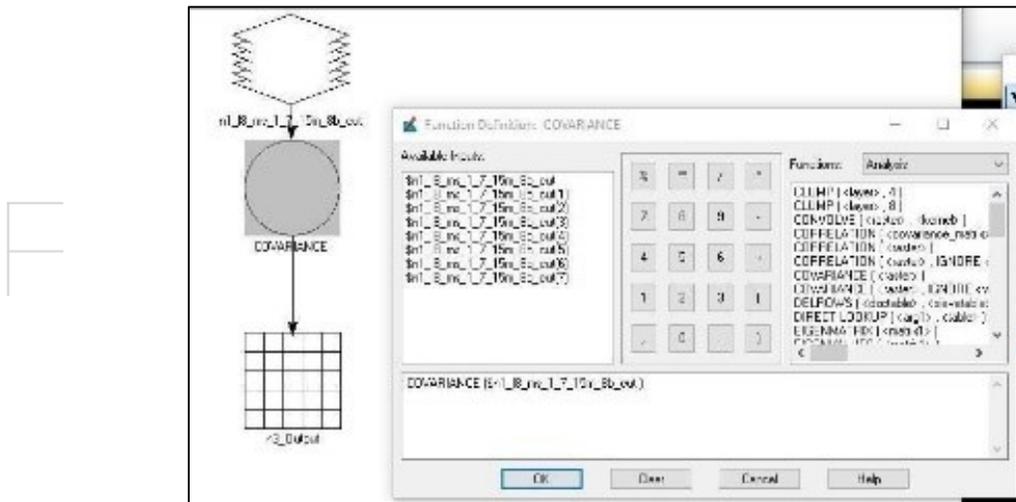


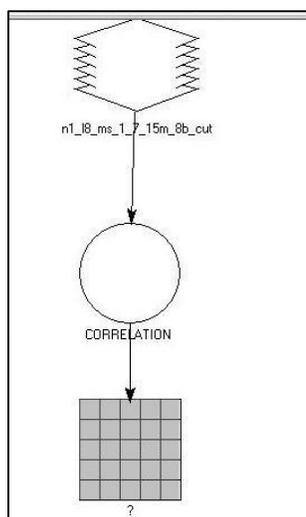
Figura. 6 Procedimiento Fuente: Propia

De forma contraria al análisis Unibanda los cálculos estadísticos no son realizados por medio de tablas Excel como se mostró anteriormente, sino que son procesados tanto el cálculo tanto de la matriz de Covarianza como el de la matriz de Correlación, (Tabla 1 Tabla 1 Matriz varianzas y covarianzas Landsat 8- 2019).

Tabla 1 Matriz varianzas y covarianzas Landsat 8- 2019

MATRIZ DE VARIANZAS Y COVARIANZAS						
1	2	3	4	5	6	7
197,8	198,78	195,54	197,31	172,26	156,8	140,1
198,78	200,54	197,89	200,67	173,1	163,07	145,32
195,54	197,89	197,42	201,37	177,21	172,68	151,18
197,31	200,67	201,37	209,1	174,94	189,67	164,86
172,26	173,1	177,21	174,94	253,71	179,2	133,79
156,8	163,07	172,68	189,67	179,2	251,64	198,1
140,1	145,32	151,18	164,86	133,79	198,1	165,2

La matriz de covarianza permite analizar que en esta imagen la banda con mayor dispersión de datos y/o varianza es la (5), dado que el dato en flujo diagonal se presenta en la banda #5. Dicha tabla contiene valores de varianzas y covarianzas. La varianza es una medida estadística que muestra cuánta varianza hay desde la media de los datos (Figura. 7).



*Figura. 7 Procedimiento Fuente: Propia*

El resultado del anterior procedimiento se ve reflejado en el reporte de resultados ( Figura. 8):

Row	Process Title	State	Progress
1	eWkspc		100%
2	FS Mapping: C:/Users/DeisyR/AppData/Local/Te	DONE - Click Dismiss to Remove	100%
3	FS Mapping: C:/Users/DeisyR/AppData/Local/Te	DONE - Click Dismiss to Remove	100%
4	MODELMAKER		
5	Modeler - running model: EGMD_004476	DONE - Click Dismiss to Remove	100%
6	Modeler - running model: EGMD_004476	DONE - Click Dismiss to Remove	100%

*Figura. 8 Procedimiento Fuente: Propia*

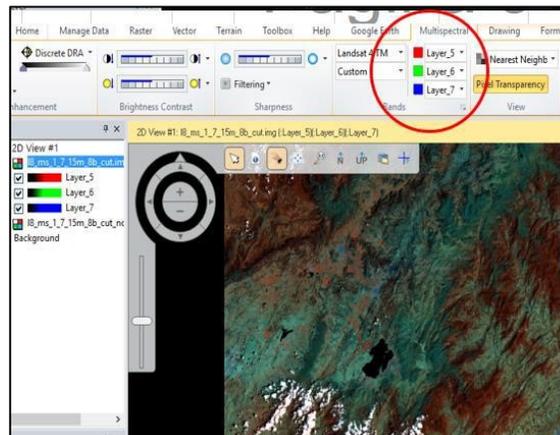
La matriz de correlación permite analizar que en esta imagen presenta los valores de celda de una banda a medida que se relacionan con los valores de celda de otra banda. La correlación entre las bandas es una medida de dependencia entre las bandas de la imagen. Para este caso la correlación entre las bandas es 1 en valor positivo lo que indica que tienen una relación directa y los valores entre todas las bandas se comportan más o menos similar (Tabla 2).

*Tabla 2 Matriz de Correlación Imagen Landsat 8-2019 Fuente: Propia*

<b>MATRIZ DE CORRELACION</b>							
	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>	<b>4</b>	<b>5</b>	<b>6</b>	<b>7</b>
<b>1</b>	1	0,9981	0,990	0,970	0,76903866	0,70288481	0,77511239
<b>2</b>	0,998134	1	0,995	0,980	0,76740648	0,72589911	0,79840034
<b>3</b>	0,989608	0,99453824	1	0,99112961	0,79183118	0,77472914	0,83711721
<b>4</b>	0,970269	0,97995219	0,99112961	1	0,75951686	0,82685303	0,88704581
<b>5</b>	0,769039	0,76740648	0,79183118	0,75951686	1	0,70920269	0,65350191
<b>6</b>	0,702885	0,72589911	0,77472914	0,82685303	0,70920269	1	0,97162541
<b>7</b>	0,775112	0,79840034	0,83711721	0,88704581	0,65350191	0,97162541	1

Luego haciendo uso de las anteriores matrices fue posible obtener el OIF para las 35 posibles combinaciones de las bandas.

Determinando el OIF de la imagen se puede establecer cual combinación entre bandas es más óptimo en la representación de los componentes de la imagen, es decir para el valor más alto de OIF es la mejor combinación de bandas para la imagen, de esta manera se obtuvieron las diferentes combinaciones de bandas para el caso de esta imagen Landsat 7 son 35 combinaciones diferentes donde la que mejor OIF tiene es la combinación: 5-6-7 (Figura. 9).



*Figura. 9 Visualización OIF Imagen Lantsad 8-2019 Fuente: Propia*

De esta manera es posible identificar claramente el cuerpo de Agua de La Laguna de Tota, los diferentes cultivos y tipos de vegetación, representadas en diferentes tonalidades de verdes, a su vez se identifica un poco mejor los cambios de pendientes entre las áreas montañosas y las zonas planas, finalmente se pueden percibir en tonos azules lo correspondientes a las zonas de construcción aledañas. Como el objetivo es determinar las áreas por coberturas a través del tiempo para el caso del presente proyecto, parece conveniente poder visualizar y representar de una mejor manera las áreas de lámina de agua y cultivos aledaños a la laguna. Donde las 10 combinaciones de banda que tienen OIF más alto o con mejor combinación entre ellas (Tabla 3).

*Tabla 3 Calculo OIF por Bandas Imagen Landsat 8-2019 Fuente: Propia*

Banda	Banda	Banda	OIF
5	6	7	21,5483962
1	5	6	20,4632677
2	5	6	20,3280059
4	5	6	19,7172656
1	6	7	19,6164391
3	5	6	19,4390989
2	6	7	19,0558738
1	5	7	18,5230761
2	5	7	18,4062681
4	5	7	17,9729941

#### 4.5 PROCEDIMIENTO CLASIFICACIÓN SUPERVISADA.

El proceso de clasificación supervisada, se puede resumir en las siguientes etapas: Analisis visual y estadísticos tanto de la imagen como de las bandas, delimitación y selección de las áreas de muestra, cálculos estadísticos y ajustes, selección de la metodología de clasificación y uso de esta, luego se realizan los correspondientes ajustes y la clasificación nuevamente, después se evalúan los resultados, y se genera la salida grafica representativa. De esta manera se realizó la clasificación supervisada para la imagen de trabajo ubicada en la zona correspondiente a la Laguna de Tota ubicada en el departamento de Boyacá.

Seleccionar la opción de Signature Editor del menú Supervised (Figura. 10) con esta opción se van asignando por polígonos o selección y delimitación de áreas pilotos cada una de las coberturas o clases que reconocemos en las imágenes (Figura. 11), es decir se establecen las áreas por coberturas definidas por el profesional.

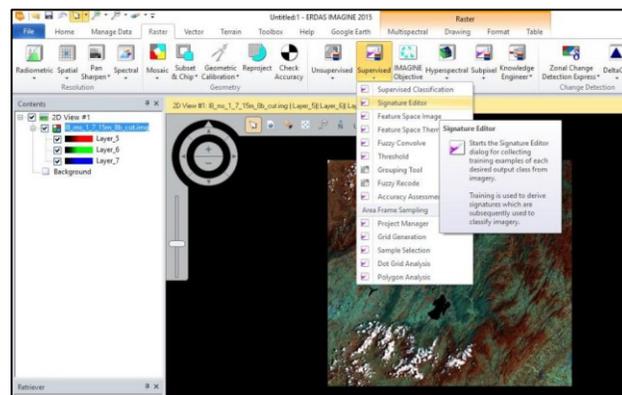


Figura. 10 Procedimiento Fuente: Propia

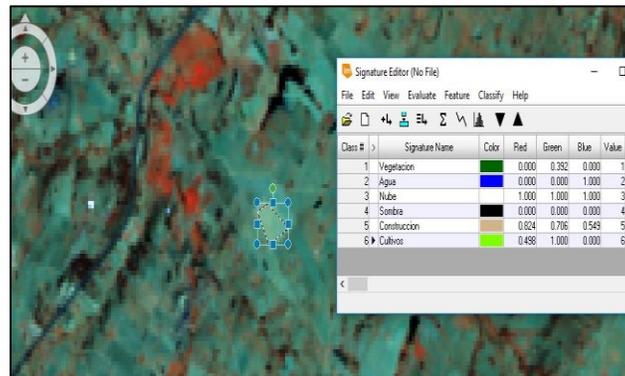


Figura. 11 Procedimiento Fuente: Propia

Realizando el anterior procedimiento sobre la imagen con mejor OIF, recordando que para este caso en particular con la imagen de trabajo el OIF optimo se presentó para la combinación de bandas 5,6,7; donde se obtuvieron las coberturas de la zona (Figura. 12):

