

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO**  
**ESCUELA DE POSGRADO**  
**UNIDAD DE POSGRADO FACULTAD DE INGENIERÍA**  
**ELÉCTRICA Y ELECTRÓNICA**



**“MODELAMIENTO MATEMÁTICO Y USO DE S.I.G PARA  
LA ESTIMACIÓN DE LA REDUCCIÓN DEL VOLUMEN DE  
AGUA EN LA LAGUNA ARICOTA, REGION TACNA”**

**TESIS PARA OPTAR EL GRADO ACADÉMICO DE DOCTOR  
EN INGENIERÍA ELÉCTRICA**

ANIBAL JUAN ESPINOZA ARANCIAGA

ASESOR: Dr. ADAN ALMIRCAR TEJADA CABANILLAS

Callao, 2022

PERÚ



## **HOJA DE REFERENCIA DEL JURADO Y APROBACIÓN**

### **MIEMBROS DEL JURADO**

<b>Dr.</b>	<b>: Marcelo Nemesio DAMAS NIÑO</b>	<b>PRESIDENTE</b>
<b>Dr.</b>	<b>: Santiago Linder RUBIÑOS JIMENEZ</b>	<b>SECRETARIO</b>
<b>Dr.</b>	<b>: Nicanor Raúl BENITES SARA VIA</b>	<b>MIEMBRO</b>
<b>Dr.</b>	<b>: Adán Almircar TEJADA CABANILLAS</b>	<b>ASESOR</b>

**ACTA** : **003-2022**

**Nº DE LIBRO** : **1**

**FOLIO** : **116**

**FECHA DE APROBACIÓN** : **07 de abril del 2022**

**RESOLUCIÓN DIRECTORAL** : **016-2022-DUPFIEE**

## DEDICATORIA

A mi **amada esposa María Elena**, mi compañera eterna, quien supo sostener nuestro hogar durante el tiempo que estuve asistiendo a mis clases doctorales en Lima. Tú sabes lo que tuvimos que pasar para cumplir con esta meta tan importante. Gracias amor, te amo.

A mis princesas **Yasmin y Luz Mariana**, quienes fueron un apoyo extraordinario en el hogar cuando más las necesitaba.

A **mi papá Juan** quien está en el cielo. A ti papá te dedico esta tesis, porque me enseñaste a nunca darme por vencido ante la adversidad.

Y a **mi mamá Alejandrina**, la fuente de mi inspiración. Este logro es para ti mamá, porque lo que soy ahora te lo debo a ti. Tu amor por nuestra familia trascenderá por la eternidad.

## AGRADECIMIENTO

Agradezco profundamente a todos los que hicieron posible el desarrollo de este trabajo de investigación:

Agradecer de manera especial al **Dr. Herber Grados Gamarra** mi profesor y primer asesor de tesis, quien con su experiencia profesional me supo orientar en el desarrollo de la tesis; a la **Ing. Carmen Román** por su asesoramiento que fue de gran ayuda.

Agradecer a mis hermanos y hermanas **Edith, Tula y Miguel** por ser un constante recordatorio y apoyo para culminar con esta investigación. De manera muy especial, agradecer a mi hermana **Ruth** por todo su apoyo durante mi permanencia en Lima. Hermana, este logro también es tuyo.

Agradecer a mi **sobrina Stephanie**, quien, a pesar de la pandemia, estuvo siempre dispuesta a apoyarme para que este trabajo llegue a buen puerto. Gracias Chevi.

Agradecer a **Dios**, porque sin su amor y protección hacia mi familia cuando tenía que ausentarme de mi hogar, no hubiese sido posible obtener mi Grado de Doctor.

# ÍNDICE

ÍNDICE .....	1
TABLA DE FIGURAS.....	4
TABLA DE CONTENIDO .....	6
RESUMEN .....	7
ABSTRACT .....	8
RESUMO .....	9
INTRODUCCIÓN .....	10
I    PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....	11
1.1. Descripción de la realidad Problemática.....	11
1.2. Formulación del problema.....	12
1.2.1 Problema general .....	12
1.2.2 Problemas específicos .....	12
1.3. Objetivos de la investigación.....	13
1.3.1. Objetivo general .....	13
1.3.2. Objetivos específicos .....	13
1.4. Limitantes de la investigación .....	13
1.5. Justificación .....	14
II   MARCO TEÓRICO.....	15
2.1. Antecedentes de estudio.....	15
2.1.1 Antecedentes internacionales .....	15
2.1.2 Antecedentes nacionales .....	20
2.2. Bases filosóficas de la investigación.....	26
2.2.1 Bases ontologicas de la investigación .....	28
2.2.2. Bases epistemológicas de la investigación .....	29
2.2.3 Bases metodológicas de la investigación .....	30
2.2.4 Base axiológica de la investigación .....	30
2.2.5 Base ética de la investigación.....	31
2.3. Marco Conceptual .....	31
2.3.1. Modelos matemáticos .....	31

2.3.2. Teledetección o Percepción Remota.....	33
2.3.3. Sistemas de Información Geográfica (SIG).....	35
2.3.4. Teledetección o percepción remota.....	44
2.3.5. Imágenes Satelitales Landsat.....	49
2.4. Definición de Términos básicos.....	56
III HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	58
3.1. Hipótesis.....	58
3.1.1. Hipótesis general.....	58
3.1.2. Hipótesis específicas.....	58
3.2. Definición conceptual de variables.....	58
3.2.1. Variables independientes.....	58
3.2.2. Variable dependiente.....	59
3.3. Operacionalización de variables.....	59
3.3.1. Variable Independiente.....	59
3.3.2. Variable Dependiente.....	60
IV DISEÑO METODOLÓGICO.....	61
4.1. Tipo y diseño de investigación.....	61
4.2. Método de la investigación.....	68
4.3. Población y muestra.....	68
4.4. Lugar de estudio y período desarrollado.....	68
4.4.1. Delimitación espacial.....	68
4.4.2. Delimitación temporal.....	69
4.4.3. Delimitación social.....	69
4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información.....	69
4.5.1. Técnicas de recolección de los datos.....	69
4.5.2. Instrumentos para la recolección de los datos.....	70
4.5.3. Procedimiento de recolección de datos.....	70
4.6. Análisis y procesamiento de datos.....	82
4.6.1. Procesamiento estadístico Digital de la Imagen.....	82
4.6.2. Procesamiento estadístico de parámetros morfométricos.....	84
4.6.3. Procesamiento estadístico para NDVI.....	85
4.6.4. Análisis multiespectral.....	86

4.6.5. Determinación de la reducción del volumen de la laguna .....	88
V RESULTADOS .....	90
5.1 Resultados descriptivos (Parámetros Morfométricos) .....	90
5.2 Resultados inferenciales (Determinación de NDVI) .....	94
5.3 Análisis multiespectral .....	95
5.4 Determinación de la reducción del volumen de la laguna .....	96
VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS .....	99
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados .....	99
6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares .....	101
6.3 Responsabilidad ética .....	102
6.4 Reporte de problemas pendientes para nuevas investigaciones .....	103
CONCLUSIONES .....	104
RECOMENDACIONES .....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	106
ANEXO 1: Matriz de consistencia .....	110
ANEXO 2: Conversión de ND a Radiancia .....	111
ANEXO 3: Conversión de Radiancia a Reflectancia .....	117
ANEXO 4: Índice de diferencia normalizado (NDVI) .....	123
ANEXO 5: Índice de diferencia normalizado (NDVI) Landsat 8 .....	124
ANEXO 6: Firmas espectrales .....	132
ANEXO 7: Índice de Kappa .....	140

## TABLA DE FIGURAS

Figura 1 Convergencia de las líneas de trabajo en un SIG.....	36
Figura 2 Elementos que forman el sistema SIG.....	38
Figura 3 Una división distinta del sistema SIG.....	39
Figura 4. Esquema de la modelización de datos en SIG. ....	43
Figura 5 Variación temporal del índice NDVI: a) 1982; b) 2007; c) 2019.....	62
Figura 6 Conversión de ND a Radiancia de las imágenes LANDSAT banda 3, según fecha de adquisición: a) 06/10/1992; b) 21/09/1990; c) 16/08/2007; d) 29/07/2015. ....	62
Figura 7 Conversión de Radiancia a Reflectancia de las imágenes LANDSAT considerando la banda 3, según fecha de adquisición: a) 06/10/1992; b) 21/09/1990; c) 16/08/2007; d) 29/07/2015; e) 08/07/2019.. ....	63
Figura 8 Procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT adquiridas el 08/07/2019 considerando las bandas 3 y 4, para determinar el índice de vegetación NDVI del año 2019.. ....	64
Figura 9 Esquema funcional para calcular el volumen de la laguna de Aricota	67
Figura 10 Ubicación de la laguna de Aricota, en la zona de estudio.. ....	69
Figura 11 Imagen Landsat, correspondiente al path (002) y row (072). ....	71
Figura 12 . Imagen Landsat cortada en la zona de estudio.. ....	72
Figura 13 . Corrección del bandeado de la imagen Landsat ETM+. ....	73
Figura 14 Curvas de nivel, usando el software Global Mapper v.20 ....	76
Figura 15 Modelo de Elevación Digital (DEM) de la laguna de Aricota.. ....	77
Figura 16 Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI) de la laguna de Aricota. ....	79
Figura 17 Relación de píxel con la máscara de la laguna de Aricota. ....	80
Figura 18 Formato vector de la laguna, para determinar su área. ....	80
Figura 19 Red Irregular de Triangulo (TIN), para determinar el volumen de la laguna de Aricota. ....	81
Figura 20 Análisis estadístico de la reflectancia en la laguna de Aricota, observando su reflectividad. ....	83
Figura 21 Valor de píxel en una imagen con corrección de reflectancia. ....	83
Figura 22 Área de la laguna en función del tiempo.....	90

Figura 23 Perfil longitudinal de la laguna de Aricota.....	91
Figura 24 Perfil Transversal de la laguna de Aricota.....	92
Figura 25 Curva hipsométrica de los años 1990(a), 2007(b), 2015(c) y 2019(d). .....	94
Figura 26 Variación del volumen de la laguna de Aricota en función del tiempo. .....	97
Figura 27 Variación del volumen de la laguna de Aricota en función del nivel altimétrico.....	98

## TABLA DE CONTENIDO

Tabla 1 Datos estadísticos de ND a radiancia .....	28
Tabla 2. Características de imagen para Landsat 1, 2 y 3.....	50
Tabla 3. Características de imagen Landsat 4 y 5 .....	51
Tabla 4. Característica de imagen para Landsat 7 – ETM+ .....	52
Tabla 5. Imágenes satelitales, procesadas en el estudio.....	71
Tabla 6. Sun Elevation de las imágenes Landsat .....	75
Tabla 7 Datos estadísticos de radiancia a reflectancia .....	82
Tabla 8. Datos estadísticos de radiancia a reflectancia .....	84
Tabla 9. Análisis estadístico de los parámetros morfométricos .....	84
Tabla 10. Análisis Estadístico de NDVI .....	85
Tabla 11. Rango de NDVI de la zona de estudio .....	85
Tabla 12. Imágenes satelitales Landsat 8 .....	86
Tabla 13. Índices de Kappa respecto a la fuerza de concordancia.....	87
Tabla 14. Proyección de área y perímetro de la laguna.....	92
Tabla 15. Validación del modelo con el índice de Kappa.....	95
Tabla 16 Proyección del volumen de la laguna en función de tiempo .....	96
Tabla 17 Correlaciones de Pearson .....	99

## RESUMEN

En el presente trabajo de investigación, se desarrolló una metodología que combina la aplicación de un modelamiento matemático y el uso de los Sistemas de Información Geográfica (SIG) para la estimación de la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna. Se planteó la metodología basada en tres aspectos: la primera, recopilación y procesamiento de las imágenes satelitales provenientes del consorcio espacial LANDSAT; segundo, el procesamiento estadístico de las imágenes y el análisis de datos obtenidos; y tercero, el análisis multiespectral y multitemporal de las imágenes satelitales para la determinación del volumen de agua de la laguna. Haciendo uso del análisis de regresión lineal simple, se determinó la reducción del volumen de la laguna de Aricota. Del análisis multitemporal, se logró determinar que la línea de tendencia de la reducción del volumen de la laguna es de  $7.9 \text{ Hm}^3/\text{año}$ , presentando un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.49$ , determinando así que la laguna presenta una notable reducción. Del análisis multiespectral, obtuvimos que el índice de Kappa fluctuó entre valores de 0.76 y 0.95, que según la tabla de los valores de Kappa nos indica que la metodología es altamente confiable. De las conclusiones, se evidenció que existe una correlación alta entre los parámetros morfométricos y la reducción de la laguna, ya que se determinó un grado de significancia de  $p < 0.05$ .

**Palabras claves:** Modelo matemático; SIG; Reducción de volumen.

## **ABSTRACT**

In the present research work, a methodology was developed that combines the application of mathematical modeling and the use of Geographic Information Systems (GIS) to estimate the reduction of water volume in the Aricota lagoon, Tacna region. The methodology based on three aspects was proposed: the first, compilation and processing of satellite images from the LANDSAT space consortium; second, the statistical processing of the images and the analysis of the data obtained; and third, the multispectral and multitemporal analysis of the satellite images to determine the volume of water in the lagoon. Using simple linear regression analysis, the volume reduction of the Aricota lagoon was determined. From the multitemporal analysis, it was possible to determine that the trend line of the reduction of the volume of the lagoon is  $7.9 \text{ Hm}^3 / \text{year}$ , presenting a coefficient of determination of  $R^2 = 0.49$ , thus determining that the lagoon presents a notable reduction. From the multispectral analysis, we obtained that the Kappa index fluctuated between values of 0.76 and 0.95, which according to the table of Kappa values indicates that the methodology is highly reliable. From the conclusions, it was evidenced that there is a high correlation between the morphometric parameters and the reduction of the lagoon, since a degree of significance of  $p < 0.05$  was determined.

**Keywords:** Mathematical model; GIS; Volume reduction.

## RESUMO

No presente trabalho de pesquisa, foi desenvolvida uma metodologia que combina a aplicação de modelagem matemática e o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG) para estimar a redução do volume de água na lagoa de Aricota, região de Tacna. A metodologia baseada em três aspectos foi proposta: o primeiro, compilação e processamento das imagens de satélite do consórcio espacial LANDSAT; em segundo lugar, o processamento estatístico das imagens e a análise dos dados obtidos; e terceiro, a análise multiespectral e multitemporal das imagens de satélite para determinar o volume de água na lagoa. Usando análise de regressão linear simples, foi determinada a redução de volume da lagoa de Aricota. A partir da análise multitemporal, foi possível determinar que a linha de tendência de redução do volume da lagoa é de 7.9 Hm<sup>3</sup> / ano, apresentando um coeficiente de determinação de  $R^2 = 0.49$ , determinando assim que a lagoa apresenta uma redução notável. A partir da análise multiespectral, obteve-se que o índice Kappa oscilou entre valores de 0.76 e 0.95, o que de acordo com a tabela de valores Kappa indica que a metodologia é altamente confiável. A partir das conclusões, evidenciou-se que existe uma alta correlação entre os parâmetros morfométricos e a redução da lagoa, uma vez que foi determinado um grau de significância de  $p < 0.05$ .

**Palavras chaves:** Modelo matemático; SIG; Redução de volume.

## **INTRODUCCIÓN**

Una de las grandes preocupaciones que muchos países presentan en la actualidad, son los efectos que produce el cambio climático producto de la explotación irracional de los recursos naturales y de una menor disponibilidad de estos recursos para sostener los medios de vida de sus poblaciones. Las aguas continentales, llámese ríos, lagos, lagunas, humedales y aguas subterráneas, se ven afectadas por actividades productivas y extractivas que se desarrollan utilizando el recurso hídrico de sus cuencas.

Las investigaciones orientadas en el conocimiento de los procesos físicos que se desarrollan en las aguas continentales y que utilizan la técnica del procesamiento digital de imágenes satelitales, han permitido desarrollar herramientas de suma utilidad para la determinación de la disponibilidad de sus recursos hídricos.

Esta Tesis Doctoral se delimita, conceptualmente, a la realización de estimaciones de la reducción del volumen de agua de la laguna de Aricota ubicada en la región Tacna. Para realizar las estimaciones en el tiempo, se propone la combinación de las siguientes técnicas: la aplicación del modelamiento matemático, el análisis e interpretación de imágenes provenientes de satélites de observación LANDSAT que usan sensores de percepción remota y el procesamiento de la información utilizando sistemas de información geográfica (SIG). La metodología desarrollada y presentada en este trabajo de investigación, permitirá realizar estimaciones de manera continua sobre la reducción del volumen de agua de la laguna de Aricota.

La información generada a partir de esta metodología, fortalecerá la base cognitiva y pretende contribuir en la toma de decisiones respecto a la planificación del manejo, aprovechamiento y conservación de los recursos hídricos de la región Tacna.

# **I PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA**

## **1.1. Descripción de la realidad Problemática**

Sabemos que el cambio climático es un desafío mundial y se requiere de un enorme esfuerzo para lograr reducirlo y combatirlo, debemos tener en cuenta que el calentamiento global es un efecto directo del cambio climático, desde la creación de la tierra esta ha pasado por procesos que han generado el aumento y descenso de temperatura, estos han sido de forma lenta durando miles o millones de años, se cree que a raíz de la Revolución Industrial, este proceso empieza su ascenso de manera rápida, debido al aumento y producción de recursos asociados a combustibles los cuales generan gases de efecto invernadero.

Las causas del cambio climático son diversas, pero en los últimos años ha generado un aumento de temperatura, esto asociado a sequías incendios, inundaciones, desglaciación, etc. Impactos que afectan de manera significativa en la naturaleza generando en muchos casos la escasez de agua superficial en las cuencas húmedas que, acompañados de una mala gestión del uso del recurso hídrico, generan una reducción en el volumen de agua de lagunas, lagos, ríos, etc.

La región Tacna no está exenta de este problema, un claro ejemplo de esto es la laguna Aricota, que se ha convertido en un recurso natural importante para el abastecimiento del recurso hídrico y para el desarrollo de la población. La laguna viene siendo explotada con fines hidro-energéticos y de abastecimiento al valle de Locumba, irrigación del valle de Ite y uso agua potable de la ciudad de Ilo. Cabe mencionar que parte de las disponibilidades hídricas del río Locumba provenientes de la laguna de Aricota, se pierden en el Océano Pacífico. Esto debido a la existencia de una incipiente infraestructura de almacenamiento hídrico y una sobreexplotación de la Laguna Aricota.

Según Estudios efectuados por el Proyecto Especial Tacna (PET), en 1967 "la laguna de Aricota tenía aproximadamente 804 MMC (millones de metros cúbicos) de agua y en octubre de 1992 sólo almacenaba 330 MMC,

descendiendo en 50 metros el nivel de la laguna.”, según esos mismos estudios a fines del 2013 la laguna de Aricota almacenaba 223 MMC (millones de metros cúbicos).

Por lo que se hace necesario proyectar o estimar en el tiempo, el decrecimiento del volumen de la laguna de Aricota, con la finalidad de tomar las medidas urgentes, considerado que es uno de los principales recursos hídricos empleados para la generación y suministro de energía eléctrica a la Región de Tacna, la laguna de Aricota no cuenta con un estudio que contenga una metodología que integre la aplicación de modelos matemáticos y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), los datos son tomados en campo, generando una demanda de tiempo y costo que se podrían reducir si se lograra implementar esta metodología.

## **1.2. Formulación del problema**

De la definición del problema, surgen las siguientes preguntas:

### **1.2.1 Problema general**

- ¿Es posible la realización de un modelamiento matemático y del uso de un SIG para la estimación de la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna?

### **1.2.2 Problemas específicos**

- ¿Cómo la determinación de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota incide en la reducción de su volumen?
- ¿Es posible realizar el análisis de variabilidad temporal y de la variabilidad espacial de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota, para estimar la variación de su volumen?
- ¿Es posible realizar el análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota, para la validación del modelo empleado en la determinación de su volumen?

### **1.3. Objetivos de la investigación**

#### **1.3.1. Objetivo general**

- Realizar un modelamiento matemático y hacer uso de un SIG para la estimación de la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna.

#### **1.3.2. Objetivos específicos**

- Determinar los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota y su incidencia en la reducción de su volumen.
- Realizar el análisis de variabilidad temporal y de variabilidad espacial de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota, para estimar la variación de su volumen.
- Realizar el análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota, para la validación del modelo empleado en la determinación de su volumen.

### **1.4. Limitantes de la investigación**

**En el aspecto teórico**, esta investigación se limitó a estimar la disminución del volumen de la laguna de Aricota, utilizando un Sistema de Información Geográfica e imágenes satelitales de observación de la constelación LANDSAT, que se encuentra administrado por la USGS (United States Geological Survey) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) de los Estados Unidos, que son de libre disponibilidad.

**En el aspecto temporal**, esta investigación limitó su trabajo de campo relativo al acopio de información de la base de datos del Proyecto Especial Tacna (PET), Órgano Desconcentrado del Gobierno Regional de Tacna quien administra los recursos hídricos de la Región, quienes proporcionaron los datos históricos de la variación del nivel de agua de la laguna de Aricota.

**En el aspecto espacial**, esta investigación se limitó a establecer la zona de estudio en la laguna de Aricota, que se encuentra ubicada en el Perú, en la Región Tacna, provincia de Candarave y distrito de Curibaya, a una altitud de 2,800 m.s.n.m.

### **1.5. Justificación**

La gestión de la Laguna de Aricota es importante para el departamento de Tacna tanto desde un punto de vista biofísico como socio - económico. La cuenca de la Laguna de Aricota está constituida por diversas subcuencas hidrográficas de diferentes características fisiográficas.

Los estudios realizados en la Laguna de Aricota, se desarrollaron utilizando las técnicas tradicionales de campañas de campo para la toma de medidas in situ. Estas técnicas demandaron alta inversión de recursos financieros y, además, para la continuidad de las series de datos era necesario que se formalicen programas de seguimiento de variables ambientales, lo cual no ocurrió.

A pesar de que muchos problemas ambientales presentes en la Laguna de Aricota están relacionados con este proceso, aún no se cuenta con información detallada sobre ellos. La razón por la que no se han hecho esfuerzos para estudiar en profundidad los aspectos mencionados, es la falta de recursos para realizar medidas de campo y de tecnología para realizar estimaciones.

El Proyecto planteado se delimita, conceptualmente, al modelamiento matemática o hidrológica y la interpretación de información obtenida en las imágenes satelitales y uso de los sistemas de información, han sido ampliamente utilizadas para investigar estos procesos.

La información aportada por este análisis puede ser utilizada para propósitos de estudios hidrológicos e hidráulicos en la Región de Tacna, para poder ser utilizadas en la ordenamiento y planeación del Territorial, así como también puede contribuir en la toma de decisiones de medidas de protección ambiental, que eviten el uso intensivo de sus recursos naturales en el área de influencia.

## II MARCO TEÓRICO

### 2.1. Antecedentes de estudio

#### 2.1.1 Antecedentes internacionales

**Valenzuela (2020)** en su trabajo de investigación titulado “Modelamiento con herramientas SIG y uso de sensores remotos de la variabilidad hídrica y sus efectos desencadenantes en las amenazas naturales de la cuenca del Río Totare, Colombia”, indica que:

El objetivo general que busca este trabajo es “modelar la variabilidad hídrica de la cuenca del río Totare y su correlación en las amenazas de movimientos en masa, avenidas torrenciales, sequia e incendios forestales, que contribuya a la toma de decisiones en la gestión del riesgo de desastres y la planificación ambiental” [...]. Uno de los objetivos específicos es “establecer el balance hídrico de la cuenca del río Totare a partir de las herramientas de sistema de información geográfica” (p.9).

La metodología empleada se basó en el análisis de la amenaza por influencia del cambio climático y la vulnerabilidad, que son dos componentes de las centrales del riesgo de desastres.

Utilizando la técnica de teledetección espacial y los sistemas de información geográfica, Valenzuela (2020) manifestó que:

Las variables meteorológicas de temperatura y precipitación fueron estimadas mediante el uso de sensores remotos y álgebra de mapas. Para los factores de transformación de la base ambiental se realizó una clasificación digital mediante técnicas no supervisadas y supervisadas, y el procesamiento digital de imágenes en distintas temporalidades respecto al cálculo del índice de vegetación (NDVI). La determinación de las condiciones hídricas se realizó mediante un balance hídrico espacial, así como el cálculo de la oferta hídrica neta,

la valoración de la demanda de agua por usos económicos y la integración de estas condiciones a través del índice de escasez hídrica, aplicando para ello herramientas de superposición espacial y cálculos entre las bases de datos asociadas a las entidades espaciales (p.1).

Finalmente, Valenzuela (2020) presentó una de las conclusiones a la que llega en este trabajo de investigación, donde afirma que:

Los resultados obtenidos demuestran en primer lugar el inmenso potencial que ofrece la teledetección y los sistemas de información geográfica en la identificación de patrones, tendencias y dinámicas asociadas a fenómenos climáticos, hídricos, ambientales y socioeconómicos, así como definir el conjunto de relaciones e interacciones que se establecen entre los fenómenos a través de vínculos de causa, consecuencia y dependencia permitiendo evidenciar de forma integral y sistémica las realidades asociadas a la geografía de la Cuenca del río Totare (p.88).

**Vilota (2019)** en su trabajo de titulación “Metodología para el cálculo de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica por medio de Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio – Río Mulaló (Yumbo - Colombia)”, manifestó que

El objetivo de este trabajo consiste en describir y medir la forma de la cuenca hidrográfica del Río Mulaló, [...], ante crecidas y riesgos que su dinamismo pueda provocar a la comunidad, desarrollando una metodología propuesta a través de Sistemas de Información Geográfica (p.18).

Para realizar un análisis cuantitativo físico de las cuencas hidrográficas, fue importante obtener los parámetros morfométricos que fueron utilizados como

indicadores. Junto con la localización espacial, constituyen el dato más útil para evaluar en forma preliminar las particularidades territoriales de una cuenca y esbozar características generales de la misma (Jardí, 1985). Para la determinación de los parámetros morfométricos, se utilizaron dos imágenes satelitales Landsat (Landsat TM, 032-377 y Landsat ETM+, 042-824) y un Modelo de Elevación Digital (DEM) SRTM3. Dichas imágenes fueron procesadas con el software ERDAS Imagine 9.2. Luego, a través del software ArcGis 10.4, se definió el área y los cursos de agua a través del DEM. Con los datos obtenidos se calcularon los principales parámetros de la morfometría de la red de drenaje y se generó el gráfico correspondiente a la curva hipsométrica (Vilota, 2019).

**Rodríguez et al. (2018)**, en el artículo de investigación titulado “Caracterización morfométrica de una laguna costera Neotropical (Ciénaga El Chino, Magdalena - Colombia)”, explicó que la morfometría de lagunas es esencial para la gestión de los recursos acuáticos y los ecosistemas limnético (Montoya Moreno, 2005). Se realizó un levantamiento batimétrico (2015 y 2017) en la ciénaga costera Neotropical El Chino (costado oriental de la Ciénaga Grande de Santa Marta) con el fin de conocer la distribución de profundidades y determinar los principales parámetros morfométricos (p.21). Se utilizó el software de análisis geo-científico SAGA GIS para hacer la interpolación de los datos de profundidad de la herramienta (module multilevel B-Spline interpolation), el cual es un algoritmo de interpolación espacial de datos dispersos, para estimar el volumen y el área superficial, construir las curvas hipsométricas y determinar las relaciones de profundidad-área-volumen (p.23). El cuerpo de agua mostró una profundidad máxima de 0,67 y 0,77 m, profundidad relativa muy baja (0,0201 y 0,0292), área de 8,62 km<sup>2</sup>, volumen de 4,30 Mm<sup>3</sup> y 5,248 Mm<sup>3</sup>, en 2015 y 2017, respectivamente. Longitud máxima de 5,89 km, ancho máximo de 2,14 km (p.23).

**Soria et al. (2017)** en el artículo “Análisis batimétrico de lagunas poco profundas mediante técnicas de teledetección y SIG: aplicación a la Laguna La Victoria”, describió la aplicación de técnicas de Teledetección, conjuntamente con el uso

de Sistemas de Información Geográfica (GIS), para determinar batimetrías de lagunas poco profundas, manifestó que:

La metodología propuesta es aplicada para determinar la batimetría de la laguna La Victoria, perteneciente a la cuenca de “Las Encadenadas”, en el sur de la provincia de Santa Fe. Se obtuvieron valores altimétricos distribuidos precisos empleando el modelo SRTM (Shuttle Radar Topography Mission), siendo el mismo calibrado y corregido. Además, con la finalidad de alcanzar una adecuada representación de las curvas altimétricas, mediante técnicas aplicadas a imágenes satelitales, seleccionadas de acuerdo a eventos climáticos variados, se realizaron máscaras de superficie de agua. A través de la vinculación de las máscaras de agua y las superficies altimétricas del modelo de elevación del terreno corregido, fueron determinadas las superficies asociadas con los correspondientes valores altimétricos. Consecuentemente, mediante la interpolación de las capas generadas se obtuvieron valores de altimetría escalados y se determinó la batimetría de la laguna. (p.51).

**Loza, Gamarra y Condori (2016)** en su investigación denominada “Caracterización morfo-batimétrica y estimación de sedimentos de la bahía interior de Puno, lago Titicaca, mediante tecnología SIG”, explicó que:

La investigación pretende aportar al conocimiento de las características morfobatimétricas de la bahía interior de Puno (BIP) y sus variaciones en el tiempo, así como sus variaciones sedimentarias, a través del uso de la tecnología SIG, cuya información posteriormente posibilite aportar lineamientos para la implementación de evaluaciones limnológicas y en la planificación de medidas de recuperación, restauración y gestión de este recurso

hídrico, el que actualmente se encuentra en un permanente deterioro ecológico y ambiental (p.239).

Loza et al. (2016) indicó además, que utilizando los Sistemas de Información Geográfica (GIS), se calculó la morfometría de los años 1975, 2010 y 2012. Con referencia al procesamiento de la información, señala que fue efectuado con ArcGis 10.0. Además, indica que la batimetría evaluada desde 1975 al 2012, “muestra en general un patrón básico, con ligeros cambios, debidos principalmente a los paulatinos procesos de sedimentación por el arrastre de material desde las fuertes pendientes adyacentes a la BIP para colmatar luego el lecho lacustre” (p. 242). Dentro de las conclusiones que presentaron, manifestaron que:

Se ha constatado algunos cambios en las características morfométricas de la BIP, principalmente en la batimetría y en la forma de la cubeta, desde el año 1975 hasta el 2012. Se aprecia una disminución en las profundidades máximas, la desaparición de algunas fosas profundas, así como la colmatación del lecho acuático con sedimentos cuyas fuentes pueden ser las aguas residuales y escorrentías (p. 246).

**Medina (2009)** en su tesis doctoral titulada “Modelos numéricos y teledetección en el Lago de Izabal, Guatemala” manifestó que el objetivo que persigue su investigación es “desarrollar una metodología que combine la aplicación de modelos numéricos, teledetección y datos de campo, que permita la estimación y seguimiento de procesos físicos del Lago de Izabal (el balance hídrico y el transporte de sedimentos)” (p.7). La metodología seguida en esta investigación consistió, “en primer lugar, en desarrollar la base de datos; posteriormente se realizó un análisis exhaustivo de la información existente en la base y por último, se complementó y actualizó esa información con productos de teledetección” (p. 57). Se estudió los factores que afectan los procesos hidrológicos del Lago de Izabal y se describió los datos utilizados, los cuales fueron: los datos

meteorológicos, los datos edafológicos, los datos geomorfológicos, los datos de uso de recursos y los datos de la morfometría.

Una de las conclusiones a las que llegó Medina (2009) en la investigación, fue que:

Las fluctuaciones de volumen de agua almacenada en el Lago de Izabal se estimaron mediante la combinación de variaciones relativas de nivel y área del lago. Las variaciones de nivel obtenidas con el sensor RA-2 estuvieron altamente correlacionadas con las medidas in situ ( $r^2 = 0.83$ ). Asimismo, las variaciones de superficie del lago determinadas a partir del sensor ASAR presentaron alta correlación con medidas de nivel in situ tomadas simultáneamente ( $r^2 = 0.9$ ). La determinación de variaciones de volumen se realizó mediante el desarrollo de curvas de calibración área/nivel/volumen (Medina, 2009, p.253).

### **2.1.2 Antecedentes nacionales**

**Velásquez (2020)** en su tesis doctoral titulada “Modelo de simulación dinámica aplicado al aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza, Manabí – Ecuador”, manifestó que el objetivo general que persiguió esta investigación fue “obtener un modelo de simulación dinámica para el embalse La Esperanza que incorpore, condiciones fisiográficas, proyecciones pluviales en la obtención de curvas guías de operación” (p.5). El tipo de investigación empleado fue Observacional-Retrospectiva-Longitudinal-Analítica. El proceso metodológico empleado constó de tres fases, cada fase está relacionado con un objetivo específico. En la primera fase se determinó las características morfológicas y fisiográficas de la cuenca aportante al embalse, empleando los sistemas de información geográfica “SIG” y batimetría por ecosonda; en la segunda fase se aplicó estadística descriptiva e inferencial para visualizar la data hidrológica histórica y en la tercera fase, se extrajeron varias curvas guías de operación por

medio del análisis estadístico de la data histórica. Finalmente, con las formulaciones matemáticas obtenidas en cada fase y aplicando el modelo el método de balance digital para embalses, se procedió a la simulación de curvas guías de operación. Los resultados permitieron visualizar las variaciones del embalse, estimando el comportamiento volumétrico conjuntamente con las entradas y salidas de caudales, además de las restricciones de operación de la presa.

**Béjar (2019)** en su tesis doctoral “Modelización matemática para determinar la contaminación orgánica del río Chambo, provincia de Chimborazo – Ecuador”, indicó que el objetivo general fue “establecer la modelización matemática del índice ICOMO para determinar el nivel de la contaminación orgánica en el río Chambo, Provincia de Chimborazo – Ecuador” (p.8). Como metodología se siguió las etapas de la modelización sugeridas por Dreyer: Identificación – suposiciones – construcción – análisis – interpretación – validación - implementación. Uno de los resultados que se obtuvo de utilizar la modelización, fue la similitud en el comportamiento de los coeficientes de determinación para cada parámetro respecto al tramo del río Chambo. Se llegó a la conclusión que el modelo matemático obtenido representa una herramienta para obtener información del nivel de contaminación orgánica del río Chambo.

