

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ESPEJO DE AGUA EN LA LAGUNA DE  
FÚQUENE PARA EL PERIODO DE 1985 A 2015**

**NIXON EUSEBIO GONZÁLEZ BUSTOS  
ADRIANA LISETH GONZÁLEZ MAHECHA**



**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2015**

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DEL ESPEJO DE AGUA EN LA LAGUNA DE  
FÚQUENE PARA EL PERIODO DE 1985 A 2015**

**NIXON EUSEBIO GONZÁLEZ BUSTOS  
ADRIANA LISETH GONZÁLEZ MAHECHA**

Trabajo de Grado presentado como opción parcial para optar  
al título de Especialista en Sistemas de Información Geográfica

**UNIVERSIDAD DE MANIZALES  
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA  
ESPECIALIZACIÓN EN SISTEMAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA  
MANIZALES  
2015**

## CONTENIDO

	<b>Pág.</b>
INTRODUCCIÓN .....	12
1. ÁREA PROBLEMÁTICA .....	13
2. OBJETIVOS.....	14
2.1 OBJETIVO GENERAL .....	14
2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	14
3. JUSTIFICACIÓN.....	15
4. MARCO TEÓRICO .....	16
4.1 ÁREA DE ESTUDIO .....	16
4.1.1 Aspecto Climático. ....	17
4.1.2 Aspecto Socioeconómico.....	17
4.1.3 Localización. ....	18
4.2 PERCEPCIÓN REMOTA .....	18
4.2.1 Sensores Remotos. ....	19
4.2.2 Firmas Espectrales. ....	20
4.2.3 Imágenes. ....	20
4.2.5 Características de la cobertura Agua.....	21
4.3 METODOLOGÍA CORINE LAND COVER .....	21
4.4 ANTECEDENTES.....	22
4.4.1 CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3451.....	22
4.4.2 Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (Eichhornia crassipes). ..	26

5. METODOLOGÍA .....	27
5.1 TIPO DE TRABAJO .....	27
5.2 PROCEDIMIENTO.....	27
6. RESULTADOS.....	29
6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS .....	29
6.1.1 Definición de Área de Estudio y Modelo Digital de Elevación .....	29
6.1.2 Preprocesamiento .....	29
6.1.3 Procesamiento .....	32
6.1.4 Análisis de Matrices de cambio.....	37
6.1.5 Tratamiento Geoestadístico de Información Meteorológica .....	41
6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	42
7. CONCLUSIONES .....	44
8. RECOMENDACIONES.....	46
BIBLIOGRAFÍA.....	47

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
Figura 1. Fotografía de margen de la Laguna de Fúquene.....	17
Figura 2. Localización general área de estudio.....	18
Figura 3. Espectro Electromagnético .....	19
Figura 4. Firmas Espectrales .....	20
Figura 5. Metodología CORINE Land Cover.....	21
Figura 6. Mapa Hidrográfico de la Laguna de Fúquene.....	23
Figura 7. Plano de Laguna de Fúquene 1933- Ministerio de Industria y Trabajo...24	24
Figura 8. Canal Perimetral- Propuesta de construcción, 1984.....	25
Figura 9. Distribución espacial de plantas acuáticas- CAR.....	25
Figura 10. Diagrama de flujo.....	27
Figura 11. Modelo Digital de Elevación.....	29
Figura 12. Subset del área de estudio .....	30
Figura 13. Corrección geométrica.....	31
Figura 14. Tasseled Cap.....	31
Figura 15. Haze Reduction .....	32
Figura 16. Clasificación de la imagen de 1985 .....	34
Figura 17. Clasificación de la imagen del 2000 .....	34
Figura 18. Clasificación de la imagen del 2015 .....	35
Figura 19. Subset de la laguna .....	35
Figura 20. Imágenes resultado Matrix Union; Img85-Img00_Img00-Img15 .....	36
Figura 21. Tendencia disminución del espejo de agua .....	40
Figura 22. Distribución de Temperatura promedio anual- Isla del Santuario .....	41
Figura 23. Distribución de Evaporación total anual- Isla del Santuario .....	41
Figura 24. Distribución de Precipitación total anual- Isla del Santuario .....	42
Figura 25. Isolíneas de Precipitación para el área de estudio .....	42

## LISTA DE CUADROS

	<b>Pág.</b>
Cuadro 1. Histórico de la ocupación del buchón en la Laguna de Fúquene .....	26
Cuadro 2. Resumen de imágenes Landsat.....	28
Cuadro 3. Niveles de Cobertura CORINE Land Cover .....	33
Cuadro 4. Clases y coberturas.....	37
Cuadro 5. Matriz de cambio 1985-2000.....	37
Cuadro 6. Descripción matriz de cambio 1985-2000 .....	38
Cuadro 7. Matriz de cambio 2000-2015.....	38
Cuadro 8. Descripción matriz de cambio 2000-2015 .....	39
Cuadro 9. Porcentajes de disminución del área del espejo de agua referencias externas .....	40
Cuadro 10. Porcentajes de disminución del área del espejo de agua en el periodo de estudio .....	40

## GLOSARIO

**Absorbancia:** Medida de la capacidad de un material para absorber energía electromagnética en una determinada longitud de onda. Es la razón existente entre el flujo absorbido por una superficie y el que incide sobre ella. [1]

**Espectro electromagnético:** Sucesión creciente de longitudes de onda de todas las radiaciones conocidas. [1]

**Filtro:** Operador local mediante el cual se obtiene una nueva imagen cuyos ND son función de los ND originales y de los de las celdas contiguas. Dependiendo del tipo, se utilizan para suavizar y eliminar ruido, o bien para realzar los rasgos lineales de una imagen. [1]

**Filtro de paso alto:** Filtros destinados a reforzar los componentes de alta frecuencia de una imagen digital. El resultado de ello es el énfasis de los contrastes entre áreas adyacentes, por cuya razón tienden a realzar los rasgos lineales de la imagen. [1]

**Filtro de paso bajo:** Filtros destinados a suavizar la imagen mediante la eliminación de los componentes de alta frecuencia de ésta. [1]

**Firma espectral:** Todos los elementos geográficos (bosques, cultivos, ríos lagos edificios, etc) transforman de forma diferenciada la radiación electromagnética que reciben del sol. La variación de reflectancia (radiación reflejada) en función de la longitud de onda se denomina firma espectral, es decir, la función que describe la cantidad de radiación reflejada, con respecto a la longitud de onda de dicha radiación, es la firma espectral de un objeto o elemento. [2]

**Formato raster:** Forma de tratamiento y representación espacial de las entidades mediante la disposición de celdas o píxeles en forma de matriz numérica de ND. [1]

**Formato vectorial:** Forma de tratamiento y representación espacial de las entidades mediante la asignación de un par de datos para cada punto, cuyo valor es el de sus propias coordenadas espaciales. [1]

**Haze Reduction:** Módulo que reduce a la humedad bruma o niebla en imágenes; puede mejorar la visibilidad y la legibilidad de procesamiento digital de imágenes. [3]

**Landsat:** Es una serie de satélites construidos y puestos en órbita por EE. UU. para la observación en alta resolución de la superficie terrestre. [3]

**MSS:** Sigla de MultiSpectral Scanner, sensor a bordo de los primeros satélites de la serie Landsat. [1]

**ND:** Abreviatura de nivel digital. Se trata del valor numérico discreto asignado por el sistema formador de imágenes a cada celda en respuesta a la irradiancia recibida sobre el plano focal del sensor. Se le conoce asimismo como nivel de gris, luminancia, número digital, valor de pixel, etc. Existe una relación lineal entre el ND grabado y la radiancia correspondiente a cada celda de terreno. [1]

**Radiancia:** Es la cantidad de energía radiada desde un objeto en la unidad de tiempo por cada unidad de ángulo sólido y de unidad de superficie del objeto perpendicular a la dirección de propagación. Es el parámetro físico medible con un radiómetro. [1]

**Resolución Espectral:** Corresponde al ancho de la banda espectral y el número de ellas que registra el sensor o que contiene la imagen. [4]

**Resolución Espacial:** Para datos con estructura raster se refiere al tamaño físico de la unidad mínima de información o píxel. [3]

**Resolución Radiométrica:** Corresponde a una cuantización digital de la energía electromagnética registrada por el sensor en un número discreto de valores. Puede ser de 8 bits (256 valores), de 10 bits (1024 valores). [3]

**Resolucion Temporal:** Tiempo de revisita de un sensor. [3]

**Subsidencia:** El término genérico de subsidencia hace referencia al hundimiento paulatino de la corteza terrestre, continental o submarina. [5]

**Tasseled Cap:** Transformación global de una imagen consistente en la obtención de tres nuevas bandas a partir de las originales, las cuales están relacionadas con determinados fenómenos fisiológicos de la materia vegetal, en particular su verdor. [1]

**Teledetección:** La teledetección o detección remota es la adquisición de información a pequeña o gran escala de un objeto o fenómeno, ya sea usando instrumentos de grabación o instrumentos de escaneo en tiempo real inalámbricos o que no están en contacto directo con el objeto. [6]

**Textura:** Frecuencia de cambio y disposición que tienen los niveles de gris en una imagen espacial o fotográfica. [1]

**TM:** Sigla de Thematic Mapper, sensor de alta resolución espectral a bordo del satélite Landsat. En la actualidad la serie TM ha sido continuada por la ETM+ (Enhanced Thematic Mapper). [1]

**Tono:** Percepción diferencial por parte del ojo humano de las distintas longitudes de onda del espectro visible. Es lo que coloquialmente se designa por color. [1]

## **RESUMEN**

Este trabajo presenta el análisis de la pérdida del espejo de agua de la Laguna de Fúquene ubicada en el departamento de Cundinamarca, como cuerpo hídrico ha sufrido grandes cambios ecosistémicos y una desecación acelerada debida a la intervención antrópica desmedida. A partir de imágenes satelitales Landsat entre el periodo de 1985 a 2015 se determinaron las coberturas para establecer la detección de cambios del área que representa la lámina de agua, además del análisis de las variables de precipitación, temperatura y evaporación a lo largo del mismo periodo de tiempo, con el fin de observar los efectos del cambio climático y su incidencia sobre el ecosistema.

**PALABRAS CLAVES:** Sensores remotos, landsat, detección de cambios, coberturas, espejo de agua, laguna.

## **ABSTRACT**

This paper shows an analysis of the water loss in Fuquene Lagoon located in the department of Cundinamarca, this ecosystem has been thru major changes and accelerated drying due to the excessive human intervention. From Landsat satellite images between 1985-2015 were determined to set the detection area changes representing the water surface, besides presents the analysis of precipitation, temperature and evaporation over the same period of time, in order to observe the effects of climate change and its impact on the ecosystem.

**KEY WORDS:** Remote sensing, Landsat, change detection, coverage, reflecting pool, lagoon.

## INTRODUCCIÓN

La laguna de Fúquene es un cuerpo de agua ubicado en el departamento de Cundinamarca a 125 km de la ciudad de Bogotá vía Chiquinquirá, su ecosistema se ha visto alterado durante más de seis décadas por acciones antrópicas y el cambio es notorio a simple vista, lo que ha suscitado el interés de diferentes entidades, instituciones y particulares, quienes han venido desarrollando diferentes estudios que involucran la observación del ecosistema y la generación de diferentes recomendaciones para evitar su continuo deterioro.

Este documento muestra el análisis de la disminución del espejo de agua a través del uso de herramientas geoinformáticas, sensores remotos, imágenes satelitales e información meteorológica, los cuales representan recursos que se constituyen como un medio muy eficaz para el estudio de cambios en la superficie.

A partir del análisis de las coberturas se obtienen las estimaciones de las áreas del espejo de agua para los diferentes periodos de estudio, los cuales permiten crear un panorama de la alteración de la laguna en una ventana temporal y sumado al análisis de la situación socioeconómica de la zona se identifica la relevancia con la que se deben manejar este tipo de ecosistemas en pro de su conservación y el desarrollo sostenible.

## 1. ÁREA PROBLEMÁTICA

La Laguna de Fúquene es un cuerpo de agua dulce situado entre los municipios de Fúquene y Susa en el departamento de Cundinamarca, siendo el río Susa su afluente y el río Suárez su efluente. Esta laguna ha sido el sustento de muchas familias para el desarrollo agropecuario principalmente, sin embargo en las últimas décadas se ha presentado una disminución excesiva de su espejo de agua [7], esto debido a diferentes hipótesis tales como el desequilibrio en el efecto invernadero, inestabilidad en el ciclo hidrológico, a la ausencia de planeación, medidas de manejo y entes de control, inadecuado uso del suelo, mal manejo de residuos, sumado a factores socioeconómicos con intereses particulares.

El inicio de las actividades de desecación de la laguna data del siglo XIX con la construcción del Canal Paris cuyo objetivo principal era aumentar la capacidad de desagüe del río Suárez y continuó a lo largo del siglo XX con los esfuerzos de implementación, incrementación y mantenimiento de la producción de las industrias lecheras a expensas de la laguna por medio de acciones de manejo de distritos de riego y ganancia de terreno.

A pesar del gran esfuerzo investigativo de la Corporación Autónoma Regional CAR, diferentes ONG, universidades, comunidades y sumado a los fallos fruto de procesos jurídicos para la intervención del problema, se ha evidenciado que los principales responsables de la vulnerabilidad del ecosistema no se apropian de la situación [8].