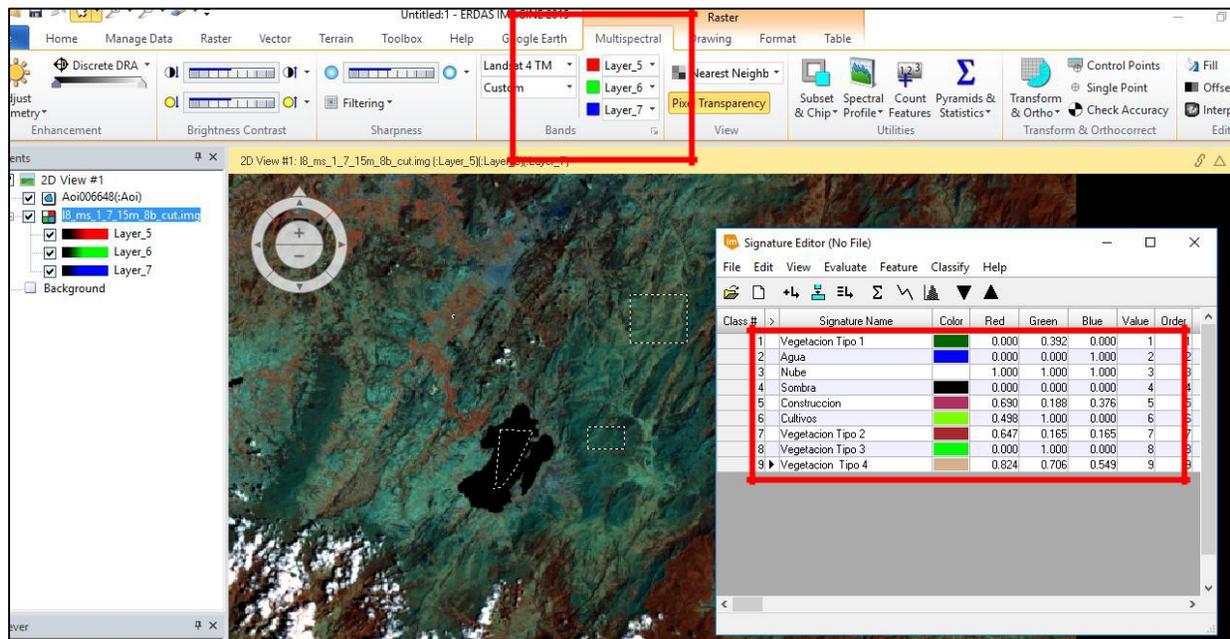
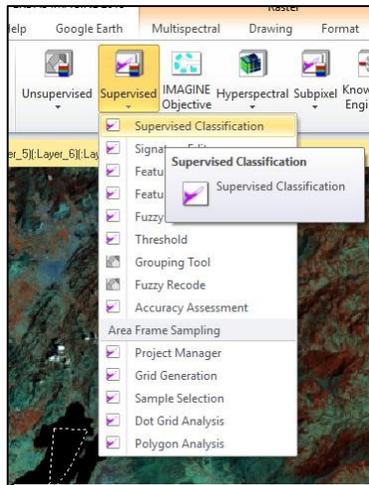


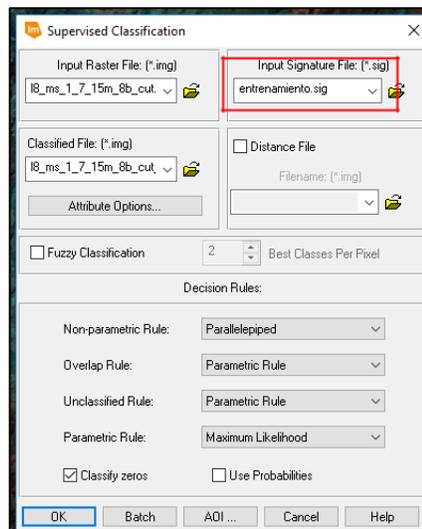
Figura. 12 Procedimiento Fuente: Propia

Dicha clasificación asignada se debe guardar como entrenamiento (Figura. 13).



*Figura. 13 Procedimiento  
Fuente: Propia*

Se debe traer el archivo del preconfigurado como definición manual de las clases (entrenamiento) de clases o coberturas (Figura. 14).



*Figura. 14 Procedimiento  
Fuente: Propia*

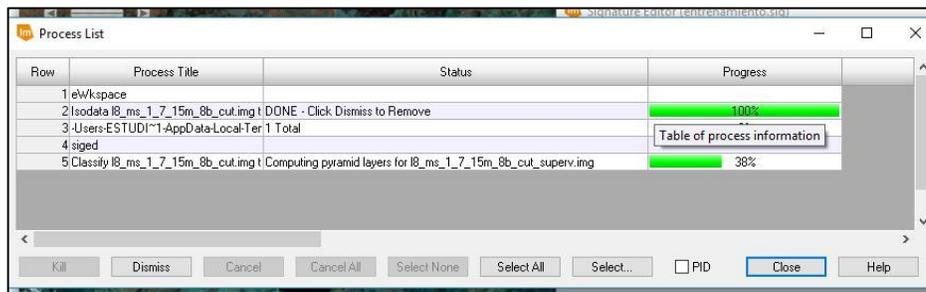


Figura. 15 Procedimiento Fuente: Propia

Al corroborar la clasificación se determinaron los errores durante la definición de las coberturas por lo que es bastante importante definir en distintos polígonos la misma cobertura y realizar un merge o unión para que los niveles digitales sean muy aproximados durante la clasificación:

Luego se realiza la evaluación de la clasificación supervisada realizada (Figura. 13).

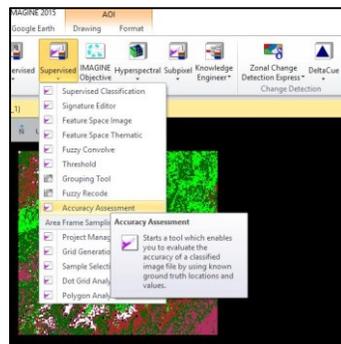


Figura. 16 Procedimiento Fuente: Propia

En Edit. ingresar los puntos de control por clase (Figura. 14).



Figura. 17 Procedimiento Fuente: Propia

Y arroja los puntos que me crearon (Figura. 15).

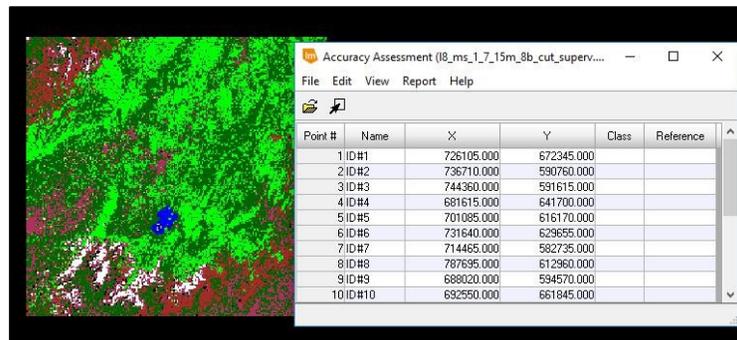


Figura. 18 Procedimiento Fuente: Propia

Se le asigna a cada punto la cobertura si es la misma que el software asumió o si por el contrario se equivocó se debe asignar el valor de la cobertura correcta. realizó la verificación para 30 puntos de control (Figura. 19).

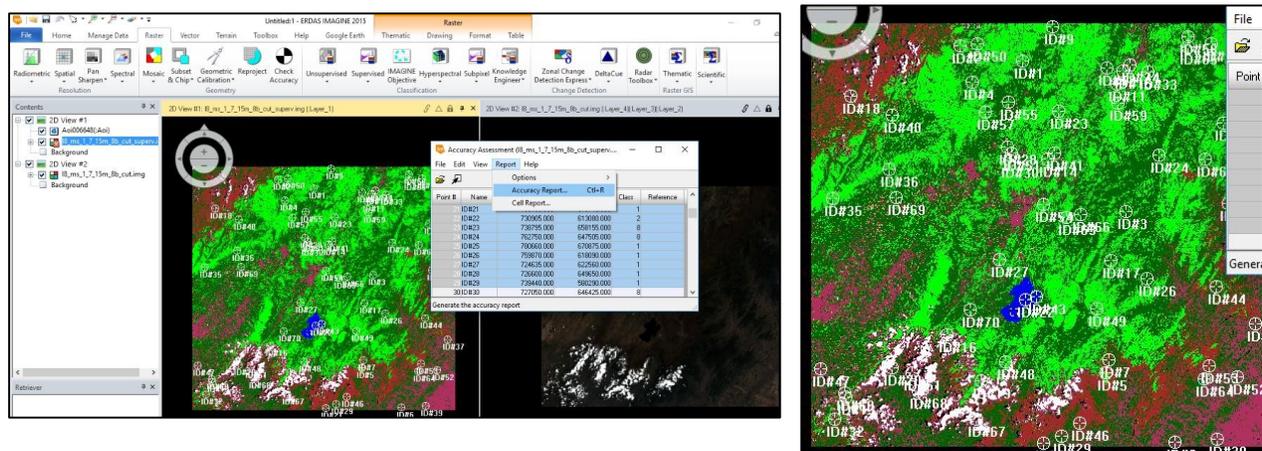


Figura. 19 Procedimiento Fuente: Propia

Realizando el Informe de Evaluación de Precisión de Clasificación se puede realizar la validación punto por punto con la matriz de confusión que arrojó el software dentro del reporte de exactitud temática de la clasificación.

Utilizando la matriz (Tabla 4) se puede determinar el grado de exactitud obtenida de dicha clasificación, determinando el grado de concordancia entre las clases determinadas por el profesional encargado del producto y sus ubicaciones correctas según la información real representada de las zonas en dicha imagen, se considera que sirve para establecer la calidad del producto en comparación con los datos reales de campo.

*Tabla 4 Matriz de grado de exactitude*

ACCURACY TOTALS					
Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy	Users Accuracy
Unclassifi	0	0	0	---	---
Agua	1	1	1	100.00%	100.00%
VegetacionT	461	461	461	100.00%	100.00%
Nube	0	0	0	---	---
Sombra	39	39	39	100.00%	100.00%
Construcci	9	9	9	100.00%	100.00%
Cultivos	36	36	36	100.00%	100.00%
VegetacionT	0	0	0	---	---
VegetacionT	174	174	174	100.00%	100.00%
VegetacionT	48	48	48	100.00%	100.00%
Totals	768	768	768		
Overall Classification Accuracy = 100.00%					

Y el resultado del Índice de Kappa que es el que permite definir la concordancia y fiabilidad de la información y no puede ser mayor de 1 (Tabla 5).