**Castillo (2019)** en su tesis doctoral titulada “Procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI y los índices de vegetación, para la caracterización de las coberturas vegetales en los distritos de Cajamarca” indicó que el objetivo general fue “determinar mediante el procesamiento de las imágenes satelitales y los índices de vegetación su comportamiento a través del tiempo, diferenciar y cuantificar su variación de las diferentes coberturas vegetales en los distritos de Cajamarca” (p.8). Se trató de una investigación aplicada, de tipo cuantitativa, Se empleó un diseño longitudinal o temporal, que consistió en analizar los cambios que se daban a través del tiempo de cada índice de vegetación, empleando para la adquisición de datos la técnica de Teledetección Espacial, En la investigación se trabajó con imágenes

provenientes de los sensores, Landsat 5 TM, 7 ETM+ y 8 OLI, con diferentes espectros e insertando algoritmos de índices de vegetación, pudiendo discriminar los cambios ocurridos en los diversos periodos. Los resultados obtenidos mostraron que los índices de vegetación permitieron diferenciar los diferentes tipos de cobertura vegetal encontrados en la zona, siendo estas modificadas ocasionados por la presencia de la actividad minera.

**García (2018)** en su tesis de Maestría titulada “Implementación de una metodología para la identificación de bofedales usando datos imágenes satelitales Landsat - caso estudio: bofedal Chunal, cuenca alta del río Chillón” afirmó que la investigación tiene como objetivo la localización espacial y temporal de ecosistemas de bofedales de puna mediante técnicas de teledetección por satélite. La metodología empleada permitió la identificación y cuantificación del área de bofedales empleando imágenes satelitales Landsat. La Metodología 3 denominada Índice de bofedal (IDB), fue el resultado de dos Metodologías previas, Metodología 1 que estuvo basado en la firma espectral de los bofedales y Metodología 2 que estuvo basado en las propiedades biofísicas de los bofedales, tales como los índices de vegetación NDVI, índice de agua NDWI, índice de infrarrojos NDII e índice de sequía NDDI. Obtenidos los indicadores IDB, se construyeron mapas de la evolución espacial y temporal de la distribución de humedales. Los estudios de campo mostraron la existencia de un marcado contraste entre las propiedades de los ecosistemas de bofedales frente a las demás áreas existentes en la zona de estudio. Este marcado contraste se vió reflejado en las propiedades reflectivas de las coberturas, permitiendo su diferenciación a partir del análisis de imágenes satelitales.

**Córdova (2017)** en su tesis “Aplicación de la simulación hidrológica e hidráulica con sistemas de información geográfica para identificar las áreas de inundación del Río Huallaga en el tramo Huaylla - Ambo, 2017”, indicó que el objetivo de la presente tesis fue “proponer la correcta aplicación de la simulación hidrológica e hidráulica con sistemas de información geográfica para identificar las áreas de inundación del río Huallaga en el tramo Huaylla – Ambo” (p.8). La zona de

estudio a tomar en cuenta fue el tramo del río Huallaga comprendido entre las localidades de Huaylla y Ambo, tramo que no cuenta con un reporte histórico de las áreas de inundación. La solución a la problemática existente, fue el uso de los sistemas de información geográfica (SIG) en conjunción con los modelos matemáticos de simulación hidrológica e hidráulica, que permitieron identificar las áreas de inundación. El tipo de investigación desarrollada fue aplicada, el nivel de investigación fue descriptivo, explicativo con un diseño de investigación de campo. La metodología empleada para cumplir con los objetivos de esta investigación, se fundamentó en dos grupos; primero un análisis hidrológico, y segundo un análisis hidráulico para obtener las áreas de inundación del río. Se concluyó que de la interacción de la simulación hidrológica e hidráulica con sistemas de información geográfica (GIS), se pudo identificar las áreas de inundación del río Huallaga en el tramo Huaylla – Ambo, a través de una metodología sencilla y automatizada.

**Gaita (2017)** en su tesis de Maestría titulada: “Cuantificación e impacto del retroceso glaciar sobre los recursos naturales determinados mediante el SIG y teledetección - Microcuenca Lullán, Ancash – Perú”, manifestó que el objetivo general fue “caracterizar el estado actual de los recursos naturales en la microcuenca Lullán, utilizando la técnica de teledetección y el procesamiento de imágenes satelitales mediante los Sistemas de Información Geográfica”. Se recurrió al análisis multitemporal de 4 imágenes satelitales en el periodo de 27 años para cuantificar el retroceso glaciar. El trabajo de investigación se realizó en tres etapas: etapa de pre-campo, etapa de campo y etapa de gabinete. Como resultado, se pudieron elaborar los mapas de coberturas de los años: 1987, 2001, 2009 y 2014. Así mismo, permitió la elaboración de un modelo de riesgo para determinar que poblaciones y zonas son vulnerables a deslizamientos. lo cual ha permitido ante el retroceso glaciar, la formulación de alternativas de manejo y gestión integrada de la microcuenca.

**León (2016)** en su tesis doctoral titulada “Modelación matemática para estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*Solanum spp.*) en Riobamba –

Ecuador”, afirmó que en el presente trabajo se propuso determinar el requerimiento hídrico del cultivo de papa *solanum spp*, a partir de la modelación matemática, que tiene en cuenta la influencia hídrica en los parámetros biométricos, utilizando métodos de imágenes captadas con vehículos no tripulados controlados remotamente (drone), lisímetros de drenaje y métodos indirectos para el cultivo de papa en Riobamba–Ecuador. El diseño de la investigación fue de tipo experimental. Para la parte metodológica se utilizó 3 fases: fase 1 o fase de pre-campo, donde se realizó el acopio de la información; la fase 2 o fase de campo se dividió en dos fases: la primera etapa requirió de la construcción, calibración y selección de un lisímetro de drenaje. La segunda etapa consistió en la aplicación de los tratamientos con la siembra de papa y captura de imágenes con los sobrevuelos con drone, los cuales fueron 4, tomados cada 30 días después de la siembra. La fase 3 o fase de gabinete se consolidó y procesó los datos obtenidos. Como resultado, se logró establecer mapas de Kc obtenidos mediante la percepción remota, así como una descripción del proceso de evapotranspiración en el período de estudio. Del estudio se concluyó, que con la metodología empleada se han generado tres expresiones matemáticas que se consideran aptos para su utilización en la estimación de los requerimientos hídricos de papa.

**Quispe y Sullca (2015)** en su tesis titulada “Aplicación del Modelo Matemático Hec Ras para el Cálculo del Perfil Hidráulico del Río Ramis”, precisaron que el objetivo general de la investigación fue “determinar el comportamiento del perfil hidráulico de un tramo del Río Ramis con diferentes períodos de retorno para analizar las llanuras de inundaciones y evaluar los riesgos por inundaciones usando los programas HEC-RAS, ARCGIS y HEC-GEORAS” (p.5). La tesis consistió en utilizar como herramienta de análisis hidráulico y modelamiento espacial, un Sistema de Información Geográfica que permita evaluar el impacto de posibles inundaciones en un sector del Río Ramis aguas arriba del puente Ramis. El modelamiento matemático se realizó con el software HEC RAS con flujo continuo o permanente en un sector del Río Ramis. Como resultado se generó mapas de riesgos por inundaciones, producto de la integración del

software HEC-RAS con el software ARCGIS, donde se puede cuantificar y visualizar la magnitud de la inundación, para períodos de retorno de 2, 10, 50, 100, 200 y 500 años. Al realizar el análisis con las secciones elevando la altura de las defensas actuales, se determinó que la altura necesaria para que no exista desbordamientos es de 1.90 metros.

**Rojas y Cárdenas (2013)** en su trabajo de investigación denominado “Identificación y registro catastral de cuerpos de agua mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes en landsat-5”, manifestaron que los objetivos que persiguió la investigación fueron:

La creación de un aplicativo de software para la detección, medición y análisis de cuerpos de agua a nivel de cuenca, el cual proporcione herramientas específicas a las entidades estatales, regionales y nacionales con el fin que puedan desarrollar un monitoreo permanente sobre una cuenca. La disminución del tiempo de adquisición de información catastral de cuencas hidrográficas, solucionando así, un problema de las autoridades administradoras de recursos hídricos en las cuencas del país (p.2).

La metodología seguida por Rojas y Cárdenas (2013), tuvo la siguiente secuencia:

Primero, la creación de Base de Datos de Imágenes LandSat 5; segundo, el estudio del Satélite LandSat 5; tercero, el estudio de los índices de Vegetación y Agua; cuarto, el pre-procesamiento de la imagen; quinto, el procesamiento de las imágenes corregidas y por último sexto, el desarrollo de Software. Las primeras pruebas sobre el aplicativo de software se realizaron usando imágenes del año 2007, en esas imágenes se lograron segmentar más de 10 lagunas de considerable tamaño (p.10).

## **2.2. Bases filosóficas de la investigación**

Asumir como objetivo académico la elaboración de un trabajo de investigación doctoral lleva implícito, formular un propósito de investigación, el cual no tendrá sentido si desde el inicio como investigador no se tiene definido un paradigma que nos permita generar conocimiento.

Al respecto, Guba y Lincoln (2002) precisan que un paradigma “representa una visión del mundo que define, para quien lo sustenta, la naturaleza del mundo, el lugar del individuo en él y la extensión de las posibles relaciones con ese mundo y sus partes” (p.120). Es decir, cómo investigadores debemos preguntarnos cómo percibimos la realidad, cómo nos relacionamos con ella y al mismo tiempo tener claro que paradigma guía y orienta esta percepción.

Guber y Lincoln (2002) afirman que “ningún investigador debe dedicarse a investigar sin tener claro exactamente cuál es el paradigma que informa y guía su acercamiento” (p. 142).

De la revisión documental realizada hasta la fecha, puedo manifestar que a través de la historia han surgido diferentes planteamientos filosóficos que definen parámetros conducentes a fijar una posición en relación al conocimiento, mediante la selección y/o posicionamiento ante un paradigma.

El paradigma que se seleccione marcará la ruta (método) del proceso investigativo; al respecto Rojas (2014) establece que:

El paradigma es el que establece los criterios para la percepción y comprensión de los significados del mundo, para ello van a intervenir no sólo elementos intelectuales y racionales, sino también factores subjetivos como los valores, las actitudes tanto del investigador como del fenómeno que se desea investigar (p. 80).

Al respecto Guba y Lincoln (2002, p. 120-121) parten de la premisa de que los paradigmas determinan en los investigadores lo que estos están haciendo y lo que está dentro o fuera del campo de una investigación reconocida en el área

científica. De hecho, proponen que un investigador podrá ubicarse en un paradigma de investigación si responde un conjunto de tres preguntas, cuyas respuestas son vinculantes una de otras:

1. La Pregunta Ontológica. ¿Cuál es la forma y la naturaleza de la realidad y, por lo tanto, qué es lo que podemos conocer de ella?
2. La Pregunta Epistemológica. ¿Cuál es la naturaleza de la relación entre quien conoce o busca conocer y lo que puede ser conocido?
3. La Pregunta Metodológica. ¿Cómo puede el investigador (el que busca conocer) arreglárselas para averiguar si lo que él o ella cree puede ser conocido?

Una vez presentada estas consideraciones conceptuales sobre los paradigmas del conocimiento, su comprensión y adecuación dependerá de la concepción del mundo que tenga el investigador. En ese sentido según Boscán de Pacheco (2016, p. 82), los paradigmas coexisten con tres dimensiones:

- La Dimensión Ontológica: Referida a la naturaleza del fenómeno (realidad social, gerencial, educativa). Es el Ser en la realidad.
- La Dimensión Epistemológica: Referida al desarrollo del conocimiento. A la relaciones sujeto, fenómeno u objeto.
- La Dimensión Metodológica. Formas de aproximación al fenómeno u objeto, es la respuesta al cuestionamiento del ¿cómo?

Todo investigador debe definir sobre que paradigma debe desarrollar su trabajo de investigación y así poder definir las bases filosóficas de su investigación. La tabla 1, desarrollada por Guba y Lincoln (2002, p. 124), presenta los cuatro paradigmas sobre los cuales cualquier investigador pueda desarrollar su trabajo de investigación, analizándolo desde las dimensiones ontológica, epistemológica y metodológica.

Tabla 1 Datos estadísticos de ND a radiancia

DIMENSIÓN	POSITIVISMO	POST POSITIVISMO	TEORÍA CRÍTICA	CONSTRUCTIVISMO
Ontológica	Realismo ingenuo: realismo aprehensible.	Realismo crítico: realidad aprehensible solo de manera imperfecta y probable.	Realismo histórico: realidad virtual moldeada por valores sociales, políticos, culturales, étnicos y de género.	Relativista: realidades construidas local/específicamente
Epistemológica	Dualista/objetivista; hallazgos reales	Dualista/objetivista modificada; tradición/comunidad crítica; hallazgos probablemente reales	Transaccional subjetivista; hallazgos mediados por valores.	Transaccional subjetivista; hallazgos son obras creadas.
Metodológica	Experimental/manipuladora; verificación de hipótesis; énfasis en método cuantitativo	Experimental/manipuladora modificada; multiplicidad crítica; puede incluir métodos cualitativos.	Dialógica/dialéctica.	Hermenéutica/dialéctica.

Fuente: Extraída de: Paradigmas en competencia en la investigación cualitativa, por Guba y Lincoln, 2002, p.124. Disponible en: <https://cutt.ly/6Yd1paL>

### 2.2.1 Bases ontológicas de la investigación

Según Carpio (2015) la ontología “es llamada la teoría del ser, es decir, el estudio de todo lo que es: qué es, cómo es y cómo es posible. La Ontología se ocupa de establecer las categorías fundamentales o modos generales de ser de las cosas”.

Desde el punto de vista ontológico, esta investigación se fundamentará en la concepción del ser humano como sujeto que construye y reconstruye su realidad

social. Razón por la cual, la identificación de un determinado paradigma se origina al conocer cuál es la creencia que mantiene el investigador con respecto a la naturaleza de la realidad que se investiga.

Es por ello que las bases ontológicas de esta investigación, buscan responder a las preguntas sobre la realidad y su representación, por ello la tesis tiene su encuadre ontológico de interpretación de la realidad de tipo positivista, natural, materialista, al representar la razón del ser de plantear y obtener los resultados mediante la predicción al aplicar del modelamiento matemático y el análisis e interpretación de imágenes.

La realidad descrita corresponde desde una perspectiva objetivista a la sustitución del conocimiento ausente, es decir: a la acción de realizar las estimaciones de la reducción del volumen de agua de la laguna de Aricota (dar presencia) y confirmar las suposiciones (la ausencia) del conocimiento.

### **2.2.2. Bases epistemológicas de la investigación**

Según Tamayo (2003), actualmente a la epistemológica “se le contextualiza como la teoría del conocimiento científico y se caracteriza por su método”.

Razón por la cual la epistemología es la doctrina de los fundamentos que presenta el conocimiento como el producto de la interacción del hombre con su medio e implica un proceso crítico a través del cual el hombre ordena el saber hasta llegar a su sistematización.

Las bases epistemológicas de esta investigación tienen la finalidad de definir y profundizar el conocimiento del comportamiento hidrológico de la Laguna de Aricota como objeto conocido y la relación que existe con los conocimientos, el grado con el que resulta ser cierto, surge la necesidad de conocer la implicancia del conocimiento que resulta de observar y deducir a partir de fuentes, criterios y conocimientos previos del fenómeno estudiado. Por ello la investigación parte de una base de conocimientos aceptados previamente que son necesarios, pero no suficiente para ser enunciados fácticos que se sean verificables a partir de la experiencia, sea directa o indirectamente.

Únicamente al haber pasado las pruebas de la verificación empírica podrá considerarse que las estimaciones en el tiempo sobre la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, es adecuado a su objeto de estudio, o sea aceptado como verdadero; y aun así todavía considerado un conocimiento falsable, porque tal como afirma Bunge (2018) en última instancia, solo la experiencia puede decirnos si una hipótesis relativa a cierto grupo de hechos materiales es adecuada o no.

### **2.2.3 Bases metodológicas de la investigación**

Las bases metodológicas de esta investigación se basan en el fundamento metodológico, que se asume desde la lógica que propicia la investigación del objeto, tomando en cuenta sus componentes, relaciones, regularidades y tendencias de desarrollo, así como las formas específicas de aproximarse desde la lógica de la ciencia a su comprensión.

La investigación al encontrarse en la rama de la ingeniería, usa como método las mediciones y estimaciones de datos físicos representados en imágenes provenientes de satélites de observación LANDSAT, para encontrar mediante modelamiento la reducción de agua de la laguna durante un periodo determinado.

Por su relevancia, las bases metodológicas de la investigación, se conciben a partir del planteamiento del problema que se sustentan a través del marco teórico, esta describe estrategias, técnicas y procedimientos que se ejecutaron durante el proceso de la investigación.

### **2.2.4 Base axiológica de la investigación**

La axiología es todo lo relacionado con el concepto de valor, aquellos predominantes en una determinada sociedad, por ello el valor de desarrollar la investigación y formalizar el conocimiento, se podría considerar un eslabón de engarce entre los valores humanos con la ingeniería.

La presente investigación tendrá su sustento en la Axiología, (del griego *axios*, 'lo que es valioso o estimable', y *logos*, 'ciencia'), como parte de la filosofía que estudia la naturaleza de los valores (lo bello, lo bueno y otros) y su influencia (Bruguera, 1998, p. 227)

El valor otorgado a la investigación está en estrecha relación con sus resultados y la posibilidad de incorporarlo como conocimiento o para fines de implementación de acciones que mejoren o planteen soluciones a la problemática enfocada. También está expuesta a la opinión y valoración de los especialistas e interesados en el tema.

### **2.2.5 Base ética de la investigación**

La ética, parte de la filosofía que trata de la moral y de las obligaciones del hombre, está presente en toda forma de actuación humana (Del castillo y Rodríguez, 2019)

Por ello, la investigación asume los principios éticos en todas las etapas de la investigación, desde la planificación, la realización y reporte de resultados considerando los posibles costos y beneficios de la investigación, con la finalidad de asegurar el avance del conocimiento, la comprensión y mejora de la condición humana y el progreso de la sociedad.

La investigación al tomar fuentes primarias y secundarias de teorías y conocimientos, asume el respeto irrestricto a la autoría y confiere los créditos que corresponda a los autores.

## **2.3. Marco Conceptual**

### **2.3.1. Modelos matemáticos**

Pidd (2010) expresa que "un modelo es una representación explícita y externa de parte de la realidad como la ven las personas que desean usar el modelo para entender, cambiar, gestionar y controlar dicha parte de la realidad" (p.24). De

igual manera, Lee (1973) manifiesta “un modelo es una representación de la realidad” (p.7).

Así mismo, Sodré (2007) expresa que “conceptualmente, un modelo puede presentarse como una representación de un sistema real, lo que significa que un modelo debe representar un sistema y la forma en que ocurren las modificaciones en él” (p.3).

El propósito más importante de un modelo es que le permite comprender el modelo en sí de una manera simple o describir este modelo de manera más completa para que el modelo pueda ser tan preciso como el mundo real (Sodré, 2007, p.3)

En ciencias aplicadas de ingeniería, un modelo matemático es uno de los tipos de modelos científicos que aplican una técnica matemática para estudiar el comportamiento de sistemas complejos, ante situaciones de difícil observación de la realidad, haciendo suposiciones pertinentes, cuya consecuencia es la obtención de una representación simbólica del mismo.

Por otro lado, Peláez y Mejía (2000) expresan que “un modelo matemático es un conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento de las variables que caracterizan un sistema”, mientras que Chapra (2008) define como modelo matemático a “una formulación idealizada que representa la respuesta de un sistema físico a un estímulo externo” (p.10).

Brito et al. (2011), manifiesta que el modelamiento matemático cumple los siguientes pasos:

- Identificación del problema o proceso a resolver, junto con los objetivos, que deben ser claros y concisos, con miras a obtener un resultado.
- Conocimiento de los aspectos cognitivos que rigen el problema, por medio de leyes, teorías y conceptos inmersos en la situación objeto de trabajo.
- Formulación de la situación-problema en términos matemáticos (matematización), mediante ecuaciones y/o relaciones

matemáticas, identificando para ello las variables, parámetros y los supuestos a que haya lugar.

- Solución del problema y/o proceso matemático obtenido. Para ello se hará uso de herramientas tales como tablas, gráficas, estadística, investigación de operaciones.
- Comparación del modelo con la situación real. En función de esto, es necesario analizar los resultados obtenidos, verificando si las respuestas alcanzadas son correctas, adecuadas o no, y además si se generan soluciones extrañas.
- Análisis de las restricciones al modelo. Es importante tener en cuenta las suposiciones hechas, así como el marco donde se va a limitar el dominio de la solución obtenida.
- Escenario de aplicación del modelo, así como su interpretación.

La caracterización y clasificación de los modelos matemáticos en ingeniería es la que emerge del proyecto de investigación (Camarena, 2000).

Sodré (2007) indica que “en la ingeniería se matematizan problemas, objetos y situaciones. Se caracteriza a un modelo matemático como aquella relación matemática que describe objetos o problemas de la ingeniería”.

La formulación de un modelo matemático implica la elección de las variables más importantes para el fenómeno en estudio y las leyes que se consideran obedecidas por las variables elegidas (Sodré, 2007, p.10).

Sodré (2007) recalca que “los modelos matemáticos explican cuantitativa y cualitativamente los fenómenos de la vida y generalmente se describen mediante ecuaciones diferenciales que pueden analizarse matemáticamente. Una parte extremadamente importante del modelo es la comparación entre el mundo real y el modelo matemático” (p.12).

### **2.3.2. Teledetección o Percepción Remota**

Según García y Maheut (2015), se indica la siguiente clasificación de los modelos matemáticos:

## 1. Según el uso que se dé a su resultado

### **Modelos normativos**

Son normativos los modelos matemáticos cuyos resultados concretos se utilizan explícitamente para tomar decisiones. Los más importantes de estos se pueden clasificar en modelos de optimización y modelos de resolución mediante heurísticas.

### **Modelos descriptivos**

Los modelos matemáticos descriptivos se utilizan para intentar obtener mejor visión del sistema, la interpretación de cuyos resultados conducirá generalmente a tomar decisiones. Entre estos modelos se pueden destacar Previsión, Data Mining, Simulación, Dinámica de Sistemas,...)

## 2. Según variables y parámetros

### **Modelos estáticos o dinámicos**

Un modelo estático no tiene en cuenta el tiempo, mientras que los modelos dinámicos sí. Los modelos dinámicos se suelen representar con ecuaciones en diferencias o ecuaciones diferenciales.

### **Modelos lineales o no-lineales**

Si todos los operadores de un modelo son lineales el modelo matemático es lineal. Si al menos uno es no-lineal el modelo matemático es no-lineal. Aunque hay excepciones, los modelos lineales son mucho más fáciles de manejar que los modelos no lineales.

### **Modelos determinísticos o estocásticos**

Un modelo determinístico es aquel en que cada conjunto de variables en un estado está definido por los parámetros del modelo y por los estados anteriores. Un modelo determinístico se comporta siempre igual para un conjunto de parámetros de entrada. En un modelo estocástico las

variables de estado se representan por distribuciones de probabilidad, y por tanto el modelo es capaz de recoger aleatoriedad o incertidumbre.

### **2.3.3. Sistemas de Información Geográfica (SIG)**

Los sistemas de información geográfica, conocidos con el acrónimo SIG, desde un punto de vista global son un conjunto organizado de hardware, software y datos geográficos diseñados para la captura, almacenamiento, manipulación, visualización y análisis de información geográfica con el fin de resolver problemas complejos de planificación y de gestión (Córdova, 2017, p. 13)

Del mismo modo, el National Center for Geographic Information and Analysis (NCGIA) de los Estados Unidos conceptualiza al SIG de modo operativa: "Un SIG es un sistema de información compuesto por hardware, software y procedimientos para capturar, manejar, manipular, analizar, modelizar y representar datos georreferenciados, con el objetivo de resolver problemas de gestión y planificación"(NCGIA, 1988).

Considerando que, un Sistema de Información (SI) consiste en la unión de información en formato digital y herramientas informáticas (programas) para su análisis con objetivos específicos, entonces según Sarria (2013) "un SIG es un caso particular de SI en el que la información aparece georreferenciada es decir incluye su posición en el espacio utilizando un sistema de coordenadas estandarizado resultado de una proyección cartográfica" (p.35)

Desde una concepción más actualizada, Olaya (2014) define un SIG "como un elemento complejo que engloba una serie de otros elementos conectados, cada uno de los cuales desempeña una función particular. Estos elementos son los datos, los procesos, la visualización, la tecnología y el factor organizativo" (p.8), que en su conjunto permite que un SIG sea una herramienta integradora y completa para el trabajo con información georreferenciada.

Las funciones básicas, y más utilizadas, de un SIG son el almacenamiento, visualización, consulta y análisis de datos espaciales. Un uso algo más avanzado sería la utilización de un SIG para la toma de decisiones en ordenación territorial o para la modelización de procesos ambientales (Sarria, 2013, p.35).

En la figura 1 se muestra la convergencia en diferentes líneas de trabajo en un SIG.

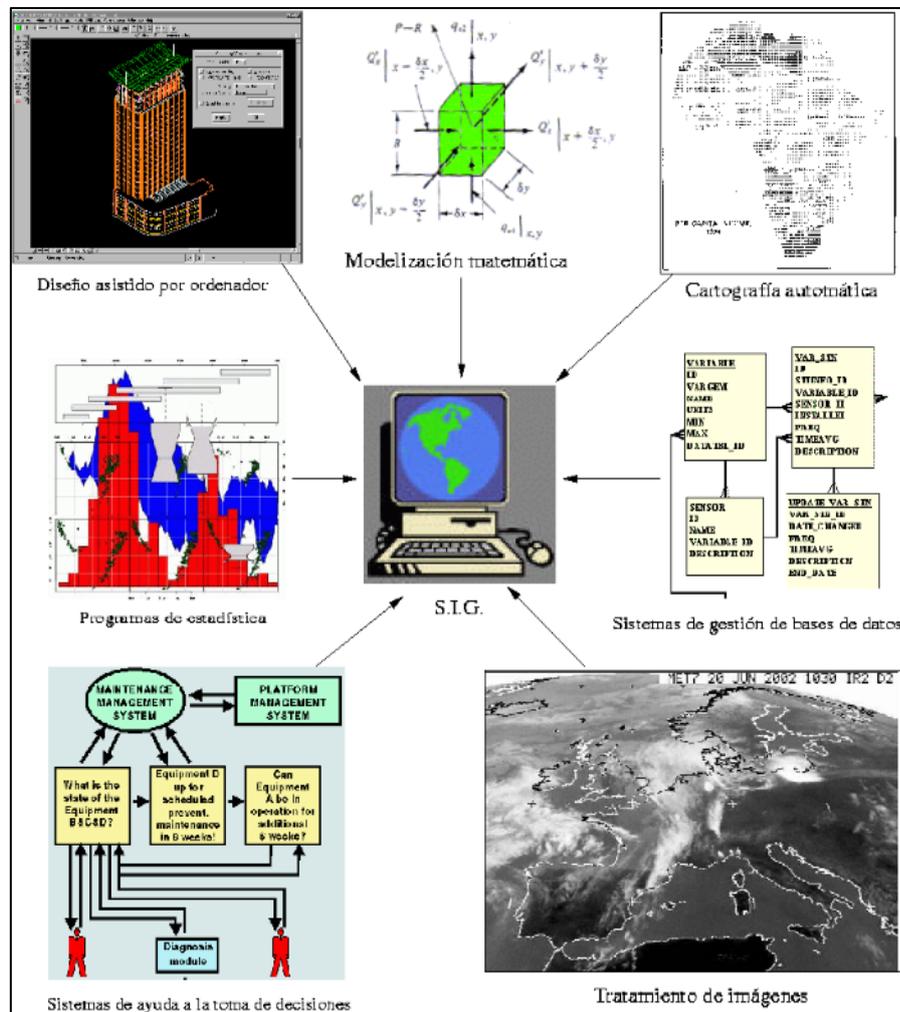


Figura 1 Convergencia de las líneas de trabajo en un SIG. Tomada de "Sistema de Información Geográfica", por Sarria, 2006, p.39.

Disponble en: <https://www.um.es/geograf/sigmur/sigpdf/temario.pdf>

## 1. Componentes de un SIG

Se puede conceptualizar que un SIG es como formado por tres subsistemas fundamentales. Olaya (2014, p.15), describe cada uno de estos sub-sistemas:

### **Subsistema de datos**

Se encarga de las operaciones de entrada y salida de datos, y la gestión de estos dentro del SIG. Permite a los otros subsistemas tener acceso a los datos y realizar sus funciones.

### **Subsistema de visualización y creación cartográfica**

Crea representaciones a partir de los datos (mapas, leyendas, etc.), permitiendo así la interacción con ellos. Entre otras, incorpora también las funcionalidades de edición.

### **Subsistema de análisis**

Contiene métodos y procesos para el análisis de los datos geográficos.

## **2. Elementos básicos de un SIG**

Según Olaya (2014, p.15), son cinco los elementos básicos que componen un SIG:

### **Datos**

Los datos son la materia prima necesaria para el trabajo en un SIG, y los que contienen la información geográfica vital para la propia existencia de los SIG.

### **Métodos**

Un conjunto de formulaciones y metodologías a aplicar sobre los datos.

### **Software**

Es necesaria una aplicación informática que pueda trabajar con los datos e implemente los métodos anteriores.

### **Hardware**

El equipo necesario para ejecutar el software.

## Personas

Las personas son las encargadas de diseñar y utilizar el software, siendo el motor del sistema SIG.

En la figura 2 se puede apreciar la estructura clásica de un SIG y la interacción entre sus diferentes elementos.

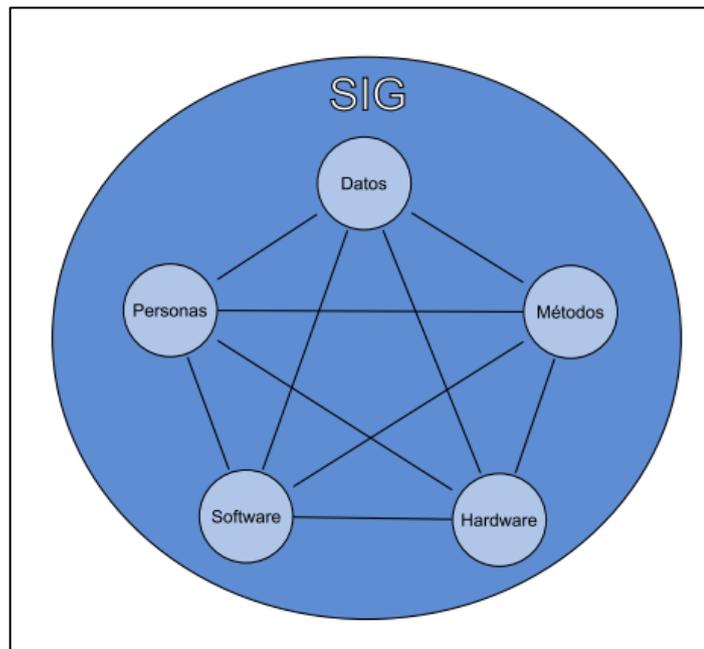


Figura 2 Elementos que forman el sistema SIG. Tomada de “Sistemas de Información Geográfica”, por Olaya 2014, p.16.

Disponible en: [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)

Con la finalidad de reflejar la evolución que vienen sufriendo los SIG, algunos autores como (GIS lounge, 2006) proponen modificar el esquema clásico de cinco elementos, tal como se puede apreciar en la figura 3.

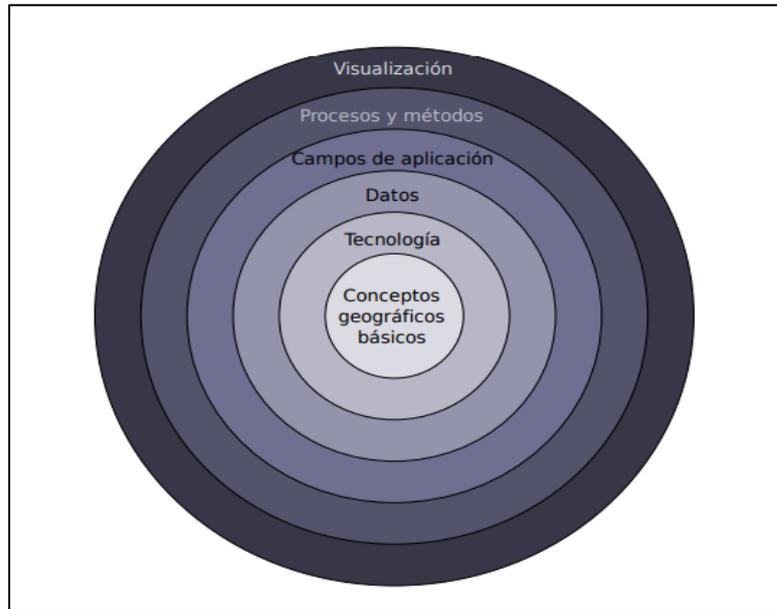


Figura 3 Una división distinta del sistema SIG. Tomada de “Sistemas de Información Geográfica”, por Olaya 2014, p.16.  
 Disponible en: [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)

### 3. Las componentes de la información geográfica

La comprensión de la información geográfica es vital importancia para poder procesarla e incorporarla a un SIG. Este tipo de información tiene dos componentes principales, cada una con funciones especiales y diferenciadas: la componente espacial y la componente temática.

Olaya (2014), hace una breve descripción de éstas dos componentes:

#### La componente espacial

Hace referencia a la posición dentro de un sistema de referencia establecido. Esta componente es la que hace que la información pueda calificarse como geográfica, ya que sin ella no se tiene una localización, y por tanto el marco geográfico no existe. La componente espacial responde a la pregunta ¿dónde? Esta componente toma valores numéricos.