Un instrumento valioso para la identificación de la dinámica de la reducción del espejo de agua es el procesamiento digital de imágenes de satélite y/u ortofotografías<sup>1</sup>, realizando un análisis de la cobertura a través del tiempo junto con información de variables ambientales, socioeconómicas y culturales, además de factores de cambio asociados. A partir de dicha identificación se pretende exponer una alerta que muestre el estado actual y la estimación de la pérdida del recurso para la adecuada gestión en la recuperación del ecosistema.

---

<sup>1</sup> Ortofotografía es una representación fotográfica de una zona de la superficie terrestre que se consigue mediante un conjunto de imágenes aéreas (tomadas desde un avión o satélite) que han sido corregidas para representar una proyección ortogonal sin efectos de perspectiva y en la que por lo tanto es posible realizar mediciones exactas.

## **2. OBJETIVOS**

### **2.1 OBJETIVO GENERAL**

Realizar un análisis multitemporal del espejo de agua en la Laguna de Fúquene localizada en el departamento de Cundinamarca, teniendo en cuenta variables ambientales medibles con el fin de determinar su desecación progresiva, el estado actual y hacer una estimación del estado del área susceptible a futuro.

### **2.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Identificar los factores o variables que afectan el cuerpo hídrico.
- Exponer el cambio de la cobertura de la Laguna de Fúquene a través del tiempo, utilizando herramientas de software para el tratamiento, interpretación y análisis de imágenes.
- Determinar el área de reducción del espejo de agua para la ventana temporal objeto de estudio.
- Estimar la reducción del área del espejo de agua a futuro, teniendo en cuenta la permanencia de las variables ambientales y de manejo actuales.
- Generar una serie de recomendaciones que mitiguen la disminución del área del espejo de agua.

### 3. JUSTIFICACIÓN

La reserva de los recursos naturales se debe asegurar mediante medidas de manejo que son ejecutadas a través de organismos gubernamentales, no gubernamentales, privados y sociales, sin embargo se hacen necesarias las iniciativas de investigación y análisis de los procesos que sostienen los entornos vulnerables, con el propósito de dar a conocer la criticidad de la situación y generar unos resultados que se puedan utilizar para concientizar en la importancia del buen uso y preservación del recurso, lo que a largo plazo permitiría mejorar la calidad de vida de los habitantes.

En este sentido es importante destacar que sobre el área de estudio “Espejo de agua de la Laguna de Fúquene” se han desarrollado investigaciones que han trascendido a los medios, sin embargo se pretende realizar un análisis multitemporal de la zona mediante imágenes satelitales y/u ortofotografías, teniendo en cuenta variables ambientales medibles que fortalezcan la investigación.

La teledetección, procesamiento digital y análisis de imágenes constituyen un instrumento potente para la identificación de cambios en la superficie terrestre ya que aporta información fiable, correcta y rápida, que al ser correlacionada con diferentes variables permite el estudio y entendimiento del entorno.

El presente estudio es novedoso debido a que al utilizar tres ventanas temporales se puede determinar una tasa de cambio del desecamiento del espejo de agua de la laguna, lo cual permite hacer estimaciones a futuro, adicionalmente se tuvieron en cuenta variables ambientales para determinar la relación con el proceso de deterioro; se pondrá a disposición de todos los actores interesados, en este caso los habitantes del sector, aquellos que hacen aprovechamiento directo e indirecto, ya sea para actividades agropecuarias o consumo, finalmente se remitirá al municipio y a las autoridades respectivas como una herramienta para favorecer los procesos de toma de decisiones.

## 4. MARCO TEÓRICO

### 4.1 ÁREA DE ESTUDIO

La laguna de Fúquene, tiene una superficie promedio de 3100 ha y una profundidad media estimada de 2.3m, tiene un volumen máximo operativo de 36.8 millones de metros cúbicos, correspondiente a una cota de 2539 m.s.n.m y sus coordenadas geográficas son 5°28' latitud norte y 73° 45' longitud oeste. [9]

El sistema lagunar es el principal componente del sistema hidrográfico de esta región y se considera una reserva ecológica, económica, social y cultural de importancia nacional; ubicado en el valle de Úbate, se han realizado transformaciones a diferentes escalas espaciales y temporales, todas ellas encaminadas a la desecación de la laguna y adecuación de tierras para usos económicos, con un alto impacto negativo sobre el ecosistema. En la actualidad la cuenca del río Ubaté se caracteriza por evidenciar índices de escasez y vulnerabilidad del recurso hídrico. En el valle del río Ubaté, en épocas de verano los caudales se reducen y en épocas de invierno los mismos aumentan produciendo inundaciones, dada la baja capacidad de drenaje, producto de las condiciones naturales del terreno. El marcado déficit hídrico que en épocas de verano llega en algunas áreas a 15.85 millones de m<sup>3</sup>/año, está asociado principalmente a la baja capacidad de regulación del recurso hídrico en la cuenca [10].

Los principales usos de la laguna son el abastecimiento para distritos de riego para cultivos de pastos, trigo, cebada, maíz, entre otros y para la ganadería; la demanda total de agua para los acueductos municipales involucra el uso doméstico, institucional e industrial, incluyendo áreas urbanas y rurales [10].

El sistema hidrográfico del Valle de Ubaté y Chiquinquirá, contiene tres secciones: alta, media y baja. La parte alta está conformada al sur desde el nacimiento del río Ubaté, uniéndose aguas abajo con otros tributarios mayores como los ríos Suta y Lenguaque, y drenajes provenientes de la Laguna Cucunubá y Palacio, hasta descargarse en la Laguna de Fúquene [10].

La construcción del canal perimetral en la laguna de Fúquene ha generado una disminución del agua que entra a la laguna ya que los canales son interceptados por dicho canal, convirtiéndose en un ecosistema que acumula altas concentraciones de nutrientes que generan una de las principales problemáticas, la proliferación de malezas acuáticas como el buchón y la elodea [10].

Ante este panorama, los planes de ordenamiento de cuencas no son instrumentos de alto impacto y la gestión pública presenta falencias, teniendo en cuenta que este es un espacio vulnerable a sequías e inundaciones, lo cual trasciende a la población, la flora, fauna y a los diferentes bienes que se encuentran en la zona.

Figura 1. Fotografía de margen de la Laguna de Fúquene.



Fuente: PLAN AMBIENTAL DE ORDENAMIENTO TERRITORIAL. Alcaldía de Fúquene - Cundinamarca. Fecha de consulta: 10/09/2015. p. 15. Disponible en: [http://www.fuquene-cundinamarca.gov.co/Nuestros\\_planes.shtml?apc=gbxx-1-&x=2952930](http://www.fuquene-cundinamarca.gov.co/Nuestros_planes.shtml?apc=gbxx-1-&x=2952930)

**4.1.1 Aspecto Climático.** De acuerdo con los datos de las estaciones climatológicas de la CAR, la cuenca presenta una precipitación media anual de 867 mm, un caudal de oferta media anual de 6.5 m<sup>3</sup>/s y un caudal de oferta promedio en los meses más secos de 4.9 m<sup>3</sup>/s.

La temperatura media mensual multianual en promedio se encuentra entre 12.4°C y 15.7°C; la humedad relativa media mensual multianual está en promedio entre el 73.3% y el 77.8%.

Los valores de brillo solar medio mensual multianual en promedio están entre 131.8 Hrs y 177.3 Hrs y los valores de evaporación media mensual multianual promedio entre 56.4 mm y 101.4 mm [11].

**4.1.2 Aspecto Socioeconómico.** En cuanto a la agricultura, se trata principalmente del cultivo de papa, arveja y trigo, sin embargo después de tres cosechas el área cultivada se siembra con pastos generalmente introducidos como el pasto de olor (*anthoxantum odoratum*) y el Poa (*Holcus lanatus*), que se utilizan para el sostenimiento de los ovinos y bovinos, la actividad económica predominante en Fúquene es la producción agrícola y la ganadería de leche constituyéndose en la más generadora de empleo.

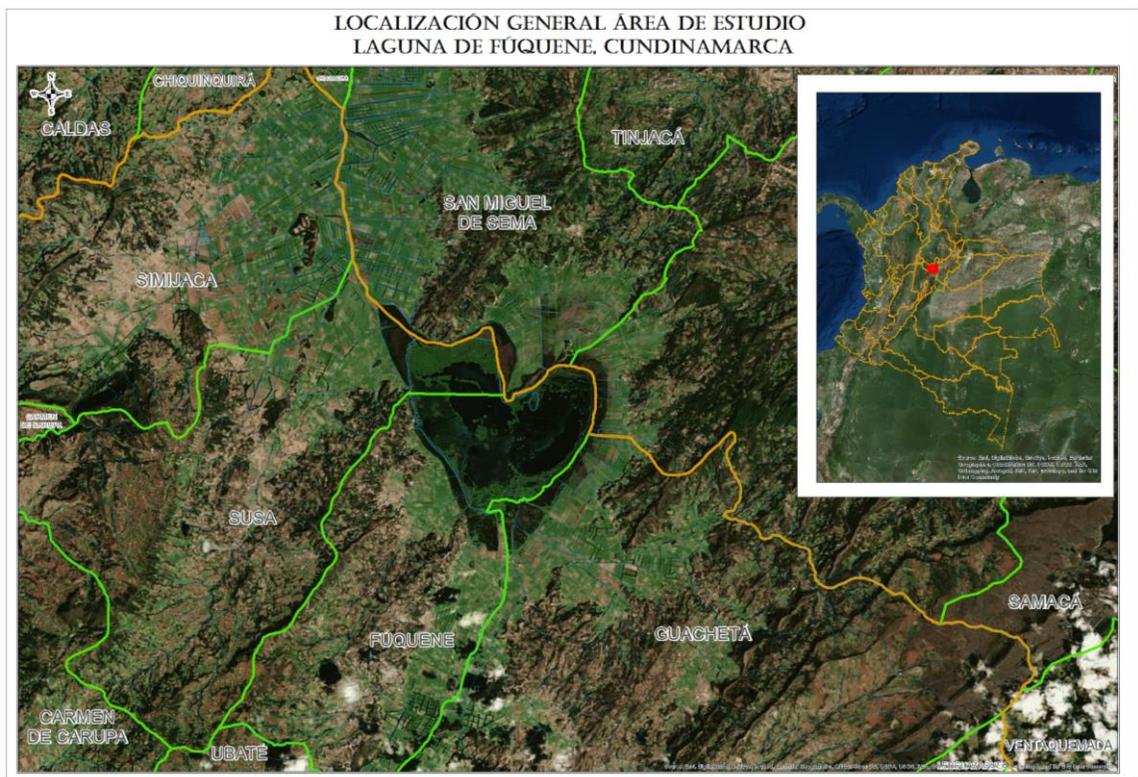
Fúquene no cuenta con una central de mercado ni con un día para las actividades de comercialización, lo que provoca el desplazamiento de la población hacia otras

zonas de mercados como la cabecera de Ubaté, Chiquinquirá y Carmen de Carupa principalmente [11].

**4.1.3 Localización.** El cuerpo hídrico objeto de este estudio se encuentra ubicado en el municipio de Fúquene, al norte del departamento de Cundinamarca, a una distancia de 116 km de la ciudad de Bogotá, además de la cabecera municipal se ubica la Inspección de policía de Capellanía y Nuevo Fúquene.

A continuación se presenta la localización del área de estudio:

Figura 2. Localización general área de estudio.



## 4.2 PERCEPCIÓN REMOTA

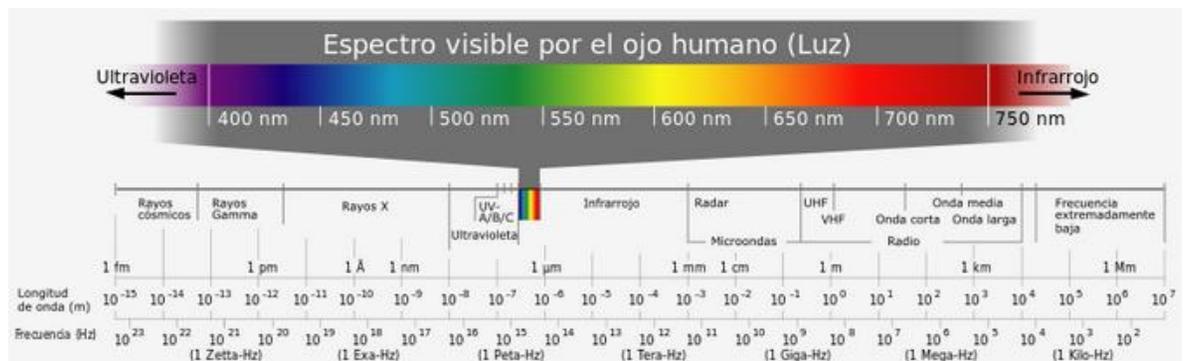
La percepción remota es la ciencia de obtener e interpretar información desde la distancia, usando sensores que no tienen contacto físico con el objeto que está siendo observado, incluye las observaciones aéreas, satelitales y de naves espaciales de la superficies y atmósfera.

La energía electromagnética se comporta como energía fluctuante compuesta por ondas que constan de longitudes de onda medidas en micrómetros. La percepción

remota utiliza la luz del sol como fuente energética con un rango de longitud de onda del visible entre 0.4 y 0.7  $\mu\text{m}$ , sin embargo el rango del espectro visible es una pequeña parte del espectro electromagnético, teniendo en cuenta que la energía solar también libera radiación ultravioleta invisible e infrarroja.