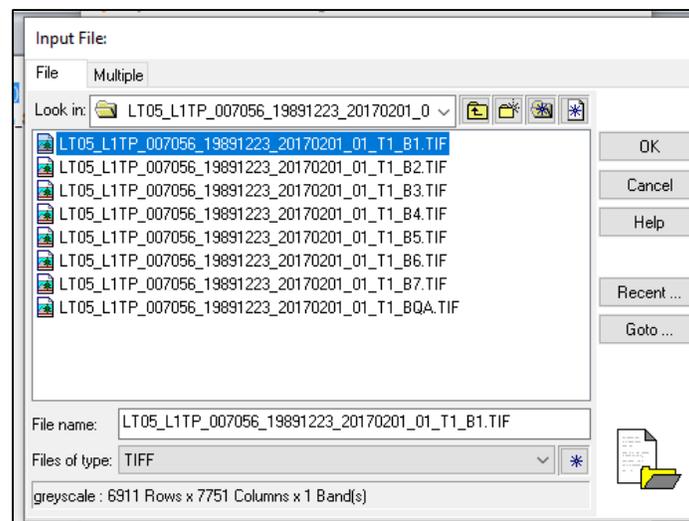
El resultado fue el siguiente en áreas por cobertura:

Overall Kappa Statistics = 0.9614

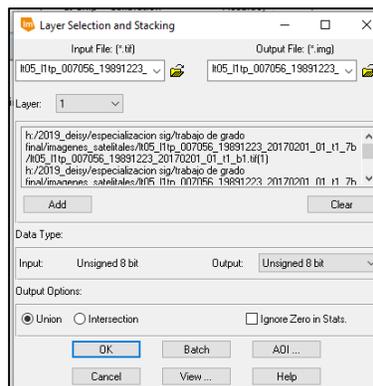
*Tabla 5 Calculo Índice Kappa*

Conditional Kappa for each Category.			
Class Name	Kappa	COBERTURA	AREA Ha
Unclassified	0.0000	Agua	5178,80
Vegetation Tipo 1	0.9561	Construccion	141138,24
Agua	10.000	Cultivos	270,34
Nube	10.000	Nube	24523,78
Sombra	10.000	Sombra	12329,66
Construccion	0.9140	Vegetacion Tipo 4	4508,18
Cultivos	10.000	Vegetacion Tipo 1	516389,22
Vegetacion Tipo 2	10.000	Vegetacion Tipo 2	105823,80
Vegetacion Tipo 3	0.9681	Vegetacion Tipo 3	296690,87
Vegetacion Tipo 4	10.000		

Luego se realiza el Layer stack con las 7 bandas de la imagen Landsat 1989, con el fin de realizar la composición de las bandas y unirlo en una sola imagen (Figura. 20), Se determina con un tamaño de 8 bits (Figura. 21):



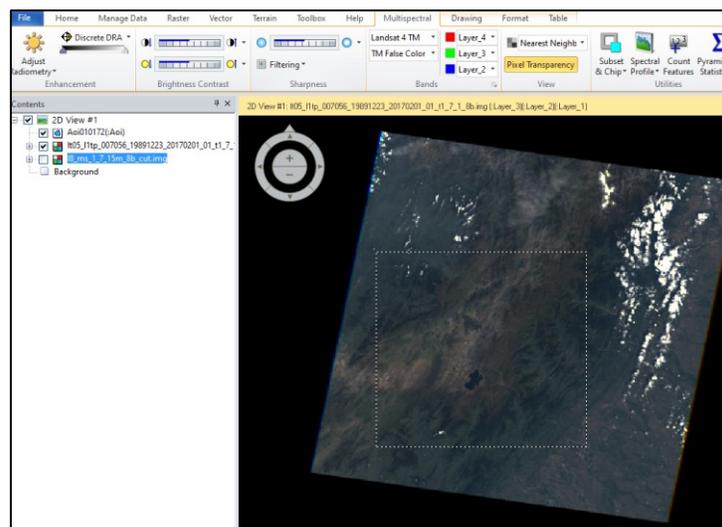
*Figura. 20 Procedimiento Fuente: Propia*



*Figura. 21 Procedimiento Fuente: Propia*

Una vez finaliza este proceso se carga la imagen resultado de la composición o unión de las diferentes bandas.

La nueva imagen compuesta por las 7 bandas se visualiza en la (Figura. 22):



*Figura. 22 Procedimiento Fuente: Propia*

Como se tiene definida el área de estudio de acuerdo a la imagen del año 2019 con la cual se proyectó realizar la comparación de áreas, ésta también debe ser el área de recorte o área de interés para la imagen Landsat de 1989.

Ahora, desde el menú principal del ERDAS sele la pestaña Raster, en la sección Geometry, seleccione Subset & chip y finalmente Create subset image, para recortar la imagen al área de interés o de estudio (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**).

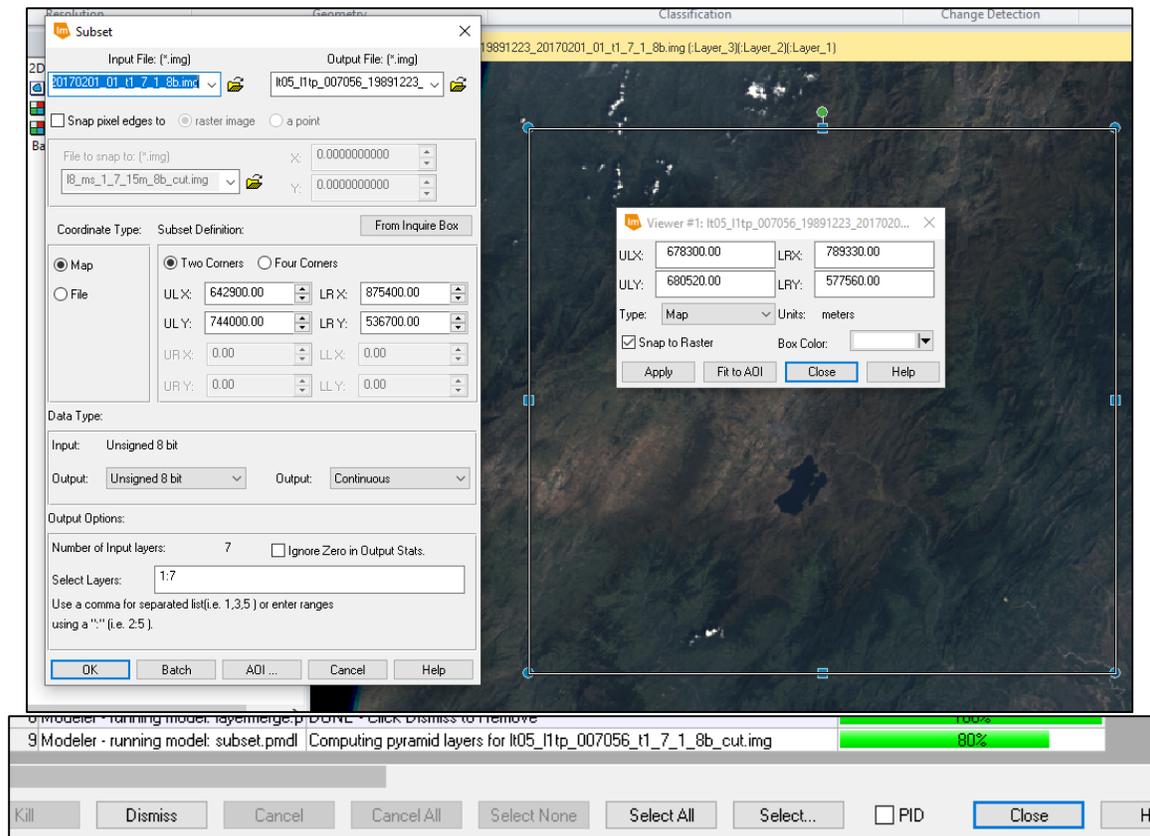


Figura. 23 Procedimiento Fuente: Propia

Una vez cortada la imagen se puede visualizar así:

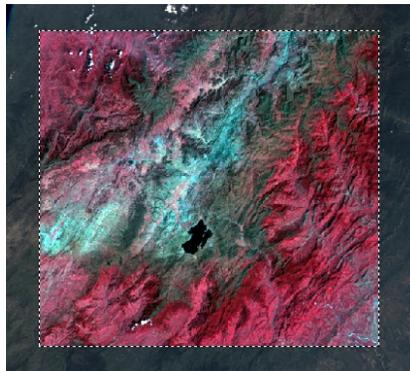


Figura. 24 Procedimiento Fuente: Propia

#### 4.6 REPROYECTAR AL SISTEMA DE REFERENCIA ADECUADO

Luego se define la proyección de las imágenes espectrales y la pancromática, seleccionando la opción <<Reproject>> disponible en el menú <<Raster – Spatial>>. A Colombia le corresponde como sistema de referencia espacial el Universal Transverse Mercator UTM y como Datum se define el WGS 84 UTM Zone 19 EPSG 32618. En cuanto al tamaño del pixel, se define un tamaño que corresponda con la resolución espacial en el caso de LANDSAT 5 es 15m (Figura. 25).

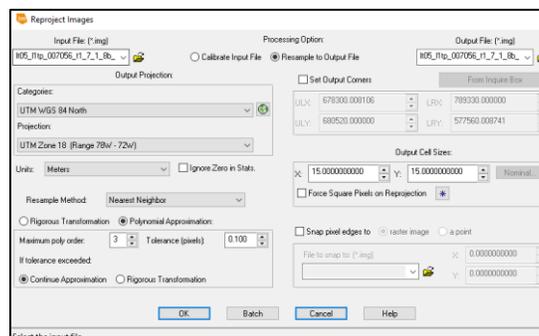
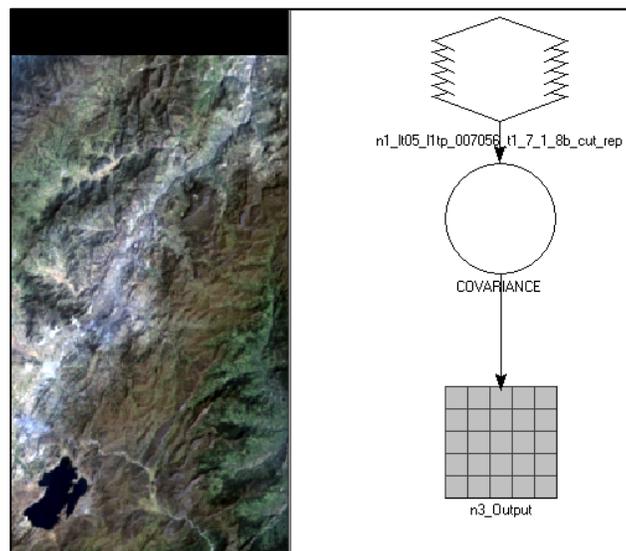


Figura. 25 Procedimiento Fuente: Propia

Una vez procesada la información con los anteriores pasos para el análisis Multibanda se pudieron procesar los datos desde un modelo automatizado (Figura. 26), en dichos modelos se programaron mediante las funciones que posee el software Erdas de la siguiente manera. Implementado los modelos anteriores fueron procesados tanto el cálculo tanto de la matriz de Covarianza (Figura. 26) como el de la matriz de Correlación (Figura. 27).



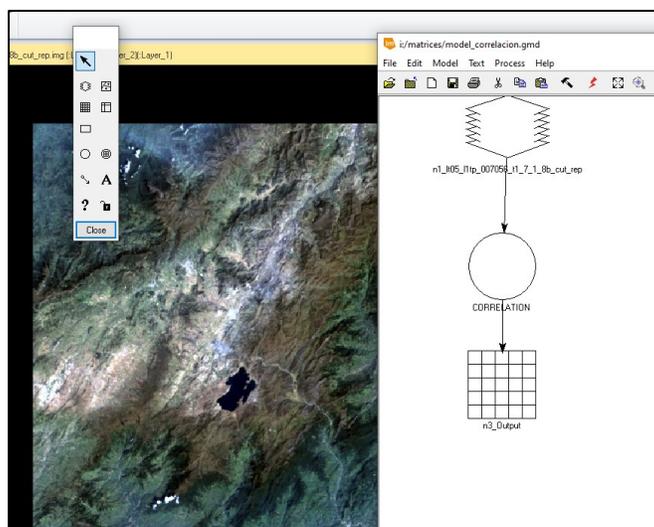
*Figura. 26 Procedimiento Fuente: Propia*

La matriz de covarianza (Tabla 6) permite analizar que en esta imagen la banda con mayor dispersión de datos y/o varianza es la (5), dado que el dato en flujo diagonal se presenta en la banda #5. La matriz de covarianza contiene valores de varianzas y covarianzas. La varianza es una medida estadística que muestra cuánta varianza hay desde la media de los datos.