### La componente temática

Responde a la pregunta ¿qué? y va invariablemente unida a la anterior. En la localización establecida por la componente espacial, tiene lugar algún proceso o aparece algún fenómeno dado. La naturaleza de dicho fenómeno y sus características particulares, quedan establecidas por la componente temática. Esta componente puede tomar valores alfanuméricos (p. 69).

## **4. Modelos de datos geográficos**

Según Sarria (2013), “al margen de asignar a cada punto de la superficie un par de coordenadas siguiendo un sistema de proyección, debemos definir, formalmente, estructuras de datos que representen entidades y variables, así como las instrucciones que utilizará el ordenador para manipular estas estructuras de datos” (p.53).

Eso significa hacer una representación digital de la realidad, lo que equivale a efectuar un modelo digital de los datos espaciales, que es un proceso muy complejo.

Para Sarria (2013), codificar toda la información relevante acerca de una porción del territorio [...] requiere un proceso de abstracción que se entienda mejor si consideramos la existencia de varios niveles de modelización (p.54). Es por ello, que Sarria (2013) plantea cuatro niveles de modelización:

### **Realidad perceptible** (montañas, lagos, campos de cultivo, etc.)

Nivel propio de los gestores preocupados por problemas de gestión y planificación del espacio.

### **Modelo conceptual**

Nivel de los científicos (geógrafos, geólogos, ecólogos, etc.) que desarrollan, verifican o aplican teorías e hipótesis sobre variables y procesos que tienen lugar en el espacio. Deben ser

capaces de tomar un problema abstracto del nivel anterior y determinar las variables implicadas en su resolución.

Existen muchos modelos geográficos distintos, entre los cuales cabe destacar: los modelos de campos y los modelos de entidades discretas.

### **Modelo lógico**

Nivel de los técnicos en SIG que utilizan las herramientas del sistema para llevar a cabo, en el ordenador, las tareas requeridas por gestores o científicos. En lugar de trabajar con la realidad, trabajan con representaciones formales que suelen ser de dos tipos: ráster y vectorial.

Los modelos de representación son construidos para reducir las propiedades de los modelos geográficos, a un conjunto finito de elementos, de tal modo que el registro de dichos elementos sirva para almacenar la realidad que los modelos geográficos describen (Olaya, 2014).

### **El modelo ráster**

Con referencia al modelo de representación ráster, López et al. (1998) manifiesta que:

El modelo ráster representa la realidad a través de superficies determinadas que quedan dispuestas en forma de matriz, en la que cada elemento está representado por un "pixel". La representación cartográfica queda dividida en celdas a manera de las teselas de un mosaico, que, agrupadas o en unidades, representan los objetos de la realidad. La representación queda simplificada en formas geométricas, predominando los cuadrados y los rectángulos (p.792).

Según Sarria (2013), “en el formato ráster se divide el espacio en un conjunto regular de celdillas, cada una de estas celdillas contiene un número que puede ser el identificador de un objeto o del valor de una variable” (p. 64).

### El modelo vectorial

Con referencia al modelo de representación vectorial, López et al. (1998) manifiesta que:

La representación espacial en un modelo vectorial se basa en la localización de puntos individuales según determinadas coordenadas, viniendo definida por funciones matemáticas, por lo que se pueden representar puntos, líneas parábolas, polígonos. En estos casos los datos incluidos en los SIGs deben ser parámetros que se den en una ecuación, tales como radios de círculos, distancias en general, etc. (p. 794).

Según Sarria (2013) con referencia al modelo de representación vectorial, manifiesta que:

En el formato vectorial los diferentes objetos se representan como puntos, líneas o polígonos. La representación de puntos o líneas es inmediata, sin embargo, al representar polígonos aparecen dos situaciones diferentes:

Si los polígonos aparecen aislados los unos de los otros, como en el caso de los núcleos urbanos, cada polígono se codifica como una línea cerrada, se trata de un modelo Orientado al Objeto.

El formato alternativo es el modelo Arco-Nodo con el que se codifican las líneas por separado y, posteriormente, se define cada uno de los polígonos a partir del conjunto de líneas que lo componen.

### **Modelo digital o d almacenamiento**

Nivel de informáticos, y desarrolladores de SIG cuya misión es optimizar las estructuras de datos adecuadas para almacenar las representaciones formales establecidas en el modelo lógico y ampliar el repertorio de herramientas para cumplir en la medida de lo posible las necesidades de los científicos y técnicos en SIG.

El modelo de almacenamiento es la tercera etapa, que llevan desde la realidad existente al conjunto de simples valores numéricos que se almacenan y manejan en un SIG y que modelizan dicha realidad (Olaya, 2014).

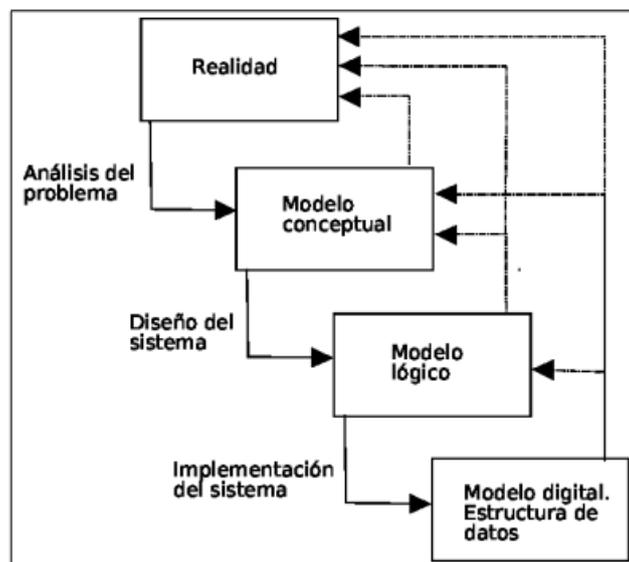


Figura 4. Esquema de la modelización de datos en SIG. Tomada de “Sistemas de Información Geográfica”, por Sarria, 2013, p. 56  
Disponible en: <http://fobos.inf.um.es/alonso/SIGCCAA/temario.pdf>

#### **2.3.4. Teledetección o percepción remota**

Meaden y Kapetsky (1992), nos explican que la teledetección aplicada al seguimiento y control ambiental se basa en servirse de sensores instalados a bordo de plataformas aéreas o espaciales para identificar o medir las propiedades de un objeto con base en las variaciones de la radiación electromagnética que ese objeto emite o refleja.

Según Sabins (2000), la teledetección es una técnica que emplea la energía electromagnética, tal como la luz, el calor y las ondas de radio como medio para la detección y medición de las características de un objeto en la superficie, sin que haya contacto físico con el sensor.

Además, según Chuvieco (1996), la teledetección permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas satelitales o aéreas. Se asume que existe entre el suelo y la radiación electromagnética, interacciones medidas y/o emitida por el sensor.

Así mismo, con referencia a los elementos que lo constituyen, Chuvieco (1996) manifiesta que, cualquier sistema de teledetección posee tres elementos fundamentales: el sensor, el objeto observado y un flujo energético que relaciona a ambos. El flujo de energía suministrado por el objeto puede ser debido a la reflexión de la luz solar, algún tipo de energía emitida por el propio objeto, o incluso por el sensor.

Además, según López (2019), este flujo puede ser, en cuanto a su origen, de tres tipos: Por Radiación solar reflejada por los objetos (luz visible e infrarrojo reflejado), por Radiación terrestre emitida por los objetos (infrarrojo térmico) y por Radiación emitida por el sensor y reflejada por los objetos (radar). Las técnicas basadas en los dos primeros tipos se conocen como teledetección pasiva y la última como teledetección activa.

En cuanto al uso de las Regiones Espectrales para la Observación Remota, Lopez (2019, p. 14) hace una descripción de las bandas espectrales:

- Espectro Visible (0,4 a 0,7  $\mu\text{m}$ ): es la única banda electromagnética que puede ser visualizada por el ojo humano. Dentro de esta región se encuentra el azul (0,4 a 0,5  $\mu\text{m}$ ); el verde (0,5 a 0,6  $\mu\text{m}$ ) y el rojo (0,6 a 0,7  $\mu\text{m}$ ).
- Infrarrojo cercano (0,7 a 1,3  $\mu\text{m}$ ): Es importante por su capacidad de discriminación de masas vegetales y concentraciones de humedad.
- Infrarrojo medio (1,3 a 8  $\mu\text{m}$ ): En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de luz solar y de emisión de la superficie de la tierra. En dicha banda se sitúan otras dos, la infrarrojo de onda corta (1,3 a 3  $\mu\text{m}$ ), útil para estimar el contenido de humedad en la vegetación y los suelos, y la cercana a los 3,7  $\mu\text{m}$  conocida como la infrarrojo medio, imprescindible para la detección de focos de alta temperatura (incendios, volcanes activos, etc.).
- Infrarrojo lejano o térmico: varía entre los 8 y 14  $\mu\text{m}$  sirviendo para detectar el calor emitido por la mayor parte de las cubiertas terrestres.
- Microondas: superior a 1 mm, este tipo de energía es bastante transparente a la cobertura nubosa. En la tabla 3.2 se observan las distintas bandas en las que trabajan en la actualidad los sensores de radar de apertura sintética. (p.14).

La teledetección puede ser definida, como la obtención de información de un objeto sin tener contacto físico con el mismo.

La teledetección aplicada al seguimiento y control ambiental se basa en servirse de sensores instalados a bordo de plataformas aéreas o espaciales para identificar o medir las propiedades de un objeto con base en las variaciones de la radiación electromagnética que ese objeto emite o refleja.

## 1. El Radar Altimétrico

Según la Agencia Espacial Europea (ESA) (2002), manifiesta que:

El radar altímetro RA-2 es un instrumento de microondas activo que realiza 20 promedios de medidas de la altura de la superficie terrestre respecto del elipsoide de revolución por cada 1.1 s. La distancia entre las medidas es de aproximadamente 400 metros. El dato altimétrico que se utiliza es un promedio de las 20 medidas mencionadas, recorriendo unos 8 km. La línea imaginaria sobre la cual el altímetro sobrevuela la superficie terrestre se denomina traza. El altímetro RA-2 (ENVISAT) opera con un ciclo de repetición de 35 días exactos, que dan una densidad de trazas espaciadas 80 kilómetros en el ecuador.

Según Medina (2009) con referencia al principio de medición del altímetro, manifiesta que:

Se basa en determinar la altura a la que se encuentra el centro de masas del satélite respecto de la superficie terrestre (denominada Range en anglosajón). El altímetro emite una señal radar que viaja hasta llegar a la superficie de la Tierra y es reflejada hacia el instrumento. A partir del tiempo desde que la señal es emitida hasta que es recibida por el sensor, se obtiene el Range (p.46).

La aparición de nuevas técnicas de altimetría radar, así como la comprobación de su utilidad en cuerpos de aguas continentales, ha permitido la aplicación exitosa en la determinación de niveles de ríos, lagos y humedales. (Frappart et al., 2006).

## **2. Interacciones entre la radiación y los objetos**

Todos los objetos van a recibir radiación electromagnética, fundamentalmente del sol. Según Sarria (2013), que, en función del tipo de objeto que estemos considerando, puede seguir tres caminos:

**Reflejarse** (la radiación es reenviada de vuelta al espacio); **absorberse** (la radiación pasa a incrementar la energía del objeto) y **transmitirse** (la radiación se transmite hacia los objetos situados detrás).

La fracción de energía que se refleja se denomina reflectividad o albedo ( $\rho$ ); la fracción de energía que se absorbe se denomina absorptividad ( $\alpha$ ); la fracción de energía que se transmite se denomina transmisividad ( $\tau$ ), cumpliéndose que  $\rho + \tau + \alpha = 1$ . Las tres variables tienen lógicamente valores entre 0 y 1 (p.124).

### **3. Interacción de elementos de la superficie terrestre con la radiación**

Según Sarria (2013, pp. 127-128) indica que “cada tipo de material, suelo, vegetación, agua, etc. Reflejará la radiación incidente de forma distinta, lo que permitirá distinguirlo de los demás si medimos la radiación reflejada”.

Según Chuvieco (2002) afirma que con referencia a la reflectividad de un objeto:

Al determinar la reflectividad de una superficie relacionaremos las magnitudes de energía reflejada y el incidente. A partir de los datos medidos por el sensor obtendremos la reflexión de la radiación solar procedentes del suelo. Esa medición se codifica en un valor numérico (ND), de acuerdo con un coeficiente de calibración la cual mediante un proceso inverso podemos obtener la radiancia espectral detectada por el sensor (p.264).

#### **Respuesta espectral reflectiva de elementos naturales**

Las firmas espectrales o curvas características son entonces representación de la energía reflejada en relación a las longitudes de

onda, consideradas sin el efecto atmosférico de la trayectoria objeto-sensor, y medida en condiciones ideales de ángulo incidente Mulla (2013).

Según Mulla (2013), con referencia a la medición de la reflectividad, manifiesta que:

El conocimiento de la reflectividad se logra con mediciones en laboratorio o en el terreno, mediante instrumentos denominados radiómetros. Los datos obtenidos mediante estos instrumentos deben ser considerados en relación a los elementos externos que afectan los datos que se obtienen por los sensores espaciales. Estos son: atmósfera, ángulo de iluminación solar, ángulo de observación del sensor, estado fenológico en el caso de los vegetales, época del año, ubicación geográfica, calibración espectral y radiométrica del sensor, etc.

### **Reflectividad de la vegetación**

Según Torres-Sánchez et al. (2014), la cobertura vegetal está conformada por un conjunto de hojas que se disponen y agrupan de formas diferentes, la cual puede ser medida por el LAI (índice de área foliar) que es la superficie total de hojas por superficie de terreno.

Del mismo modo, Torres-Sánchez et al. (2014), manifiesta que la cantidad de energía que es reflejada, absorbida y transmitida en las diferentes longitudes de onda por las hojas, depende de otros factores, como son la respuesta espectral del suelo, presencia de vegetación senescente, elevación angular del sol y del sensor, la geometría de la propia cobertura de los cultivos y los cambios fenológicos.

### **Respuesta espectral del contenido de agua en los vegetales**

Según Ben-Dor (2010), “en el infrarrojo medio, la respuesta espectral de la vegetación está determinada por su contenido hídrico. El agua contenida en la vegetación presenta una alta absorción en las longitudes

de onda de 1,4  $\mu\text{m}$ , 1,9  $\mu\text{m}$  y 2,7 $\mu\text{m}$  lo que significa una baja reflectividad por parte de la vegetación en estos valores”.

### **Respuesta espectral del suelo**

Para Ben-Dor (2010), el tipo de suelo afecta la reflectancia de la vegetación. La reflectancia de los suelos oscuros, producen una alteración de las longitudes de onda del rojo, aumentando los índices foliares. La reflectancia de los suelos de tonos claros incide en una correlación menor entre el LAI y la reflectancia del infrarrojo

## **2.3.5. Imágenes Satelitales Landsat**

### **1. Consorcio Landsat**

Landsat es un programa co-administrado por la USGS (United States Geological Survey) y la NASA (National Aeronautics and Space Administration) de los Estados Unidos. Consta de una constelación de satélites de observación de la Tierra que operan desde la década del 70 y desde esa fecha ofrece el registro espacial de imágenes satelitales de modo continuo, capturando imágenes en 12 banda diferentes, ofreciendo una máxima resolución espacial de 15 metros por pixel. La resolución temporal de las imágenes es de 16 días.

GISANDBEERS (2020, párr. 2) en características de las imágenes Landsat, muestra las diferentes misiones empleadas desde su creación:

- Landsat 1: julio 1972 – enero 1978
- Landsat 2: enero 1975 - febrero 1982
- Landsat 3: marzo 1978 - marzo 1983
- Landsat 4: julio 1982 - diciembre 1993
- Landsat 5: enero 1984 - enero 2013
- Landsat 7: enero 1999 – Actualidad
- Landsat 8: abril 2013- Actualidad

Para captar más información de la superficie terrestre con una mayor precisión y detalle, GISANDBEERS (2020) en el acápite Instrumentos TM, MSS, OLI y TIRS de Landsat, manifiesta que:

Las características de sus bandas espectrales se deben a los diferentes tipos de instrumentos con que se cuenta. El primer instrumento utilizado fue el Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido del Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) y del Thematic Mapper (TM). Con la llegada LANDAT 8, se incorporaron el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS) (párr. 1)

Landsat 1 (anteriormente ERTS 1, Satélite Tecnológico de los Recursos Terrestres) fue una versión modificada del satélite meteorológico Nimbus 4. La nave espacial en órbita casi polar sirvió como plataforma estabilizada orientada hacia la Tierra para obtener información sobre recursos agrícolas y forestales, geología y recursos minerales, hidrología y recursos hídricos, geografía, cartografía, contaminación ambiental, oceanografía y recursos marinos y fenómenos meteorológicos.

Tabla 2. Características de imagen para Landsat 1, 2 y 3

<b>LANDSAT 1, 2 y 3</b>	<b>Sensor</b>	<b>Longitud de onda (<math>\mu\text{m}</math>)</b>	<b>Resolución Espacial (m)</b>	<b>Resolución Radiométrica</b>
Banda 4 - Verde	MSS	0.50 - 0.60	60	8 bits
Banda 5 - Rojo	MSS	0.60 - 0.70	60	8 bits
Banda 6-Infrarrojo Cercano (NIR1)	MSS	0.70 - 0.80	60	8 bits
Banda 7-Infrarrojo Cercano (NIR2)	MSS	0.80 - 1.10	60	8 bits

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. Adaptada de United States Geological Survey, 2020. Disponible en: <https://cutt.ly/4Yunpn3>

En los tres primeros satélites (Landsat 1, 2 y 3) tiene una longitud de onda desde 0.5 a 1.1 micrómetros, presenta un sólo sensor MSS (Sistema de Escáner Multiespectral), su órbita está en una altitud de 960 km. La tabla 1 muestra las características de Imagen para Landsat 1, 2 y 3.

El satélite LANDSAT 4 se lanzó el 16 de junio de 1982 y LANDSAT-5 fue lanzado el 07 de marzo de 1984. Landsat 5 se ha convertido en el satélite de Observación de la Tierra que más tiempo ha estado operativo. Finalmente fue dado de baja el 5 de junio de 2013.

Tabla 3. Características de imagen Landsat 4 y 5

<b>LANDSAT 4 y 5</b>	<b>Sensor</b>	<b>Longitud de onda (µm)</b>	<b>Resolución Espacial (m)</b>	<b>Resolución Radiométrica</b>
Banda 1 - Verde	MSS	0.50 - 0.60	60	8 bits
Banda 2 - Rojo	MSS	0.60 - 0.70	60	8 bits
Banda 3 - Infrarrojo Cercano (NIR1)	MSS	0.70 - 0.80	60	8 bits
Banda 4 - Infrarrojo Cercano (NIR2)	MSS	0.80 - 1.10	60	8 bits
Banda 1 - Azul	TM	0.45 - 0.52	30	8 bits
Banda 2 - Verde	TM	0.52 - 0.60	30	8 bits
Banda 3 - Rojo	TM	0.63 - 0.69	30	8 bits
Banda 4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	TM	0.76 - 0.90	30	8 bits
Banda 5 - Onda corta infrarroja (SWIR) 1	TM	1.55 - 1.75	30	8 bits
Banda 6 - Térmico	TM	10.40 - 12.50	120 * (30)	8 bits
Banda 7 - Onda corta infrarroja (SWIR) 2	TM	2.08 - 2.35	30	8 bits

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático. Adaptada de United States Geological Survey, 2020. Adaptada de United States Geological Survey, 2020. Disponible en: <https://cutt.ly/DYumPco>

Sus aplicaciones se extienden a campos como la detección de cambios globales, agricultura, calidad del agua y administración de recursos. El instrumento MSS tiene una resolución espacial de 60 m y el TM tiene una resolución espacial de 30 m, ambas con una resolución temporal de 16 días. La tabla 3 muestra las características para Landsat 4 y 5.

Este tipo de sensor presenta el satélite de Landsat 7 y las imágenes constan de ocho bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros de Bandas 1 a 5 y 7. La resolución de la banda 8 (pancromática) es de 15 metros. Presenta una resolución temporal de 16 días.

El tamaño aproximado de cada escena es de 170 km de norte a sur por 183 km de este a oeste. La tabla 3 muestra las características de imagen para Landsat 7 – ETM+.

Tabla 4. Característica de imagen para Landsat 7 – ETM+

<b>LANDSAT 7</b>	<b>Sensor</b>	<b>Longitud de onda (µm)</b>	<b>Resolución Espacial (m)</b>	<b>Resolución Radiométrica</b>
1 – Azul	ETM+	0.45 - 0.52	30	8 bits
2 - Verde	ETM+	0.52 - 0.60	30	8 bits
3 – Rojo	ETM+	0.63 - 0.69	30	8 bits
4 - Infrarrojo Cercano (NIR)	ETM+	0.76 - 0.90	30	8 bits
5 - onda corta infrarroja (SWIR) 1	ETM+	1.55 - 1.75	30	8 bits
6_1 – Térmica – Baja ganancia	ETM+	10.40 - 12.50	60 * (30)	8 bits
6_2 – Térmica – Alta ganancia	ETM+	10.40 - 12.50	60 * (30)	8 bits
7 - onda corta infrarroja (SWIR) 2	ETM+	2.08 - 2.35	30	8 bits
8 - Pancromática	ETM+	0.52 - 0.90	15	8 bits

Nota: ETM: Mapeador temático mejorado. Adaptada de United States Geological Survey, 2020. Disponible en: <https://cutt.ly/sYuQ301>

## 2. Las características de una imagen satelital

Con respecto a **la resolución espacial**, Chuvieco (1996) hace referencia a la identificación del objeto más pequeño sobre la imagen, remarcando el nivel de detalle que ofrece la misma. Se pueden identificar los objetos que superen el tamaño del pixel. Para los sensores ópticos la resolución espacial depende de la distancia al objeto y la apertura (P.92).

Con respecto a la **resolución espectral**, Chuvieco (1996) indica que es el número y anchura de de bandas espectrales que puede discriminar el sensor. La elección del número, anchura y localización de las bandas que incluye el sensor están íntimamente relacionados con los objetivos de su diseño (p.93).

Con respecto a **la resolución radiométrica**, Chuvieco (1996) hace mención a la sensibilidad del sensor, es decir, a su capacidad de detectar variaciones en la radiancia espectral que recibe (p.94)

Con respecto a la **resolución temporal**, tiempo que tarda el satélite en tomar dos imágenes del mismo sitio, Chuvieco (1996) indica que este longitud de onda del sistema. concepto alude a la frecuencia de cobertura que proporciona el sensor (p.95).

## 3. Análisis de la Metadata

Los archivos MTL, son aquellos que contiene las características propias del sensor y particulares de la imagen satelital.

Según Rojas y Cárdenas (2013, p. 5), el contenido del archivo Metadata es:

- Información de la Metadata
- Información de la Carpeta
- Producto Metadata
- Atributos de la Imagen

- Valores máximos y mínimos de Radiancias
- Valores máximos y mínimos de ND por banda
- Parámetros de la Proyección sobre el plano

#### 4. Pre-procesamiento de la imagen

##### Corrección Radiométrica

Cuyo objetivo es calcular las radiancias espectrales de una imagen satelital seleccionada. En el archivo de metadatos de la imagen satelital podemos encontrar las variables involucradas requeridas para el cálculo.

A continuación, se presenta la ecuación que permite transformar los ND a valores de radiancia (L):

$$L = L_{min} + ND * (L_{max} - L_{min}) / d_{max} \quad (1)$$

##### Cálculo de la Reflectancia Aparente

Para el cálculo de la reflectancia, se requiere extraer la información que se encuentra en el archivo de metadatos de la imagen seleccionada y según (Rojas y Cárdenas, 2013, p. 6) que están relacionadas con las variables que usaremos:

- Angulo de elevación solar (e).
- Angulo cenital solar ( $z=90^\circ - e$ ).
- Día del año juliano (dda).
- Distancia tierra-sol en unidades astronómicas (d).
- Valor medio de irradiancia solar total en cada banda espectral (E)

La fórmula de cálculo de la reflectancia a partir de la Radiancia está dada por la ecuación ya obtenida en el paso anterior.

Pero, previamente es necesario la obtención de la distancia tierra-sol (d) en el momento de toma, según la siguiente expresión:

$$d = 1 - (0.01674 * \cos (0.98563 * (dda - 4))) \quad (2)$$

Para el cálculo de la reflectancia, se utiliza la siguiente fórmula:

$$\rho = \frac{\pi \cdot d^2 \cdot L}{E \cdot \cos(z)} \quad (3)$$

### **Corrección Atmosférica**

Para la corrección atmosférica de una imagen satelital, se requiere la conversión de reflectancia aparente a reflectancia de la superficie terrestre, para ello en este trabajo se usa el modelo del objeto oscuro (Rojas y Cárdenas, 2013).

## **5. Procesamiento**

En el procesamiento de las imágenes satelitales corregidas en la etapa de pre-procesamiento, requiere de dos sub-procesos: las operaciones morfológicas y la binarización.

### **Operaciones morfológicas**

Según Rojas y Cárdenas (2013), el objetivo de estas operaciones es simplificar y conservar las principales características de forma de las regiones. Las operaciones morfológicas usadas por el software son la dilatación y erosión (p.7).

### **Binarización**

Según Rojas y Cárdenas (2013), el subproceso de binarización consiste en:

Un proceso de reducción de la información de una imagen digital a dos valores: 0 (negro) y 255 (blanco). Esta técnica consiste en

comparar cada pixel de la imagen con un determinado umbral (valor límite que determina si un pixel será de color blanco o negro). Los valores de la imagen que sean mayores que el umbral toman un valor 255 (blanco), el resto de píxeles toman valor 0 (negro) (p. 7).

## **2.4. Definición de Términos básicos**

- 1. Corrección geométrica.** Corrige y distorsiona la imagen original con objeto de que esta constituya una representación más fiable de la escena original (Olaya, 2014, p.428).
  
- 2. Corrección radiométrica.** La corrección radiométrica corrige valores erróneamente registrados o ruido presente en la imagen, entre otras alteraciones que pueden aparecer en esta. Existen muchas razones por las que el Nivel Digital recogido en un píxel puede no ser correcto y no reflejar con fidelidad la realidad presente sobre el terreno (Olaya, 2014, p.420).
  
- 3. Georreferenciación.** Paso de un sistema de filas y columnas a un sistema de coordenadas estándar (Sarria, 2013, p.190).
  
- 4. Índice de vegetación NDVI.** Índice que se basa en que la vegetación tiene una reflectividad muy alta en la banda 4 de Landsat y muy baja en la banda 3. Por tanto, cuanto mayor sea la diferencia entre ambas bandas mayor es el porcentaje de cobertura vegetal y más sana es esta. El dividir el índice entre la suma de ambas reflectividades compensa tanto el efecto de mayor o menor luminosidad como el efecto de la atmósfera. (Sarria, 2013, p.195).
  
- 5. Isolíneas.** Líneas en las que el identificador se sustituye por el valor de la variable (Sarria, 2013, p.65).

6. **MDE.** Modelo que contiene información explícita acerca de la altitud en un área muestreada en diversos puntos (modelo TIN) o celdillas (modelo ráster) sino que también aporta información relativa a las relaciones (distancia y vecindad) entre los diferentes valores de altitud (Sarria, 2013, p.132).
  
7. **MDT.** Conjunto de capas (generalmente ráster) que representan distintas características de la superficie terrestre derivadas de una capa de elevaciones a la que se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE) (Sarria, 2013, p.127).
  
8. **Ráster.** Área de trabajo que se divide en celdillas, cada una de estas celdillas contiene un número que puede ser el valor de una variable cuantitativa, un identificador de una variable cualitativa o el identificador de un objeto (Sarria 2013, p. 48).
  
9. **Sensor remoto.** Es el sensor es el encargado de registrar la radiación electromagnética procedente de la zona estudiada y captar la imagen (Olaya, 2014, p.128).
  
10. **Sistema de Gestión de Base de Datos (SGBD).** Permite el almacenamiento, manipulación y consulta de datos pertenecientes a una base de datos organizada en uno o varios ficheros (Sarria, 2013, p.167).
  
11. **TIN (Red Irregular de Triángulos).** Estructura de datos donde los puntos se concentran en aquellas zonas donde la variable representada tiene mayor variabilidad (Sarria, 2013, p.64)

### III HIPÓTESIS Y VARIABLES

#### 3.1. Hipótesis

##### 3.1.1. Hipótesis general

- **H:** Mediante un modelamiento matemático y haciendo uso de SIG es posible estimar la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna.

##### 3.1.2. Hipótesis específicas

- **H1:** Existe una relación directa entre parámetros morfométricos de la laguna y la reducción de su volumen.

H0: No existe una relación directa entre parámetros morfométricos de la laguna y la reducción de su volumen.

- **H2:** La integración del análisis de la variabilidad temporal y espacial de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota, nos permitirá la estimación de la variación de su volumen.
- **H3:** El análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota nos permitirá la validación del modelo empleado para la determinación de su volumen.

#### 3.2. Definición conceptual de variables

##### 3.2.1. Variables independientes

###### Modelo matemático

Es un conjunto de expresiones matemáticas que describen el comportamiento de las variables que caracterizan un sistema.

### Sistema de Información Geográfica (SIG)

Sistema de información que procesa las imágenes satelitales sobre áreas no accesibles al ojo humano o la fotografía convencional.

#### **3.2.2. Variable dependiente**

##### Estimación de la reducción del volumen de agua

Posibilita realizar una evaluación cuantitativa de los recursos hidrológicos de la laguna y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.

#### **3.3. Operacionalización de variables**

##### **3.3.1. Variable Independiente**

###### Modelo matemático

DIMENSIÓN: Validación del modelo

INDICADORES: Índice de Kappa  
Precisión global

INSTRUMENTO: Método de firma espectral

###### Sistema de Información Geográfica (SIG)

DIMENSIÓN: Calidad de la imagen satelital

INDICADORES: Resolución espectral  
Resolución temporal  
Resolución espacial  
Resolución radiométrica

INSTRUMENTO: Método de corrección geométrica  
Método de corrección radiométrica

### **3.3.2. Variable Dependiente**

#### Estimación de la reducción del volumen de agua

DIMENSIÓN: Reducción del volumen de agua en el tiempo

INDICADORES: Nivel altimétrico de la laguna

Superficie de la laguna

Perímetro de la laguna

INSTRUMENTO: Método de polígonos

## **IV DISEÑO METODOLÓGICO**

### **4.1. Tipo y diseño de investigación**

#### **4.1.1 Tipo de investigación**

Según el objetivo de la investigación, puedo mencionar lo siguiente: en función al propósito realizado es una investigación aplicada, puesto que debemos determinar el comportamiento de la reducción del volumen de la laguna de Aricota con respecto al tiempo y espacio.

Según el tipo de dato recogido podemos establecer que es una investigación de tipo cuantitativa, dado que se basa en el estudio y análisis de la realidad (volumen de la laguna) a través de diferentes métodos y procedimientos de medición, para encontrar inferencias con otros tipos de investigación y obtener explicaciones contrastadas a partir de las hipótesis.

Según el tipo de inferencia, recurrimos al método inductivo pues nos basaremos en la obtención de conclusiones a partir de la variación del fenómeno (Hernández, Fernández y Baptista, 2010).

#### **4.1.2 Diseño de la investigación**

El diseño de la investigación, según el grado de manipulación de variables es de tipo no experimental, por basarse en la observación y las variables procesadas no pueden ser manipuladas, solo observaremos los fenómenos en su estado natural para luego analizarlos.

La figura 5 muestra las imágenes satelitales LANDSAT de la laguna de Aricota, que fueron procesadas para determinar el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de los años 1992, 2007 y 2019

Las imágenes satelitales procesadas forman parte del Anexo 4, que contiene los índices de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de los años 1972, 1982, 1990, 2007, 2015 y 2019.

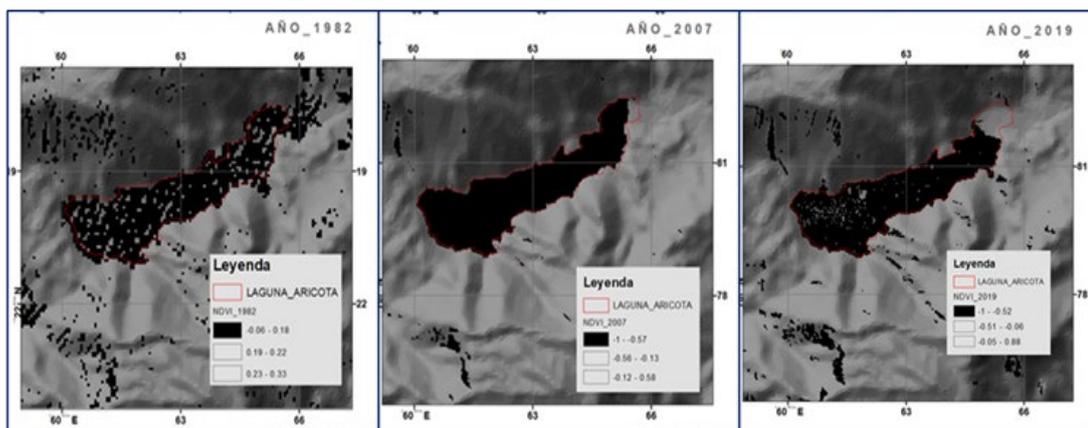


Figura 5. Variación temporal del índice NDVI: a) 1982; b) 2007; c) 2019.

Elaboración propia

Con respecto a su análisis temporal, se trata de un diseño longitudinal o temporal, que consiste en analizar los cambios que se dan a través del tiempo, de determinadas categorías, conceptos, sucesos o eventos.

En la figura 6 se observa la conversión de las imágenes satelitales LANDSAT de la laguna de Aricota de formato ND a Radiancia considerando la banda 3, adquiridas los días 06/10/1992, 21/09/1990, 16/08/2007 y 29/07/2015. En el Anexo 2 se encuentran las imágenes satelitales utilizadas en la figura.