El espectro electromagnético se distribuye a partir de los rayos gamma, el rango visible, Infrarrojo hasta los rangos de onda corta tal como se logra apreciar en la siguiente imagen:

Figura 3. Espectro Electromagnético



Fuente: FISICA OPTICA (INVESTIGACION). Fecha de consulta: 10/09/2015. Disponible en: <http://ireneadh.blogspot.com.co/>

Los sensores remotos miden la radiación electromagnética que interactúa con la superficie, las interacciones con la materia pueden cambiar de dirección, intensidad, longitud de onda y polarización de la radiación [12].

**4.2.1 Sensores Remotos.** Los sensores remotos miden la radiación electromagnética que interactúa con la superficie, las interacciones con la materia pueden cambiar de dirección, intensidad, longitud de onda y polarización de la radiación. Se categorizan de acuerdo a la fuente de radiación electromagnética y a las interacciones de la energía con la superficie terrestre.

Se logra caracterizar tres tipos de sensores:

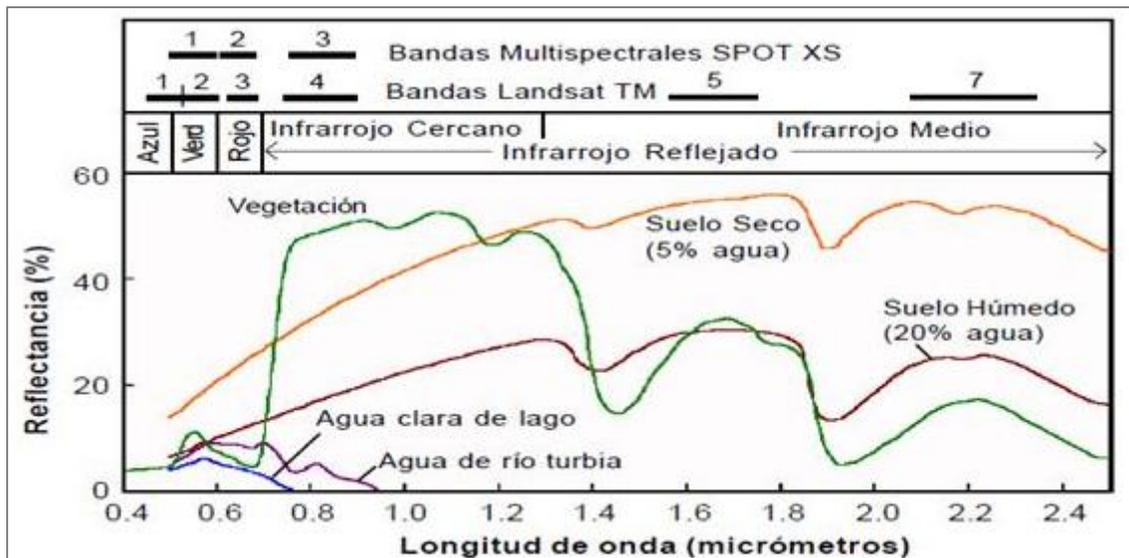
- Sensor de Radiación Solar Reflejada: Son aquellos que detectan la radiación solar difusamente reflejada a partir de las características de la superficie.
- Sensor Infrarrojo Termal: Logran detectar la radiación infrarroja termal a partir de las características termales de los objetos.

- Sensor de Imágenes de Radar: Dependen de la emisión de radiación de microondas, por lo que miden la energía difusamente reflejada que regresa al sensor.

**4.2.2 Firmas Espectrales.** Permiten la discriminación de los diferentes materiales de energía solar reflejada. Se cuantifica mediante la propiedad “reflectancia espectral” en razón de la energía reflejada y la energía incidente como una función de longitud de la longitud de onda.

A continuación se discrimina la reflectancia espectral en las bandas del sensor SPOT y Landsat TM:

Figura 4. Firmas Espectrales



Fuente: RAPID UPLIFT. Hyperspectral Mapping Of The Geology. Fecha de consulta: 08/09/2015. Disponible en: <http://suvratk.blogspot.com.co/2012/07/hyperspectral-mapping-of-geology-of.html>

**4.2.3 Imágenes.** Una imagen consiste en una grilla rectangular de dos dimensiones de valores numéricos que representan diferentes niveles de luminosidad. Cada valor representa el promedio de luminosidad para una porción de la superficie, representada por unidades de área cuadradas en la imagen.

**4.2.4 Tipos de Resoluciones.** Los factores de resolución limitan la información que se puede extraer de las imágenes detectadas. La resolución espacial mide el detalle espacial de una imagen, la resolución espectral distingue diferentes rangos de longitud de onda en el espectro, se caracterizan en pancromáticas, multispectrales o hiperespectrales. La resolución radiométrica hace referencia a los niveles discretos y la resolución temporal al tiempo de revisita del sensor a cada una de las escenas.

**4.2.5 Características de la cobertura Agua.** La cobertura de agua clara presenta buena transmisión de la radiación en el espectro visible y de absorción en el infrarrojo, debido a esto se logra distinguir fácilmente la diferencia de coberturas entre suelo y agua. Debido al carácter tridimensional de las superficies de agua su respuesta espectral se presenta en tres componentes, debido a la superficie, a la columna de agua y al fondo. La profundidad a la que la luz puede penetrar depende de la longitud de onda, por lo que al incrementar la profundidad del agua la reflectancia descende. La mayor variabilidad del agua se observa cuando las longitudes de onda son más cortas (en el espectro azul y verde), lo cual se relaciona con la profundidad, contenido de materiales en suspensión y rugosidad de la superficie [13].

### 4.3 METODOLOGÍA CORINE LAND COVER

La Leyenda Nacional de Coberturas de la Tierra es uno de los productos de la adaptación de la Metodología CORINE Land Cover, la cual contiene y describe las Unidades de Coberturas de la Tierra presentes en el Territorio Nacional y que además son cartografiables a escala 1:100.000. Estas unidades son representativas de la compleja oferta ambiental de Colombia y expresan de modo indicativo la dinámica de apropiación y uso del territorio [14]. Se conforma de cinco niveles de entrada al sistema de clasificación y están conformados por:

Figura 5. Metodología CORINE Land Cover



Fuente: Sistema de Información Ambiental de Colombia- SIAC. Leyenda CORINE Land Cover Colombia. Escala 1:100.000. Fecha de consulta: 08/09/2015. Disponible en: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=904&conID=1449>

## **4.4 ANTECEDENTES**

### **4.4.1 CONPES (Consejo Nacional de Política Económica y Social) 3451.**

El CONPES 3451 reseña la “Estrategia para el manejo ambiental de la cuenca de Ubaté – Suárez”, desarrollado en diciembre de 2006 por el Departamento Nacional de Planeación y otros entes adscritos; para llevar a la recuperación y conservación del ecosistema lagunar de Fúquene, Cucunubá y Palacio con los propósitos de asegurar la oferta y demanda de bienes y servicios ambientales del ecosistema, optimizar la regulación hídrica y mitigar riesgos de inundaciones o sequías.

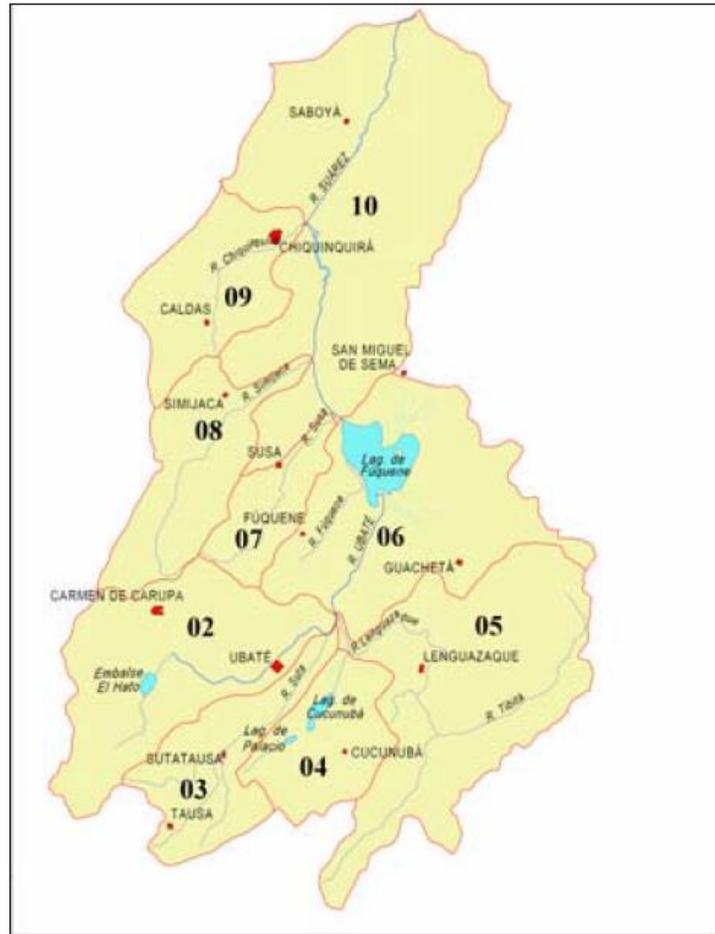
El ecosistema presenta escenarios críticos en cuanto a las sequías e inundaciones los cuales generan inconvenientes sociales, económicos y ambientales.

“El sistema hidrográfico del Valle de Ubaté y Chiquinquirá, contiene tres subcuencas: alta, media y baja. La parte alta está conformada al sur desde el nacimiento del río Ubaté, uniéndose aguas abajo con otros tributarios mayores como los ríos Suta y Lenguazaque, y drenajes provenientes de las Lagunas de Cucunubá y Palacio, hasta descargar al norte, en la laguna de Fúquene.

La cuenca media, corresponde a la laguna de Fúquene, que recibe al oriente numerosos afluentes secundarios que drenan directamente a la laguna como las quebradas Honda y Monroy, y al occidente el río Fúquene, y descargas directas compuestas por corrientes superficiales y canales de drenaje. Gran parte de la Laguna de Fúquene se encuentra bordeada por un canal perimetral, que captura un alto porcentaje de los afluentes naturales drenados directamente al río Suárez, sin permitir su ingreso directo a la Laguna.

Finalmente, la parte baja está conformada por el río Suárez, único efluente de la laguna. Este río fluye hacia el norte sobre un cauce rectificado con topografía de muy baja pendiente, cruzando por los municipios de Chiquinquirá y Saboyá en el departamento de Boyacá. Recibe los aportes de los ríos Susa, Simijaca y Chiquinquirá por su margen izquierda y del río Madrón por su margen derecha” [10].

Figura 6. Mapa Hidrográfico de la Laguna de Fúquene



Fuente: Consejo Nacional de Política Económica y Social, Republica de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. CONPES 3451. Fecha de consulta: 08/09/2015. Disponible en: <https://pwh.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3451.pdf>. p P7.

“Las características climatológicas en la cuenca son de carácter tropical, afectadas principalmente por variaciones altimétricas, por lo que el sistema montañoso es el principal condicionante del clima de la región. Adicionalmente, la zona de la cuenca se encuentra afectada por la variación de la Zona de Confluencia Intertropical, que genera dos períodos húmedos y dos secos, intercalados a lo largo del año. [10]”

En cuanto al aprovechamiento del recurso hídrico, es el sustento principal del sector agropecuario y en una menor proporción se utiliza en acueductos.

Los principales factores que afectan la disponibilidad hídrica son:

- Ineficiente desarrollo de los sistemas de captación y distribución del distrito de riego y drenaje.
- Deseccación.
- Producción de sedimentos.
- Calidad de Agua: Aguas residuales. Vertimientos industriales. Vertimientos no puntuales.

De acuerdo al contexto histórico del documento se iniciaron obras de deseccación desde el año 1822, tal como se observa en la siguiente figura:

Figura 7. Plano de Laguna de Fúquene 1933- Ministerio de Industria y Trabajo



Fuente: Consejo Nacional de Política Económica y Social, Republica de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. CONPES 3451. Fecha de consulta: 08/09/2015. Disponible en: <https://pwh.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3451.pdf>. p P7.

Este plano define como cota máxima 2.581 msnm y como cota mínima 2.578 msnm, lo que infiere un área aproximada de 10.265 ha. En el año 1984 se continúa con las prácticas para la deseccación del cuerpo hídrico a través de un "Dique Perimetral", rediseñado y conocido como "Canal Perimetral".

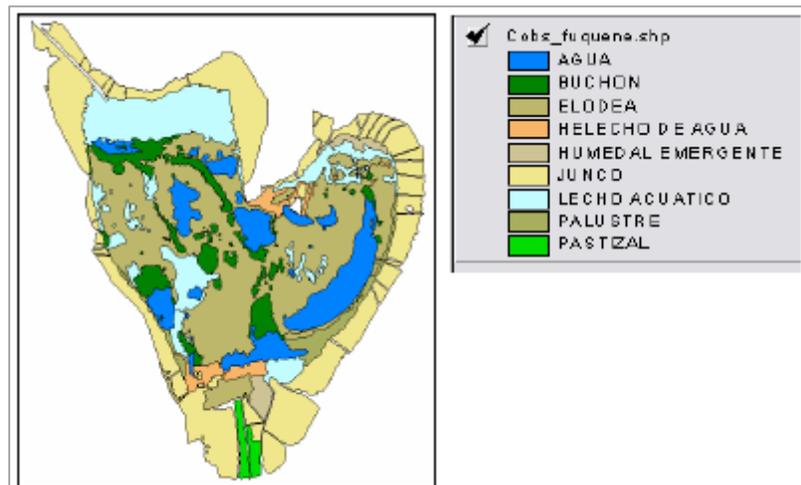
Figura 8. Canal Perimetral- Propuesta de construcción, 1984



Fuente: Consejo Nacional de Política Económica y Social, Republica de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. CONPES 3451. Fecha de consulta: 08/09/2015. Disponible en: <https://pwh.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3451.pdf>. p P10.