*Tabla 6 Matriz de Varianzas y Covarianzas Imagen Landsat 5-1989*

MATRIZ DE VARIANZAS Y COVARIANZAS							
	1	2	3	4	5	6	7
1	92,0	60,12	80,32	72,27	188,91	45,53	101,32
2	60,12	43,72	58,77	64,07	150,13	34,44	76,84
3	80,32	58,77	86,81	56,32	219,41	48,10	119,57
4	72,27	64,07	56,32	400,77	270,53	73,94	65,65
5	188,91	150,13	219,41	270,53	755,47	182,41	367,64
6	45,53	34,44	48,10	73,94	182,41	86,32	85,80
7	101,32	76,84	119,57	65,65	367,64	85,80	203,14

Para el cálculo de la matriz de Correlación:



*Figura. 27 Procedimiento Fuente: Propia*

La matriz de correlación (Tabla 7) permite analizar que en esta imagen la correlación que presentan los valores de celda de una banda a medida que se relacionan con los valores de celda de otra banda. La correlación entre las bandas es una medida de dependencia entre las bandas de la imagen. Para este caso la correlación entre las bandas es 1 en valor positivo lo que indica que tienen una relación directa y los valores entre todas las bandas se comportan más o menos similar.

Tabla 7 Matriz de Correlación Imagen Landsat 5 -1989.

MATRIZ DE CORRELACION							
	1	2	3	4	5	6	7
1	1	0,9479	0,899	0,376	0,71653816	0,51091995	0,74111915
2	0,947881	1	0,954	0,484	0,82603801	0,56058851	0,81528192
3	0,898801	0,95397048	1	0,30191746	0,85676778	0,55563964	0,90042447
4	0,376389	0,48397876	0,30191746	1	0,49165226	0,397521	0,23010236
5	0,716538	0,82603801	0,85676778	0,49165226	1	0,71433564	0,93847093
6	0,51092	0,56058851	0,55563964	0,397521	0,71433564	1	0,64796538
7	0,741119	0,81528192	0,90042447	0,23010236	0,93847093	0,64796538	1

Para la clasificación supervisada de la imagen Landsat 5 del año 1989, no se realizó el cálculo de OIF, sino que se implementaron las recomendaciones de (Fernandez-Coppel, 2001) Y teniendo en cuenta que el Satélite Landsat es el más empleador para las actividades agrícolas, forestales y usos del suelo, en su análisis y monitoreo medioambiental (Fernandez-Coppel, 2001), se realiza dicha clasificación con una combinación de bandas 257, propicia para la clasificación de coberturas como es el caso en estudio, tal y como se muestra en la (Figura. 28):

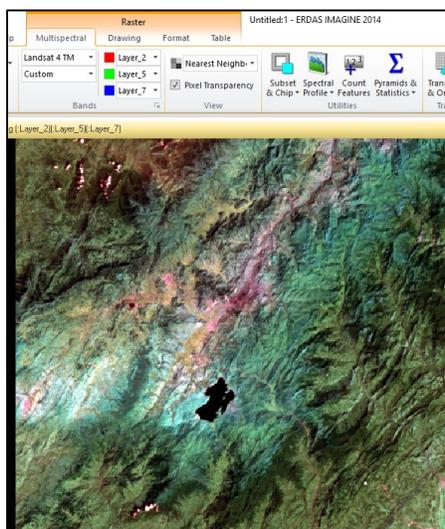
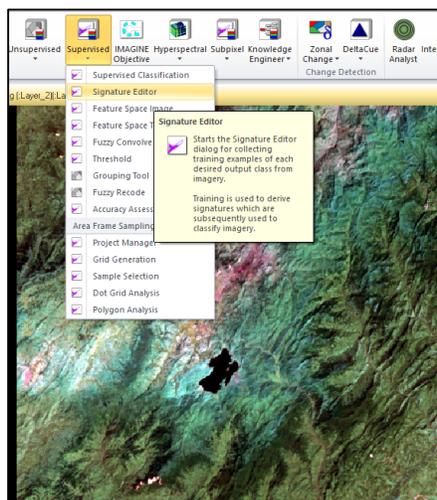


Figura. 28 Procedimiento Fuente: Propia

Una vez se determina la combinación de bandas más adecuada para la imagen se realizó la clasificación supervisada para la imagen de trabajo ubicada en la zona correspondiente a la Laguna de Tota ubicada en el departamento de Boyacá (Figura. 29) .

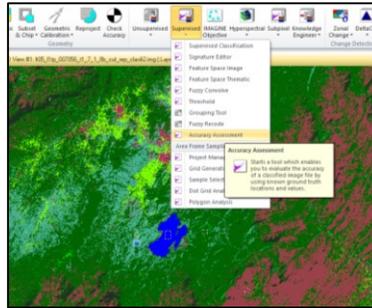


*Figura. 29 Procedimiento Fuente: Propia*

Una vez son determinados los parámetros de la clasificación, se puede continuar con el procedimiento de la clasificación supervisada, donde se debe seleccionar dicho archivo como parámetro de procesamiento.

Al corroborar la clasificación, se determinaron los errores durante la definición de las coberturas, por lo que es bastante importante definir en distintos polígonos la misma cobertura y realizar un merge o unión para que los niveles digitales sean muy aproximados durante la clasificación.

Luego se realiza la evaluación de la clasificación supervisada realizada:



*Figura. 30 Procedimiento Fuente: Propia*

Lo demás se realizó como se mostró para la imagen Landsat 2019 (Figura. 13 a la Figura. 27).

Realizando el Informe de Evaluación de Precisión de Clasificación se puede realizar la validación punto por punto con la matriz de confusión que arrojó el software dentro del reporte de exactitud temática de la clasificación (Figura. 31):

Class Name	Reference Totals	Classified Totals	Number Correct	Producers Accuracy
Unclassified	0	0	0	---
Agua	1	1	1	100.00%
VegetacionTipo	461	461	461	100.00%
Nube	0	0	0	---
Sombra	39	39	39	100.00%
Construccion	9	9	9	100.00%
Cultivos	36	36	36	100.00%
VegetacionTipo	0	0	0	---
VegetacionTipo	174	174	174	100.00%
VegetacionTipo	48	48	48	100.00%
<b>Totals</b>	<b>768</b>	<b>768</b>	<b>768</b>	
Overall Classification Accuracy = 100.00%				
----- End of Accuracy Totals -----				
KAPPA (K <sup>2</sup> ) STATISTICS				
-----				
Overall Kappa Statistics = 1.0000				
Conditional Kappa for each Category.				
-----				
Class Name	Kappa			
Unclassified	0.0000			
Agua	1.0000			
VegetacionTipo 1	1.0000			
Nube	0.0000			
Sombra	1.0000			
Construccion	1.0000			
Cultivos	1.0000			
VegetacionTipo 2	0.0000			
VegetacionTipo 3	1.0000			
VegetacionTipo 4	1.0000			

*Figura. 31 Procedimiento Fuente: Propia*

Utilizando la matriz (Figura. 31) se puede determinar el grado de exactitud obtenida de dicha clasificación, determinando el grado de concordancia entre las clases determinadas por el profesional encargado del producto y sus ubicaciones correctas según la información real representada de las zonas en dicha imagen, se consideró que sirve para establecer la calidad del producto en comparación con los datos reales de campo.

Y el resultado del Índice de Kappa que es el que permite definir la concordancia y fiabilidad de la información y no puede ser mayor de 1.

Overall Kappa Statistics = 1 .0

Una vez se obtienen las imágenes clasificadas mediante el software Erdas, se procedió a procesar las imágenes en formato Raster, las cuales fueron vectorizadas en el software ArcGis, para el cálculo de áreas por clase anteriormente definidas por los puntos de control definidos. En la (Figura. 32), se puede visualizar el ejercicio realizado para la imagen Landsat 5 del año 1989:

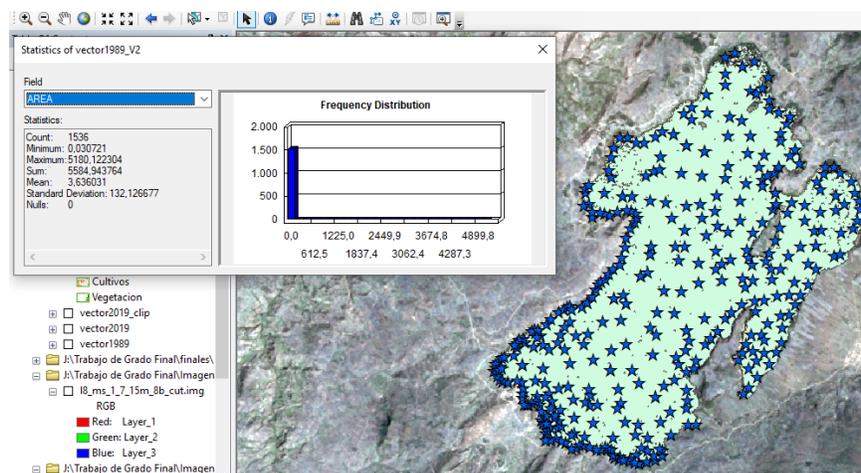
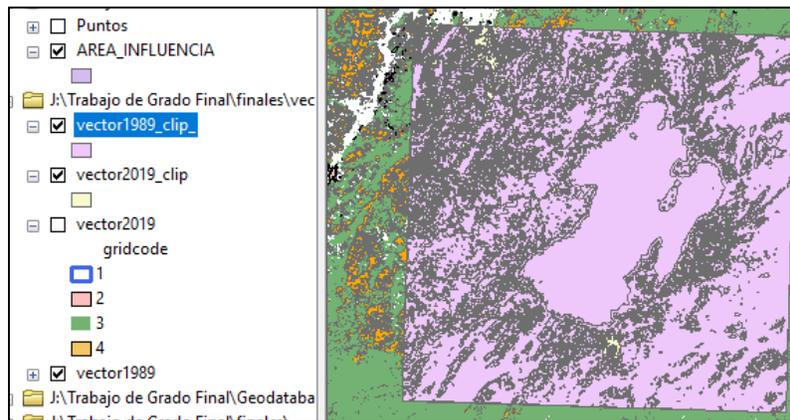


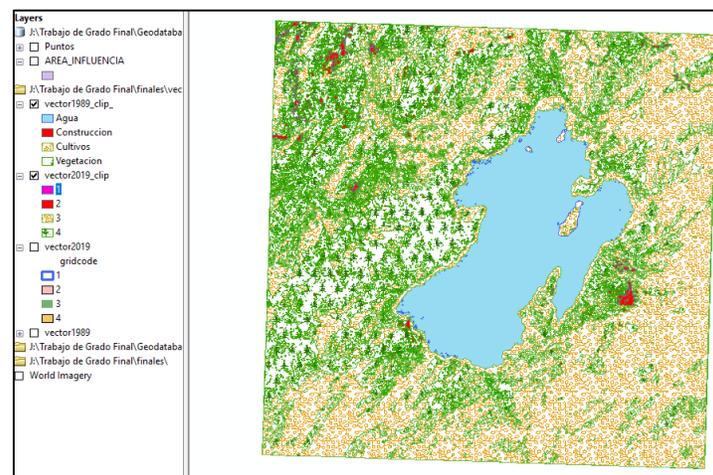
Figura. 32 Procedimiento Fuente: Propia

Luego de tener en formato vector ambas imágenes, se realizaron dos clips con un área de interés más cercana al lago, uno por cada imagen (Figura. 33):



*Figura. 33 Procedimiento Fuente: Propia*

Determinando las coberturas del área se realizó la representación gráfica para los mapas comparativos (Figura. 34).