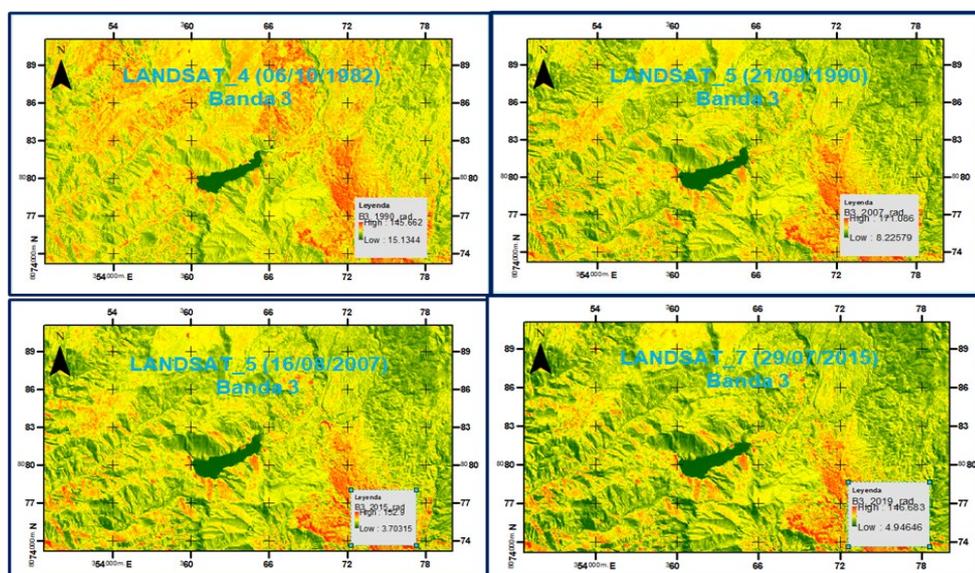


Figura 6. Conversión de ND a Radiancia de las imágenes LANDSAT banda 3, según fecha de adquisición: a) 06/10/1992; b) 21/09/1990; c) 16/08/2007; d) 29/07/2015.

Elaboración propia.

En la figura 7 se observa la conversión de las imágenes satelitales LANDSAT de la laguna de Aricota de formato Radiancia a Reflectancia considerando la banda 3, adquiridas los días 06/10/1992, 21/09/1990, 16/08/2007, 29/07/2015 y 08/07/2019.

Las imágenes satelitales utilizadas en la presente figura forman parte del Anexo 3, donde además se encuentran las correspondientes a la banda 4, adquiridas en las mismas fechas de las que pertenecen a la banda 3.

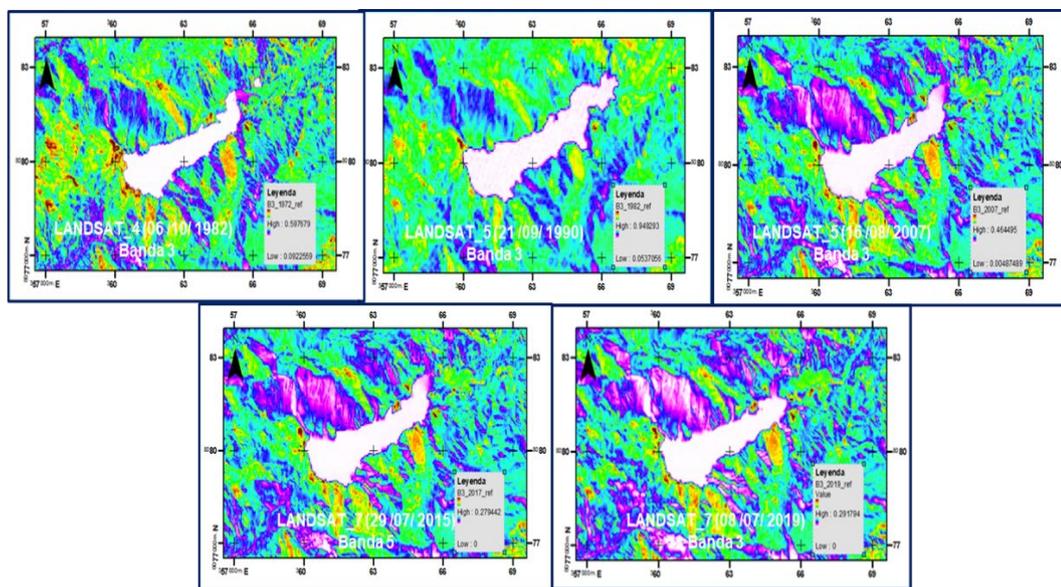


Figura 7. Conversión de Radiancia a Reflectancia de las imágenes LANDSAT considerando la banda 3, según fecha de adquisición: a) 06/10/1992; b) 21/09/1990; c) 16/08/2007; d) 29/07/2015; e) 08/07/2019. Elaboración propia.

También el diseño de la investigación es transversal por la recolección de datos, con el propósito de describir y analizar su comportamiento de las variables en un mismo tiempo, es decir realizaremos la comparación en la misma temporalidad.

En la figura 8 se muestra el procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT adquiridas el 08/07/2019 considerando las bandas 3 y 4, para determinar el índice de vegetación NDVI del año 2019.

Las imágenes satelitales procesadas de la laguna de Aricota utilizadas para elaborar la figura 8, se encuentran en los Anexos 2, 3 y 4.

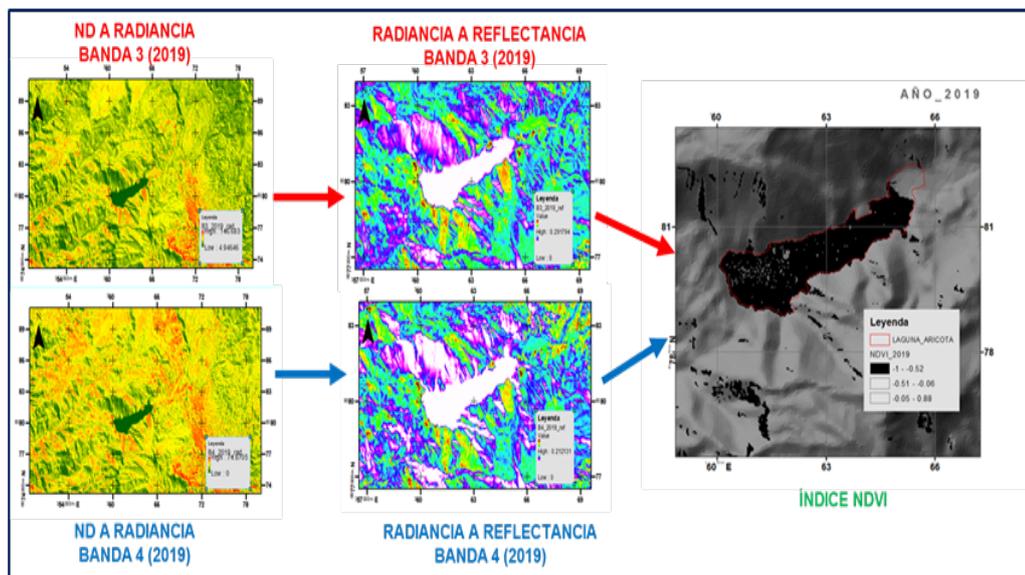


Figura 8. Procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT adquiridas el 08/07/2019 considerando las bandas 3 y 4, para determinar el índice de vegetación NDVI del año 2019. Elaboración propia.

### **Diagrama del modelamiento funcional para determinar el volumen de la laguna de Aricota**

En la figura 9 se muestra el diagrama del modelamiento funcional para determinar el volumen de la laguna de Aricota.

#### **1. Adquisición de imágenes satelitales LANDSAT**

Se trabajaron con imágenes satelitales Landsat, las cuales fueron descargadas de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del servidor Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Estas corresponden al periodo de 1972 – 2019, se trabajó con imágenes Landsat, porque son las más usadas para análisis multi-temporal de vegetación, según (Lunneta & Balogh, 1999).

Se descargaron 6 imágenes satelitales, las cuales corresponden: 01 imagen LANDSAT\_1 del 26/09/1972 y 01 imagen LANDSAT\_4 del

06/10/1982, que utilizan el sensor MSS (Sistema de Escáner Multiespectral); 02 imágenes LANDSAT\_5 del 21/09/1990 y del 16/08/2007, que utilizan el sensor TM (Mapeador Temático); y 02 imágenes LANDSAT\_7 29/07/2015 y del 08/07/2019, que utilizan el sensor ETM (Mapeador Temático Mejorado Plus).

Las imágenes están ubicadas en el cuadrante WRS\_PATH = 002 y WRS\_ROW = 072.

## 2. Determinación parámetro morfométricos

La representación de las características de elevación de un terreno es importante para conocer el comportamiento superficial del agua,

Para el análisis espacial con fines hidrológicos de la geomorfología de un cuerpo de agua, se utilizan tres modelos de representar la elevación en modelos digitales: Las curvas a nivel o contornos, el modelo TIN (Triangular Irregular Networks) y los DEM (Moore et al. 1991; Bundela, 2004).

Nuestro modelo funcional consideró el empleo de esos tres modelos:

- a) **Modelo de curvas de nivel o contornos.** En este tipo de modelo, la elevación se representa en líneas que tienen igual altitud (isolíneas), los intervalos de altura entre cada línea son constantes e indican el nivel de detalle del modelo (Medina, 2006, p. 70).
- b) **El modelo TIN,** es un modelo con resolución espacial variable, basado en puntos, líneas y triángulos con separación irregular que indican distintas alturas. El modelo TIN se puede generar a partir de curvas a nivel utilizando técnicas GIS (Medina, 2006, pp. 70-71).
- c) **Los modelos de elevación digital (DEM)** son modelos simples bidimensionales en formato grid con espaciamiento regular. Todas las celdas de un DEM tienen las mismas dimensiones

horizontales y a cada una se asigna un valor de elevación (Medina, 2006, p. 71).

### **3. Procesamiento digital de imágenes**

Para el procesamiento de las imágenes satelitales adquiridas de los sensores que se encuentran en los satélites LANDSAT1, LANSAT 4, LANDSAT 5 y LANSAT 7, se desarrolló la siguiente metodología:

#### **Corrección geométrica**

- Pre-procesamiento de las imágenes, que consistió en el recorte de las imágenes.
- El segundo paso es recortar la imagen\_raster para ubicarnos en la zona de estudio planteado.

#### **Corrección radiométrica**

- **Corrección de imágenes con el proceso GapFill:** Uno de los problemas encontrados en las imágenes radiométricas del Landsat 7 ETM+ fue cuando uno de sus sensores dejó de funcionar, las imágenes comenzaron a presentar franjas de datos inválidos (gaps) a los costados de la imagen. La eliminación de estos gaps se realizó a través del proceso GapFill para corregir la imagen.
- **Conversión del formato de la imagen de número digital (ND) a Radiancia:** Se entiende como la conversión de valores digitales a magnitudes físicas. Para convertir los valores digitales (ND) de la imagen a la magnitud física de radiancia es imprescindible realizar la corrección radiométrica, puesto que las imágenes presentan diferentes características como: ángulos, fechas, tipo de sensor y otros. Se obtienen de la Metadata de las imágenes adquiridas, los datos de entrada de las radiancias espectrales máxima y mínima.

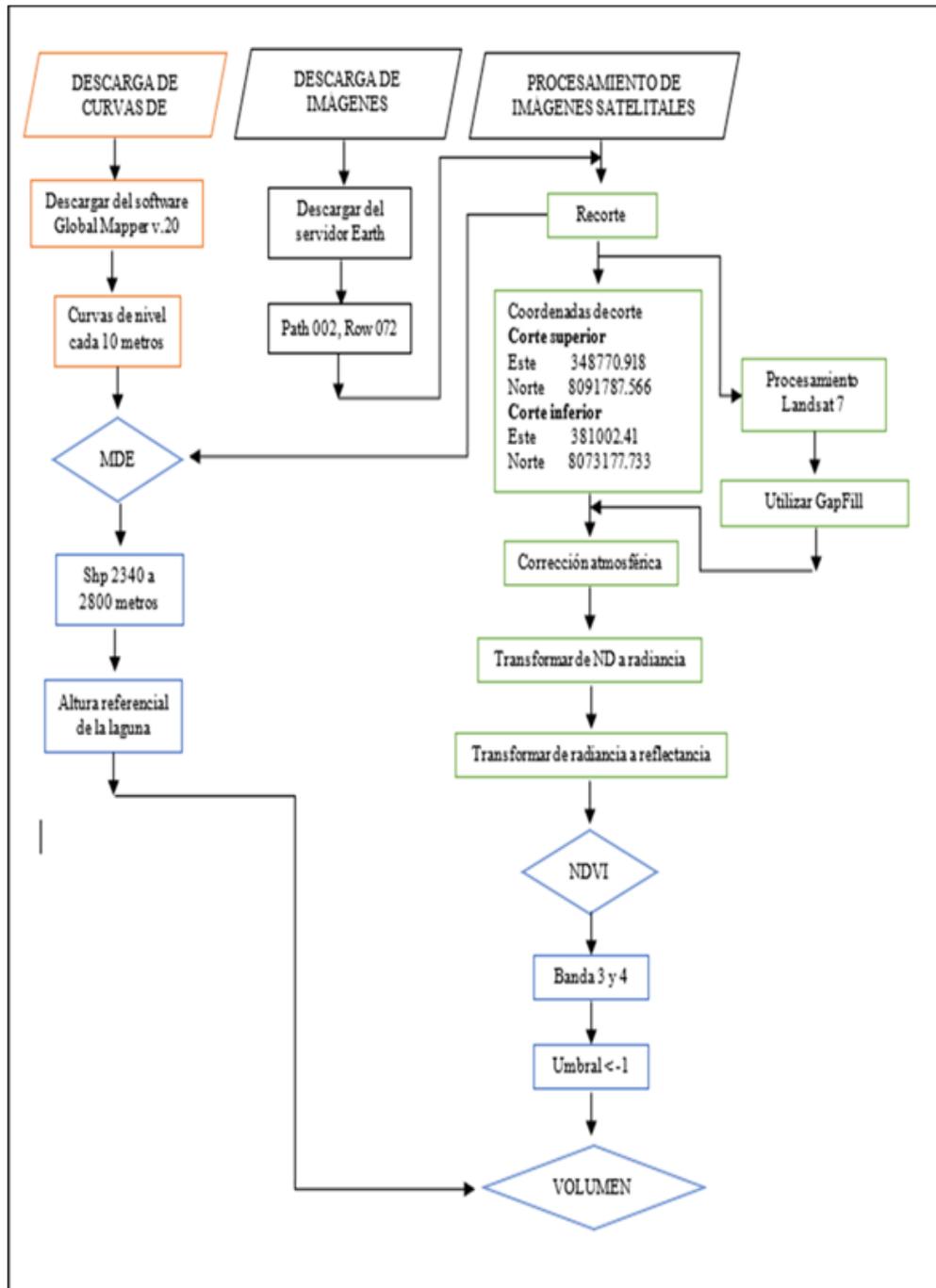


Figura 9. Esquema funcional para el cálculo del volumen de la laguna de Aricota. Elaboración propia.

- **Conversión de radiancia a reflectancia:** Se calculó la reflectancia al tope de la atmósfera (indica la relación existente entre la energía incidente y la reflejada). Para el proceso de

corrección de la radiancia, se tomó en cuenta la radiación solar, elevación solar y el día Juliano y así encontrar la reflectancia.

- **Conversión de reflectancia a índice de vegetación (NDVI):** Para poder delimitar la Laguna de Aricota, se realizó la metodología de Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index), NDVI, propuesto por Gutman (1991).

## **4.2. Método de la investigación**

En cuanto al nivel de la investigación es de forma descriptivo ya que se pretende observar y describir el grado de susceptibilidad, sin influir de ninguna manera sobre él, pero también es de forma correlacional, ya que se pretende medir la relación entre el volumen del nivel de agua y los parámetros morfométricos, para ello se aplicará el análisis de correlación entre variables y la regresión lineal sobre los datos de estudio.

## **4.3. Población y muestra**

La población corresponde a las cuatro cuencas hidrográficas de la Región Tacna: Cuenca Locumba, Cuenca Sama, Cuenca Caplina y Cuenca Uchusuma.

Para la muestra se seleccionó la Cuenca del río Locumba donde se encuentra la Laguna de Aricota, por la importancia que representa en el suministro del recurso hídrico en la región Tacna.

## **4.4. Lugar de estudio y período desarrollado**

### **4.4.1. Delimitación espacial**

La zona de estudio comprende la laguna de Aricota ubicada en el departamento de Tacna, provincia de Candarave, Distrito de Curibaya, a una altura de a una altura de 2 800 m.s.n.m. Pertenece a la Cuenca del río Locumba de la Región Tacna, como se muestra en la figura 10.

#### 4.4.2. Delimitación temporal

El periodo de la investigación se realizó entre los años 2019 y 2021.

#### 4.4.3. Delimitación social

Corresponde a la laguna Aricota.

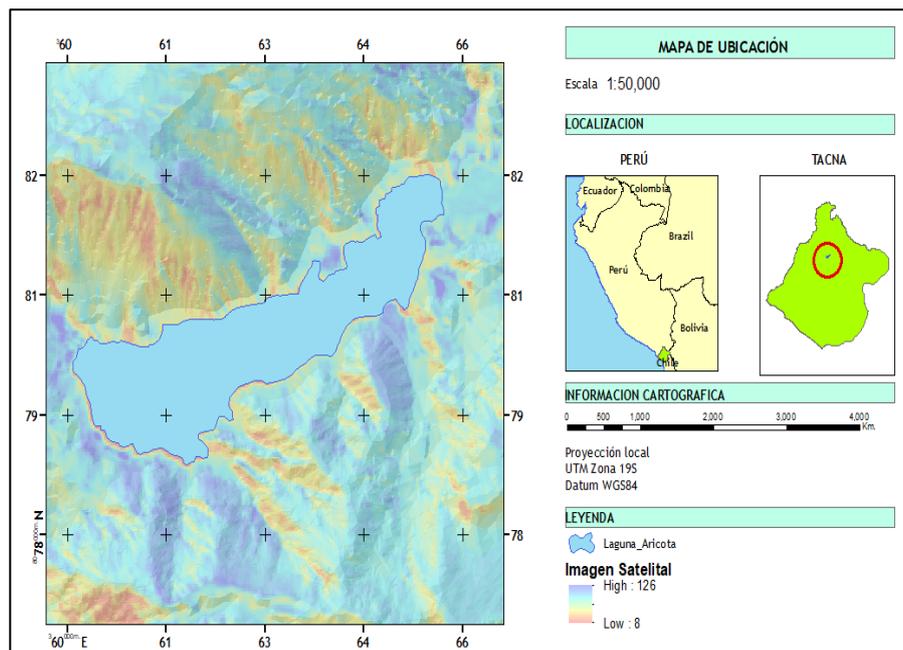


Figura 10. Ubicación de la laguna de Aricota, en la zona de estudio. Adaptada de United States Geological Survey, 2020. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

#### 4.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

##### 4.5.1. Técnicas de recolección de los datos

**Técnica de análisis documental**, el cual hace uso de los documentos confiables ya existentes y de fuentes similares de información como las fuentes de datos.

**Técnica de observación no experimental**, el cual se efectuó a través del estudio de campo. El estudio de campo permitió obtener información, del estado situacional del recurso hídrico en la zona de estudio, información necesaria para hacer la propuesta.

#### **4.5.2. Instrumentos para la recolección de los datos**

**Para fuentes secundarias:** libros especializados sobre procesos hidrológicos, Sistemas de Información Geográfica (SIG), procesamiento digital de imágenes satelitales; bibliotecas virtuales de artículos especializados referidos a la investigación; direcciones URL para acceder al fundamento teórico, antecedentes del estudio, y para acceder a imágenes satelitales LANDSAT.

Uso de software de ubicación geo-referenciada GOOGLE EARTH para la ubicación cartográfica de la zona de estudio, uso del software ARCGIS 10.3 para el manejo del sistema GIS; empleo del software Global Mapper v.20 para la descarga de curvas de nivel; uso del software ENVI 5.0 para el recorte de las imágenes satelitales LANDSAT adquiridas.

#### **4.5.3. Procedimiento de recolección de datos**

##### **1. Recolección de información**

Se trabajaron con imágenes satelitales Landsat, las cuales fueron descargadas de la página del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS), del servidor Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Estas corresponden al periodo de 1972 – 2019, se trabajó con imágenes Landsat, porque son las más usadas para análisis multi-temporal de vegetación, según (Lunneta & Balogh, 1999).

Se trabajaron imágenes del periodo seco (meses de abril-diciembre) para evitar la presencia de nubosidad y no realizar corrección atmosférica. Las imágenes procesadas se muestran en la tabla 5.

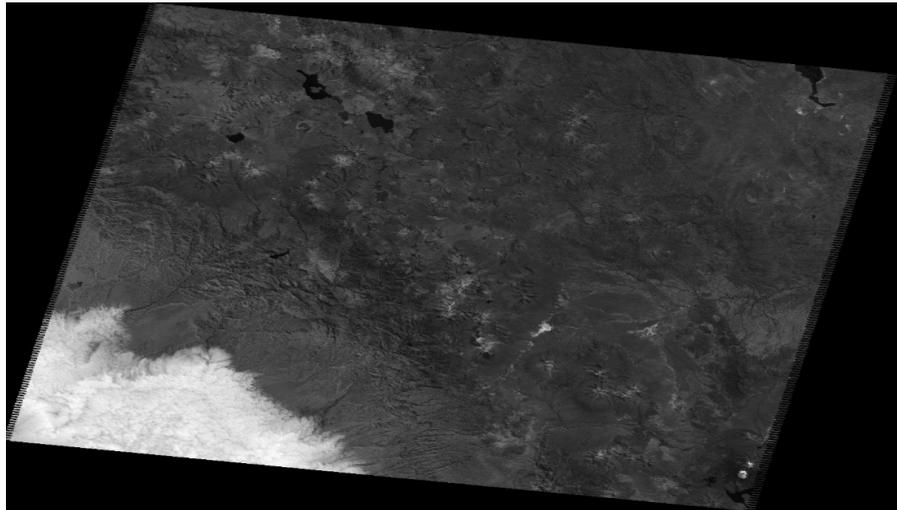


Figura 11. Imagen Landsat, correspondiente al path (002) y row (072). Tomada de United States Geological Survey, 2020. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

Tabla 5. Imágenes satelitales, procesadas en el estudio

<b>IDEM</b>	<b>Landsat</b>	<b>Sensor</b>	<b>Fecha de adquisición</b>	<b>Identificador de escena</b>
1	LANDSAT_1	MSS	26/09/1972	LM10010721972270AAA05
2	LANDSAT_4	MSS	06/10/1982	LM40020721982279AAA03
3	LANDSAT_5	TM	21/09/1990	p002r72_5t19900921
4	LANDSAT_5	TM	16/08/2007	LT50020722007228CUB00
5	LANDSAT_7	ETM	29/07/2015	LE70020722015210CUB00
6	LANDSAT_7	ETM	08/07/2019	LE70020722019189EDC00

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático. ETM: Mapeador Temático Mejorado Plus. Elaboración propia.

## 2. Procesamiento de información

### Pre procesamiento

Antes de empezar el procesamiento se cortaron las imágenes usando el software ENVI 5.0, con la aplicación ENVI Standard, tal como se

muestra en la figura 12 y se utilizaron las siguientes coordenadas UTM de corte:

**Corte superior**

Este 348770.918

Norte 8091787.566

**Corte inferior**

Este 381002.41

Norte 8073177.733

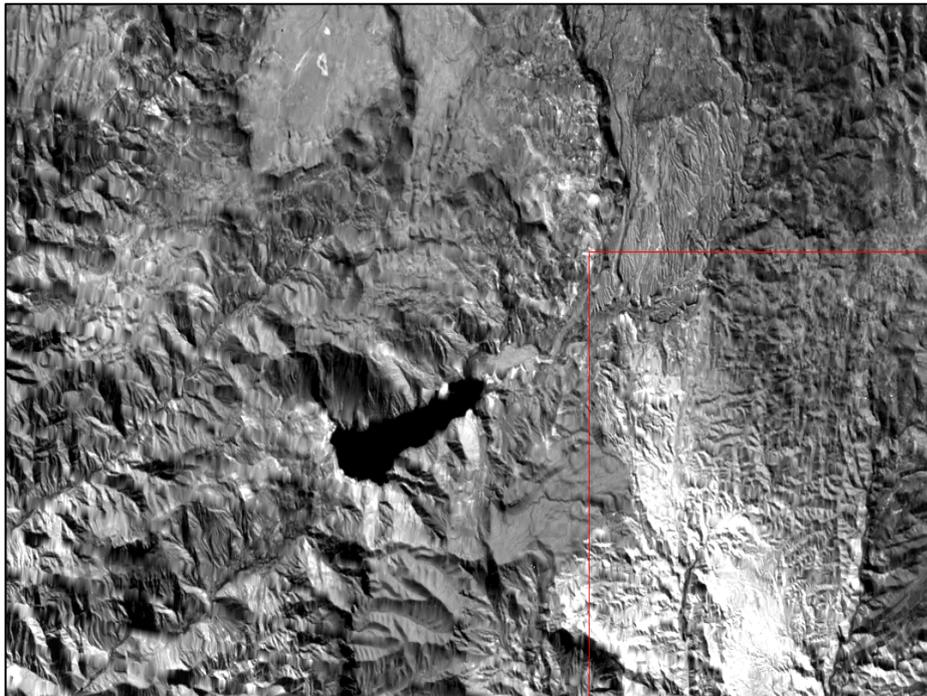


Figura 12. Imagen Landsat cortada en la zona de estudio. Tomada de United States Geological Survey, 2020. Disponible en: <https://earthexplorer.usgs.gov/>

En el caso de las imágenes Landsat 7 ETM+, se utilizó una corrección de bandeo (GapFill), tal como se muestra en la figura 13, como resultado del daño que sufrió el dispositivo óptico mecánico del sensor después del 31 de mayo del 2003, ([http://landsat.usgs.gov/products\\_slcoffbackground.php](http://landsat.usgs.gov/products_slcoffbackground.php)).

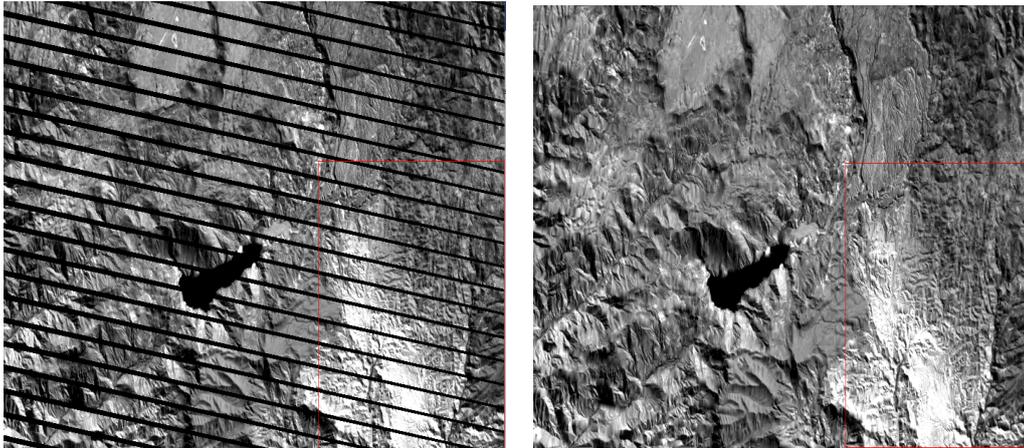


Figura 13. Corrección del bandeo de la imagen Landsat ETM+. Tomada de United States Geological Survey (USGS), 2020. Disponible en: [http://landsat.usgs.gov/products\\_slc0ffbackground.php](http://landsat.usgs.gov/products_slc0ffbackground.php)

### 3. Procesamiento Digital de la Imagen

#### Transformación de número digital (ND) a radiancia

Para realizar el procesamiento digital de las imágenes satelitales, se tuvo que realizar el cambio de número digital (ND) a radiancia haciendo uso del software ENVI 5.0. Con ayuda de la herramienta Landsat Calibrations, se ingresó el Sun Elevation de cada imagen satelital.

Se utilizó el Método de escala radiancia espectral, para calcular la radiancia espectral en el sensor ( $L\lambda$ )

$$L\lambda = \left( \frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{Qcalmax - Qcalmin} \right) (Qcal - Qcalmin) + LMIN\lambda \quad (4)$$

El factor multiplicativo de re-escalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (ML), viene dado por:

$$ML = \left( \frac{LMAX\lambda - LMIN\lambda}{Qcalmax - Qcalmin} \right) \quad (5)$$

El factor aditivo de re-escalamiento específico de la banda, proveniente de los metadatos (AL), viene dado por:

$$AL = LMIN_{\lambda} - \left( \frac{LMAX_{\lambda} - LMIN_{\lambda}}{Qcalmax - Qcalmin} \right) Qcalmin \quad (6)$$

Donde:

*Qcal*: Valor de pixel discretizados y calibrados del producto estándar (Valor digitales DN).

*LMAX<sub>λ</sub>*: Radiancia espectral máxima correspondiente a la banda *Qcalx*.

*LMIN<sub>λ</sub>*: Radiancia espectral mínima correspondiente a la banda *Qcalx*.

*Qcalmax*: Valor máximo del píxel, va depender de la resolución radiométrica, ejemplo de 8 bits es 256.

*Qcalmin*: Valor mínimo del píxel, en nuestro caso es 1.

En el anexo 02 se muestra la corrección de las imágenes de ND a radiancia para las imágenes satelitales procesadas en la investigación, considerando desde el LANDSAT 1 (fecha de descarga: 26/08/1972) hasta el LANDSAT 7 (fecha de descarga: 08/07/2019), considerando las bandas 3 y 4 que nos servirán para determinar el índice de diferencia normalizada.

Tabla 6. Sun Elevation de las imágenes Landsat

IDEM	Landsat	Sensor	Sun Elevation
1	LANDSAT_1	MSS	52.09
2	LANDSAT_4	MSS	53.95
3	LANDSAT_5	TM	49.36
4	LANDSAT_5	TM	45.55
5	LANDSAT_7	ETM	42.68
6	LANDSAT_7	ETM	46.76

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático. ETM: Mapeador Temático Mejorado Plus. Elaboración propia.

### **Transformación de radiancia a reflectancia**

El siguiente tratamiento de la imagen fue transformar de radiancia a reflectancia, utilizando el algoritmo procesado por (Grant & Carter, 2011), donde se obtienen los datos estadísticos de las imágenes procesadas, convertidas de radiancia a reflectancia. Del procesamiento se obtienen valores de 0 hasta 1.

Para determinar la reflectancia en el sensor  $R_{sensor}$ , se utilizó la expresión:

$$R_{sensor} = \left( \frac{\pi \cdot L_{\lambda} \cdot d^2}{E_{sun} \cdot \cos(z)} \right) \quad (7)$$

Donde:

$L_{\lambda}$  = radiancia espectral en el sensor;

$E_{sun}$  = irradiancia solar en la banda de interés

$z$  = ángulo cenital solar (ángulo cenital = 90 – ángulo de elevación solar).

En el anexo 03 se puede visualizar la corrección de las imágenes satelitales desde el LANDSAT 1 (fecha de descarga: 26/08/1972) hasta el LANDSAT 7 (fecha de descarga: 08/07/2019), considerando

las bandas 3 y 4 que nos servirán para determinar el índice de diferencia normalizada.

#### **4. Procesamiento parámetros morfométricos**

##### **Modelo de Elevación Digital (DEM)**

Para determinar los parámetros morfométricos de la imagen, se generó el Modelo de Elevación Digital (DEM), se descargaron curvas de una distancia de 10 metros utilizando el software Global Mapper v.20, como se puede apreciar en la figura 14.

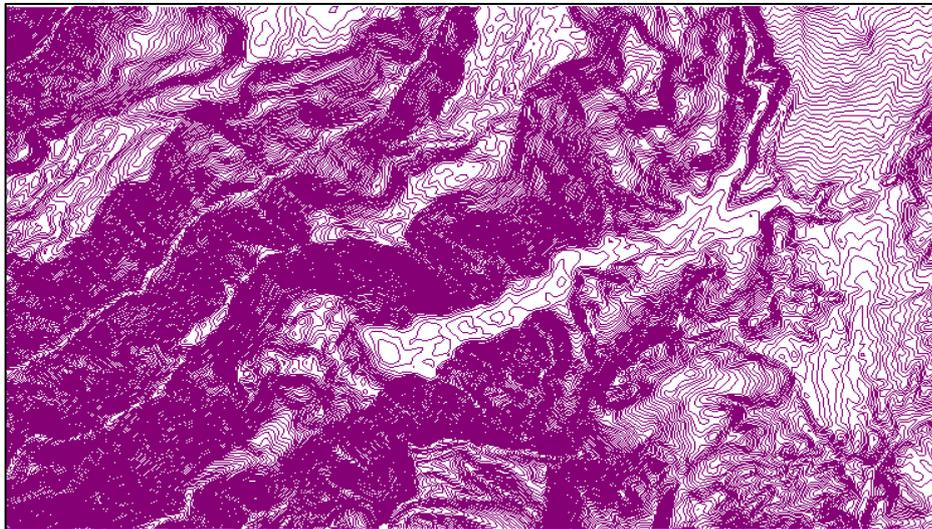


Figura 14 Curvas de nivel, utilizando el software Global Mapper v.20. Elaboración propia.

Al generar el Modelo de Elevación Digital (DEM) apreciamos que las elevaciones están en un rango de 1 880 a 3 950 metros, la laguna varía entre cotas de 2 340 a 2 800 metros, tal como se muestra en la figura 15.