Para el año 2006, de las 2.800 has que conformaban la superficie lagunar, 1.200 has (40%) se encontraban invadidas por la Elodea brasilera; 700 has (23.3%) por Buchón; 900 has (30%) por plantas acuáticas no consideradas malezas, como el Junco (*Scirpus californicus*) y la Catleya (*Typha angustifolia*) y tan sólo 200 has, 6.7% del área total, correspondían al espejo de agua.

Figura 9. Distribución espacial de plantas acuáticas- CAR



Fuente: Consejo Nacional de Política Económica y Social, Republica de Colombia, Departamento Nacional de Planeación. CONPES 3451. Fecha de consulta: 08/09/2015. Disponible en: <https://pwh.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3451.pdf>. p P20.

#### 4.4.2 Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (*Eichhornia crassipes*).

Este documento muestra las transformaciones que se han presentado en el ecosistema de acuerdo a la investigación de las especies invasoras en el cuerpo hídrico como el buchón, determinando que el crecimiento exponencial se ha presentado a partir del año 1955.

El siguiente cuadro muestra el histórico del área de la Laguna y la ocupación del buchón:

Cuadro 1. Histórico de la ocupación del buchón en la Laguna de Fúquene

Año	Agua km <sup>2</sup>	Buchón km <sup>2</sup>
1955	27.1	4.0
1956	26.8	4.3
1978	21.8	9.3
1982	21.0	10.1
1983	20.4	10.8
1989	19.3	11.9
1992	17.2	13.9
2007	9.7	21.5

Fuente: Pontificia Universidad Javeriana. Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (*Eichhornia crassipes*). Fecha de consulta: 01/09/2015. Disponible en: <http://repository.javeriana.edu.co/handle/10554/921>

Se determinó que el crecimiento del buchón se ha dado de los bordes hacia el centro de la laguna debido a que se presenta mayor disponibilidad de nutrientes, en especial nitrógeno y fosforo.

Á partir de esta investigación se generó un modelo para la simulación del crecimiento y distribución, donde se determinó que aproximadamente para el año 2035 el buchón cubriría totalmente el espejo de agua siguiendo un patrón de crecimiento logístico hasta alcanzar la capacidad de carga, es decir el cubrimiento del espejo de agua. Este modelo no tiene en cuenta fenómenos estocásticos como tormentas, inundaciones, heladas que podrían inducir la mortalidad del buchón [15].

## 5. METODOLOGÍA

### 5.1 TIPO DE TRABAJO

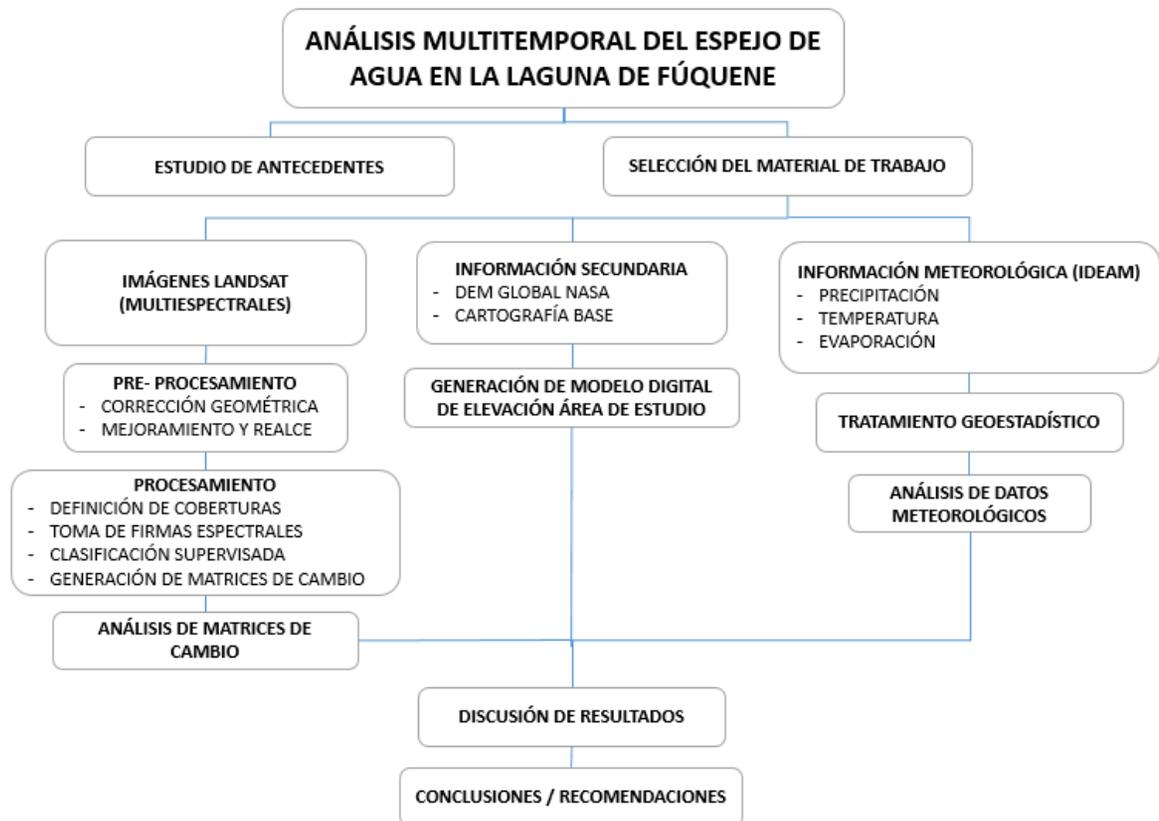
Este es un trabajo de investigación aplicada para la cuantificación del área correspondiente a la disminución del espejo de agua de la Laguna de Fúquene, basado en los conceptos de percepción remota e interpretación de imágenes.

### 5.2 PROCEDIMIENTO

Para el análisis del desecamiento de la Laguna de Fúquene se utilizaron imágenes multiespectrales del satélite Landsat, cuyas principales aplicaciones permiten la identificación y clasificación de diferentes coberturas en la superficie, determinación de humedad del suelo y clasificación de la vegetación; el cubrimiento temporal de los insumos fue a partir del año 1985 a la fecha.

A continuación se presenta un diagrama de flujo donde se muestran las principales actividades relacionadas con el desarrollo del proyecto:

Figura 10. Diagrama de flujo



En cuanto a la etapa de la selección del material de trabajo, comprende los siguientes insumos y herramientas:

#### Imágenes de satélite

Para realizar el análisis se tuvieron en cuenta tres imágenes del satélite Landsat, las cuales fueron tomadas en el mes de febrero de los años 1985, 2000 y 2015, esto con el fin de identificar la acelerada desecación del cuerpo de agua. A continuación se presentan las imágenes utilizadas:

Cuadro 2. Resumen de imágenes Landsat

<b>Imagen</b>	<b>Programa</b>	<b>Sensor</b>	<b>Fecha de Adquisición</b>	<b>Resolución Espacial</b>
1	LANDSAT_5	MSS	02/02/1985	60m
2	LANDSAT_7	ETM+	04/02/2000	30m (15m)
3	LANDSAT_8	OLI_TIRS	21/02/2015	30m (15m)

#### Información Secundaria

Se usó del Modelo Digital de Elevación Global de la NASA para generar el Modelo Digital de Elevación del área de estudio y junto la información de cartografía base del IGAC escala 1:100.000 poder tener una identificación primaria de la topografía del área de estudio.

#### Información IDEAM

Se solicitaron datos de las variables de precipitación, temperatura y evaporación al Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales de Colombia- IDEAM para el periodo de estudio.

Los programas que fueron usados para el desarrollo del proyecto son:

- ERDAS IMAGINE 9.2
- ArcGIS 10.2.1
- GLOBAL MAPPER
- SURFER 13 – Golden Software
- Google Earth
- Paquete de Office (Word, Excel, PowerPoint)

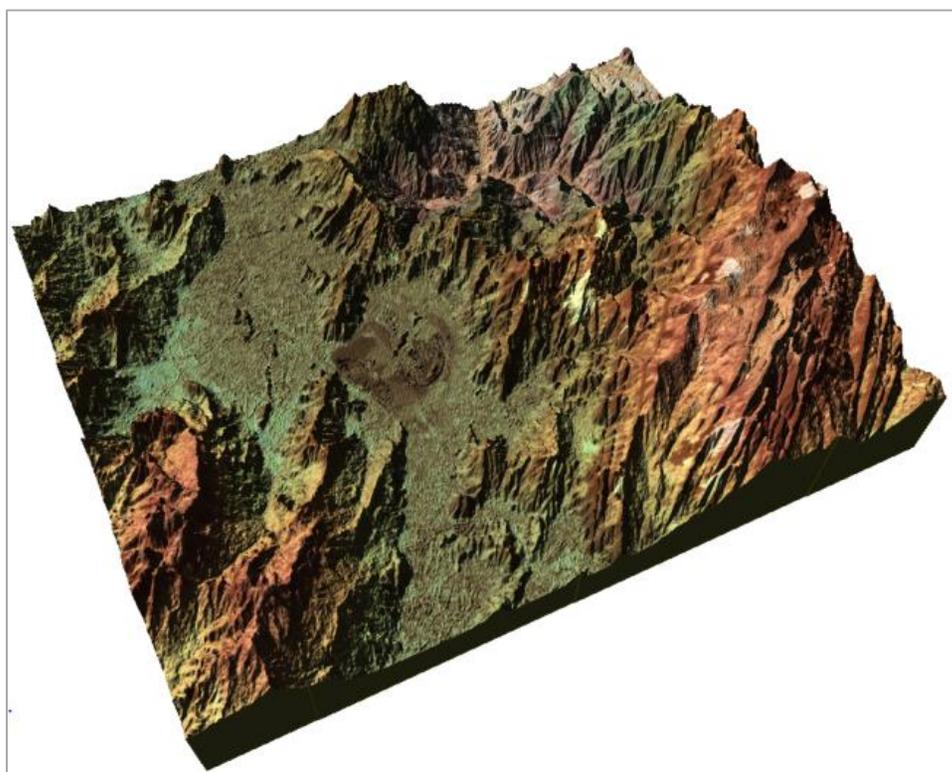
## 6. RESULTADOS

### 6.1 DESCRIPCIÓN DE RESULTADOS

#### 6.1.1 Definición de Área de Estudio y Modelo Digital de Elevación

A partir del modelo de la NASA “NASA\_MDT\_GRID\_30m” se generó un Modelo Digital de Terreno – DTM en la ventana de estudio con el fin de observar el relieve y la topografía del terreno.