*Figura. 34 Procedimiento Fuente: Propia*

Una vez vectorizadas las imágenes Landsat, se realizó el cálculo de áreas correspondientes a cada cobertura para el año de 1989 (Tabla 8).

Tabla 8 Cuadro de áreas por Coberturas Imagen Landsat 5, año 1989. Fuente: Propia

<b>LANDSAT 5 AÑO 1989</b>	
<b>COBERTURA</b>	<b>AREA (Ha)</b>
Agua	5111.37
Nube	911.34
Sombra	54797.1
Construccion	28024
Vegetacion	42226,6

## 5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

De acuerdo al análisis realizado se pudieron determinar las diferentes coberturas presentes en la zona de influencia de la Laguna de Tota, tanto para el año de 1989 como de 2019, determinando los puntos geográficos donde ocurrió en mayor proporción el cambio físico, obteniendo como uno de los resultados el cuadro de las área de clasificación (Tabla 9).

Con el fin de realizar una corroboración numérica de las áreas en comparación, y en especial la del espejo de agua del lago, se realizó la clasificación supervisada con la implementación del software ArcGis 10.5 y con las dos imágenes Landsat procesadas previamente en Erdas 2014, donde se determinó una nube de puntos para implementar una muestra de las 4 coberturas (1:Agua, 2:Construcciones, 3:Cultivos, 4:Vegetación); presentes en la zona de estudio y las aledañas, asignando un valor de cobertura para cada punto (1,2,3,4); según su geolocalización sobre la zona (Figura. 35).

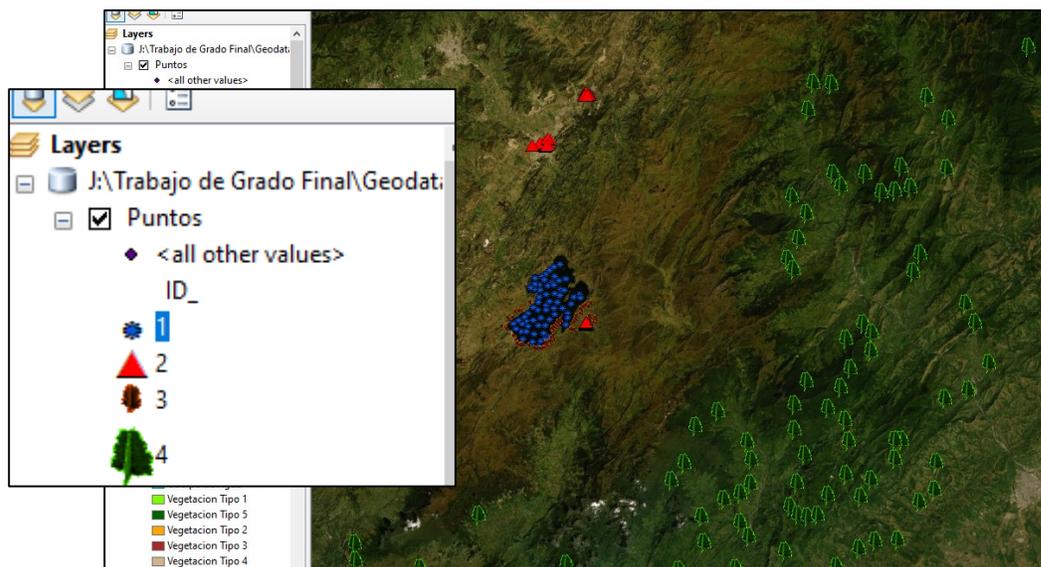


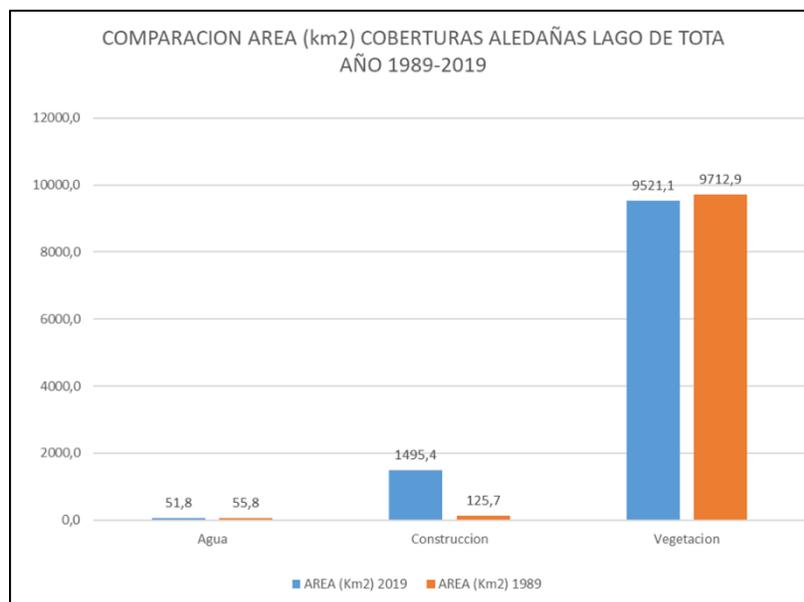
Figura. 35 Procedimiento Fuente: Propia

*Tabla 9 Resultados Comparativos de Coberturas por Año, ArcGis 10.5*

*Fuente: Propia*

LANDSAT 5 2019 ARCGIS 10,5		LANDSAT 5 1989 ARCGIS 10,5	
COBERTURA	AREA (Km2)	COBERTURA	AREA (Km2)
Agua	51,8	Agua	55,8
Construccion	1495,4	Construccion	125,7
Cultivos	3934,3	Cultivos	8753,9
Vegetacion	5586,8	Vegetacion	959,1

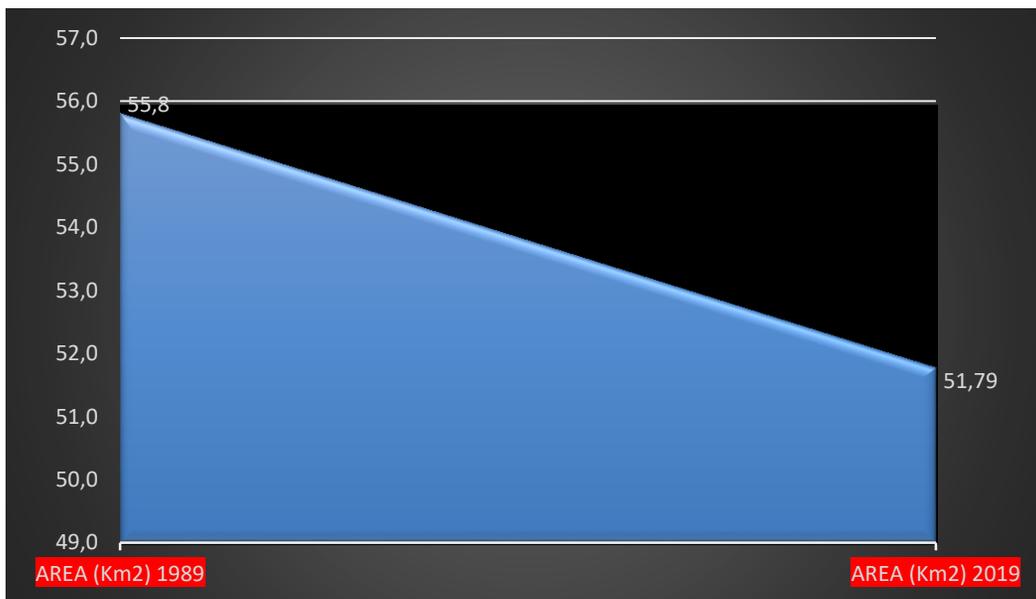
Como resultado de la clasificación de las imágenes vectorizadas se obtuvieron las coberturas y las áreas (km<sup>2</sup>) para cada una de ellas, en cada uno de los respectivos años . Mediante el diagrama de barras se representa la variación que tuvieron las áreas de las coberturas aledañas al lago en el transcurso de 30 años (1989-2019), se presentan las coberturas correspondientes al años 2019 dadas en áreas km<sup>2</sup> y las del año 1989, como se observa la cobertura con mayor variación en su área fue la de construcción (Figura. 36).



*Figura. 36 Grafica Comparativa de Áreas por Coberturas, año 2019-1989*

*Fuente: Propia*

Para el área del espejo de agua de la Laguna se puede observar la notoria disminución del área general del Lago en 4.1 Km<sup>2</sup>, entre los años 1989 y 2019, presentando una reducción del 7.2% (55.8Km<sup>2</sup>). del área del espejo de agua (Figura. 37).



*Figura. 37 Grafica comparativa área del espejo de agua del Lago Fuente: Propia*

Realizando la comparación a detalle del área de interés se presentaron en particular variaciones en 7 puntos nombrados como: A, B, C, D, E, F, G. donde se presentan las diferencias encontradas en las áreas, tanto al costado norte como al costado sur de la Laguna, identificando la variación en el área del espejo de agua de la laguna para el año 2019 y para el año 1989 (Figura. 38).