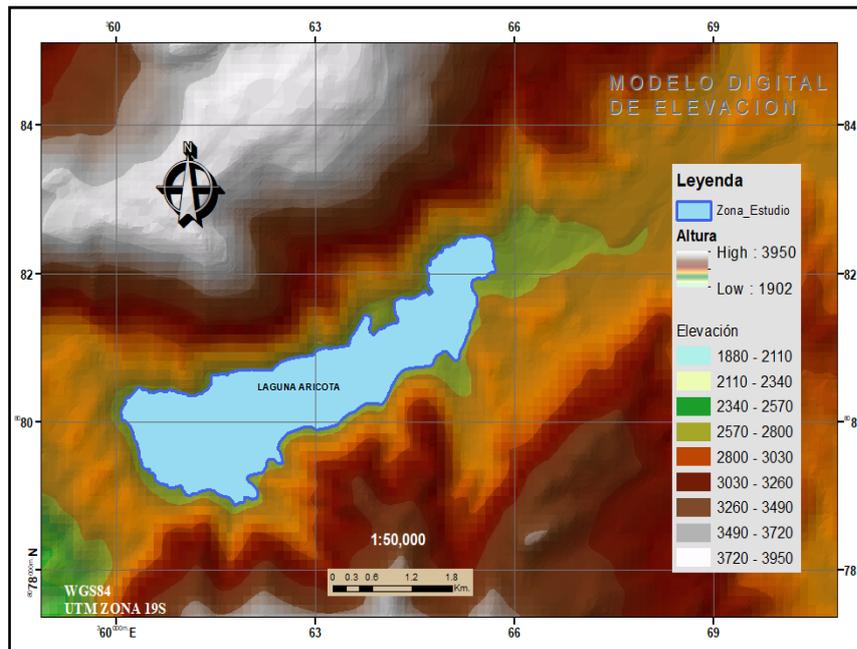


Figura 15 Modelo de Elevación Digital (DEM) de la laguna de Aricota. Elaboración propia.

Se determino el área o superficie de la laguna en función del tiempo, así como el perímetro. Realizando la curva hipsométrica se pudo determinar la profundidad de la laguna en función del área y volumen. El área y perímetro son variables importantes que están en función a la precipitación.

En cuanto a la profundidad este es un parámetro morfométrico muy importante para determinar el funcionamiento y la productividad del ecosistema de la laguna.

Así mismo la curva hipsométrica nos servirá para determinar la forma de la laguna y con esto el desarrollo del volumen.

## 5. Procesamiento para determinar NDVI

Para poder delimitar la Laguna de Aricota, se realizó la metodología de Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (Normalized

Difference Vegetation Index), NDVI, propuesto por (Gutman, 1991) el cual define como:

$$NDVI = \frac{(IRc-Vis)}{(IRc+Vis)} \quad (8)$$

Donde:

IRc = Banda del infrarrojo cercano;

Vis = Banda del rojo.

En la figura 16, se muestra la imagen procesada para obtener el Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (Normalized Difference Vegetation Index), NDVI de la laguna de Aricota.

En el anexo 04 se muestran los resultados del procesamiento desde el año 1972 hasta el año 2019. En la imagen se observa el shapefile de la delimitación de la laguna de Aricota en tonalidad roja, esta corresponde al año 2016, información que corresponde a la base de datos publicada por la unidad de ordenamiento territorial del Gobierno Regional de Tacna, que nos sirvió como base para ver la evolución de la laguna en el tiempo. También se observa en la leyenda la reclasificación tomando en tonalidades negras valores menores a 0.2 los cuales corresponden a cuerpos de agua. Cabe indicar que esta información corresponde a las imágenes satelitales LANDSAT 1 al 7.

En el anexo 06 se muestra los resultados del NDVI de las imágenes LANDSAT 8, que corresponden al periodo de tiempo 2013 al 2020, se muestra la reclasificación de la imagen en 5 categorías que corresponden desde (0-0.1) cuerpos desnudos, (0.1-0.2) vegetación regular (0.2-0.4) vegetación buena y (>0.4) vegetación muy buena como se muestra en las imágenes los cuerpos de agua se delimitan de color rojo que corresponden a cuerpos desnudos o erosionados, esto nos servirá para delimitar la laguna y hacer el análisis multitemporal y para determinar parámetros morfométricos como el área.

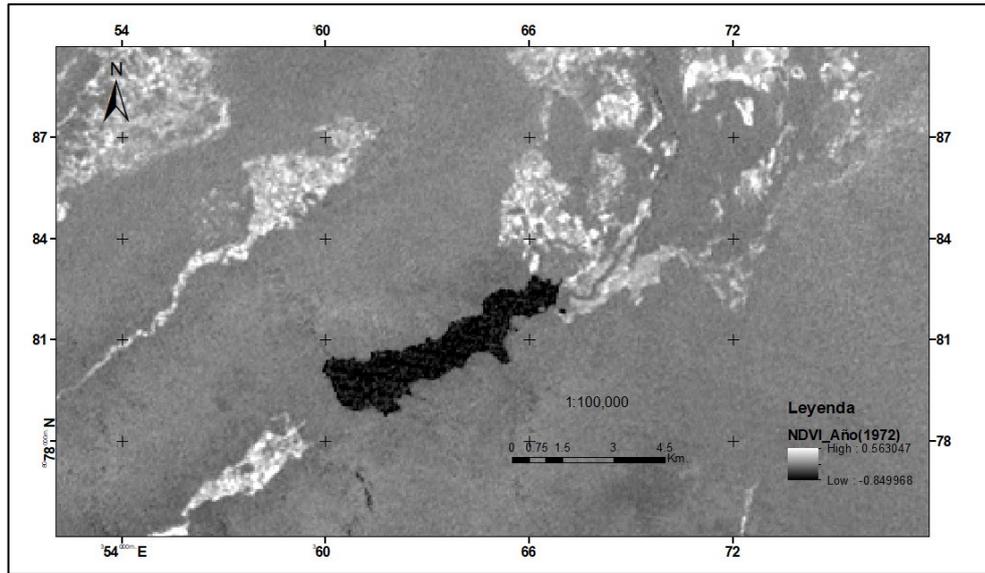


Figura 16 Índice de Vegetación Diferencia Normalizada (NDVI) de la laguna de Aricota. Elaboración propia.

La imagen Landsat es de 3 234 x 1 872 y un tamaño de píxel de 10x10 metros, se consideró un umbral de 0.34, propuesto por (Borro, et al., 2014), haciendo una clasificación de ( $NDVI > 0.34$  = ausencia de agua), ( $NDVI < 0.34$  = presencia de agua), creando esta máscara se determinó el valor de 1 para la presencia de agua, como se muestra en la figura 17.

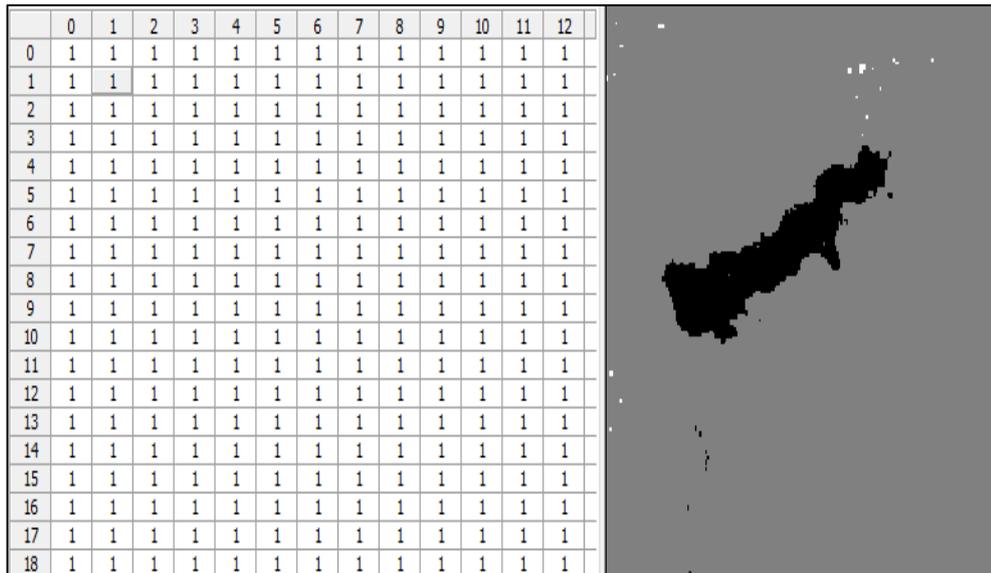


Figura 17 Relación de píxel con la máscara de la laguna de Aricota, El valor 1 indica la presencia de agua. Elaboración propia.

Transformando a formato vector la imagen Landsat, logramos despejar y obtener el área de la laguna de Aricota, tal como se aprecia en la figura 18.

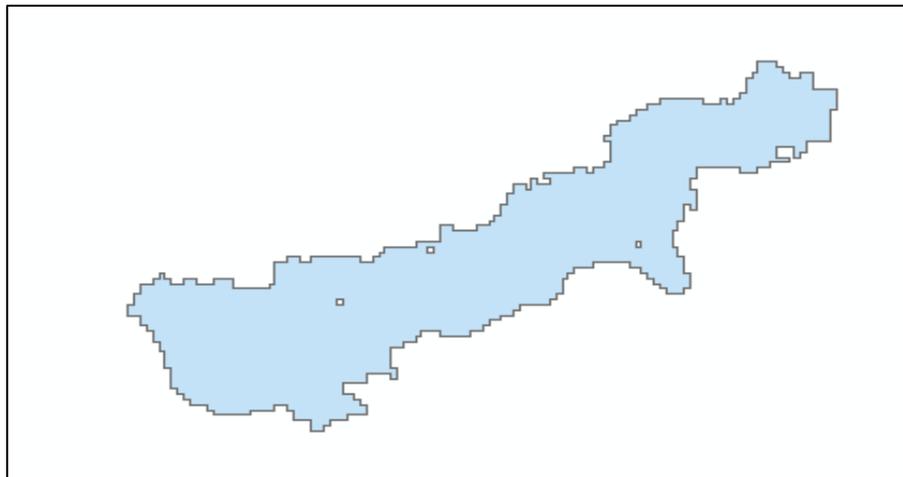


Figura 18 Formato vector de la laguna, para determinar su área. Elaboración propia.

Finalmente, para obtener el volumen de la laguna trabajamos con la Red Irregular de Triangulo (TIN: Triangular Irregular Network),

colocamos el valor de la cota, considerando el punto de descarga de la laguna, ver la figura 19.

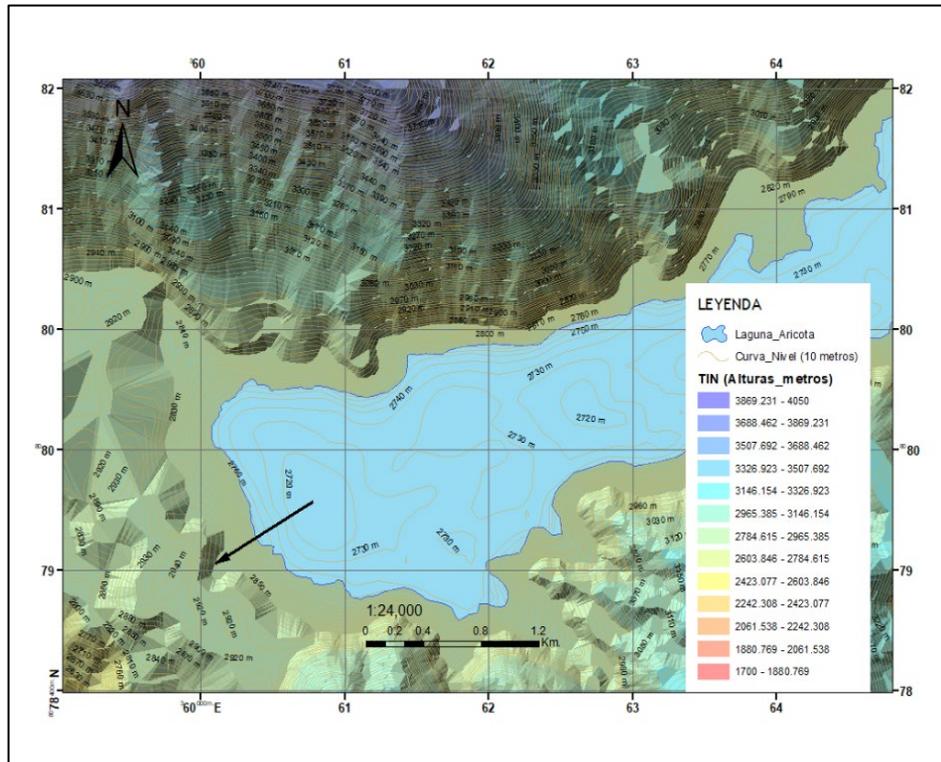


Figura 19 Red Irregular de Triangulo (TIN), para determinar el volumen de la laguna de Aricota. Elaboración propia.

## 6. Procesamiento para determinar el volumen de la laguna

Para determinar el volumen se consideró las fluctuaciones relativas del nivel del agua, las estimaciones de las zonas inundadas con respecto a las curvas de nivel ( $Z_1$ ), considerando la desembocadura de la laguna como se muestra en la figura 19, a partir de estos datos se utilizaron las imágenes satelitales en diferentes periodos de tiempo (años), en esta metodología se toma como referencia una altura inicial ( $Z_0$ ).

## 4.6. Análisis y procesamiento de datos

### 4.6.1. Procesamiento estadístico Digital de la Imagen

En cuanto al procesamiento digital de la imagen observamos que, en los sensores MSS más de 50% de los píxeles de la imagen tienen valores entre 70 y 140. Para los sensores TM, observamos valores promedio de 40 a 80, superando el 50% de los píxeles. A diferencia de los anteriores sensores ETM nos da valores por debajo del 50%, esto quiere decir que los píxeles almacenan niveles poco concentrados, pero en todos los sensores observamos muy poca dispersión. Los datos estadísticos se muestran en la tabla 7.

Tabla 7 Datos estadísticos de radiancia a reflectancia

LANDSAT	SENSOR	AÑO	BANDA	MIN.	MAX.	MED.	DES. STD
LANDSAT_1	MSS	1972	5	12.47	284.08	140.51	36.58
			6	5.88	183.38	70.19	22.19
LANDSAT_4	MSS	1982	3	11.47	280.08	138.51	34.58
			4	4.88	180.38	80.19	20.19
LANDSAT_5	TM	1990	3	34.33	210.76	87.18	17.71
			4	15.13	145.66	62.18	13.47
LANDSAT_5	TM	2007	3	8.23	171.09	56.52	18.37
			4	2.87	136.90	47.80	15.19
LANDSAT_7	ETM	2015	3	3.70	152.90	48.45	16.59
			4	0.00	87.67	28.30	9.46
LANDSAT_7	ETM	2019	3	4.95	146.68	43.12	16.26
			4	0.00	74.87	24.47	9.39

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático. ETM: Mapeador Temático Mejorado Plus. Elaboración propia.

Para las imágenes en reflectancia los valores mínimos los que nos sirven para identificar los cuerpos de agua, la reflectividad aumenta en aguas menos profundas, como en el caso de la laguna donde observamos valores mínimos de 0.006, y valores máximos de 0.2, tal como se muestra en la figura 20.

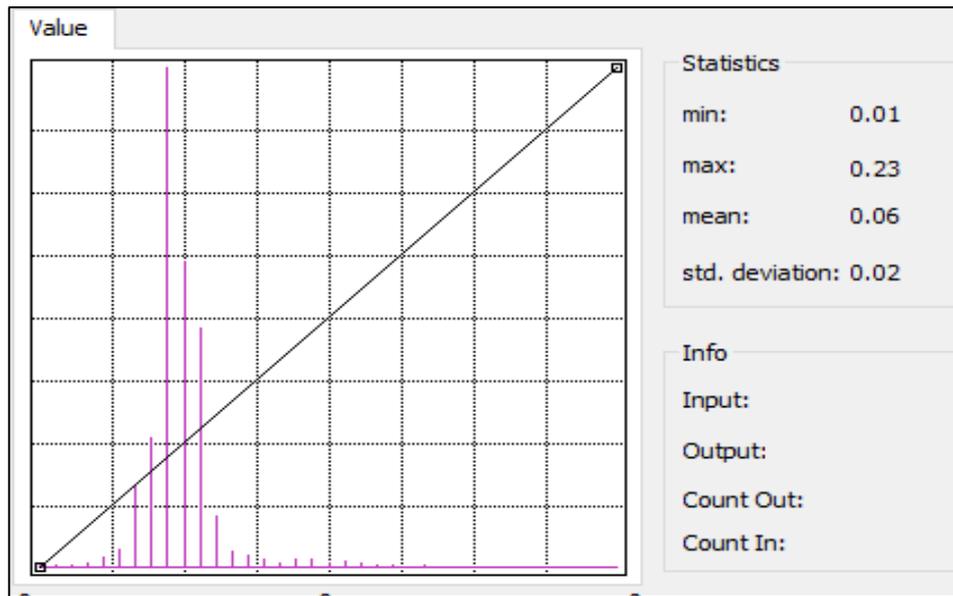


Figura 20 Análisis estadístico de la reflectancia en la laguna de Aricota, observando su reflectividad. Elaboración propia.

Luego, se procede a la corrección de la reflectancia, donde se obtiene los nuevos valores de los píxeles, tal como se muestra en la figura 21.

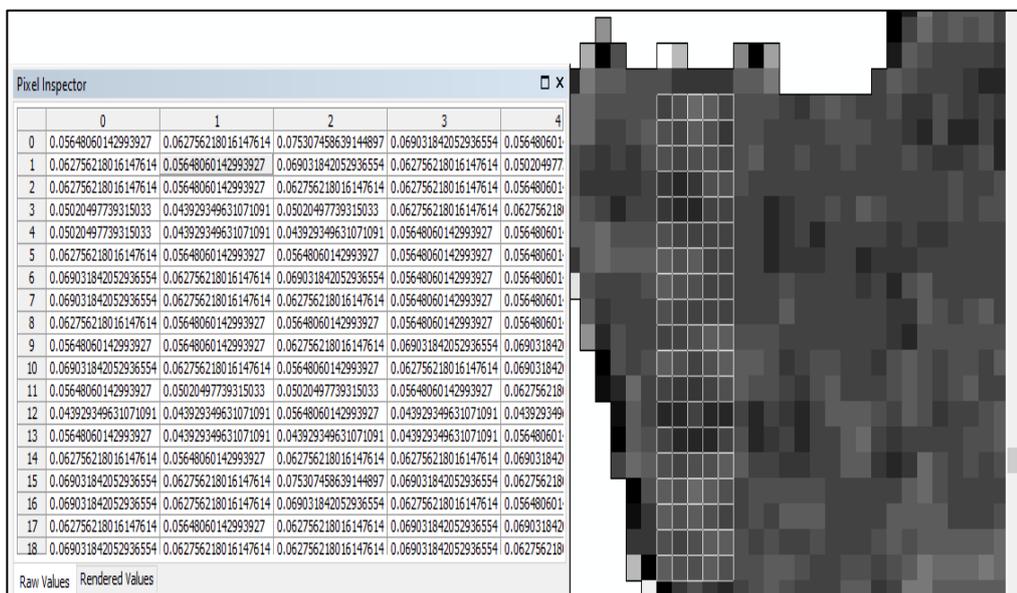


Figura 21 Valor de píxel en una imagen con corrección de reflectancia. Elaboración propia

La tabla 8, muestra los datos estadísticos de radiancia a reflectancia obtenidos para los Landsat 1, 4, 5 y 7.

Tabla 8. Datos estadísticos de radiancia a reflectancia

LANDSAT	SENSOR	AÑO	BANDA	MIN.	MAX.	MED.	DES.STD
LANDSAT_1	MSS	1972	6	0.032	1.644	0.677	0.196
			5	0.006	1.600	0.636	0.174
LANDSAT_4	MSS	1982	3	0.054	0.949	0.477	0.115
			4	0.037	0.733	0.336	0.080
LANDSAT_5	TM	1990	3	0.092	0.598	0.244	0.051
			4	0.044	0.512	0.213	0.048
LANDSAT_5	TM	2007	3	0.005	0.464	0.143	0.051
			4	0.000	0.327	0.099	0.036
LANDSAT_7	ETM	2015	3	0.000	0.279	0.077	0.032
			4	0.000	0.253	0.063	0.030
LANDSAT_7	ETM	2019	3	0.000	0.292	0.072	0.034
			4	0.000	0.212	0.051	0.029

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático.  
ETM: Mapeador Temático Mejorado Plus. Elaboración propia.

#### 4.6.2. Procesamiento estadístico de parámetros morfométricos

Como ya se explicó se determinó el área y perímetro de la laguna logrando obtener los siguientes análisis estadístico. Podemos decir que estos varían significativamente en el tiempo con respecto al área, en el caso del perímetro.

Tabla 9. Análisis estadístico de los parámetros morfométricos

Parámetro	Área (Km <sup>2</sup> )	Perímetro (Km)
Rango	8.85 - 4.81	21.56 - 27.96
Media	6.39	4.66
Desviación Estándar	1.39	2.72

*Nota:* Variación de los parámetros morfométricos de la laguna e Aricota.  
Elaboración propia.

#### 4.6.3. Procesamiento estadístico para NDVI

En el caso del Índice de Vegetación Normalizado, se tiene el siguiente análisis estadístico. En la tabla 10 se puede apreciar que existe poca dispersión y los datos se ajustan para poder delimitar la laguna.

Tabla 10. Análisis Estadístico de NDVI

<b>LANDSAT</b>	<b>SENSOR</b>	<b>AÑO</b>	<b>MINIMO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>MEDIA</b>	<b>DES. STD</b>
LANDSAT_1	MSS	1972	-0.850	0.563	-0.033	0.073
LANDSAT_4	MSS	1982	-0.064	0.332	0.204	0.035
LANDSAT_5	TM	1990	-0.370	0.558	-0.070	0.071
LANDSAT_5	TM	2007	-1.000	0.581	-0.197	0.127
LANDSAT_7	ETM	2015	-1.000	0.765	-0.143	0.197
LANDSAT_7	ETM	2019	-1.000	0.880	-0.168	0.155

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático. ETM: Mapeador Temático Mejorado Plus. Elaboración propia.

Además, como se puede apreciar en la tabla 11, se tiene valores mínimos desde -1.00 hasta valores máximos de 0.88, esto nos indica presencia de agua. El NDVI nos sirve para delimitar la laguna y poder luego obtener los resultados de volumen. En la tabla 10 muestra el rango de los datos tomados en la laguna.

Tabla 11. Rango de NDVI de la zona de estudio

<b>LANDSAT</b>	<b>SENSOR</b>	<b>AÑO</b>	<b>MÍNIMO</b>	<b>MAXIMO</b>	<b>MEDIA</b>
LANDSAT_1	MSS	1972	-0.850	0.210	-0.530
LANDSAT_4	MSS	1982	-0.060	0.180	0.060
LANDSAT_5	TM	1990	-0.370	-0.100	-0.235
LANDSAT_5	TM	2007	-1.000	-0.570	-0.785
LANDSAT_7	ETM	2015	-1.000	-0.510	-0.755
LANDSAT_7	ETM	2019	-1.000	-0.520	-0.760

*Nota:* MSS: Sistema de Escáner Multiespectral. TM: Mapeador Temático. ETM: Mapeador Temático Mejorado Plus. Elaboración propia.

#### 4.6.4. Análisis multiespectral

En cuanto al análisis Multiespectral, se utilizaron imágenes satelitales Landsat 8, tal como se muestra en la tabla 12.

Tabla 12. Imágenes satelitales Landsat 8

FECHA	SUN_ELEVATION	SUN_AZIMUTH
18/07/2020	41.12559547	39.81608088
15/05/2020	43.92892659	39.09846164
1/08/2019	43.29935435	42.36996752
29/05/2019	41.8207526	37.0897327
14/08/2018	46.17617833	45.74488726
26/05/2018	42.11476974	37.56344136
26/07/2017	42.27694419	41.24226238
7/05/2017	45.50656388	41.03611307
23/07/2016	41.84406625	40.68519525
20/05/2016	43.08933017	38.16059305
6/08/2015	44.26709408	43.59715007
2/05/2015	46.56790028	42.73364362
19/08/2014	47.57998421	46.97456329
15/05/2014	44.0582739	39.16049951
16/08/2013	47.18494115	45.70194267
26/04/2013	48.14795032	43.91607239

*Nota:* Análisis multiespectral del LANDSAT 8. Elaboración propia.

El análisis multiespectral de las imágenes satelitales Landsat 8, nos permitirá analizar las diferentes longitudes de onda con respecto al pixel de la imagen. Para la presente metodología se realizó una clasificación supervisada, haciendo la identificación de firmas espectrales, se determinó tres tipos de coberturas: agua, vegetación y suelo. En cuanto a la metodología se realiza mediante el uso de las bandas. Las bandas espectrales se obtienen gracias a la luz que se

refleja y que es absorbida por los tres tipos de coberturas analizadas, estas se agrupan de acuerdo a la clase espectral.

Para validar la metodología se utilizó la matriz de confusión de clases y el coeficiente de Kappa. Altman (1991) ofrece una clasificación de los coeficientes Kappa según la fuerza de concordancia, que nos puede ayudar a interpretar los coeficientes obtenidos. Los coeficientes registran valores que van desde 0 a 1, siendo 0 el valor donde hay mayor desacuerdo entre investigadores y 1 el punto donde encontramos mayor acuerdo, tal como se muestra en la tabla 13.

En el anexo 06 se muestra los resultados obtenidos de las firmas espectrales para las imágenes LANDSAT 8 desde el año 2013 al 2020. Se puede visualizar las coberturas y la relación entre la reflectancia y las bandas. Se observa que en el caso de la banda del infrarrojo cercano para cuerpos de agua se obtiene resultados menores a 0.2, a diferencia de zonas de cobertura vegetal y suelos erosionados donde se tiene valores por encima de 0.4, lo cual nos indica que se ha realizado de forma correcta la delimitación de las coberturas.

Tabla 13. Índices de Kappa respecto a la fuerza de concordancia

<b>Coeficiente de Kappa (K)</b>	<b>Fuerza de concordancia</b>
< 0.20	Pobre
0.21 – 0.40	Débil
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Buena
0.81 – 1.00	Muy buena

Nota: Tomada de “Cálculo de la fiabilidad y concordancia”, por Torres y Perera, 2009, p. 100. Disponible en: <https://www.redalyc.org/pdf/2833/283322804006.pdf>

En el anexo 07, se muestra los resultados del índice de Kappa para las diferentes coberturas, esto corresponde a las imágenes landasat 8 desde el año 2013 al 2020,

#### 4.6.5. Determinación de la reducción del volumen de la laguna

Para la identificación de la reducción del volumen de la laguna de Aricota, se realizó la conversión de formato ráster a vectorial generando de esta forma polígonos que nos permitirán determinar el área y el volumen de la laguna de Aricota por años.

Para determinar la reducción del volumen se utilizó el modelo de regresión, el cual permite determinar la relación que existe entre el volumen en función del tiempo.

Según Franco (2007), el análisis de regresión lineal simple se realiza cuando se pretende explicar una variable dependiente,  $Y$ , cuantitativa, en función de una variable independiente,  $X$ , cuantitativa. Este modelo matemático permite estimar la función lineal matemática entre  $X$  e  $Y$ , con el fin de hallar la estimación media de  $Y$ , a partir de los valores de  $X$ , tal como se presenta en la ecuación

$$Y_i = \beta_0 + \beta_1 X_i + \varepsilon_i \quad i = 1, 2, \dots, n \quad (9)$$

Donde:

$Y_i$  = Variable dependiente (superficie de la laguna)

$X_i$  = Variable independiente (años de las imágenes satelitales).

$\beta_0$  = Parámetro desconocido

$\beta_1$  = Parámetro desconocido

$\varepsilon$  = Error de perturbación

Posteriormente se realizó un modelo matemático muestral de regresión lineal a los datos multitemporales de las diferentes coberturas. Entonces se obtuvo del siguiente modelo matemático para la disminución del volumen.

Los coeficientes poblacionales de correlación  $\beta_0$  y  $\beta_1$  se estiman con los datos muestrales del estudio generando los valores de  $a$  y  $b$  respectivamente, como se presenta a continuación:

$$y = \beta_0 + \beta_1 x + \varepsilon \text{ Modelo poblacional.} \quad (10)$$

$$\hat{y} = a + bx \text{ Modelo muestral.} \quad (11)$$

## V RESULTADOS

### 5.1 Resultados descriptivos (Parámetros Morfométricos)

Los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota tomados en cuenta en la presente investigación fueron: el área, el perímetro y el volumen.

#### 1. Área de la laguna

La laguna de Aricota es considerada una laguna grande por tener un área  $> 2 \text{ km}^2$ , En el caso del área, la figura 22 muestra su variación temporal. En el año 1972 el área de la laguna fue de  $8.85 \text{ km}^2$ , mientras que en el año 2019 se pudo apreciar un descenso significativo hasta llegar a un área de  $5.8 \text{ km}^2$ .

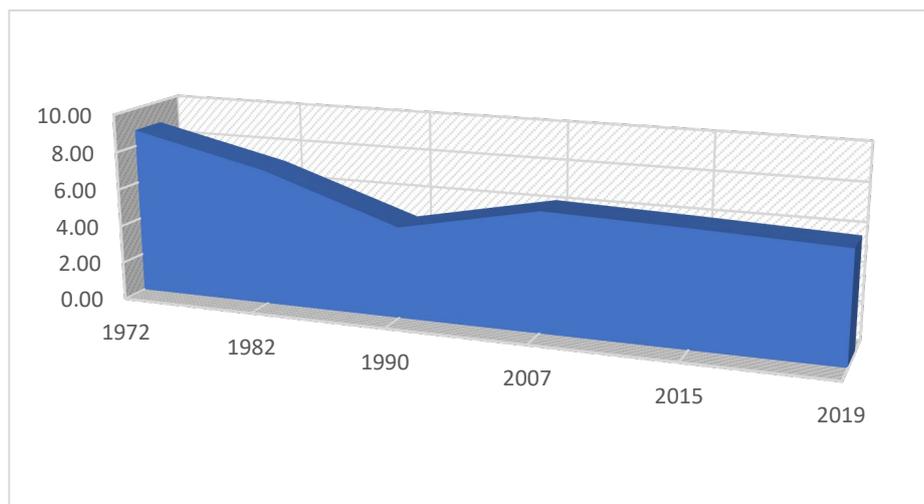


Figura 22 Área de la laguna en función del tiempo. Elaboración propia.

La figura 23 muestra el perfil longitudinal del cauce de la laguna de Aricota. Se pudo observar que la morfometría de la laguna presentó profundidades máximas de hasta 180 metros aproximadamente. Se observó que la profundidad de la laguna muestra un comportamiento no homogéneo variando en su recorrido. Las mayores profundidades se dieron a los 2, 5 y 6 km, presentando pendientes pronunciadas y una cubeta

irregular (contorno de la profundidad), esto debido a la sedimentación acumulada en la parte central de la laguna. De acuerdo a las características geológicas de la zona, la dirección de flujo va de este a oeste.

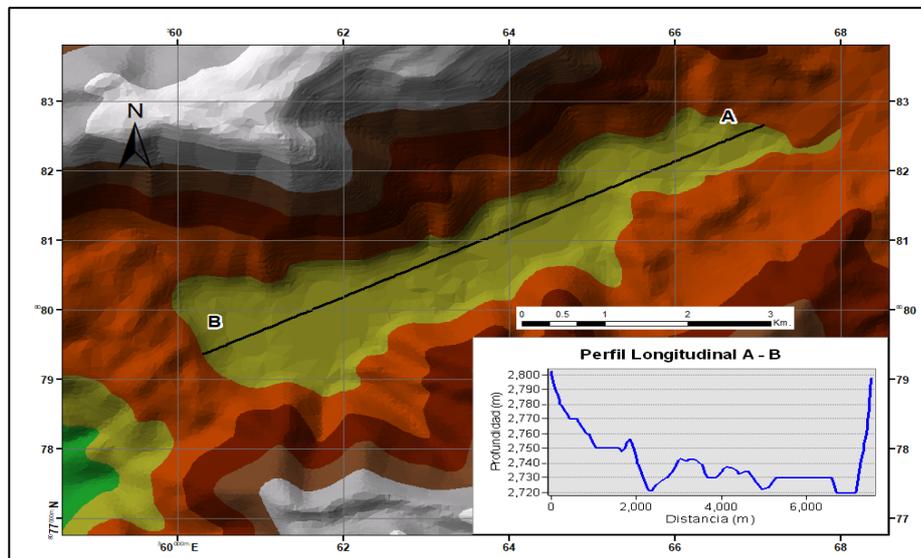


Figura 23 Perfil longitudinal de la laguna de Aricota. Elaboración propia.

Realizando un perfil transversal del cauce de la laguna, como se muestra en la figura 24, en el punto más profundo de la laguna se puede observar la cubeta asimétrica con una distancia de 1400 metros.

Siendo el área es uno de los parámetros morfométricos más importantes en el caso de la batimetría de una laguna, fue importante analizar su comportamiento temporal para determinar la reducción de su área superficial.

Haciendo un análisis multitemporal del comportamiento del área de la laguna de Aricota tal como se muestra en la tabla 13, pudimos observar que hubo un decrecimiento excepcional del área de la laguna en el año 1990. El área de la laguna en 1972 fue de 8.85 km<sup>2</sup> y decreció hasta los 4.61 km<sup>2</sup> en 1990,

produciéndose una reducción del área de aproximadamente el 50 %.

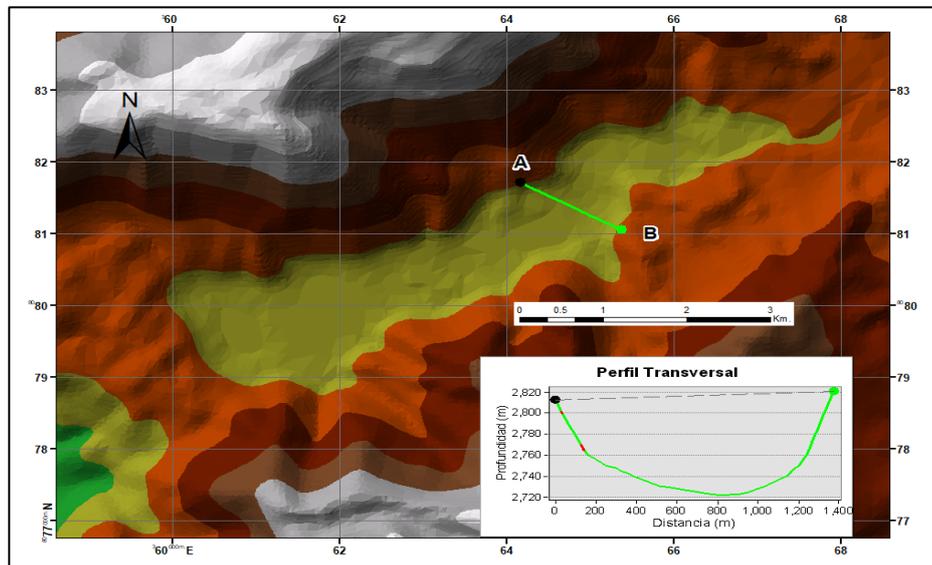


Figura 24 Perfil Transversal de la laguna de Aricota.