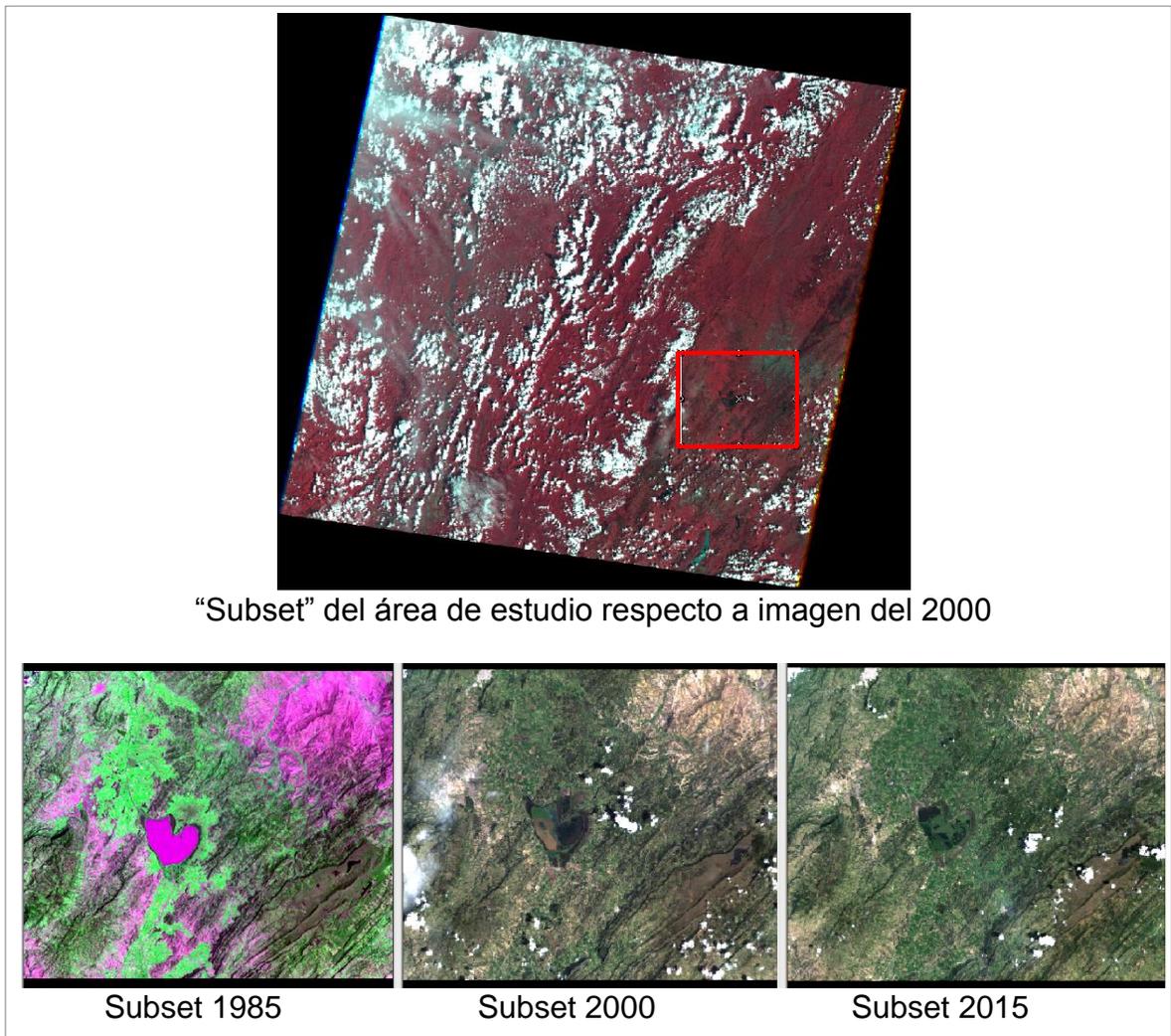
Figura 11. Modelo Digital de Elevación



#### 6.1.2 Preprocesamiento

Las imágenes digitales Landsat se desplegaron en el software ERDAS para hacer la extracción del área de estudio, ya que cada imagen Landsat tiene un tamaño de escena de 183 km x 170 km, generando como resultado tres imágenes con un cubrimiento de 38.9 km por 30.7 km.

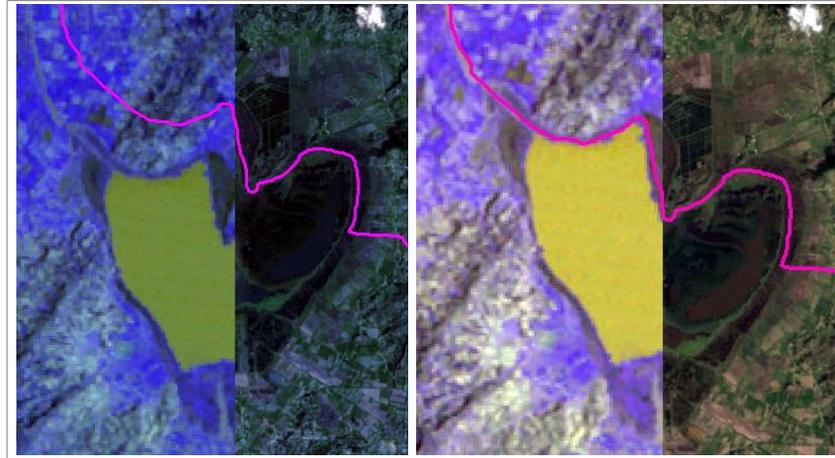
Figura 12. Subset del área de estudio



### Corrección Geométrica

Inicialmente se realizó una revisión visual respecto a la precisión en la georreferenciación de las imágenes, identificando que la imagen del año 1985 presentaba desplazamiento respecto a las otras dos imágenes, las cuales se revisaron de acuerdo al servicio de mapa base de imagen de ArcGIS y a la cartografía base. Por lo anterior, se realizó la corrección geométrica para la imagen de 1985 a partir de la imagen del año 2000.

Figura 13. Corrección geométrica

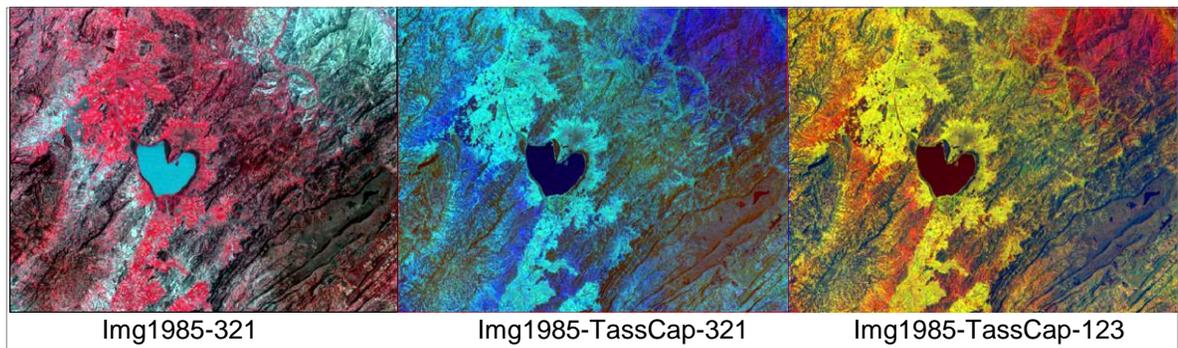


### Realce y mejoramiento

Se hizo un mejoramiento a las imágenes con herramientas del paquete de ERDAS con el fin de tener una mejor apreciación de las coberturas de acuerdo a la composición de color en el proceso de clasificación. La imagen de 1985 se trató con la opción de Tasseled Cap (espectral) y las imágenes del 2000 y 2015 se trataron con la opción de Haze Reduction (radiométrico).

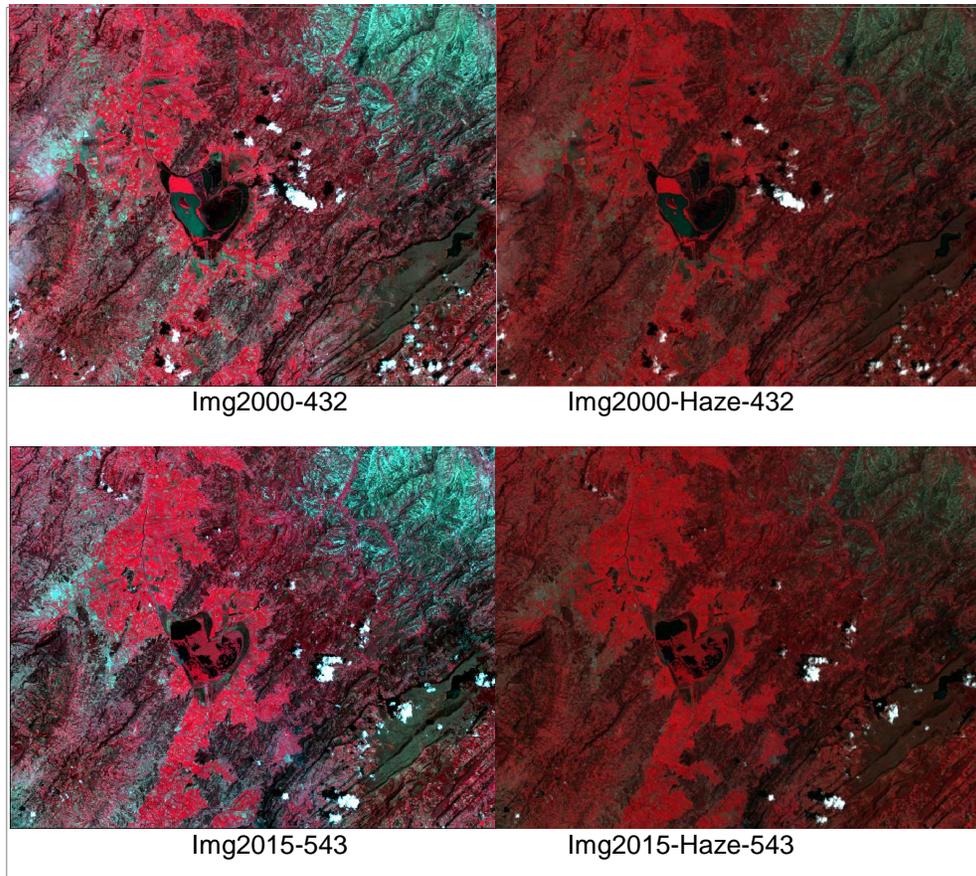
El “Tasseled Cap” hizo una atenuación de las sombras que tiene la imagen de 1985 y permitió identificar mejor algunas coberturas a diferentes composiciones de color.

Figura 14. Tasseled Cap



El “Haze Reduction” también proporciona una atenuación en las sombras de las imágenes del 2000 y 2015, además de permitir que algunos tipos de coberturas se aprecien más homogéneas y mejor delimitadas para la posterior clasificación.

Figura 15. Haze Reduction



### 6.1.3 Procesamiento

#### Clasificación Supervisada

Para la clasificación, se definieron las clases a identificar de acuerdo a un conocimiento previo del área de estudio, teniendo en cuenta la metodología CORINE Land Cover:

Cuadro 3. Niveles de Cobertura CORINE Land Cover

COBERTURA CORINE			
Nivel 1	Nivel 2	Nivel 3	Código CORINE
Territorios Artificializados	Zonas Urbanizadas	Tejido urbano discontinuo	1.1.2
Territorios Agrícolas	Cultivos permanentes	Cultivos permanentes arbustivos	2.2.2
		Cultivos confinados	2.2.5
	Pastos	Pastos Limpios	2.3.1
Bosques y áreas semi-naturales	Bosques	Bosque denso	3.1.1
		Bosque fragmentado	3.1.3
		Bosque de Galería y ripario	3.1.4
	Áreas con vegetación herbácea y/o arbustiva	Herbazal	3.2.1
	Áreas abiertas, sin o con poca vegetación	Tierras desnudas y degradadas	3.3.3
Áreas Húmedas	Áreas húmedas continentales	Zonas Pantanosas	4.1.1
		Vegetación acuática sobre cuerpos de agua	4.1.3
Superficies de Agua	Aguas continentales	Ríos (50m)	5.1.1
		Lagunas, lagos y ciénagas naturales	5.1.2

Una vez realizado el preprocesamiento de las tres imágenes y la revisión de las respuestas espectrales en las composiciones de color, se procedió a realizar la clasificación supervisada para las imágenes, tomando varias firmas espectrales para cada clase y luego promediándolas o recodificándolas para obtener un grupo bien diferenciado de clases. El resultado de cada clasificación se presenta en las siguientes figuras:

Figura 16. Clasificación de la imagen de 1985

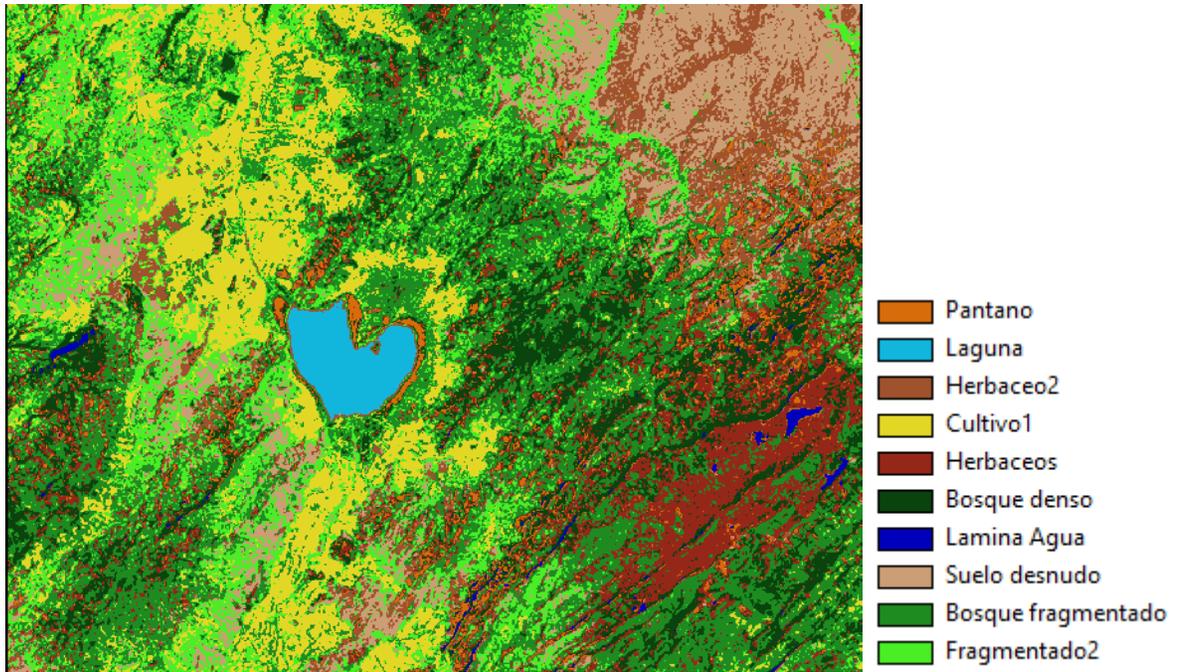


Figura 17. Clasificación de la imagen del 2000

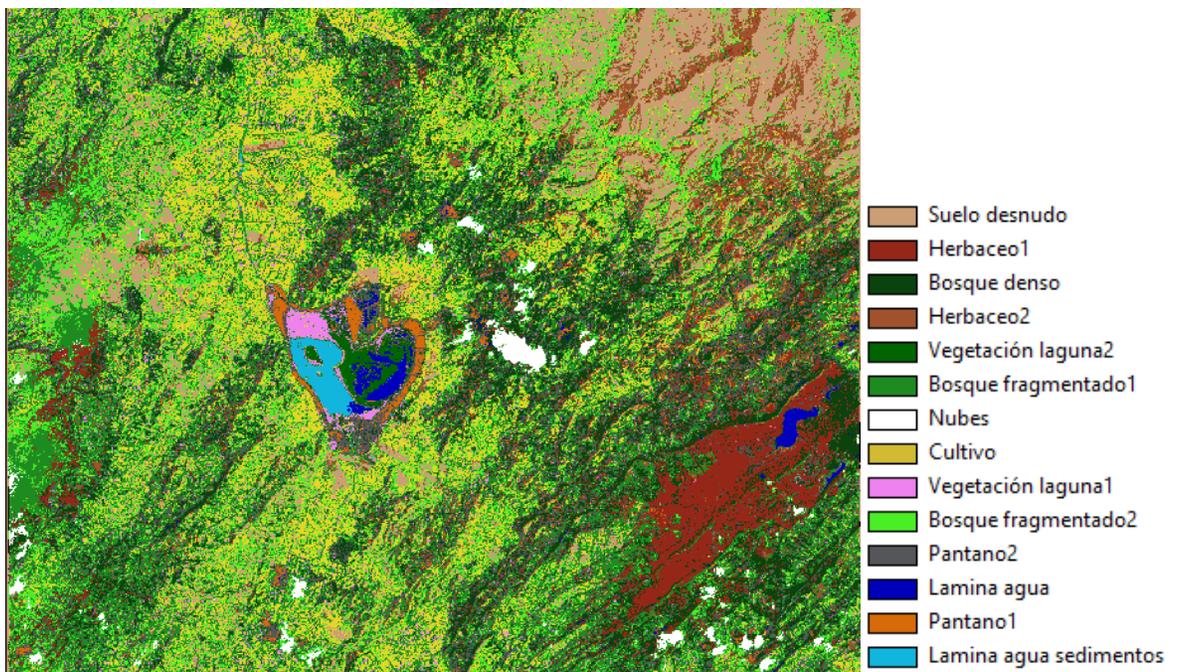
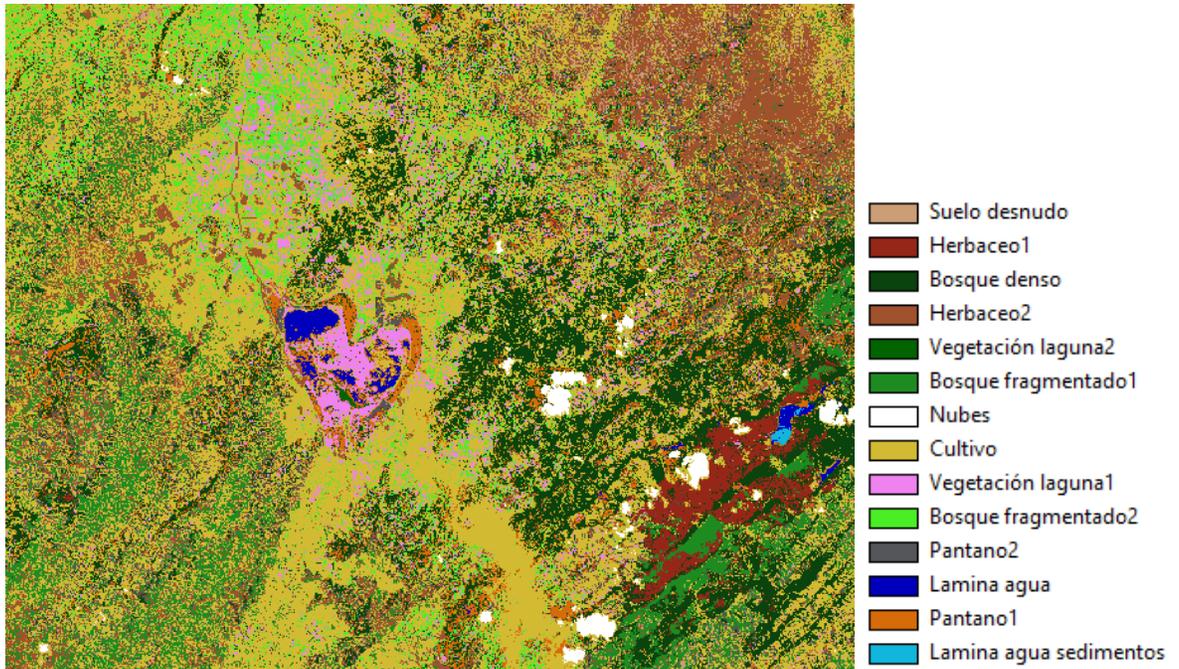


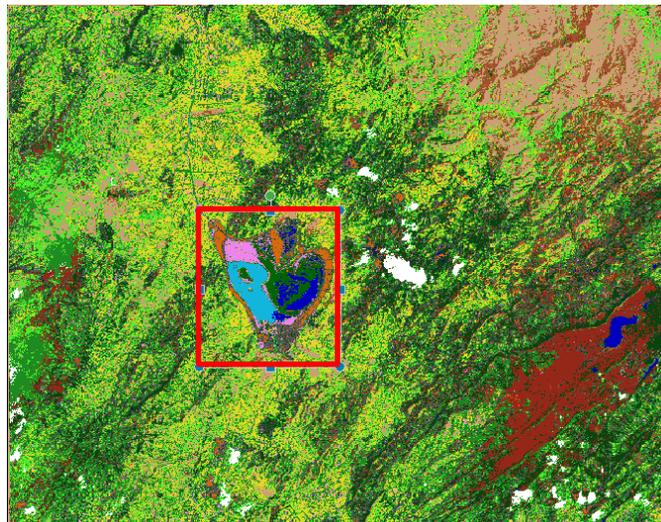
Figura 18. Clasificación de la imagen del 2015



“Subset” de la Laguna

Para realizar el cálculo del cambio en el espejo de agua y coberturas presentes en la laguna y próximas a su perímetro, se hizo un subset de cada imagen clasificada, seleccionando así un área de interés más específica.

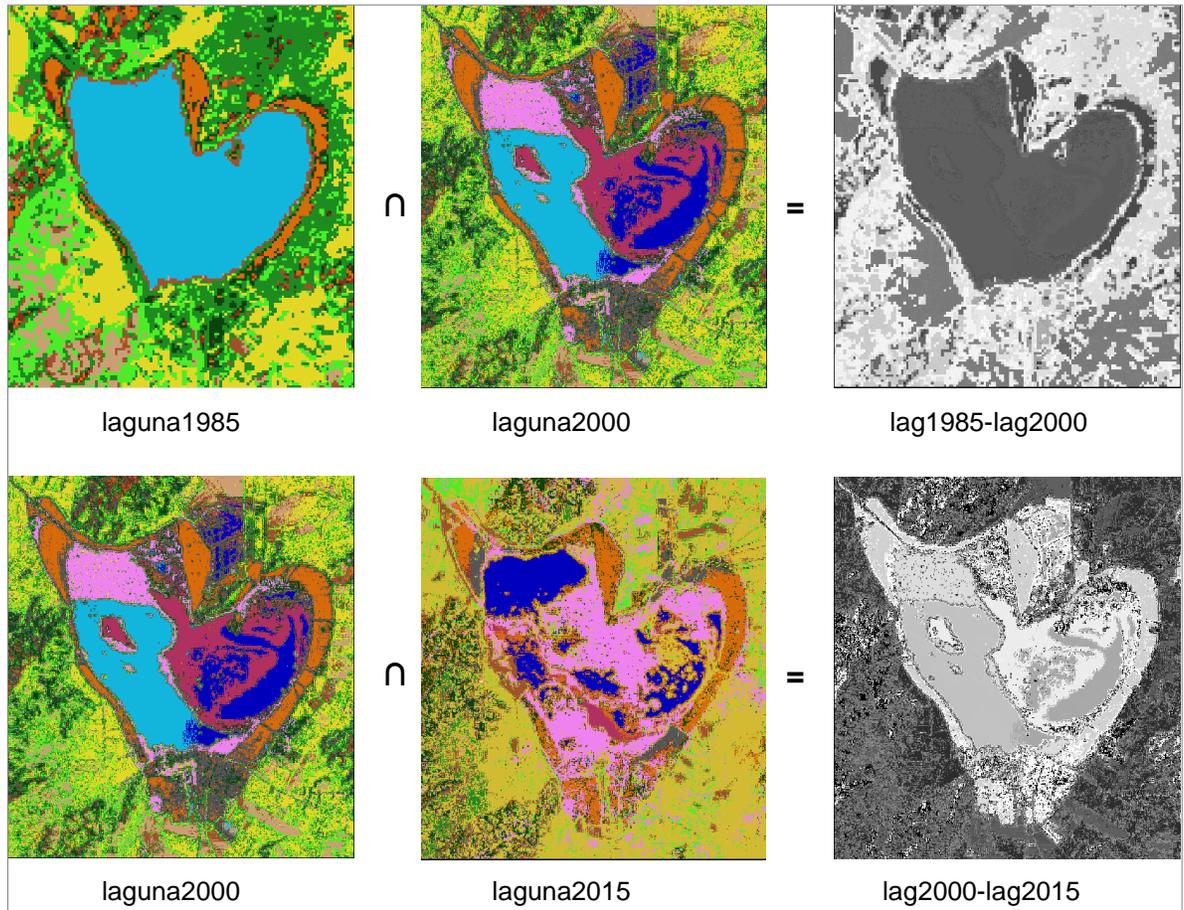
Figura 19. Subset de la laguna



## Obtención de imágenes con matriz de cambios

Con la opción “Matrix Union” del paquete de ERDAS, se generaron las imágenes que arrojan como resultado, la matriz de cambios para las clases o tipos de coberturas definidas, a partir de las imágenes resultado del subset realizado a las imágenes clasificadas:

Figura 20. Imágenes resultado Matrix Union; Img85-Img00\_Img00-Img15



Al revisar las coberturas resultantes en cada imagen del área específica de la laguna, se identificaron cuatro coberturas más para las imágenes del 2000 y 2015 en relación con la imagen de 1985, que podrían corresponder a otro tipo de pantano, a lámina de agua con poca sedimentación y a dos tipos de vegetación que aparecen principalmente en lo que correspondía a espejo de agua con sedimentación en la imagen de 1985. El siguiente cuadro presenta las clases y su correspondiente cobertura para las tres imágenes:

Cuadro 4. Clases y coberturas

Clase	Cober_1985	Cober_2000	Cober_2015
1	Bosque denso	Bosque denso	Bosque denso
2	Bosque fragmentado1	Bosque fragmentado1	Bosque fragmentado1
3	Bosque fragmentado2	Bosque fragmentado2	Bosque fragmentado2
4	Herbaceo1	Herbaceo1	Herbaceo1
5	Herbaceo2	Herbaceo2	Herbaceo2
6	Cultivo	Cultivo	Cultivo
7	Suelo desnudo	Suelo desnudo	Suelo desnudo
8	Laguna	Lamina agua sedimentos	Lamina agua sedimentos
9	Pantano	Pantano	Pantano
10		Pantano2	Pantano2
11		Lamina agua	Lamina agua
12		Vegetación laguna1	Vegetación laguna1
13		Vegetación laguna2	Vegetación laguna2

#### 6.1.4 Análisis de Matrices de cambio

Con las matrices resultado del cambio de cobertura, se analizaron los cambios para el espejo de agua entre los periodos de 1985-2000 y 2000-2015, a continuación se presentará cada matriz con los cambios de interés resaltados y su interpretación:

Cuadro 5. Matriz de cambio 1985-2000

1985\2000	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Clase 7	Clase 8	Clase 9	Clase 10	Clase 11	Clase 12	Clase 13	Total ha
Clase 1	41.94	25.25	4.34	8.98	11.36	11.27	6.03	0.02	93.53	104.67	0.18	4.21	0.52	312.30
Clase 2	204.91	396.70	124.79	31.01	90.50	422.24	123.77	1.98	100.37	279.72	27.63	71.60	16.52	1,891.71
Clase 3	84.69	297.16	201.26	9.65	37.28	271.89	117.38	2.32	17.84	72.54	5.24	41.60	3.67	1,162.53
Clase 4	23.06	18.41	2.99	9.14	5.81	7.25	2.43	0.00	36.59	37.33	0.54	2.88	0.56	146.97
Clase 5	52.61	66.49	16.47	15.95	13.57	25.45	9.88	1.85	14.63	56.41	3.62	46.42	8.60	331.92
Clase 6	18.74	230.33	181.85	2.25	37.28	552.78	101.77	0.11	8.48	29.23	4.82	25.65	2.23	1,195.52
Clase 7	24.12	89.84	61.58	6.91	12.44	45.70	77.56	0.02	0.86	6.64	0.05	5.29	0.38	331.38
Clase 8	83.07	80.64	3.11	1.55	4.52	18.77	1.80	504.50	16.36	127.44	308.27	281.52	432.54	1,864.08
Clase 9	20.75	9.72	2.77	11.79	2.90	6.03	0.79	0.00	204.17	63.79	1.85	0.97	0.56	326.07
Total ha	553.88	1,214.53	599.15	97.22	215.66	1,361.36	441.41	510.80	492.82	777.76	352.19	480.13	465.57	7,562.48