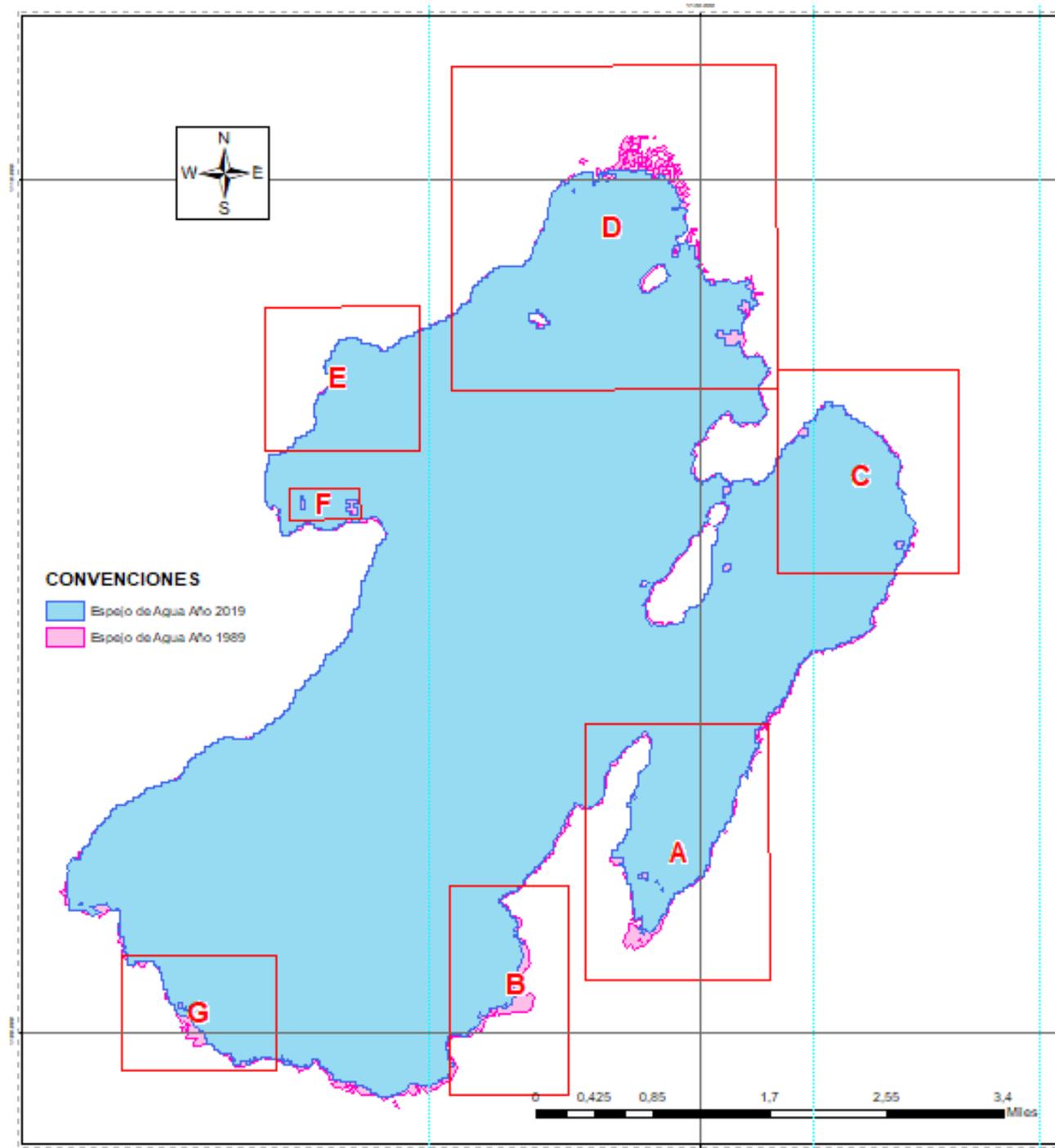
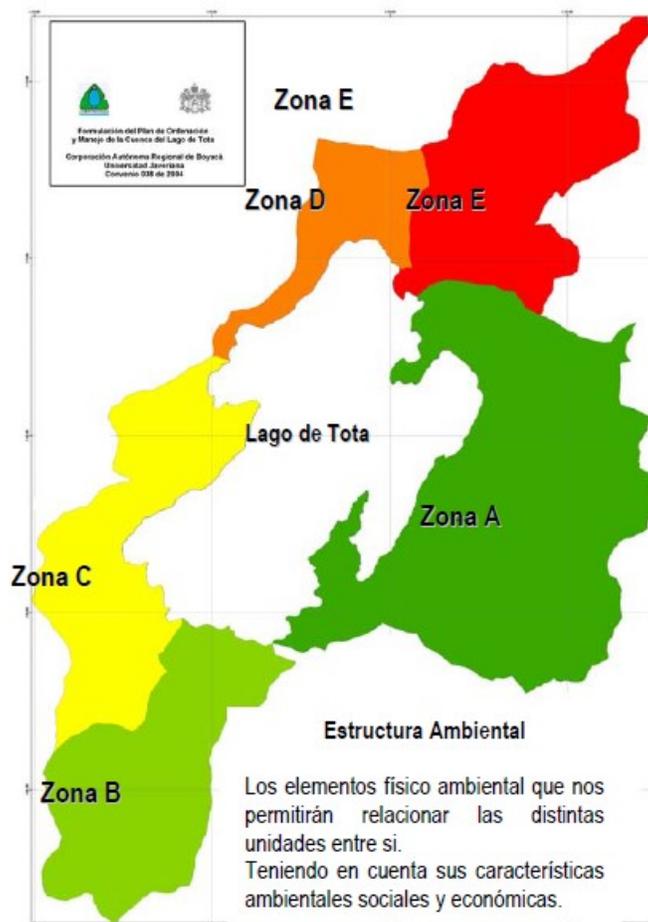


Figura. 38 Localización General Puntos de Variación, Espejo de Agua del Lago de Tota.  
Fuente: Propia

Como apoyo a dicha sectorización se realizó la identificación de las características de estos puntos geográficos basados en ((Pérez García & Macias Acevedo, 2005, P.26)) el mapa de zonificación de la cuenca del Lago de Tota (Figura. 39).



*Figura. 39 Mapa de Zonificación de La Cuenca del Lago de Tota.*

*Fuente: POMCA, CORPOBOYACA. Año 2005*

De acuerdo con lo anterior y basados en el mapa de zonificación POMCA (Figura. 39) la distribución de las zonas empleadas para el análisis multitemporal de la laguna de Tota se tendrá la siguiente distribución (Tabla 10).

Tabla 10 Distribución de zonas zonificación POMCA Vs Análisis multitemporal

ZONIFICACION POMCA (2005)	ZONA ANALISIS MULTITEMPORAL (1989-2019)
A	A-C
B	B
C	F-G
D	D-E
E	N/A

Según esta distribución de zonas (**¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.**) y teniendo en cuenta las características del territorio y el uso permitido de la zona según el POMCA ((Pérez García & Macias Acevedo, 2005, P.65)) se definieron 5 tipo de uso por grupos (Tabla 11).

Tabla 11 Distribución de Tipos de uso y características del territorio Fuente:POMCA

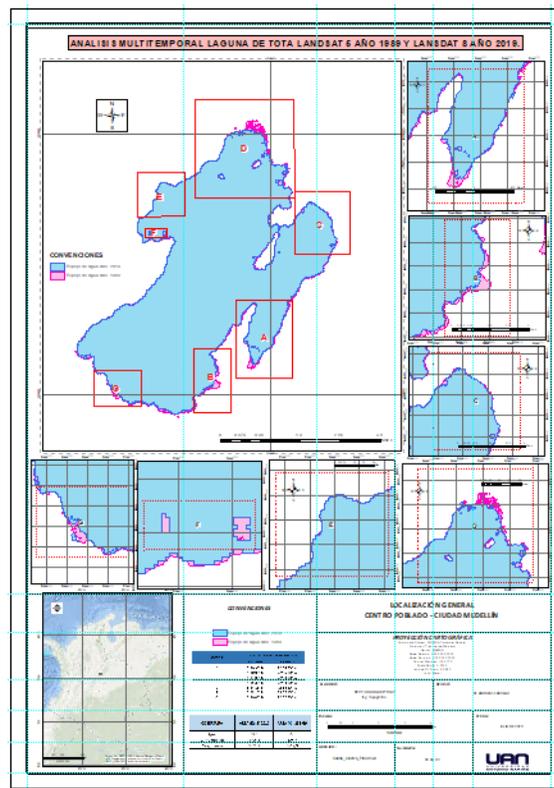
TIPO DE USO	CARACTERÍSTICAS DEL TERRITORIO	USO POSIBLE
Grupo 1	Topografía plana, pendiente <5% Profundidad efectiva > 90 cm. Textura media y pesada	Agrícola intensivo
Grupo 2	Topografía ondulada Pendiente 5 a 35% Profundidad efectiva 30 – 90 cm Texturas livianas y medianas 3.000 – 3.200 msnm	Sistemas agroforestales (huertos frutales con cultivos agrícolas) o silvopastoriles con practicas intensivas de conservación de suelos
	Pendiente 5 a 20% Profundidad efectiva >60 cm Hasta 3.100 msnm	Sistemas agroforestales (huertos frutales con cultivos agrícolas) con practicas intensivas de conservación de suelos
	Pendiente entre 5 a 30%, Profundidad efectiva entre 30 a 60 cm Pendiente entre 20 a 30% Profundidad efectiva mayor a 60 cm	Usos agrícolas o pecuarios asociados a cercas vivas Sistemas agroforestales o silvopastoriles uso no maderable de los árboles plantados
	Pendiente >30% Profundidad efectiva menor de <30 cm	Coberturas arbóreas para extracción no maderable
Grupo 3	Topografía quebrada a escarpada, Pendiente <35% Profundidad efectiva variable Textura media y pesada <3.200 msnm	Coberturas arbóreas para extracción no maderable
Grupo 4	Topografía ondulada y quebrada Pendientes variables Profundidad efectiva >30 cm.	Usos agrícolas o pecuarios asociados a cercas vivas Sistemas agroforestales o silvopastoriles uso no maderable de los árboles plantados
	Topografía ondulada y quebrada Pendientes variables Profundidad efectiva <30 cm.	Coberturas arbóreas para extracción no maderable
Grupo 5	Areas sobre 3.300 msnm	Aprovechamiento sostenible de recursos existentes sin cambios de cobertura natural

Al realizar la sectorización del análisis multitemporal, también se determinó el punto geográfico donde visualmente se puede observar la mayor variación en área por sector (Tabla 12).

*Tabla 12 Cuadro de coordenadas Puntos Geográficos de Variación*

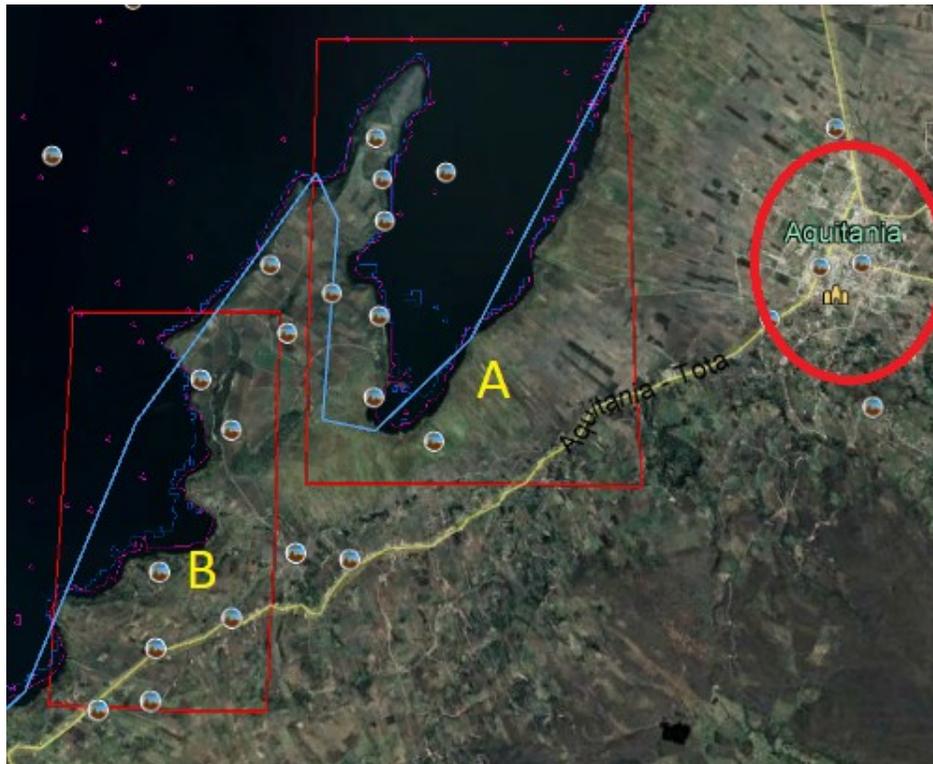
SECTOR	PUNTO DE MAYOR VARIACION	
	LATITUD	LONGITUD
A	5°30'30" N	72°54'30" W
B	5°30'00" N	72°55'30" W
C	5°34'00" N	72°53'30" W
D	5°35'30" N	72°54'30" W
E	5°34'15" N	72°56'30" W
F	5°33'15" N	72°57'15" W
G	5°30'00" N	72°57'30" W

El resultado final del análisis multitemporal implementando imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, para los años 1989 y 2019, visualizando a través de un mapa los 7 puntos geográficos con mayor variación física (Figura. 40)..