En esta matriz se analizó principalmente la Clase 8 que es la que representa el espejo de agua de la laguna para 1985, respecto a los cambios en el 2000. Los colores en la matriz indican lo siguiente:

Cuadro 6.Descripción matriz de cambio 1985-2000

Clases	No cambio
Clase 8	No cambio para Lamina agua sedimentos
C-8 a C-10	Aporte Lamina agua sedimentos-1985 a Pantano2-2000
C-8 a C-11	Aporte Lamina agua sedimentos-1985 a Lamina agua-2000
C-8 a C-12	Aporte Lamina agua sedimentos-1985 a Vegetación laguna1-2000
C-8 a C-13	Aporte Lamina agua sedimentos-1985 a Vegetación laguna2-2000
Tot C-8 1985	Total Lamina agua sedimentos-1985
Tot C-8 2000	Total Lamina agua sedimentos-2000
Clase 11	Total Lamina agua-2000

Teniendo en cuenta lo anterior, el cambio en el espejo de agua es el siguiente:

- Espejo de agua 1985: **1,864.08 ha** (total Clase 8-1985)
- Espejo de agua 2000: **862.99 ha** (total Clase 8-2000+total Clase 11-2000)

Cuadro 7.Matriz de cambio 2000-2015

2000\2015	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5	Clase 6	Clase 7	Clase 8	Clase 9	Clase 10	Clase 11	Clase 12	Clase 13	Total ha
Clase 1	138.31	4.05	30.98	2.39	28.96	130.23	0.56	0.00	84.98	21.02	15.19	96.10	1.13	553.88
Clase 2	78.17	37.40	96.44	4.34	75.89	661.64	4.55	0.00	55.80	57.60	23.06	118.01	1.64	1,214.53
Clase 3	31.39	43.81	40.25	0.63	27.68	394.72	4.68	0.00	8.42	23.56	0.95	23.06	0.00	599.13
Clase 4	29.27	0.56	5.24	1.28	4.25	21.49	0.07	0.00	18.43	6.55	0.11	9.97	0.00	97.22
Clase 5	11.18	4.79	18.52	1.42	23.04	104.94	0.70	0.00	13.66	13.84	2.14	21.42	0.02	215.66
Clase 6	33.57	50.27	121.68	1.80	42.62	961.38	3.26	0.00	23.13	40.91	8.15	74.59	0.05	1,361.39
Clase 7	4.55	21.83	33.93	0.52	53.73	272.48	11.43	0.00	3.74	18.50	0.43	20.25	0.05	441.41
Clase 8	22.95	0.00	7.40	0.36	45.25	55.98	0.02	0.00	77.00	0.02	82.87	187.65	31.30	510.80
Clase 9	46.94	0.43	11.70	8.53	18.45	52.63	0.11	0.00	265.55	52.38	3.69	32.00	0.38	492.77
Clase 10	107.46	1.60	39.67	6.77	43.90	176.54	0.34	0.00	173.86	49.93	23.58	150.39	3.78	777.80
Clase 11	7.09	0.99	10.22	0.43	25.94	75.15	0.02	0.00	49.50	0.68	76.68	93.89	11.61	352.19
Clase 12	15.95	1.06	17.39	1.91	24.68	103.16	0.32	0.00	30.49	7.52	172.35	104.27	1.04	480.13
Clase 13	10.78	0.23	8.26	1.24	26.03	77.56	0.00	0.00	59.72	0.61	61.56	216.16	3.44	465.57
Total ha	537.59	167.00	441.68	31.61	440.42	3,087.88	26.06	0.00	864.25	293.09	470.75	1,147.75	54.43	7,562.48

En esta matriz se analizó la Clases 8 y la Clase 11 que son las que representan el espejo de agua de la laguna para el 2000, respecto a los cambios en el 2015. Los colores en la matriz indican lo siguiente:

Cuadro 8. Descripción matriz de cambio 2000-2015

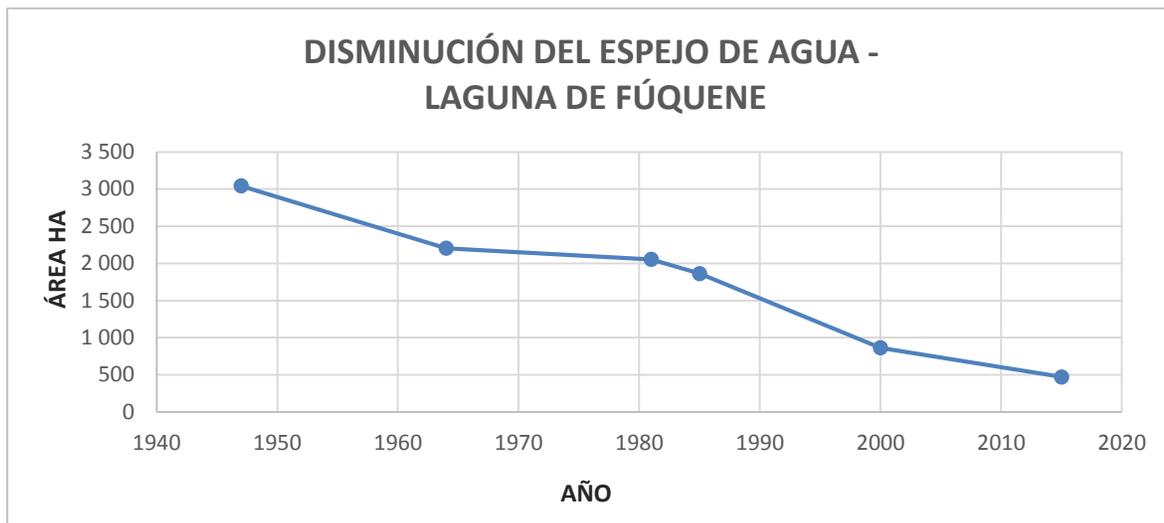
Clases	No cambio
Clase 8	No cambio para Lamina agua sedimentos
Clase 11	No cambio para Lamina agua
C-8 a C-6	Aporte Lamina agua sedimentos-2000 a Cultivo-2015
C-8 a C-9	Aporte Lamina agua sedimentos-2000 a Pantano-2015
C-8 a C-11	Aporte Lamina agua sedimentos-2000 a Lamina agua-2015
C-8 a C-12	Aporte Lamina agua sedimentos-2000 a Vegetación laguna1-2015
C-8 a C-13	Aporte Lamina agua sedimentos-2000 a Vegetación laguna2-2015
C-11 a C-6	Aporte Lamina agua-2000 a Cultivo-2015
C-11 a C-9	Aporte Lamina agua-2000 a Pantano-2015
C-11 a C-12	Aporte Lamina agua-2000 a Vegetación laguna1-2015
C-11 a C-13	Aporte Lamina agua-2000 a Vegetación laguna2-2015
C-12 a C-11	Aporte Vegetación laguna1-2000 a Lamina agua-2015
C-13 a C-11	Aporte Vegetación laguna2-2000 a Lamina agua-2015
Tot C-8 2000	Total Lamina agua sedimentos-2000
Tot C-8 2015	Total Lamina agua sedimentos-2015
Tot C-11 2000	Total Lamina agua-2000
Tot C-11 2015	Total Lamina agua-2015

Teniendo en cuenta lo anterior, el cambio en el espejo de agua es el siguiente:

- Espejo de agua 2000: **862.99 ha** (total Clase 8-2000+total Clase 11-2000)
- Espejo de agua 2015: **470.75 ha** (total Clase 8-2015+total Clase 11-2015)

Del análisis de las matrices de cambio, fue posible estimar el área del espejo de agua para las fechas de 1985, 2000 y 2015, adicionalmente en la revisión de los antecedentes se encontraron datos de las áreas del espejo de agua para las fechas de 1947, 1964 y 1981 [11], con esta información se generó la siguiente gráfica de tendencia de disminución del espejo de agua:

Figura 21. Tendencia disminución del espejo de agua



Cuadro 9. Porcentajes de disminución del área del espejo de agua referencias externas

Año	Área (ha)	% Disminución
1947	3042	0.00
1964	2203	27.58
1981	2053	32.51
1985	1864	38.72
2000	863	71.63
2015	471	84.52

Cuadro 10. Porcentajes de disminución del área del espejo de agua en el periodo de estudio

Año	Área	% Disminución
1985	1864	0.00
2000	863	53.70
2015	471	45.42

### 6.1.5 Tratamiento Geoestadístico de Información Meteorológica

Para determinar el cambio en cuanto a las variables de meteorológicas de evaporación, precipitación y temperatura, se generaron gráficos de comportamiento anual para la estación del IDEAM identificada como 24011100, Isla del Santuario, la cual se encuentra dentro de la laguna.

Figura 22. Distribución de Temperatura promedio anual- Isla del Santuario

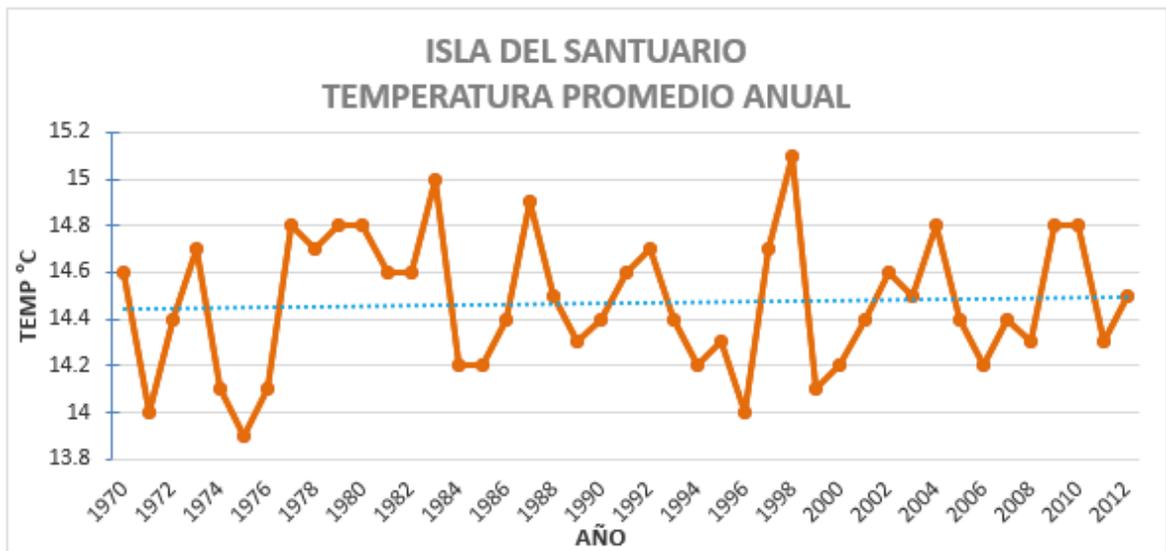


Figura 23. Distribución de Evaporación total anual- Isla del Santuario

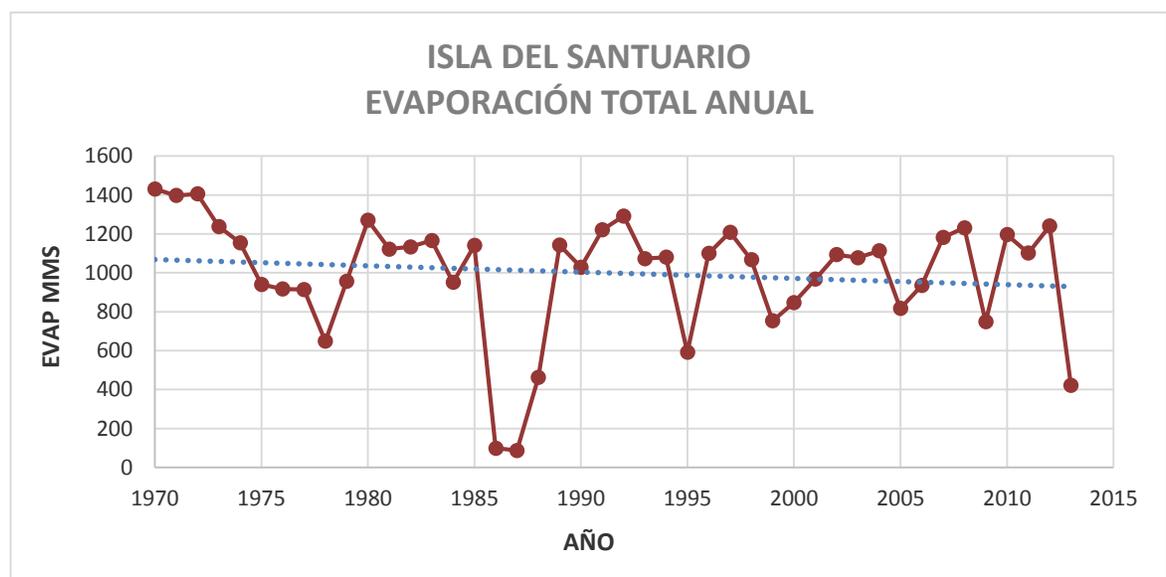
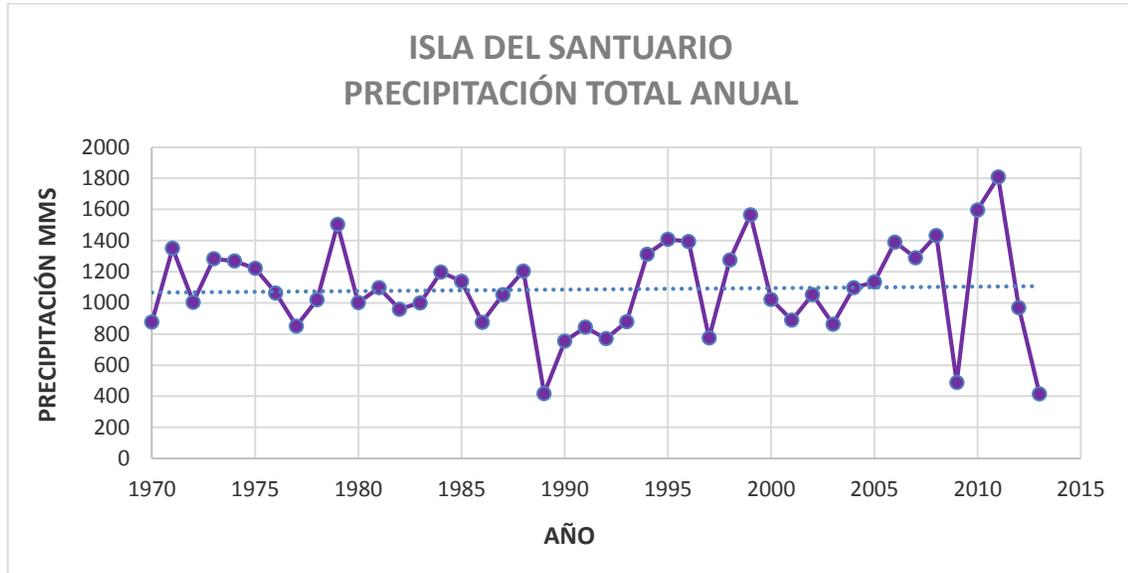
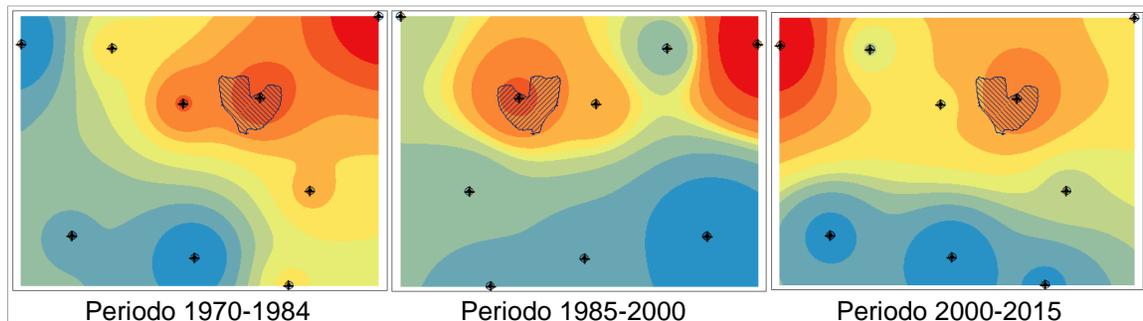


Figura 24. Distribución de Precipitación total anual- Isla del Santuario



De acuerdo a la información entregada por el IDEAM se realizó la interpolación por el método IDW para la generación de isólinas de precipitación.

Figura 25. Isólinas de Precipitación para el área de estudio



## 6.2 DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Con el Modelo Digital del Terreno generado para el área de estudio, se logró identificar las rutas de escorrentía y el área colindante del cuerpo hídrico, de esta manera se obtuvo un criterio adicional para la caracterización y análisis de coberturas, además de tener una visión general de los componentes físicos.

Al realizar la corrección geométrica en el preprocesamiento se asegura que se evalúen los mismos objetos para la ventana temporal de estudio (imagen 1985, 2000 y 2015). El realce y mejoramiento son etapas importantes en el pre-

procesamiento debido a que permite sacar el mayor provecho a la información raster y facilita el procesamiento; el paquete de Erdas ofrece un gran número de herramientas para el preprocesamiento espectral y radiométrico, cuya aplicación depende del resultado esperado o lo que se desee identificar, en este caso se aplicaron las herramientas de Tasseled Cap y Haze Reduction que dieron un efecto de atenuación a la sombras, homogenizaron y diferenciaron las coberturas.

El proceso de tomas de firmas espectrales se hizo principalmente en la composición de falso color y para la mejor identificación de algunas coberturas se utilizaron composiciones alternas, un buen resultado en la clasificación supervisada depende de una correcta caracterización de las coberturas. Para la imagen del año 1985 se obtuvieron diez (10) clases de coberturas y para las imágenes de los años 2000 y 2015 se obtuvieron catorce (14) clases, esta diferencia corresponde a que en las imágenes de los periodos más recientes tienen un cubrimiento mínimo de nubes, una cobertura de lámina de agua sin sedimentos, un tipo de pantano circundante a la laguna y dos tipos de vegetación al interior de la laguna.

En el ejercicio de comparación de las matrices se identificó un cambio drástico en la disminución del espejo de agua de casi la mitad en cada uno de los periodos comparados.

El comportamiento de la temperatura media anual en la Isla del Santuario presenta años de mínimos y máximos, teniendo temperaturas mínimas hasta de 13.9°C durante los años 1970, 1975 y 1997; contrario a la presentación de las temperaturas más altas registradas durante los años 1984, 1988 y 1998, superando los 15° C; sin embargo no se logró estandarizar una tendencia durante el periodo de estudio con la cual se concluyera que las temperaturas en la zona afectan el cuerpo hídrico directamente.

En cuanto a la distribución de la evaporación total anual, se logró determinar que presentó una constante de 1,000 mms con tendencia a la baja, aunque se debe tener en cuenta que durante los años 1986 y 1987 se obtuvo un valor de evaporación mínimo durante el periodo de estudio, equivalente a 150 mms en total.

En cuanto a la precipitación total anual, se presentó una tendencia de aproximadamente 1,100 mms sobre la estación de estudio, sin embargo se presentaron altos niveles de precipitación durante los años 1979, 2000 y 2011; inverso a los años 1989, 2009 y 2013.

A partir de las isóneas de precipitación se logró notar que en los diferentes periodos no se encontró un comportamiento de disminución en cuanto a la precipitación en el área de estudio.

## 7. CONCLUSIONES

- La Laguna de Fúquene es un cuerpo hídrico que ha sufrido cambios drásticos en su entorno teniendo en cuenta que para el momento que se empieza a determinar su área en el año 1933 esta era de aproximadamente 10,265 ha y el cálculo del espejo de agua actual de acuerdo al análisis desarrollado es de 471 ha.
- A partir de las imágenes del año 2000 y 2015 se logró evidenciar una dinámica en la localización de la vegetación al interior de la laguna y de su espejo de agua, esto se puede dar debido a la dirección e intensidad de los vientos.
- El buchón es una planta invasiva que no permite el proceso normal de fotosíntesis en el lecho lagunar al limitar la entrada de la luz solar, afectando la biodiversidad de la laguna.
- El área del espejo de agua de la laguna disminuyó del año 1985 al 2000 en 1,001 ha, es decir un 53.7% y del año 2000 al 2015 en 392 ha equivalente al 45.4%. Teniendo en cuenta esta información se puede inferir que la pérdida del espejo de agua es muy acelerada perdiendo casi la mitad de su área cada quince años de manera progresiva, de mantenerse las condiciones de uso y manejo actuales y no tomarse las medidas adecuadas en un periodo similar, es decir de treinta años, este ecosistema podrá aumentar su velocidad de degradación e incluso desaparecer.
- Teniendo en cuenta las referencias externas, la laguna contaba con 3,042 ha para el año 1947, tomando como base para la medición dicha área, el espejo de agua presentó una disminución del 38% en el año 1985, 71% en el año 2000 y un 84% a la fecha actual.
- Las herramientas geoinformáticas se constituyen en medios muy poderosos para la validación de eventos científicos, evaluación de la dinámica terrestre y brindan un soporte técnico para la toma de decisiones.
- Con las variables ambientales no se puede inferir que la desecación del cuerpo de agua se debe a los eventos climáticos y/o al calentamiento global, esto teniendo en cuenta que la tendencia de las variables de estudio (evaporación, precipitación y temperatura) no presentaron cambios significativos, además se identificó que los modelos climáticos son muy complejos debido a que tienen en cuenta muchas variables estocásticas.

- Se ha podido evidenciar que la disminución del ecosistema se ha dado en primera medida por la intervención antrópica desmedida en prácticas agropecuarias y al mal manejo de residuos que conllevan a la contaminación del ecosistema.

## 8. RECOMENDACIONES

- Generar planes de manejo que mitiguen la proliferación del buchón, especie identificada como uno de las principales causas de alteración del espejo de agua.
- Realizar trabajo de campo para identificar detalladamente los tipos de vegetación que presentan una dinámica dentro de la laguna en relación con el espejo de agua y de las coberturas en el área circundante al perímetro de la laguna.
- Las autoridades ambientales deberán establecer las medidas de control respecto a los usos del suelo que se determinen en pro de la recuperación y conservación de la laguna, como por ejemplo las prácticas agropecuarias adecuadas, recuperación de terreno y que a su vez impidan la invasión, además de un adecuado manejo de residuos.
- Generar planes sociales que sensibilicen a la población en cuanto a los riesgos a los que se exponen al generar conflictos de uso del suelo, en cuanto a sequías, inundaciones y subsidencia del terreno.
- Para la rápida recuperación del espejo de agua sería importante realizar un plan de manejo de reasentamiento de la población del valle lagunar y de aquella que hace aprovechamiento agropecuario sobre la misma área, esto con el fin de remover los canales perimetrales para que los respectivos drenajes fluyan a la laguna, es posible que al generarse más corriente dentro del cuerpo hídrico la vegetación invasora no se logre asentar.

## BIBLIOGRAFÍA

- [1] Universidad de Jaén, «Universidad de Jaén,» 2015. [En línea]. Available: <http://coello.ujaen.es/asignaturas/teledeteccion/glosario.htm>.
- [2] Geomática al día, «Geomática al día,» 2 04 2013. [En línea]. Available: [http://geomatica-al-dia.blogspot.com.co/2013/04/firmas-espectrales\\_2.html](http://geomatica-al-dia.blogspot.com.co/2013/04/firmas-espectrales_2.html).
- [3] Instituto Geográfico Agustín Codazzi, Manual de Prácticas de Percepción Remota, Parte 1, Bogotá, 2012.
- [4] Instituto Espacial, «Instituto Espacial,» 04 05 2009. [En línea]. Available: [http://www.institutoespacial.gob.ec/sigrena/descargas\\_sigrena/GLOSARIO%20SENSORES%20REMOTOS\\_V2.pdf](http://www.institutoespacial.gob.ec/sigrena/descargas_sigrena/GLOSARIO%20SENSORES%20REMOTOS_V2.pdf).
- [5] Revistes Catalanes amb Accés Obert, «Revistes Catalanes amb Accés Obert,» 2009. [En línea]. Available: <http://www.raco.cat/index.php/ect/article/viewFile/199932/267375&sa=U&ei=IEcRUeOWG-6R0QW1t4GADQ&ved=0CBkQFjAB&usq=AFQjCNGrAi0edTxgUUq8JXu8HNEMhtsupg>.
- [6] Alawa Forestal, «Alawa Forestal,» 2015. [En línea]. Available: [http://www.alawaforestal.com/?page\\_id=281](http://www.alawaforestal.com/?page_id=281).
- [7] A. Torres, «Revisión de Fúquene,» *El Espectador*, 21 11 2014.
- [8] Observatorio Ambiental CAR, 14 02 2014. [En línea]. Available: [www.observatorioambientalcar.co/vercaso.php?id=41](http://www.observatorioambientalcar.co/vercaso.php?id=41).
- [9] Alcaldía de Fúquene, «Alcaldía de Fúquene- Cundinamarca,» 2015. [En línea]. Available: <http://www.fuquene-cundinamarca.gov.co/index.shtml>.
- [10] R. d. C. D. N. d. P. Consejo Nacional de Política Económica y Social, «www.dnp.gov.co,» 7 12 2006. [En línea]. Available: <https://pwh.dnp.gov.co/Portals/0/archivos/documentos/Subdireccion/Conpes/3451.pdf>.

- [11] Alcaldía de Fúquene, «Plan de Ordenamiento Territorial Ambiental énfasis en Manejo Ambiental,» Fúquene, 1999.
- [12] E. Chuvieco, Fundamentos de la Teledetección Espacial (2da Ed), Madrid: Ediciones Rialp S.A., 1995.
- [13] Universidad de Murcia, «Universidad de Murcia,» 2015. [En línea]. Available: [http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario\\_10.pdf](http://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario_10.pdf).
- [14] Sistema de Información Ambiental de Colombia- SIAC, «Sistema de Información Ambiental de Colombia- SIAC,» 2015. [En línea]. Available: <https://www.siac.gov.co/contenido/contenido.aspx?catID=904&conID=1449>.
- [15] S. Bustamante Sanint, «Modelado de especies invasoras, caso de estudio: pérdida del espejo de agua en la laguna de Fúquene por invasión del buchón (*Eichhornia crassipes*).,» Pontificia Universidad Javeriana, Bogotá, 2010.