*Figura. 40 Localización General Variación, Espejo de Agua del Lago de Tota Año 1989 - 2019. Fuente: propia*

Observando cada uno de los sectores (Tabla 12; **Error! No se encuentra el origen de la referencia.**), se puede determinar que, en los puntos geográficos expuestos, la variabilidad en área del año 1989 y el año 2019 es gráficamente más notoria en los sectores A, B y D. Con el apoyo del Software Google Earth se puede observar cuál es la población más cercana a estos puntos geográficos y en algunos casos se visualiza la existencia de cultivos y/o establecimientos construidos in situ, aspectos que pueden estar influyendo para la disminución del área del espejo de agua de la laguna de Tota (Figura. 41).



*Figura. 41 Localización casco urbano de Aquitania con respecto a los puntos A y B.  
Fuente: Google Earth*

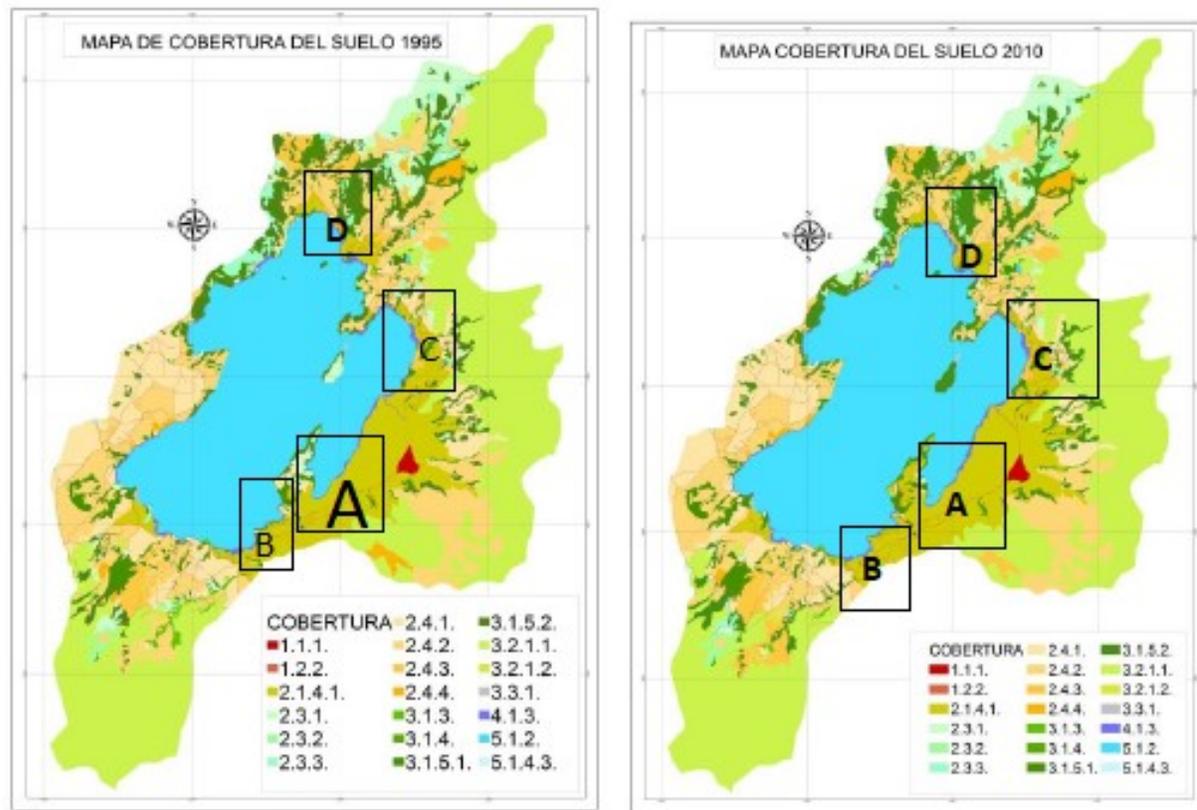
De acuerdo a la metodología Corine Land Cover adaptada para Colombia la Ing. Maria Cristina Mateus, realizó la interpretación manual y visual de la cobertura vegetal presente en su ortofotomosaico del año 2012 y un chequeo realizado en campo puso determinar y ajustar las categorías temáticas de las coberturas cercanas a la Laguna de Tota, partiendo de esto y con dicho análisis multitemporal que corresponde a los años 1995 y 2010, determinó mediante una matriz de coberturas, la cobertura que más incidencia tiene en la

deseccación del lago, teniendo tres grados de afectación de las coberturas, Alto, medio y bajo cada uno dado con varios criterios (Tabla 13).

*Tabla 13 Tabla de Clasificación grado de afectación Fuente: (Mateus, 2013)*

TABLA DE CALIFICACION GRADO DE AFECTACION	
GRADO	CRITERIOS
ALTO: 5	Coberturas expuestas a erosión, escorrentías y que favorecen la pérdida de suelo.
MEDIO: 3	Coberturas que favorecen en cierto grado la disminución de escorrentías e infiltración del agua.
BAJO. 1	Coberturas que favorecen la protección del recurso hídrico.

De acuerdo al mapa de cobertura del suelo de 1995 y 2010 (Figura. 42), se muestran las diferentes clases de coberturas. Basados en la investigación realizada por (Mateus, 2013), y en contraste con los resultados arrojados en el presente estudio, se puede determinar que para la zonificación propuesta en este trabajo y basados en las coberturas obtenidas por Mateus, se encuentran presentes en los puntos geográficos con mayor variación (Figura. 42).



*Figura. 42 Sectores de mayor variación (A,B,C,D) en el análisis multitemporal 1989-2019 sobre Mapa de Coberturas del suelo Laguna de Tota Fuente. (Mateus, 2013).*

De esta manera se consolidó la en esta se muestra el tipo de cobertura por cada punto geográfico determinado de acuerdo a su notorio cambio desde el año 1989 hasta el 2019, en 4 de estos 5 puntos geográficos la cobertura que tiene un área aproximadamente del 3.92% del suelo con 3.686 ha a lo largo de toda la cuenca, es el de cultivo de cebolla, el cual es la cobertura del suelo que más está incidiendo en la desecación de la laguna (Mateus, 2013), dicha causa es una de las que atribuye Mateus a partir de los resultados de su estudio y de la visita realizada en campo mediante la inspección visual directa del terreno, lo que le permitió ajustar las categorías temáticas de la clasificación, para lo cual

utilizó un mapa escala 1:25000, donde identificó el aumento de 92 Ha de cultivos de cebolla entre los años de 1995 y 2010. (Tabla 14).

*Tabla 14 Tipos de Coberturas existentes en los puntos geográficos con mayor variación según el análisis multitemporal 1989-2019*

ZONIFICACION POMCA (2005)	ZONA ANALISIS MULTITEMPORAL (1989-2019)	COBERTURA (MATEUS,2013)	NOMBRE COBERTURA
A	A-C	2,1,4,1 y 3,1,5,2	Cebolla y plantación de Latifolladas
B	B	2,1,4,1	Cebolla
D	D-E	2,4,4 y 3,1,5,2	Pastos Naturales y plantación de Latifolladas

Sin embargo por otro lado, observando los resultados generales por áreas según el tipo de cobertura de la Cuenca de la Laguna de Tota (Mateus, 2013), el área correspondiente al espejo de agua de la laguna para el año de 1995 y 2010 fue de 55.14 km<sup>2</sup> y 55.019 km<sup>2</sup>, respectivamente, en lo cual se genera una discusión puesto que para el presente análisis multitemporal, para el año de 1989 se obtuvo un área de 55.8 km<sup>2</sup>, presentando una disminución del 7.2% con un área de 51.8 Km<sup>2</sup> para el año 2019, resultados que discrepan con los obtenidos por (Mateus, 2013), siendo adecuado el cálculo de área del año de 1995, pero muy diferente la correspondiente a la de 2010 con relación a la de 2019, por lo tanto en el presente estudio se toman como base las áreas con coberturas diferentes a las de cuerpos de agua, puesto que presentan resultados muy diferentes a las del objeto de estudio del presente documento. Sin embargo Rebollo 2012, muestra una tabla de resultados de su análisis multitemporal, con las diferentes coberturas existentes en las áreas cercanas a la laguna de Tota y a su área del espejo de agua, ésta última para los años de 1992 con un área de 55.47 Km<sup>2</sup> y para el año 2012 un área de 55.21 Km<sup>2</sup>, muy aproximados a los

resultados de Mateus, por lo cual se podría pensar que la reducción del área del espejo de agua ha sido en mayor porcentaje en los últimos 7 años, teniendo en cuenta la reducción del 7% del área total para el año 2019, mientras que en los otros estudios ha sido de 0.22% para el 2010 y 0.47% para el 2012.

A continuación, se realiza la descripción un poco más detallada de cada uno de los sectores donde visualmente es más notoria la disminución del área del espejo de agua de la Laguna (Figura. 43).

### SECTOR A Y B:

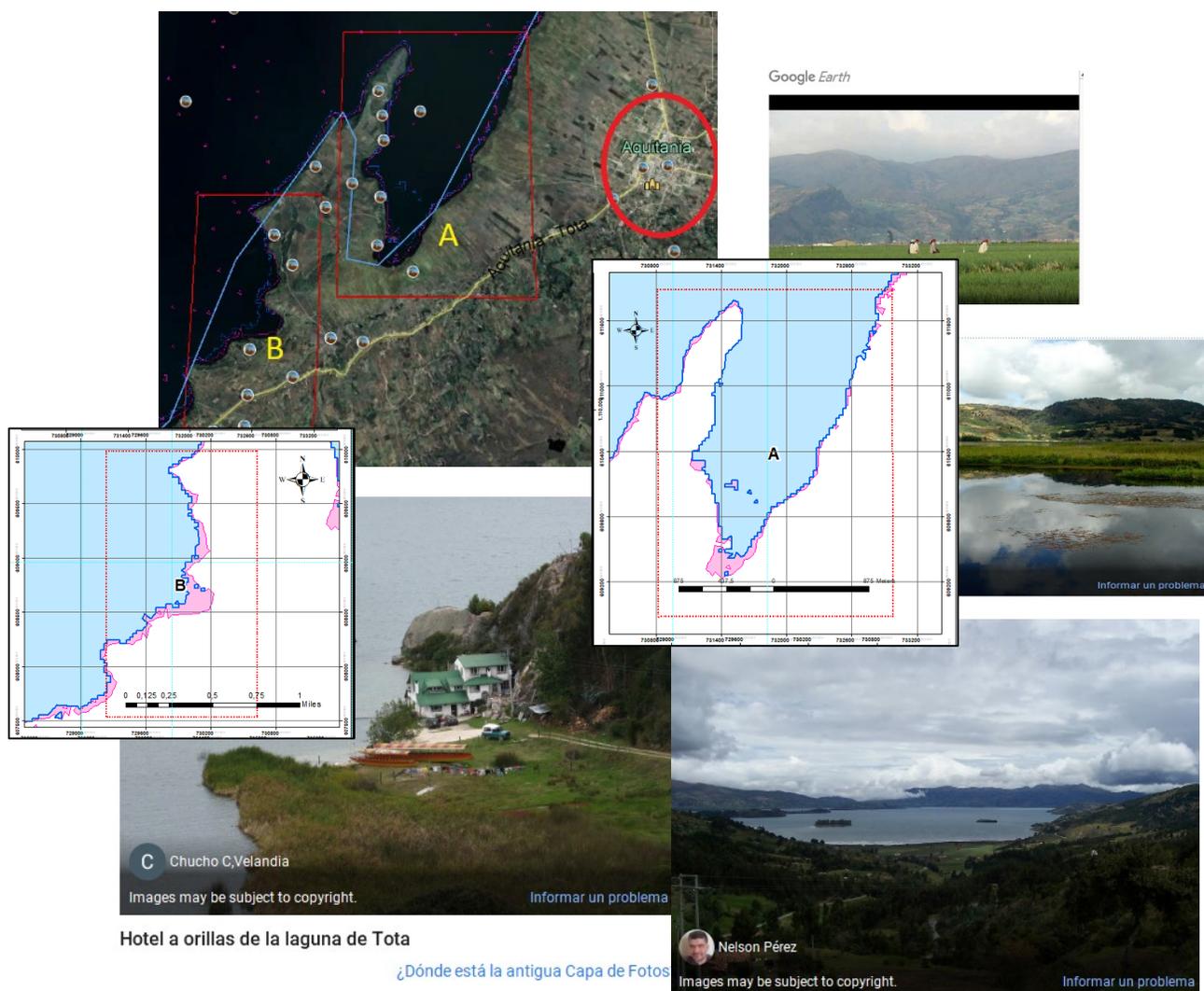


Figura. 43 Registros fotográficos sector A y B Fuente: Google Earth

Para este sector y el sector B (Figura. 44), el municipio más cercano es Aquitania, con un casco urbano bastante notorio y con una distancia en línea recta desde el centro del municipio al sector de aproximadamente 2 km. Este municipio vierte sus aguas residuales sin ningún tipo de tratamiento a la laguna, ocasionando importantes efectos ambientales, por lo cual es necesario gestionar los recursos y construir la planta de tratamiento de aguas residuales, (Pérez García & Macias Acevedo, 2005).

### SECTOR D:

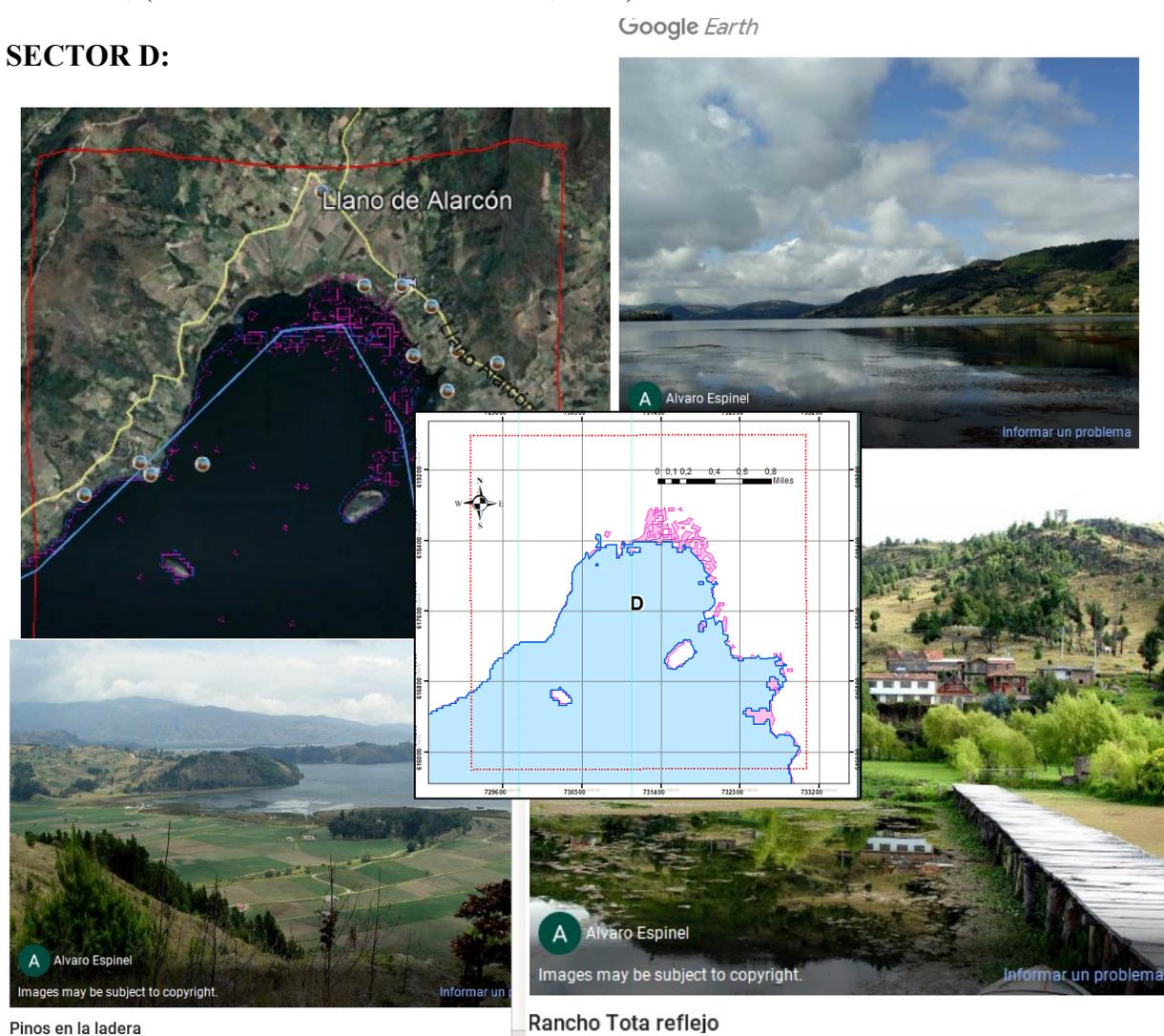


Figura. 44 Registros fotográficos sector D Fuente: Google Earth

Para el sector D se cuentan con áreas aledañas importantes de cultivos y algunas viviendas, en las imágenes se observa el mal estado del agua y los residuos de cultivos hacia los bordes de la laguna (Figura. 44). El 80% de la población se localiza en la periferia de la laguna, lo cual genera una densidad de ocupación territorial de 0.22 v/km<sup>2</sup>, para lo cual es importante una distribución equitativa de la población en el territorio, para la gestión de la dotación y mejoramiento de los servicios públicos, generando bienestar a los sectores lejanos de los cascos urbanos (Pérez García & Macías Acevedo, 2005). En contraste con todo lo relacionado a la Laguna de Tota y de los factores incidentes en la reducción del área del espejo de agua de la Laguna, aparece el caso de la Laguna de Funeque, cuyas principales evidencias de la afectación por efecto antrópico es la aparición de coberturas vegetales acuáticas que favorecen a la reducción del área del espejo de agua de la Laguna, con el fin de analizar lo anterior se realizó una investigación en el año 2017, para determinar la dinámica multitemporal de dichas coberturas y la del espejo de agua de la laguna, mediante la utilización de imágenes satelitales realizaron este análisis para los años de 1984 y 2003, dentro de las causas antrópicas determinadas en este estudio se tuvieron en cuenta actividades económicas cercanas a la laguna como la ganadería y agricultura en su mayoría de cultivos de papa, presentando una disminución del área del espejo de agua de la laguna de 19.8 km<sup>2</sup> para el año 1984 a 4.2 km<sup>2</sup> para el año 2003, lo cual significa que 15.6 km<sup>2</sup> de espejo de agua fueron ocupados por vegetación acuática (Castillo & Rodríguez, 2017), lo cual es un factor muy similar al de los cultivos de cebolla que se encuentran cercanos a la Laguna de Tota y que es la siembra de estos cultivos de manera descontrolada uno de los factores mas incidentes en la reducción de las áreas de los espejos de agua.

## 6. CONCLUSIONES

- El análisis multitemporal de la lámina de agua de la Laguna de Tota a lo largo de 30 años, presentó una mayor variación en algunos sectores, caso particular hacia el costado Norte y una parte hacia el costado sur de la Laguna, con una reducción total de 4.1 Km<sup>2</sup> entre 1989 y 2019.
- El área de la lámina de agua identificada para los años 1989 y 2019, fue de 55.8 Km<sup>2</sup> y 51.8 Km<sup>2</sup> respectivamente.
- Se determinó que la cobertura con mayor presencia en los puntos de mayor cambio fueron los cultivos de cebolla, al tener en estos puntos geográficos una mayor reducción en el área del espejo de agua de la Laguna de Tota.

## 7. BIBLIOGRAFÍA

- Castillo, I. M., & Rodríguez, M. Á. (2017). Dinámica multitemporal de las coberturas y el espejo de agua en la laguna de Fúquene. *Revista Mutis*, 7(1), 20–33.  
<https://doi.org/10.21789/22561498.1183>
- CONPES. (2014). Manejo ambiental integral de la cuenca hidrográfica del Lago de Tota. *Consejo Nacional de Política Económica y Social 3801*.
- Gobernación de Boyacá. (2012). Mapa de riesgo de la calidad del agua para consumo humano de la laguna de tota, fuente abastecedora del casco urbano de los municipios de firavitoba y cuitiva. *Secretaría de Salud Departamental*, 7420111–7420131.
- Lu, D., & Weng, Q. (2007). A survey of image classification methods and techniques for improving classification performance. *International Journal of Remote Sensing*, 28(5), 823–870. <https://doi.org/10.1080/01431160600746456>
- Marina Mazón, Dionys Sánchez, F. A. D. y J. C. G. (2016). Metodología para el monitoreo participativo de la restauración ecológica con estudiantes de primaria en plantaciones de cacao de Mérida, Venezuela Methods of participative monitoring of ecological restoration by primary school students in cacao plantation. *Biota Colombiana*, 7(2), 304. <https://doi.org/10.21068/c001>
- Mateus. (2013). Análisis De La Cobertura Vegetal, Uso Del Suelo Y Su Impacto En La Desecación Del Lago De Tota. *Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia*, 53(9), 1689–1699. <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>
- Pérez García, A. J., & Macias Acevedo, J. P. (2005). *Plan de Ordenamiento y Manejo de la Cuenca del Lago de Tota Convenio número 038 de 2004. CORPOBOYACA -PUJ*.

67. <http://www.corpoboyaca.gov.co/index.php/es/nuestra-gestion/plan-de-ordenacion-y-manejo-de-cuencas/item/280-pomca-lago-de-tota>

Rebollo, E. (2012). Estudio multitemporal para la determinación de cambios en el uso del suelo en el complejo de páramos Tota-Bijagual-Mamapacha para el periodo 1992-2012. *Universidad Militar Nueva Granada*, 53(9), 1689–1699.

<https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>

Stefouli, M., & Charou, E. (2012). *Ohrid Lake Monitoring using Meris and Landsat Images*. June, 1–13.