Tabla 14. Proyección de área y perímetro de la laguna.

<b>AÑO</b>	<b>Área (m<sup>2</sup>)</b>	<b>Área (Km<sup>2</sup>)</b>	<b>Perímetro (m)</b>	<b>Perímetro (Km)</b>
1972	8852400.00	8.85	27960.00	27.96
1982	7217659.35	7.22	27500.00	27.50
1990	4810106.75	4.81	22860.00	22.86
2007	6297693.32	6.30	21600.00	21.60
2015	6078023.12	6.08	21560.00	21.56
2019	5803906.26	5.80	22800.00	22.80
Máximo	8852400.00	8.85	27960.00	27.96
Mínimo	4810106.75	4.81	21560.00	21.56
Media	6393118.12	6.39	23905.47	23.91
Desv. estándar	1386182.03	1.39	2911.07	2.91

Fuente: Elaboración propia.

## **2. Perímetro de la laguna**

En cuanto al perímetro de la laguna, observamos en la tabla 14 las variaciones de este parámetro morfométrico, que van desde 21.56 a los 27.96 km.

Según el perfil longitudinal de la figura 23, la laguna de Aricota presenta una longitud máxima de 8.4 km y un ancho máximo de 1.7 km y mínimo de 1 km, tal como se aprecia en el perfil transversal de la figura 24.

Una vez calculados los parámetros morfométricos de la laguna que se presentaron en la tabla 14, se generó el gráfico correspondiente a la curva hipsométrica de la laguna de los años 1990, 2007, 2015 y 2019, que representan la variación de la elevación de la cuenca respecto al nivel medio del mar, ver figura 25.

Realizando la curva hipsométrica como se aprecia en la figura 25, se pudo determinar que en el año 1990 se aprecia a un 50% del área acumulada una profundidad de 2 725 metros y en el año 2019 se tiene una profundidad de 2700 metros, observándose un descenso en el volumen de la laguna Aricota.

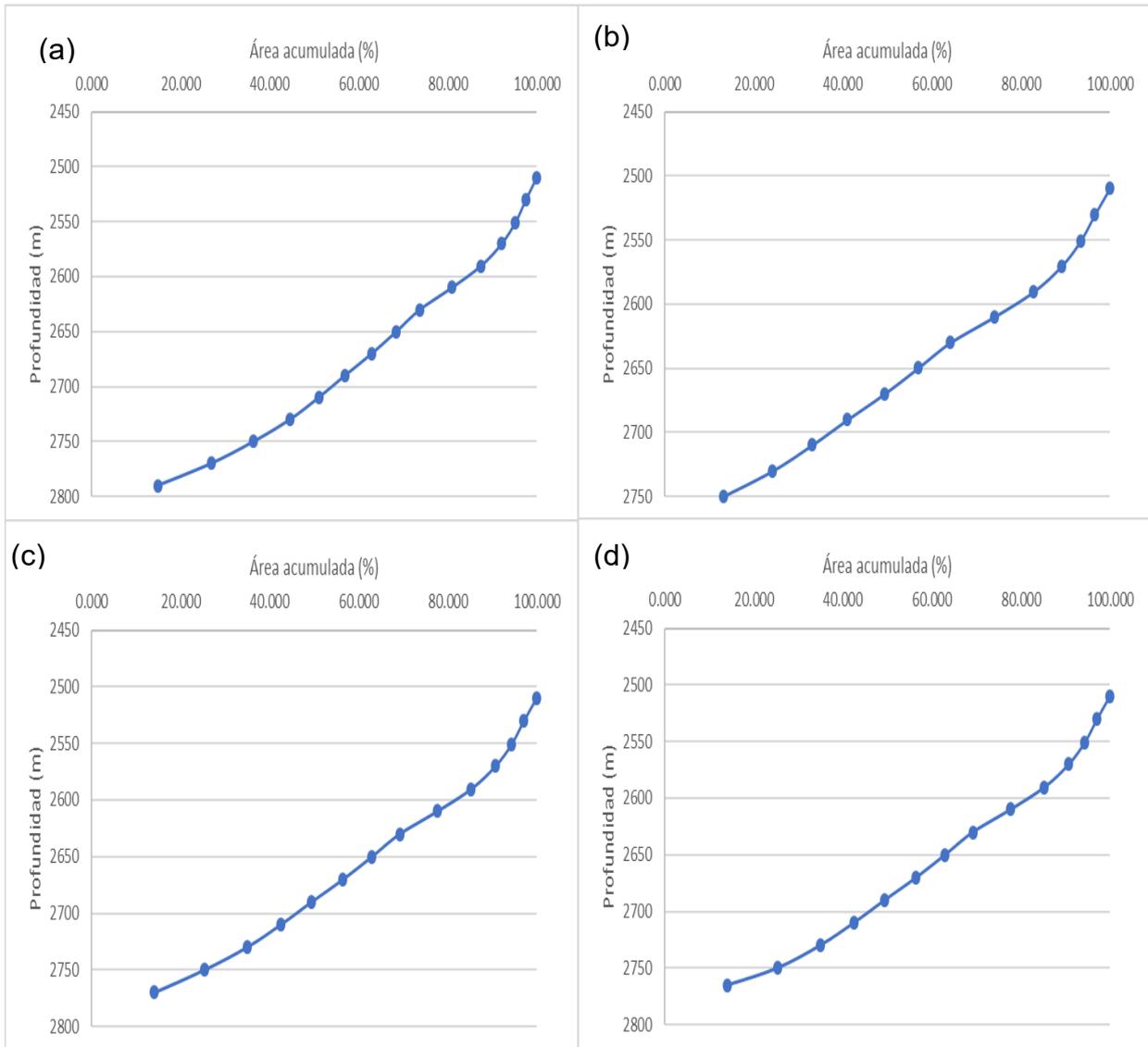


Figura 25 Curva hipsométrica de los años 1990(a), 2007(b), 2015(c) y 2019(d). Elaboración propia

## 5.2 Resultados inferenciales (Determinación de NDVI)

En cuanto a los resultados obtenidos de NDVI en la zona de estudio se tiene que los valores presentan un rango de (0.2 a 0.6), los cuales nos indican valores mayores a 0.2 vegetación buena a muy buena y teniendo rangos de (0 a 0.2) presenta vegetación regular y en el caso de cuerpos de agua presenta un rango de (-1 a 0), este índice de vegetación nos permite

delimitar mejor el cuerpo de agua para determinar el volumen de la laguna. En el Anexo 4 se muestran las imágenes satelitales adquiridas desde el año 1972 hasta el año 2019, las cuales fueron procesadas para la determinación de los valores de NDVI.

### 5.3 Análisis multiespectral

El análisis multiespectral fue empleado para validar el modelo utilizado para la determinación del volumen de agua de la laguna de Aricota. La tabla 15 muestra la precisión global de la clasificación de coberturas y los valores del coeficiente de kappa obtenidos para cada año trabajado entre el 2013 al 2020.

Tabla 15. Validación del modelo con el índice de Kappa

<b>Año</b>	<b>Coeficiente de Kappa</b>	<b>Kappa (%)</b>	<b>Precisión global</b>
2013	0.86	86.20	93.48
2014	0.86	85.68	93.48
2015	0.81	80.55	91.30
2016	0.81	81.26	91.30
2017	0.76	76.14	89.13
2018	0.81	81.26	91.30
2019	0.95	94.99	97.83
2020	0.90	89.78	95.65

Fuente: Elaboración propia.

Analizando la tabla 15, se pudo apreciar que el índice o coeficiente de Kappa fluctúa entre valores de 0.76 y 0.95. Según la tabla 12 de los valores de Kappa, indicó que el modelo tuvo una fuerza de concordancia muy buenos y en cuanto a la precisión global se tuvo valores mayores a 90%, los cuales nos indicaron el modelo fue altamente aceptable, validando de

esta forma el modelo utilizado para la determinación del volumen de agua de la laguna de Aricota.

#### 5.4 Determinación de la reducción del volumen de la laguna

##### **Modelamiento del volumen de la laguna en función del tiempo**

El volumen también es un parámetro morfométrico importante, nos ayuda a determinar el tipo de laguna y su funcionamiento en el tiempo. En el caso de la zona de estudio, observamos que esta también ha variado en función del tiempo, como se muestra en la tabla 16, donde se observa un decrecimiento en un periodo de 47 años, que va desde los 668.96 hm<sup>3</sup> en 1972, hasta 206.11 hm<sup>3</sup> en 2019, presentando un porcentaje de decrecimiento más bajo en el año 1990 que representó el 14% del volumen inicial.

Tabla 16 Proyección del volumen de la laguna en función de tiempo

AÑO	COTA_REF	VOLUMEN (m <sup>3</sup> )	VOLUMEN (hm <sup>3</sup> )	PORCENTAJE (%)
1972	2820	668'959,519.0	668.96	100
1982	2800	498'355,906.1	498.36	74
1990	2750	93'477,245.05	93.48	14
2007	2770	225'330,627.7	225.33	34
2015	2780	265'418,513.0	265.42	40
2019	2770	206'107,518.1	206.11	31

En cuanto a la línea de tendencia del volumen de la laguna de Aricota, se pudo obtener de acuerdo al modelo de regresión polinómica de Grado 4, la ecuación de parametrización de volumen en función del tiempo (año de estimación del volumen):

$$\text{Volumen} = - 0.0031x^4 + 24.976x^3 - 74742x^2 + 1E+08 x - 5E+10 \quad (11)$$

Donde x(m) es el año de estimación del volumen

El ajuste de la curva presentó un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.9737$ , como se muestra en la figura 26.

La tendencia de la gráfica nos permite determinar que la laguna de Aricota presentará una notable reducción en los próximos años.

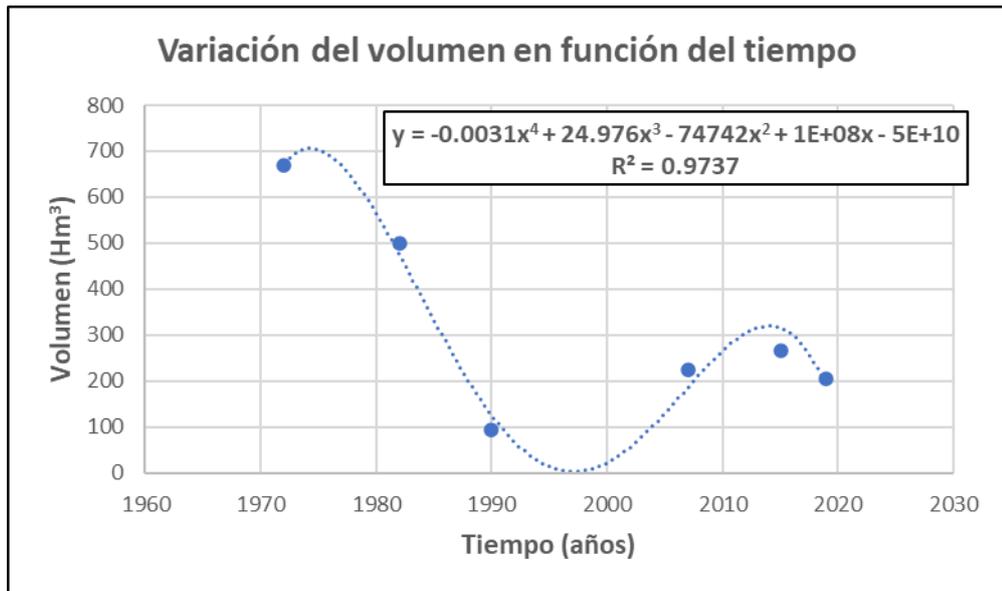


Figura 26 Variación del volumen de la laguna de Aricota en función del tiempo.

### **Modelamiento del volumen de la laguna en función del nivel altimétrico**

En la tabla 16 se puede apreciar los diferentes de niveles de agua de la laguna de Aricota con respecto a la superficie de la laguna inicial. Se puede observar que a medida que estos decrecen, se aprecia una disminución del volumen de la laguna.

En el modelo de regresión lineal se puede obtener la ecuación de parametrización de volumen con respecto a los niveles altimétricos.

$$\text{Volumen} = 8.544x - 23440 \quad (12)$$

Donde  $x(m)$  es el nivel altimétrico.

El ajuste de la curva presenta un coeficiente de determinación de  $R^2 = 0.9804$ , tal como se muestra en la figura 27.

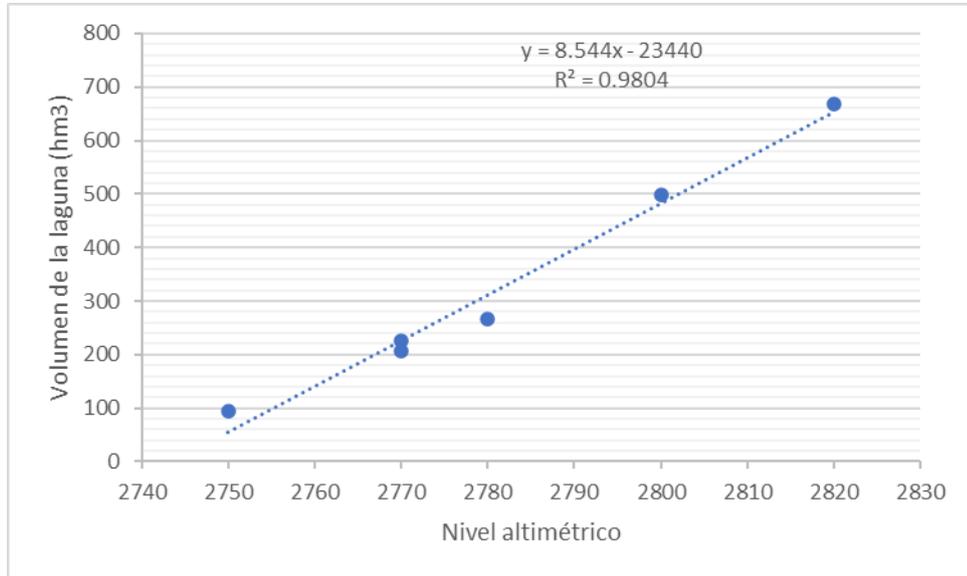


Figura 27 Variación del volumen de la laguna de Aricota en función del nivel altimétrico

## VI DISCUSIÓN DE RESULTADOS

### 6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

#### 1. Hipótesis específicas

Se utilizó la correlación de Pearson (ver tabla 17), el análisis multiespectral y multitemporal para la contrastación de las hipótesis específicas.

#### **H1: Existe una relación directa entre parámetros morfométricos de la laguna y la reducción de su volumen**

Tabla 17 Correlaciones de Pearson

		Volumen	perímetro	Área
Volumen	Correlación de Pearson	1	,885*	,978**
	Sig. (bilateral)		,019	,001
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	2295728145313 52576,000	2759660638628 ,667	1452779478345 646,000
	Covarianza	4591456290627 0512,000	551932127725, 733	2905558956691 29,200
	N	6	6	6
perímetro	Correlación de Pearson	,885*	1	,798
	Sig. (bilateral)	,019		,057
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	2759660638628 ,667	42371733,333	16101471993,2 00
	Covarianza	551932127725, 733	8474346,667	3220294398,64 0
	N	6	6	6
Área	Correlación de Pearson	,978**	,798	1
	Sig. (bilateral)	,001	,057	
	Suma de cuadrados y productos vectoriales	1452779478345 646,000	16101471993,2 00	9607503090498 ,090
	Covarianza	2905558956691 29,200	3220294398,64 0	1921500618099 ,618
	N	6	6	6

Nota: \*. La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

\*\* . La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). Elaboración propia.

Haciendo uso de la correlación de Pearson, se determinó un grado de significancia de ( $p < 0.05$ ), encontrándose una CORRELACION ALTA, rechazándose la hipótesis nula. Esto quiere decir que existe una relación directa entre variabilidad de los parámetros morfométricos perímetro, área y profundidad obtenidos en la tabla 14, con la variabilidad del volumen de la laguna de Aricota que se muestra en la tabla 16.

**H2: La integración del análisis de la variabilidad temporal y espacial de los parámetros morfométricos y el volumen de la laguna de Aricota, nos permitirá la reducción de la laguna.**

Realizado el análisis multitemporal del procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT 1, 4, 5 y 7 obtenidas de los años 1972, 1982, 1990, 2007, 2015 y 2019, se obtuvo el Modelo de Elevación Digital (DEM) y los parámetros morfométricos de la laguna. Efectuado el análisis multiespectral del procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT 8 de los años 2013 al 2020, se obtuvieron las firmas espectrales de la laguna, que sirvieron para determinar el índice de vegetación (NDVI). De los dos análisis, se logró determinar la reducción del volumen de la laguna, según se muestra en la tabla 16, donde se pudo observar que en el año 2019 se tuvo una reducción de hasta el 31% con respecto al volumen inicial.

**H3: El análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota nos permitirá la validación del modelo empleado para la determinación de su volumen.**

Realizando el análisis multiespectral del procesamiento de las imágenes satelitales LANDSAT 8 de los años 2013 al 2020, se obtuvieron las firmas espectrales de la laguna de esos años. En el anexo 5 se muestran las tablas obtenidas de los índices Kappa del agua, suelo y vegetación, como resultados de la determinación del índice de vegetación NDVI, valores que fluctúan entre 0.76 y 0.95, y

que según la tabla 8 de los valores de Kappa nos indica que la metodología es casi perfecta y en cuanto a la precisión global se tiene valores mayores a 90% los cuales nos indican una metodología altamente aceptable. Validando de esta forma la metodología utilizada.

## **2.- Hipótesis general**

Se utilizó el análisis de la regresión lineal y polinómica para la contrastación de la hipótesis general.

**H: Mediante un modelamiento matemático y haciendo uso de SIG es posible estimar de la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna.**

Haciendo uso del análisis de regresión polinómica de grado 4, se estimó la reducción del volumen de la Laguna de Aricota en función del tiempo utilizando la ecuación (11). La línea de tendencia del decrecimiento del volumen de la laguna en el tiempo, presentó una fuerte correlación con un coeficiente de determinación de  $R^2=0.9737$ . Haciendo uso de la regresión lineal, la línea de tendencia del decrecimiento del volumen de la laguna en función del nivel altimétrico, presentó una fuerte correlación con un coeficiente de determinación de  $R^2=0.9804$ .

## **6.2 Contrastación de resultados con otros estudios similares**

Según **Rodríguez et al. (2018)**, en su investigación titulado “Caracterización morfométrica de una laguna costera Neotropical (Ciénaga El Chino, Magdalena - Colombia)”, nos muestra en sus resultados que el cuerpo de agua mostró una profundidad máxima de 0,67 y 0,77 m, profundidad relativa muy baja (0,0201 y 0,0292), área de 8,62 km<sup>2</sup>, volumen de 4,30 Mm<sup>3</sup> y 5,248 Mm<sup>3</sup>, en 2015 y 2017, respectivamente. Longitud máxima de 5,89 km, ancho máximo de 2,14 km. En

nuestra investigación se logró evidenciar que existe una relación directa entre los parámetros morfométricos y la reducción de la laguna.

**Medina (2009)** en su tesis Doctoral: “Modelos numéricos y teledetección en el Lago de Izabal, Guatemala”, llegó a la siguiente conclusión: La combinación de técnicas de teledetección con medidas in situ permitió conocer la variabilidad espacial y temporal de los factores que inciden en los procesos hidrológicos estudiados. Las fluctuaciones de volumen de agua almacenada en el Lago de Izabal se estimaron mediante la combinación de variaciones relativas de nivel y área del lago. Las variaciones de nivel obtenidas con el sensor RA-2 estuvieron altamente correlacionadas con las medidas in situ ( $R^2=0.83$ ). Asimismo, las variaciones de superficie del lago determinadas a partir del sensor ASAR presentaron alta correlación con medidas de nivel in situ tomadas simultáneamente ( $R^2=0.9$ ). La determinación de variaciones de volumen se realizó mediante el desarrollo de curvas de calibración área/nivel/volumen. En nuestra investigación, las variaciones del volumen presentaron una alta correlación con las medidas del nivel in situ ( $R^2 = 0.9804$ ).

### **6.3 Responsabilidad ética**

La presente tesis doctoral se desarrolló respetando los criterios éticos y lineamientos que se encuentran establecidos en los Reglamentos y Directivas para el desarrollo de trabajos de investigación de la Universidad Nacional del Callao.

Con referencia a la propiedad intelectual, el presente trabajo de investigación respetó el aporte cognitivo de cada uno de los autores o investigadores, efectuando las citas textuales adecuadamente y ubicándolas dentro de las referencias bibliográficas. Es por ello, que las fuentes consultadas son consignadas mediante el sistema de citación y referencias sugeridas.

#### **6.4 Reporte de problemas pendientes para nuevas investigaciones**

La tesis doctoral basó la estimación del volumen de la laguna de Aricota en la utilización de un modelo matemático, imágenes satelitales LANDSAT obtenidas mediante la teledetección y su procesamiento en un Sistema de Información Geográfica (SIG). Si bien es cierto, que el resultado obtenido tuvo un buen grado de confiabilidad, sin embargo, las dificultades para obtener imágenes satelitales con buena resolución en determinados días debido a la actividad meteorológica o alta nubosidad, dificultaron su desarrollo.

No se tomó en cuenta los parámetros meteorológicos como la Precipitación Pluvial y Temperatura Media. Cada uno de los parámetros climáticos considerados juega un papel en los procesos hidrológicos que se estuvieron estudiando. Los registros de lluvia se utilizan para obtener la cantidad de agua que entra a la cuenca, que posteriormente es transformada en escorrentía superficial, que a su vez es absorbida por los suelos o sale del sistema en forma de vapor. En el caso de la erosión hídrica, la lluvia afecta por la fuerza que ejerce a su caída en las partículas de suelo. La pérdida de suelo es afectada por la intensidad y duración de la lluvia, pero los registros únicamente reportan cantidad de lluvia, por lo que será necesario estimar los otros parámetros utilizando las funciones regidoras. En cuanto a la temperatura media, ésta se utiliza para estimar la evapotranspiración potencial de la cuenca (mm), determinando, por consiguiente, en las pérdidas de agua de la cuenca. Estos parámetros permitirán estimar con mayor exactitud la reducción del volumen de la laguna de Aricota.

Otro problema pendiente es la validación del modelo empleado y de los resultados obtenidos para la estimación de la reducción del volumen de la laguna. Esta validación se puede realizar a través de mediciones in situ con ecosondas electrónicas para determinar la profundidad de la laguna, en conjunción con sensores de percepción remota ubicados en vehículos móviles aéreos denominados drones, que se encargarán de determinar los parámetros morfométricos superficiales de la laguna. El diseño de esas investigaciones, requerirán de un análisis temporal transversal.

## **CONCLUSIONES**

### **Primera conclusión**

Se demostró que haciendo uso del modelo matemático y del análisis de regresión lineal y polinómica, se pudo estimar la reducción del volumen de la Laguna de Aricota. Utilizando la regresión polinómica, se obtuvo que la línea de tendencia del decrecimiento del volumen de la laguna en el tiempo, presentó una fuerte correlación con un coeficiente de determinación de  $R^2=0.9737$ . Haciendo uso de la regresión lineal, la línea de tendencia del decrecimiento del volumen de la laguna en función del nivel altimétrico, presentó una fuerte correlación con un coeficiente de determinación de  $R^2=0.9804$ .

### **Segunda conclusión**

Se evidencio que existe una correlación entre los parámetros morfométricos y la reducción del volumen de la laguna, ya que se determinó un grado de significancia de ( $p<0.05$ ), encontrándose un grado de correlación alta, rechazándose de esta manera la hipótesis nula.

### **Tercera conclusión**

Realizando el análisis multitemporal, se logró determinar la reducción del volumen de la laguna de Aricota, según se muestra en la tabla 15 de Proyección del volumen de la laguna en función de tiempo. Se pudo observar que, en el año 2019, se obtuvo una reducción de hasta el 31% con respecto al volumen inicial.

### **Cuarta conclusión**

Realizando el análisis multiespectral, vemos en la tabla 14 que el índice de Kappa fluctúa entre valores de 0.76 y 0.95 y que según la tabla 8 de los valores de Kappa nos indica que la metodología es casi perfecta y en cuanto a la precisión global se tiene valores mayores a 90% los cuales nos indican una metodología altamente aceptable. Validando de esta forma la metodología utilizada.

## RECOMENDACIONES

Considerando la importancia que tiene la cuenca la laguna de Aricota como recurso hídrico para la Región Tacna, se recomienda a las instituciones regionales y nacionales hacer un seguimiento y monitoreo de los procesos físicos de la laguna, que preserve este recurso hídrico. Por lo que la aplicación de la metodología desarrollada en esta Tesis Doctoral, contribuirá con el seguimiento de algunas variables hidrológicas con relativo bajo costo y alta confiabilidad.

Se recomienda la utilización de la Big Data Satelital, que es un servicio de acceso a imágenes satelitales durante todo el año, cuyos satélites cuentan con sensores a bordo que suministran imágenes de alta calidad y de gran resolución a pesar de la actividad meteorológica o la alta nubosidad presente.

La teledetección se usa para el estudio de aguas continentales como la laguna de Aricota. En esta Tesis Doctoral se estudiaron algunas variables hidrológicas (topografía, nivel de agua y volumen de agua), pero la teledetección ofrece una perspectiva más amplia para aumentar el conocimiento de la laguna. Por lo que se recomienda utilizar esta técnica para desarrollar trabajos de investigación con variables hidrológicas que se puede observar mediante sensores remotos como: temperatura de la superficie, que puede ser medida utilizando señales en el infrarrojo térmico; la calidad de las aguas superficiales (concentración de sedimentos en suspensión, contenido de clorofila y otras sustancias) que puede determinarse con sensores pasivos.

Se debe establecer un sistema de monitoreo del nivel de la laguna de Aricota, basado en un sistema de información geográfica (GIS) ya que estos sistemas hacen posible la integración de datos in situ, la técnica de teledetección y el empleo del modelamiento matemático.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Béjar Suárez, J. G. (2019). Modelización matemática para determinar la contaminación orgánica del río Chambo, provincia de Chimborazo – Ecuador. Tesis (Grado de Doctor en Ciencias Ambientales). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Disponible en: <https://cutt.ly/MYxKwud>
- [2] Borro, M. M., Morandera, N.S., Kandus, P., Salvia, M., Minotti, P. G., & Perna, P. (2014). Mapping shallow lakes in a large. *Journal of Hydrology*, 39-52.
- [3] Brito-Vallina, M. L., Alemán-Romero, I., & Fraga-Guerra, E. (2011). Papel de la modelación matemática en la formación de los ingenieros. *Ingeniería Mecánica*, 129-139.
- [4] Castillo Rojas, H. G. (2019). Procesamiento de imágenes satelitales Landsat 5 TM, 7 ETM+, 8 OLI y los índices de vegetación, para la caracterización de las coberturas vegetales en los distritos de Cajamarca. Tesis (Grado de Maestro en Ingeniería de Sistemas). Lima: Universidad Nacional Federico Villarreal, Perú. Disponible en: <https://bit.ly/3GluDpi>
- [5] Chuvieco, Emilio. Fundamentos de la teledetección espacial (en línea). Segunda Edición España: Ediciones RIALP S.A, (1996). Disponible en: <https://bit.ly/2urLeYP>
- [6] Congedo, L. (2012-2017). Breve Introducción a la Teledetección. Disponible en: <https://bit.ly/3QoFmbO>
- [7] Córdova Mendoza, D. P. (2017). Aplicación de la simulación hidrológica e hidráulica con sistemas de información geográfica para identificar las áreas de inundación del Río Huallaga en el tramo Huaylla - Ambo, 2017. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Huánuco: Universidad Nacional Hermilio Valdizán, Perú. Disponible en: <https://cutt.ly/LYxKxp9>
- [8] Fornerón, C. F., Piccolo, M. C., & Carbone, M. E. (2010). Análisis morfométrico de la laguna Sauce Grande (Argentina). *Huellas*, 11-30.
- [9] Gaita Iparraguirre, M. P. (2017). Cuantificación e impacto del retroceso glaciar sobre los recursos naturales determinados mediante el SIG y teledetección - Microcuenca Lullán, Ancash - Perú. Tesis (Grado de Maestría). Lima:

Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. Disponible en:  
<https://bit.ly/3VKdvUI>

- [10] García Dulanto, J. L. (2018). Implementación de una metodología para la identificación de bofedales usando datos imágenes satelitales Landsat - caso estudio: Bofedal Chunal, cuenca alta del río Chillón. Tesis (Grado de Magister en Física). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/10446>
- [11] García Sabater, J. P., & Maheut, J. (15 de Octubre de 2015). Modelado y Resolución de Problemas de Organización Industrial mediante Programación Matemática Lineal. Disponible en: <https://bit.ly/3IqNPJi>
- [12] Gayol, M., Morandeira, N., & Grimson, R. (2016). Uso de observaciones satelitales para la delimitación y caracterización de lagunas en el Bajo Río Paraná. Instituto de Investigación e Ingeniería Ambiental, 3iA, Universidad Nacional de San Martín. Buenos Aires.
- [13] GISandBEERS (Tutoriales, herramientas y cursos SIG). Todo lo que deberías saber sobre imágenes Landsat 22 febrero, 2020. Disponible en: <https://bit.ly/3jXL6wl>
- [14] Grant, J., & Carter, L. (2011). Calculating Vegetation Indices from Landsat 5 TM and Landsat 7 ETM+ Data. Colorado State : University, Fort Collins. 18 p.
- [15] Gutman, G. G. (1991). Vegetation Index from AVHRR: An Update and Prospects. Remote Sensing of Environment., 121-135.
- [16] León Ruíz, J. E. (2016). Modelación matemática para estimar los requerimientos hídricos del cultivo de papa (*Solanum spp.*) en Riobamba - Ecuador. Tesis (Grado de Doctor). Lima: Universidad Nacional Agraria La Molina, Perú. Disponible en: <https://bit.ly/3WRlcsi>
- [17] Loza Del Carpio, A., Gamarra Peralta, C. y Condori Aliaga, N. (2016) Caracterización morfobatimétrica y estimación de sedimentos de la bahía interior de Puno, lago Titicaca, mediante tecnología SIG. Altoandina: Revista de Investigación, ISSN: 2313-2957 (Versión digital). Volumen 18, N° 2, 2016; págs. 237 – 248. DOI: <https://doi.org/10.18271/ria.2016.205>
- [18] López Lara, E., Posada Simeón, C. y Moreno Navarro, J. G. (1997). Ponencia: Los sistemas de Información Geográfica. I Congreso de Ciencia Regional de

- Andalucía: Andalucía en el umbral del siglo XXI, págs. 789-804, Universidad de Sevilla. Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/51403511.pdf>
- [19] Lunneta, R., & Balogh, M. (1999). Application of multi-temporal Landsat 5 TM imagery for wetland identification. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 1303-1310.
- [20] Meaden, G., & Kapetsky, J. (1992). Los sistemas de información geográfica y la telepercepción en la pesca continental y la acuicultura. Roma: FAO Documento Técnico de Pesca. No. 318.
- [21] Medina Mazariegos, C. E. (2009). Modelos numéricos y teledetección en el Lago de Izabal, Guatemala. Tesis (Grado de Doctor). Cádiz: Universidad de Cádiz, España. Disponible en: <https://cutt.ly/2TRMMKz>
- [22] Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica. Universidad de Girona. Disponible en: [https://www.icog.es/TyT/files/Libro\\_SIG.pdf](https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf)
- [23] Quispe Torres, J. A., y Sulca Otazu, R. F. (2015). Aplicación del Modelo Matemático Hec Ras para El Cálculo del Perfil Hidráulico del Río Ramis. Tesis (Título de Ingeniero Civil). Juliaca: Universidad Andina Néstor Cáceres Velásquez, Perú. Disponible en: <https://cutt.ly/AYxLeD5>
- [24] Rendón-Mesa, P. A., & Esteban Duarte, P. V. (2013). La modelación matemática en ingeniería de diseño. Ponencia presentada en el I Congreso de Educación Matemática de América Central y el Caribe en Santo Domingo, (págs. 387-483). República Dominicana. Disponible en: <https://bit.ly/3VNdTBU>
- [25] Rodríguez Curcio J., Linero Cueto, J. y Barros Ortiz, L. J. (2018). Caracterización morfométrica de una laguna costera neotropical (ciénaga El Chino, Magdalena - Colombia). *Intrópica: Revista del Instituto de Investigaciones Tropicales*, ISSN 1794-161X, ISSN-e 2389-7864, Vol. 13, Nº 1, 2018, págs. 21-29. Disponible en: <https://bit.ly/3Z5IcGq>
- [26] Rojas, K. H. y Cárdenas, Ch. B. (2013). Identificación y registro catastral de cuerpos de agua mediante técnicas de procesamiento digital de imágenes en Landsat-5. Artículo científico, Universidad Nacional de Ingeniería. Disponible en: <https://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/1309/1309.7609.pdf>
- [27] Sarría, F. A. (2013-2014). Sistemas de Información Geográfica. Temario de la asignatura. Universidad de Murcia. Disponible en:

<http://fobos.inf.um.es/alonso/SIGCCAA/temario.pdf>

- [28] Soria, M., Piñero, V., Ledesma, N., Basile, P. y Riccardi, G. (2017). Análisis batimétrico de lagunas poco profundas mediante técnicas de teledetección y SIG: Aplicación a la laguna La Victoria. Cuadernos del Curiham: Revista sobre la cuestión hidroambiental, ISSN 2683-8168 (En línea), Vol. 23, 2017, págs. 51-61. Disponible en: <https://cutt.ly/qTRM6FI>
- [29] Soria Ruiz, J., & Granados Ramírez, R. (2005). Relación entre los índices de vegetación obtenidos de los sensores AVHRR del satélite NOAA y TM del. Ciencia Ergo Sum, 167-174
- [30] Valenzuela, W. E. (2020). Modelamiento con herramientas SIG y uso de sensores remotos de la variabilidad hídrica y sus efectos desencadenantes en las amenazas naturales de la cuenca del Río Totare, Colombia. Tesis (Título de Especialista en Teledetección y SIG). Buenos Aires: Universidad Nacional de Luján, Argentina. Disponible en: <http://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/815>
- [31] Velásquez Intriago, F. J. (2020). Modelo de simulación dinámica aplicado al aprovechamiento eficiente del embalse La Esperanza, Manabí - Ecuador. Tesis (Grado de Doctor en Ciencias Ambientales). Lima: Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Perú. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12672/11569>
- [32] Villota Rosero, M. A. (2019). Metodología para el cálculo de los parámetros morfométricos de una cuenca hidrográfica por medio de Sistemas de Información Geográfica. Caso de estudio – Río Mulaló (Yumbo - Colombia). Tesis (Título de Especialista en Teledetección y SIG). Buenos Aires: Universidad Nacional de Luján, Argentina. Disponible en: <http://ri.unlu.edu.ar/xmlui/handle/rediunlu/843>

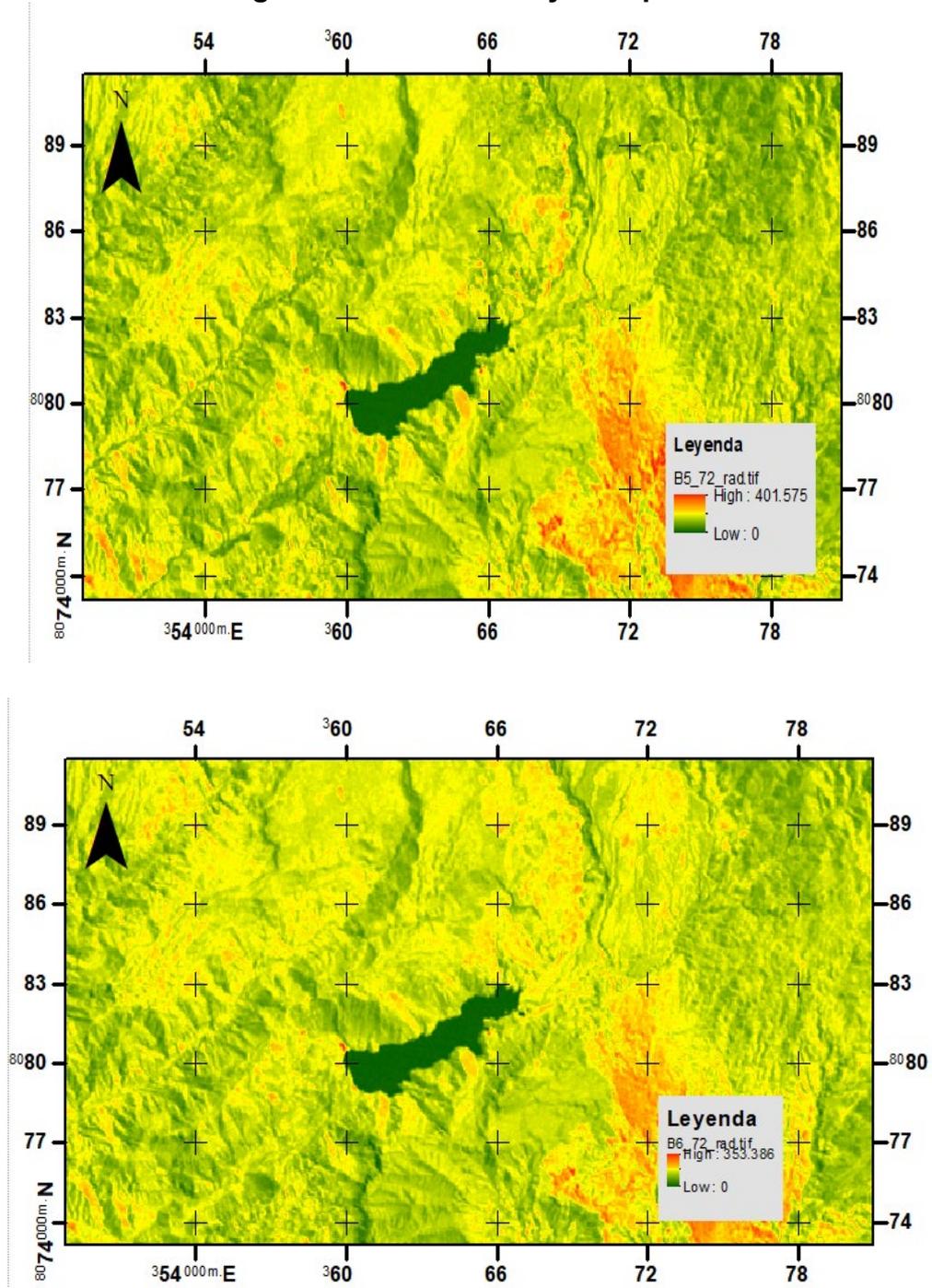
## ANEXO 1: Matriz de consistencia

FORMULACIÓN DEL PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTESIS	VARIABLE	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIÓN	INDICADORES
<p><b>GENERAL</b></p> <p>¿Es posible la realización de un modelamiento matemático y del uso de un SIG para la estimación de la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna?</p> <p><b>ESPECÍFICOS</b></p> <p>¿Cómo la determinación de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota incide en la reducción de su volumen?</p> <p>¿Es posible realizar el análisis de variabilidad temporal y de la variabilidad espacial de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota, para estimar la variación de su volumen?</p> <p>¿Es posible realizar el análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota, para la validación del modelo empleado en la determinación de su volumen?</p>	<p><b>GENERAL</b></p> <p>Realizar un modelamiento matemático y hacer uso de un SIG para la estimación de la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna.</p> <p><b>ESPECÍFICOS</b></p> <p>Determinar los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota y su incidencia en la reducción de su volumen.</p> <p>Realizar el análisis de variabilidad temporal y de variabilidad espacial de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota, para estimar la variación de su volumen.</p> <p>Realizar el análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota, para la validación del modelo empleado en la determinación de su volumen.</p>	<p><b>GENERAL</b></p> <p>H: Mediante un modelamiento matemático y haciendo uso de SIG es posible estimar la reducción del volumen de agua en la laguna Aricota, región Tacna.</p> <p><b>ESPECÍFICOS</b></p> <p>H1: Existe una relación directa entre parámetros morfométricos de la laguna y la reducción de su volumen. H0: No existe una relación directa entre parámetros morfométricos de la laguna y la reducción de su volumen.</p> <p>H2: La integración del análisis de la variabilidad temporal y espacial de los parámetros morfométricos de la laguna de Aricota, nos permitirá la estimación de la variación de su volumen.</p> <p>H3: El análisis multiespectral de las imágenes satelitales de la laguna de Aricota nos permitirá la validación del modelo empleado para la determinación de su volumen.</p>	<p><b>NDEPENDIENTE</b></p> <p><b>Modelo matemático</b></p> <p><b>Sistema de Información Geográfica (SIG)</b></p> <p><b>DEPENDIENTE</b></p> <p><b>Estimación de la reducción del volumen de agua</b></p>	<p>Representación matemática que utiliza números para representar aspectos del sistema modelizado, e incluye fórmula y algoritmo matemático.</p> <p>Sistema de información que procesa las imágenes satelitales sobre áreas no accesibles al ojo humano o la fotografía convencional</p> <p>Posibilita realizar una evaluación cuantitativa de los recursos de agua y sus modificaciones por influencia de las actividades del hombre.</p>	<p>Validación del modelo</p> <p>Calidad de la imagen satelital</p> <p>Reducción del volumen de agua en el tiempo</p>	<p>Índice de Kappa Precisión global</p> <p>Resolución espectral Resolución temporal Resolución espacial Resolución radiométrica</p> <p>Nivel altimétrico de la laguna Superficie de la laguna Perímetro de la laguna</p>

## ANEXO 2: Conversión de ND a Radiancia

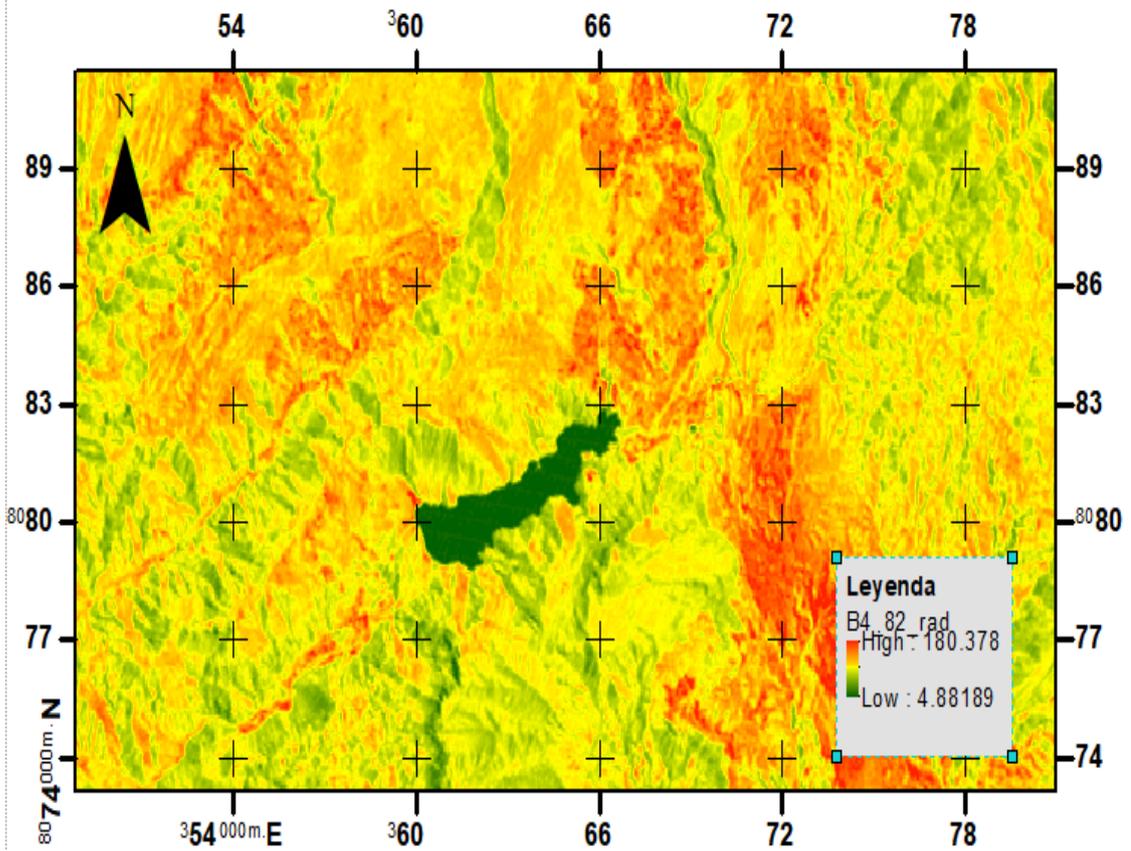
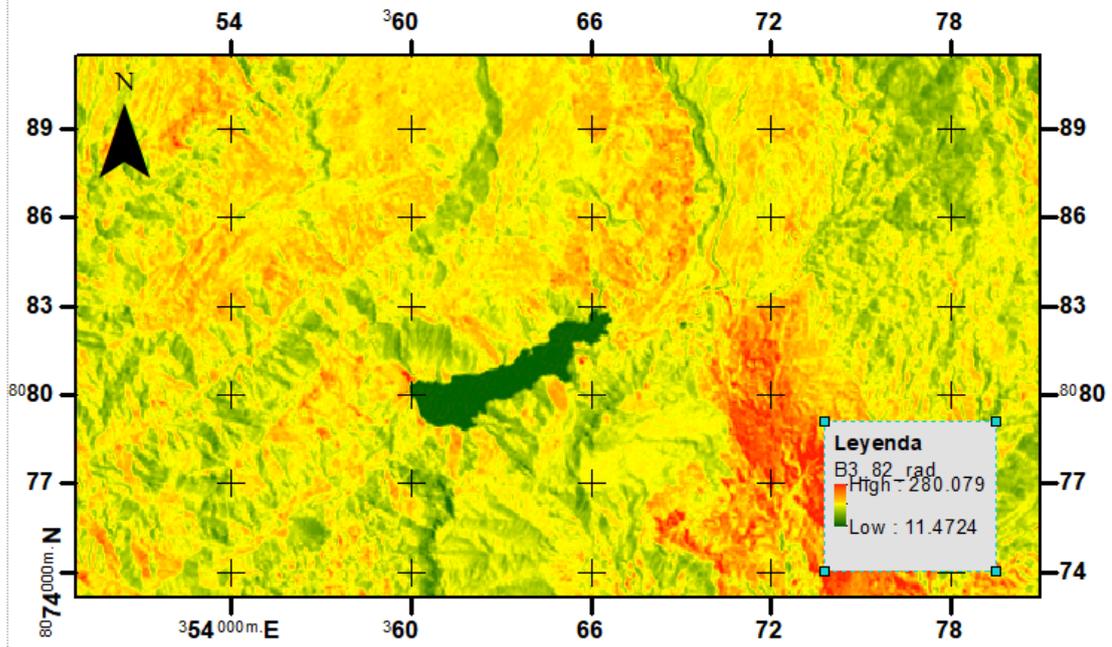
LANDSAT\_1 (26 /08/ 1972)

Imagen cortada banda 5 y 6 respectivamente



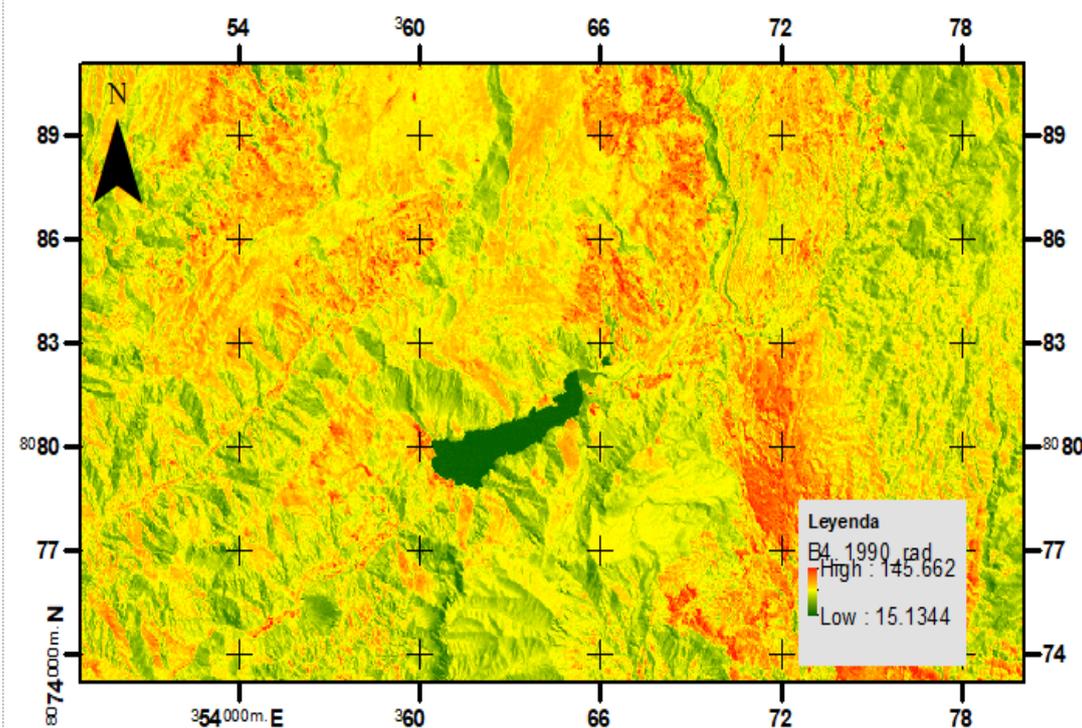
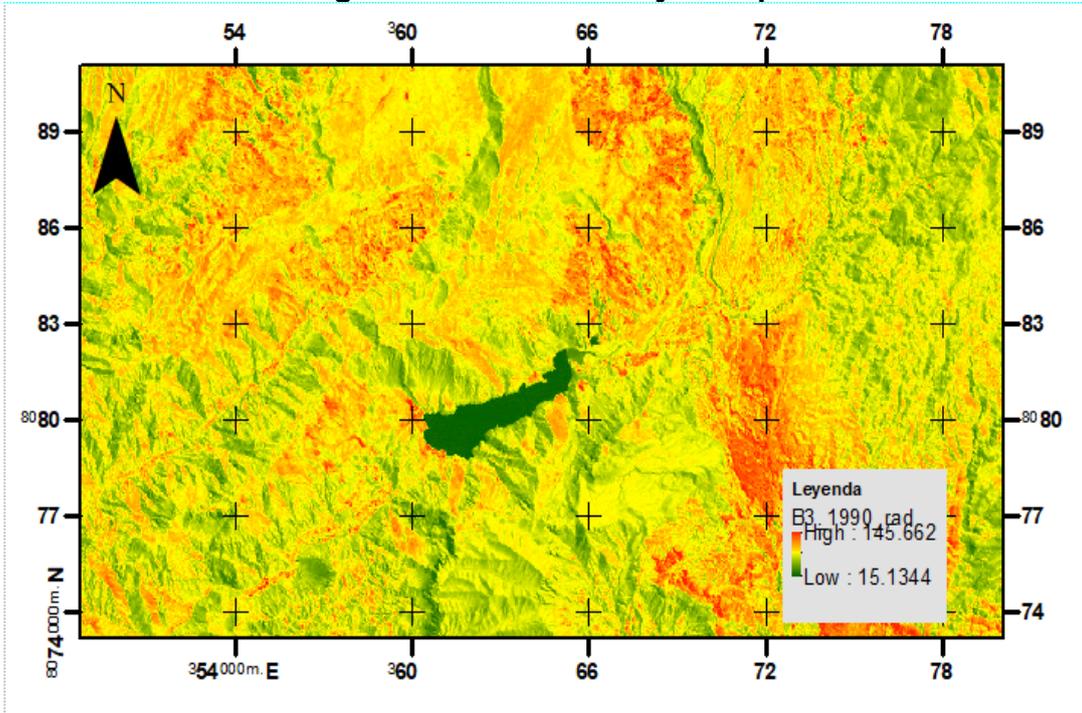
# LANDSAT\_4 (06/10/1982)

## Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



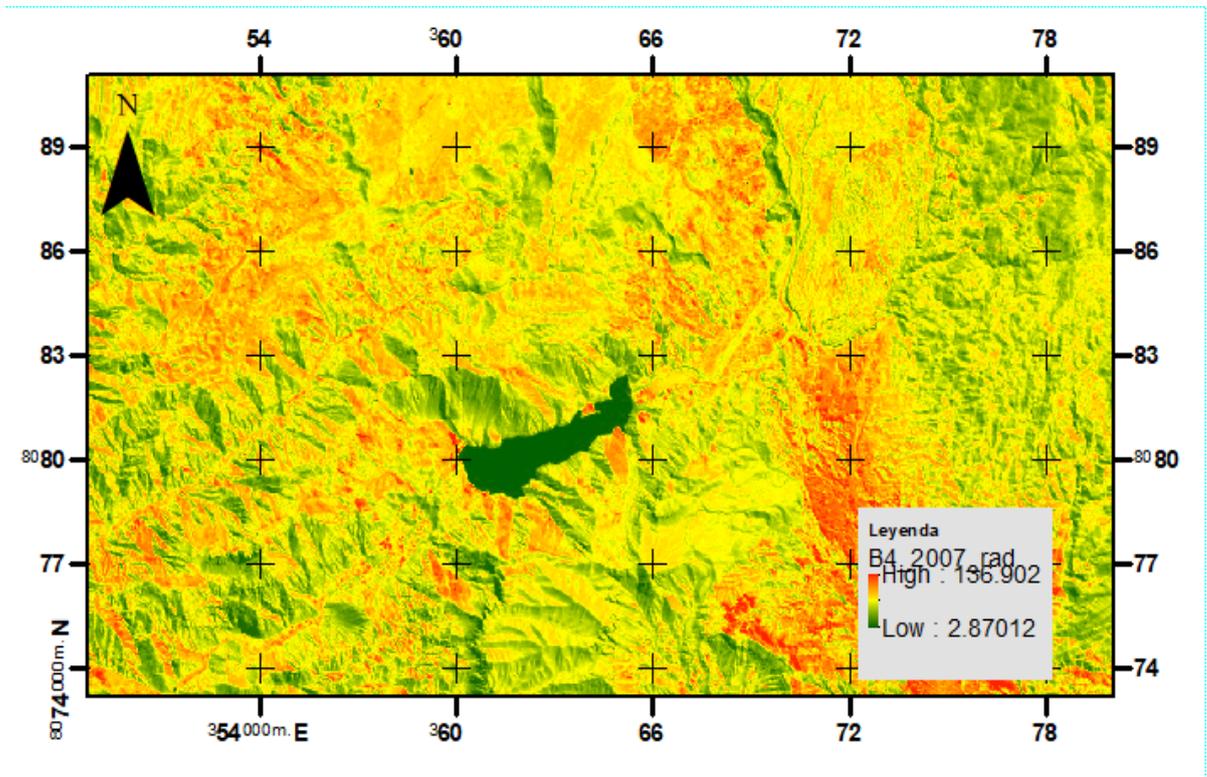
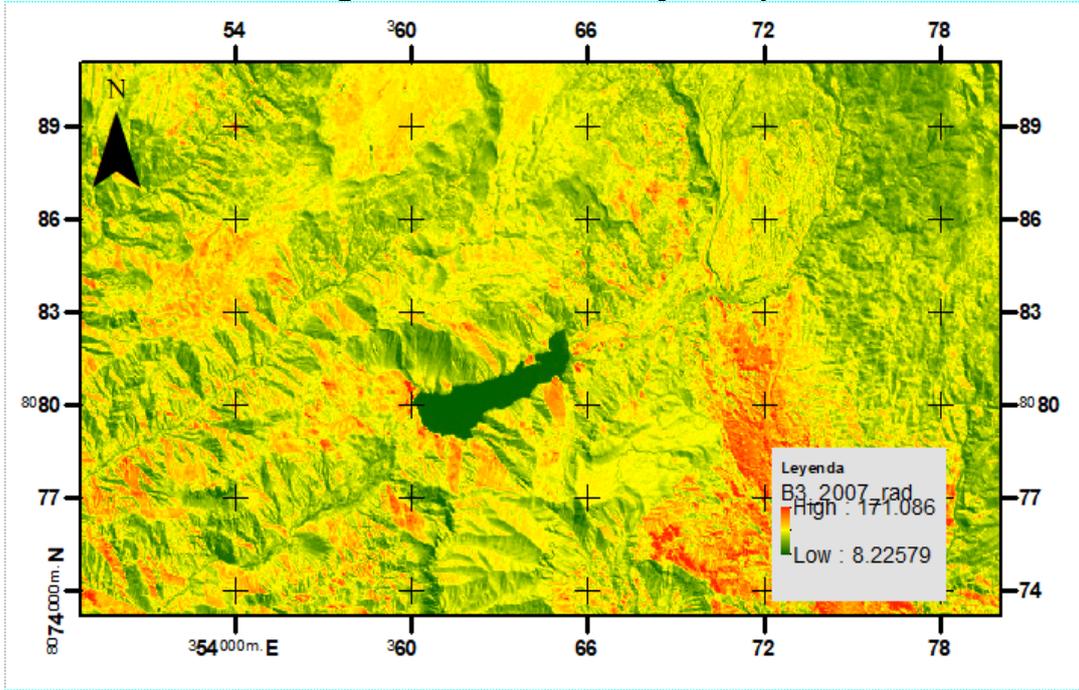
# LANDSAT\_5 (21/09/ 1990)

## Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



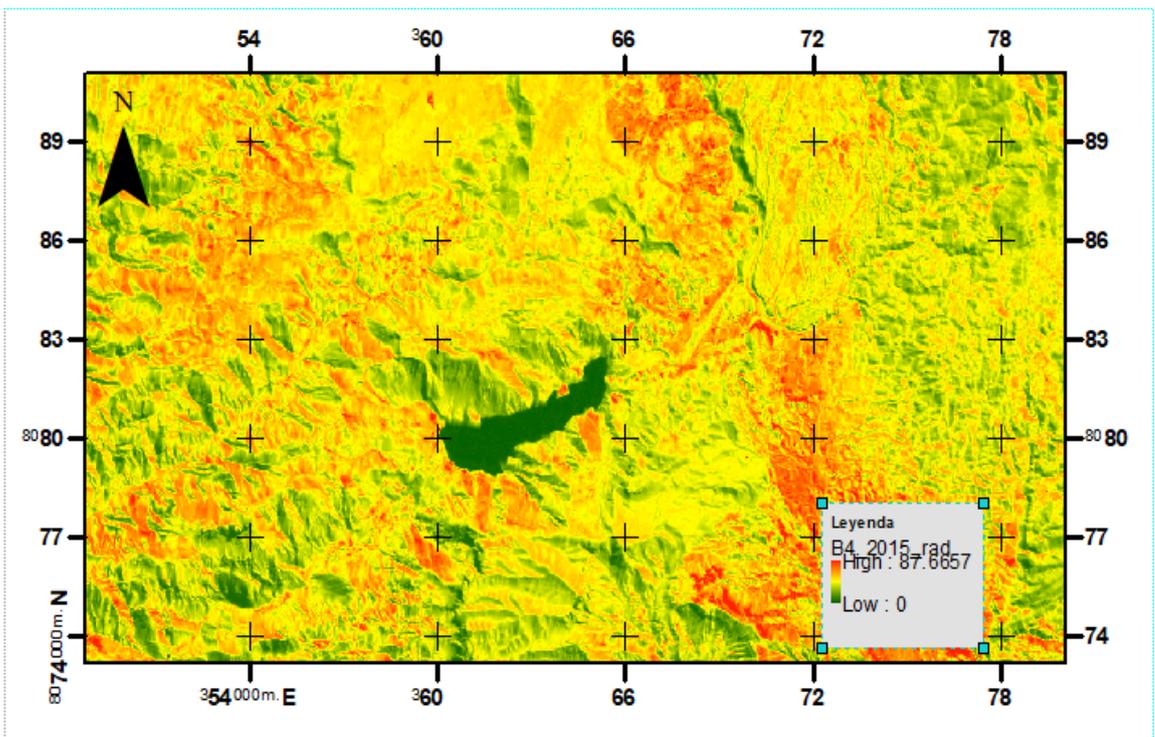
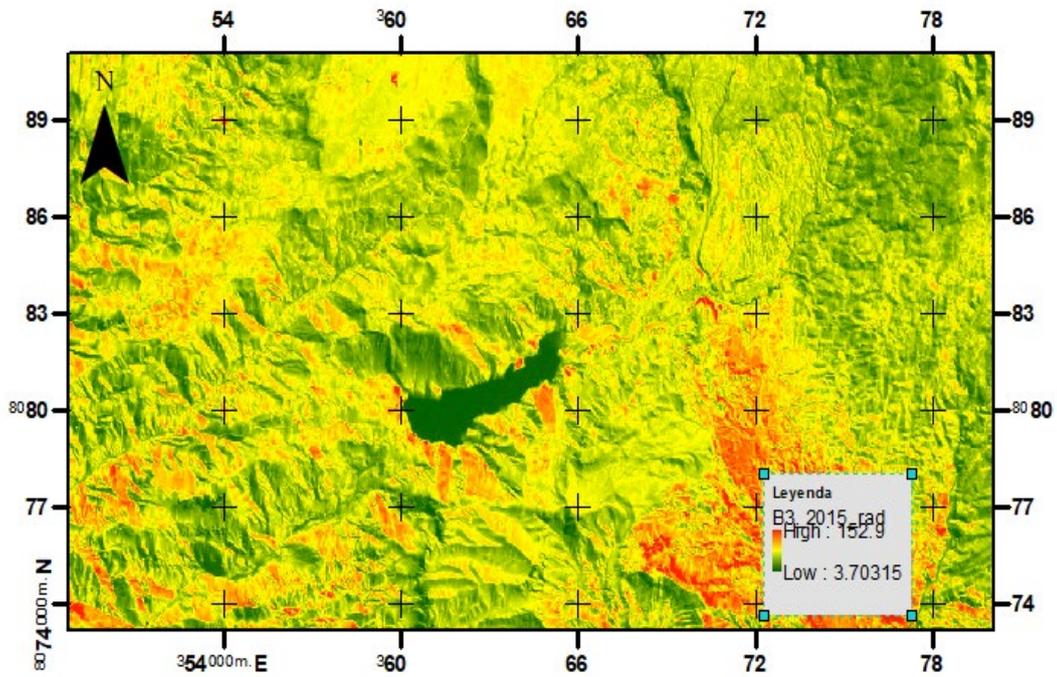
# LANDSAT\_5 (16/08/2007)

## Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



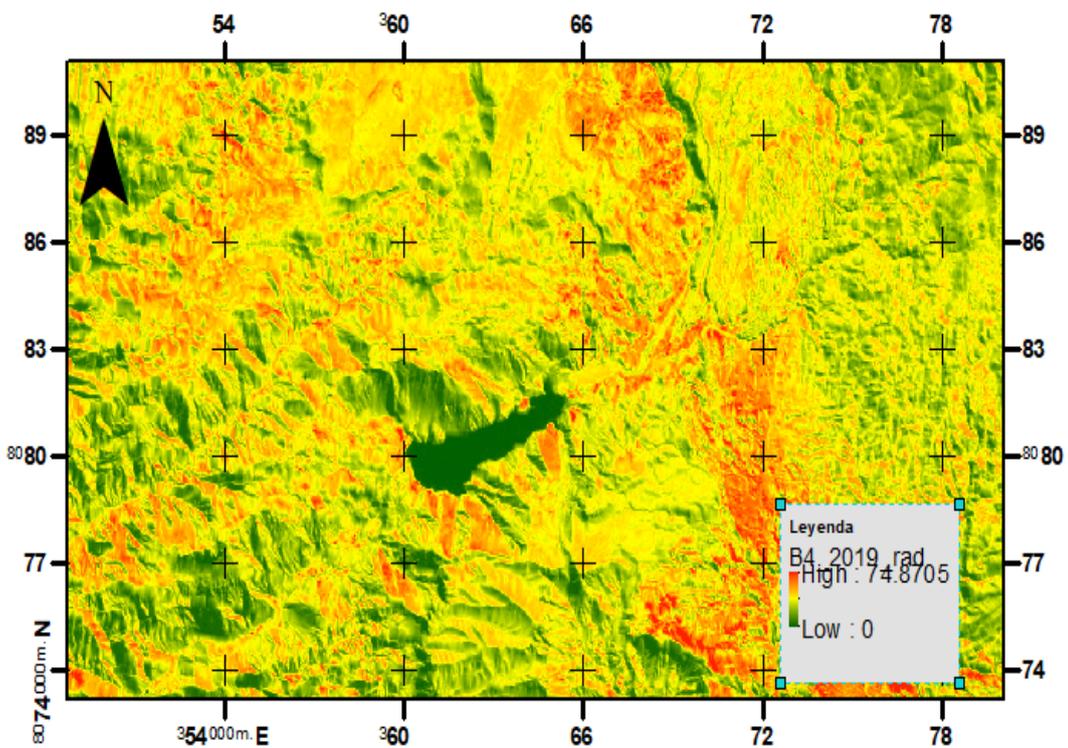
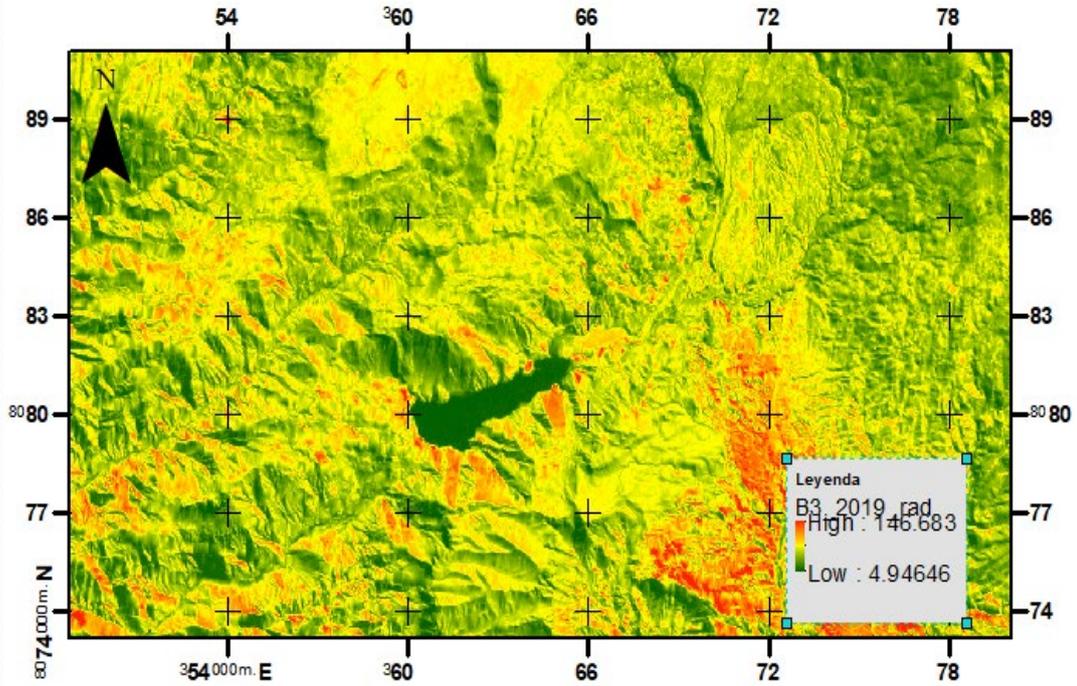
# LANDSAT\_7 (29/07/2015)

## Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



# LANDSAT\_7 (08/07/2019)

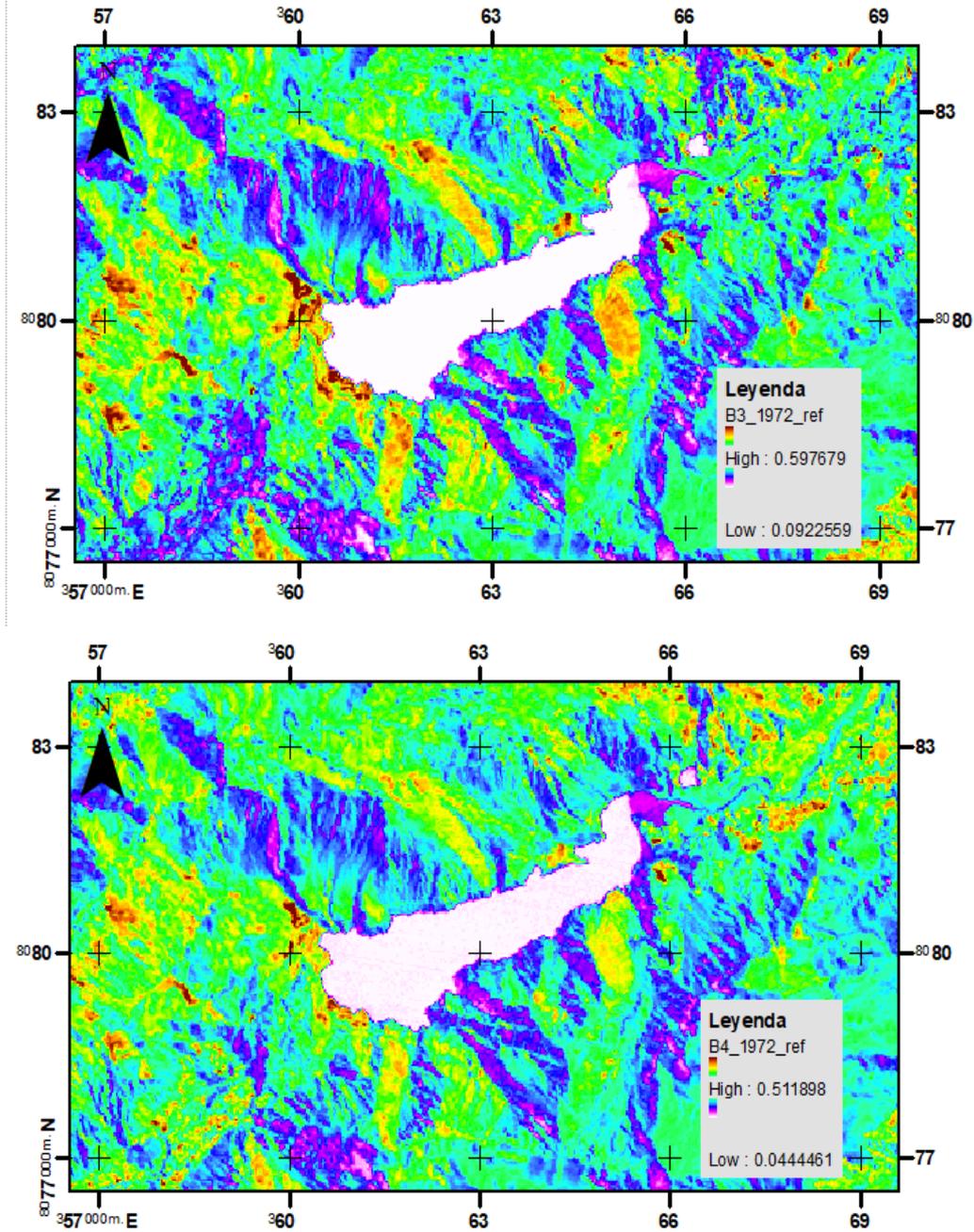
## Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



## ANEXO 3: Conversión de Radiancia a Reflectancia

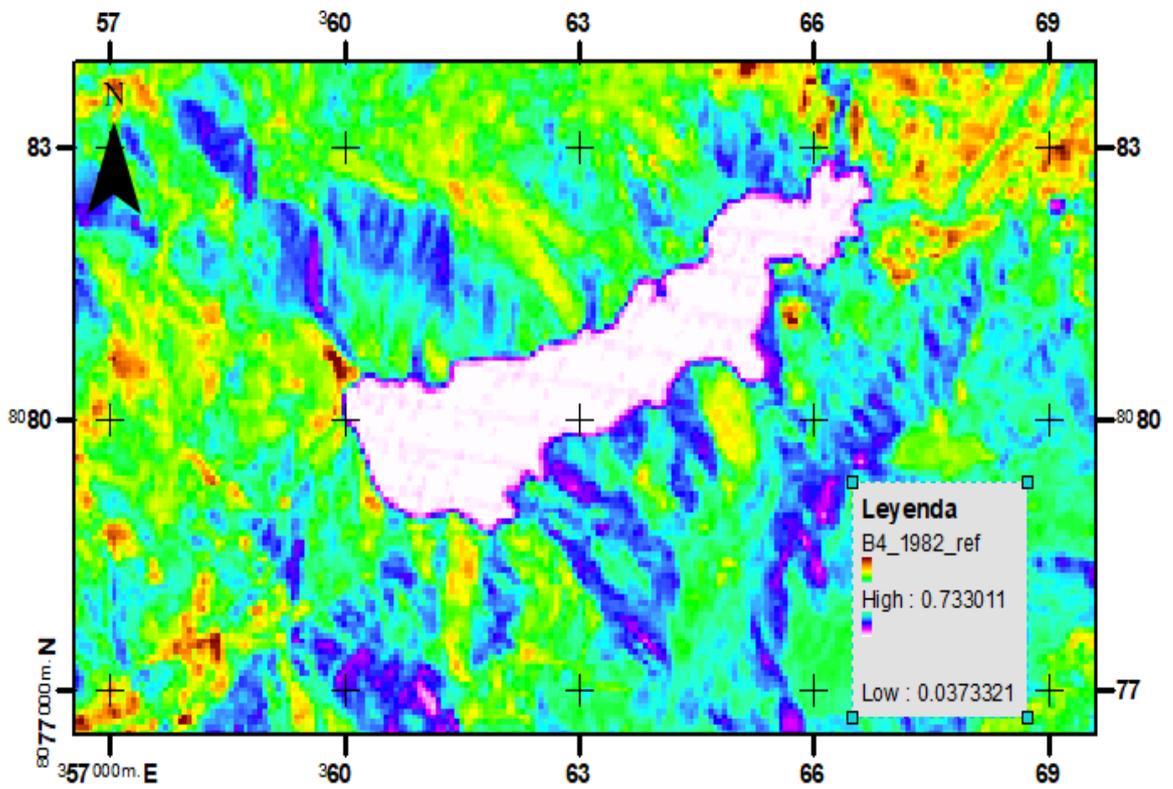
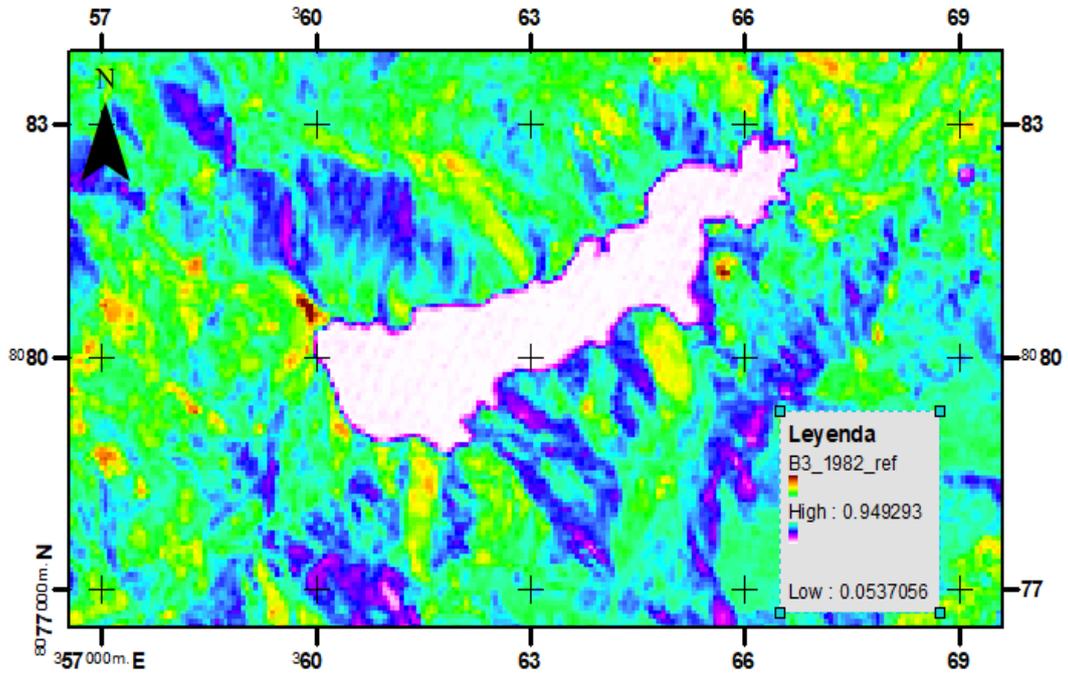
LANDSAT\_1 (26 /08/ 1972)

Imagen cortada banda 5 y 6 respectivamente



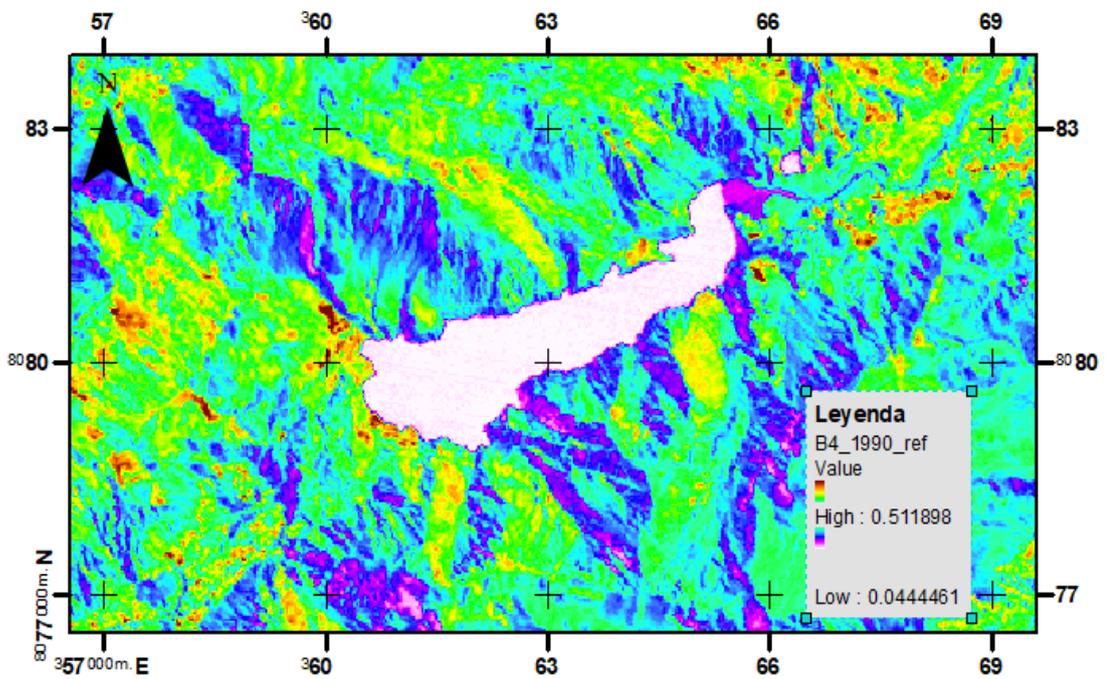
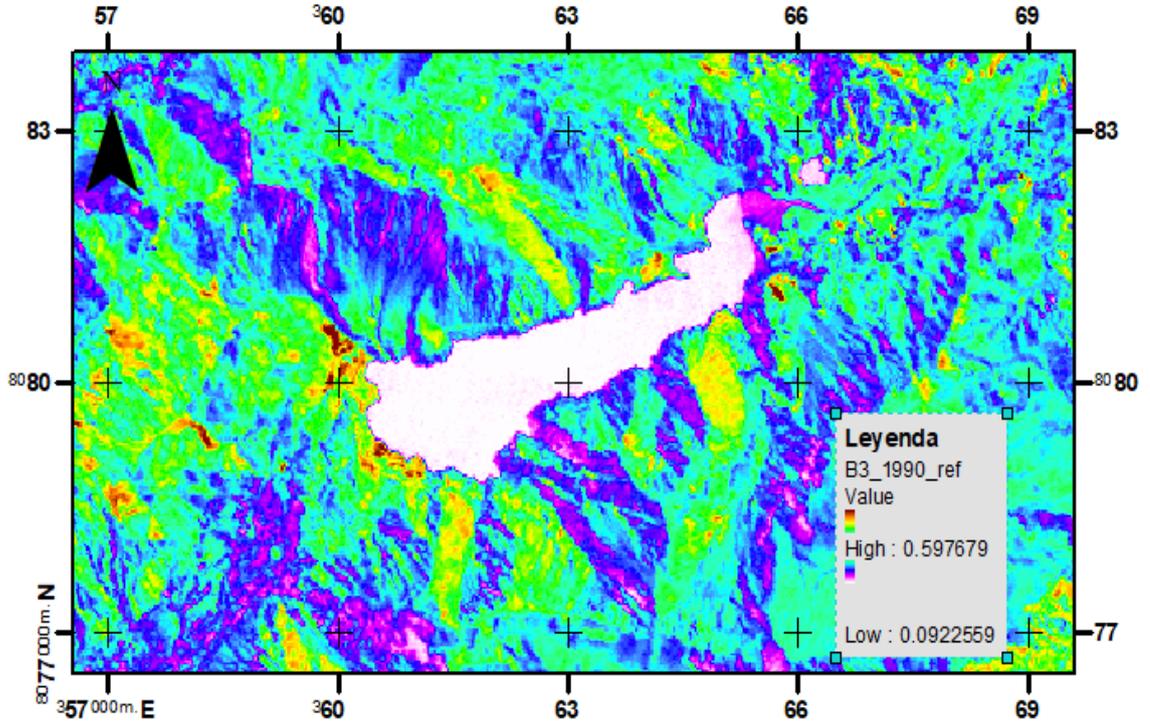
# LANDSAT\_4 (06/10/1982)

## Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



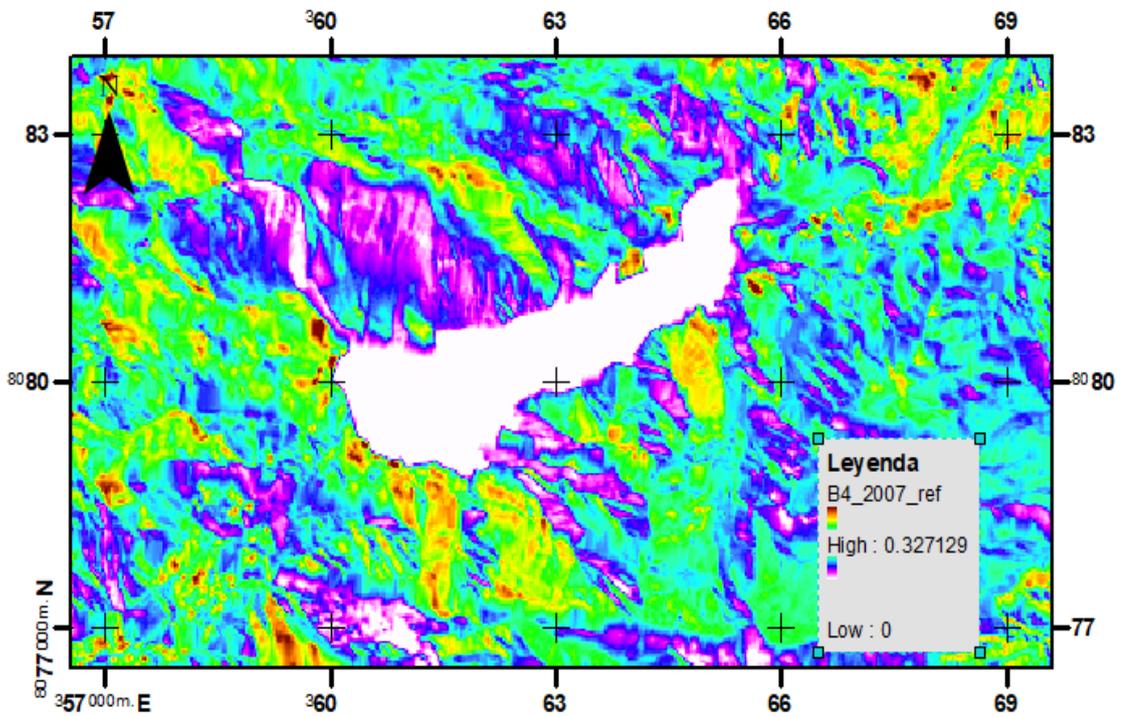
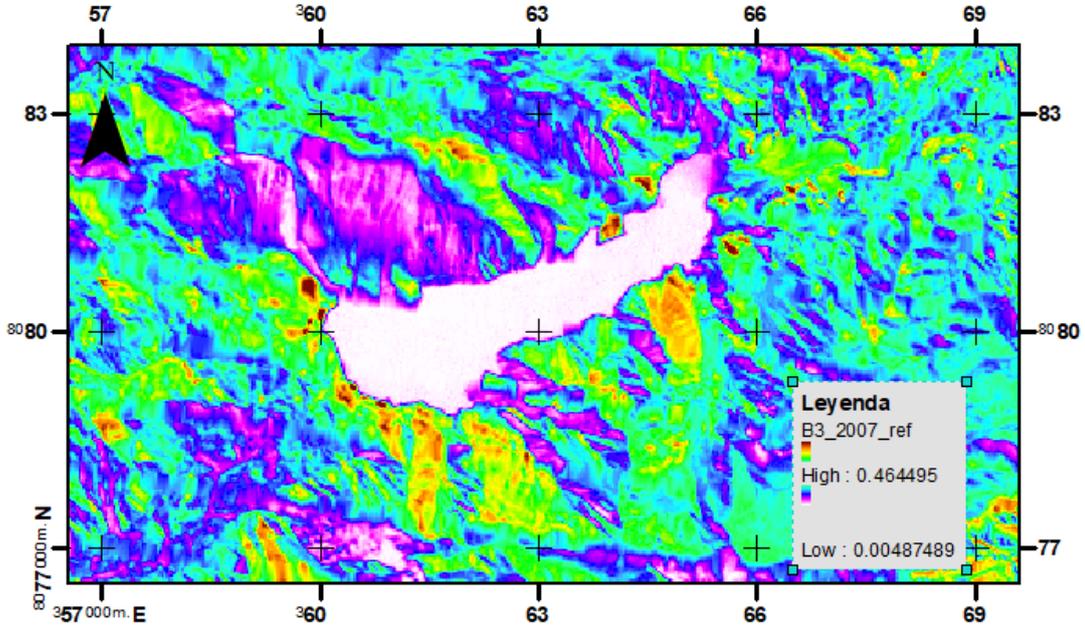
LANDSAT\_5 (21/09/ 1990)

Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



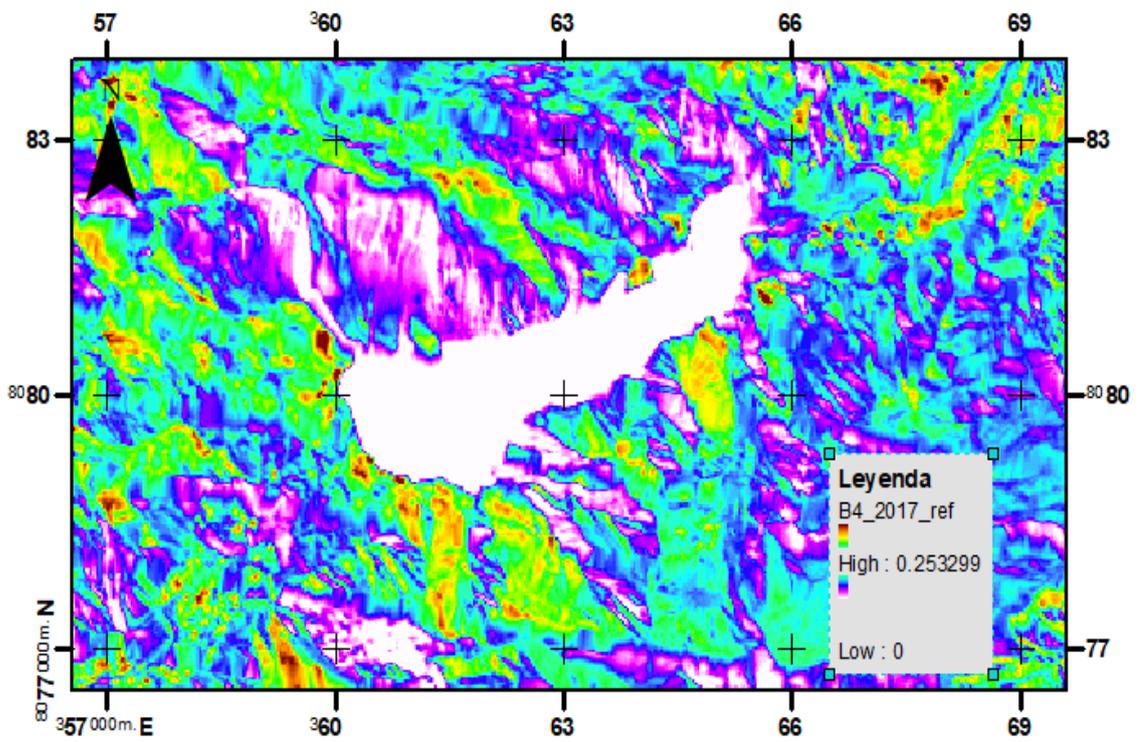
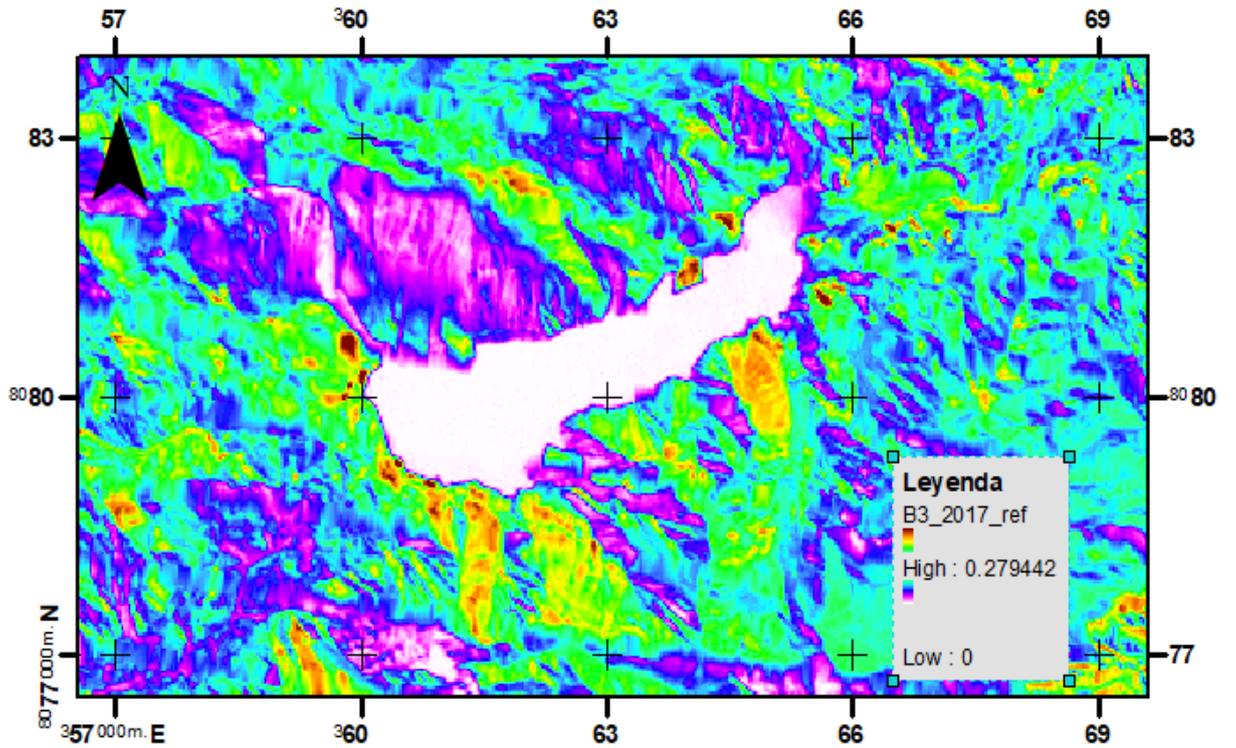
LANDSAT\_5 (16/08/2007)

Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente



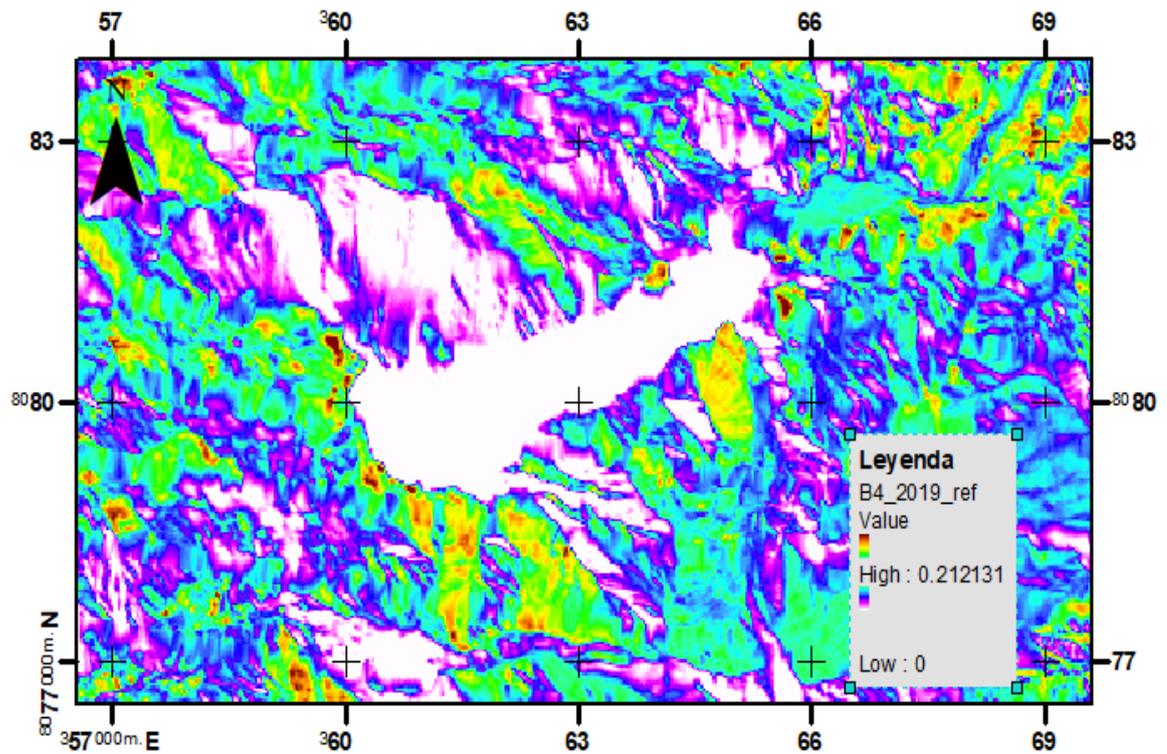
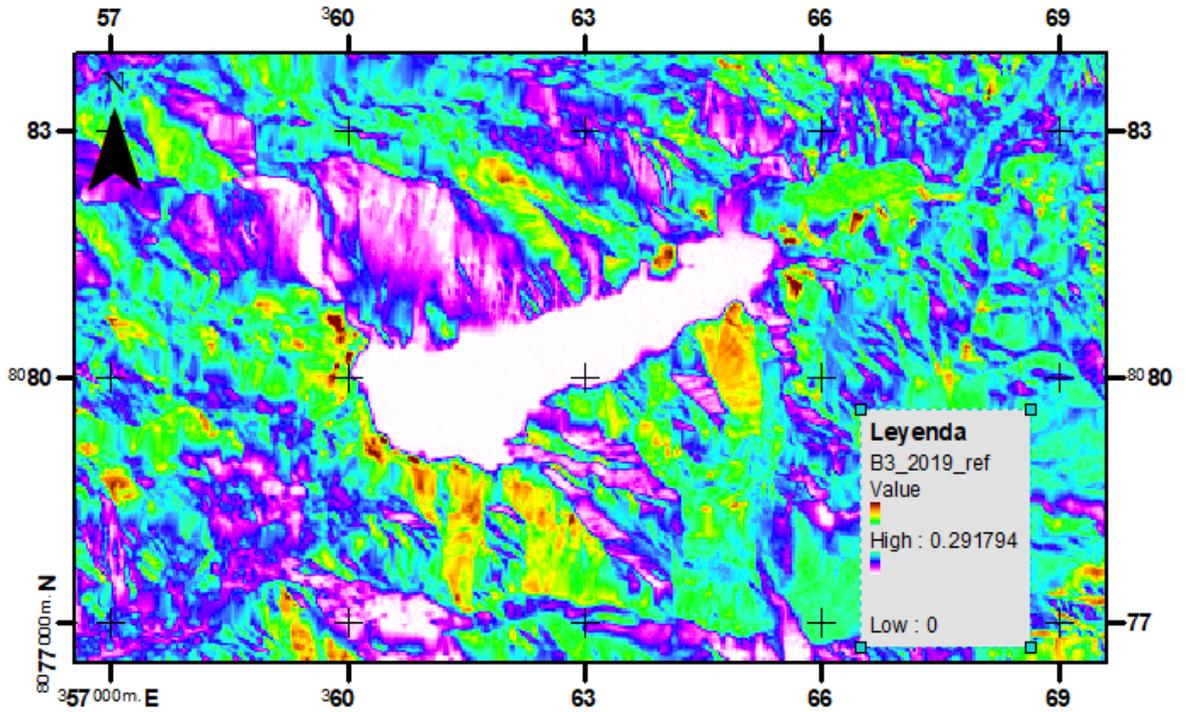
LANDSAT\_7 (29/07/2015)

Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente

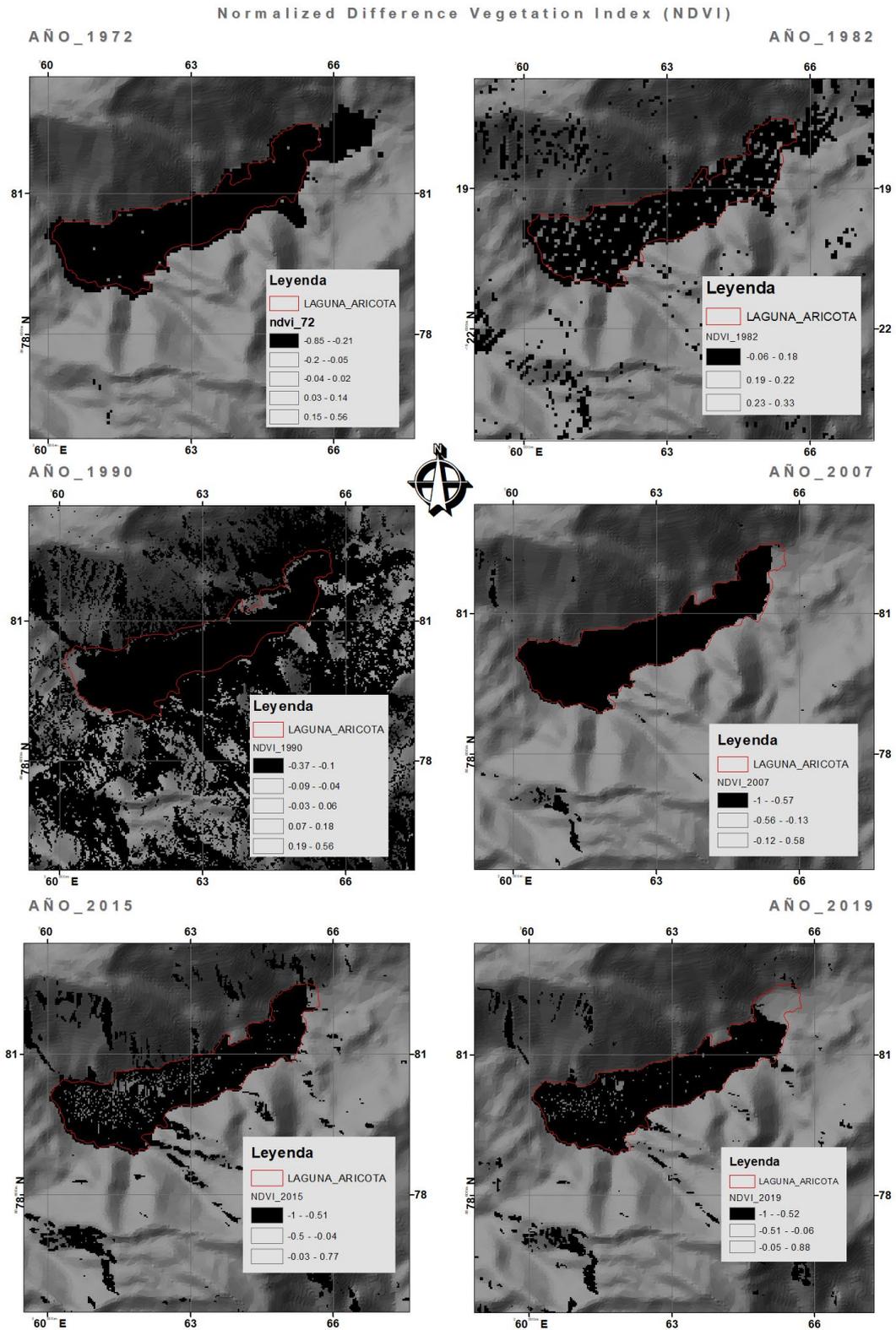


LANDSAT\_7 (08/07/2019)

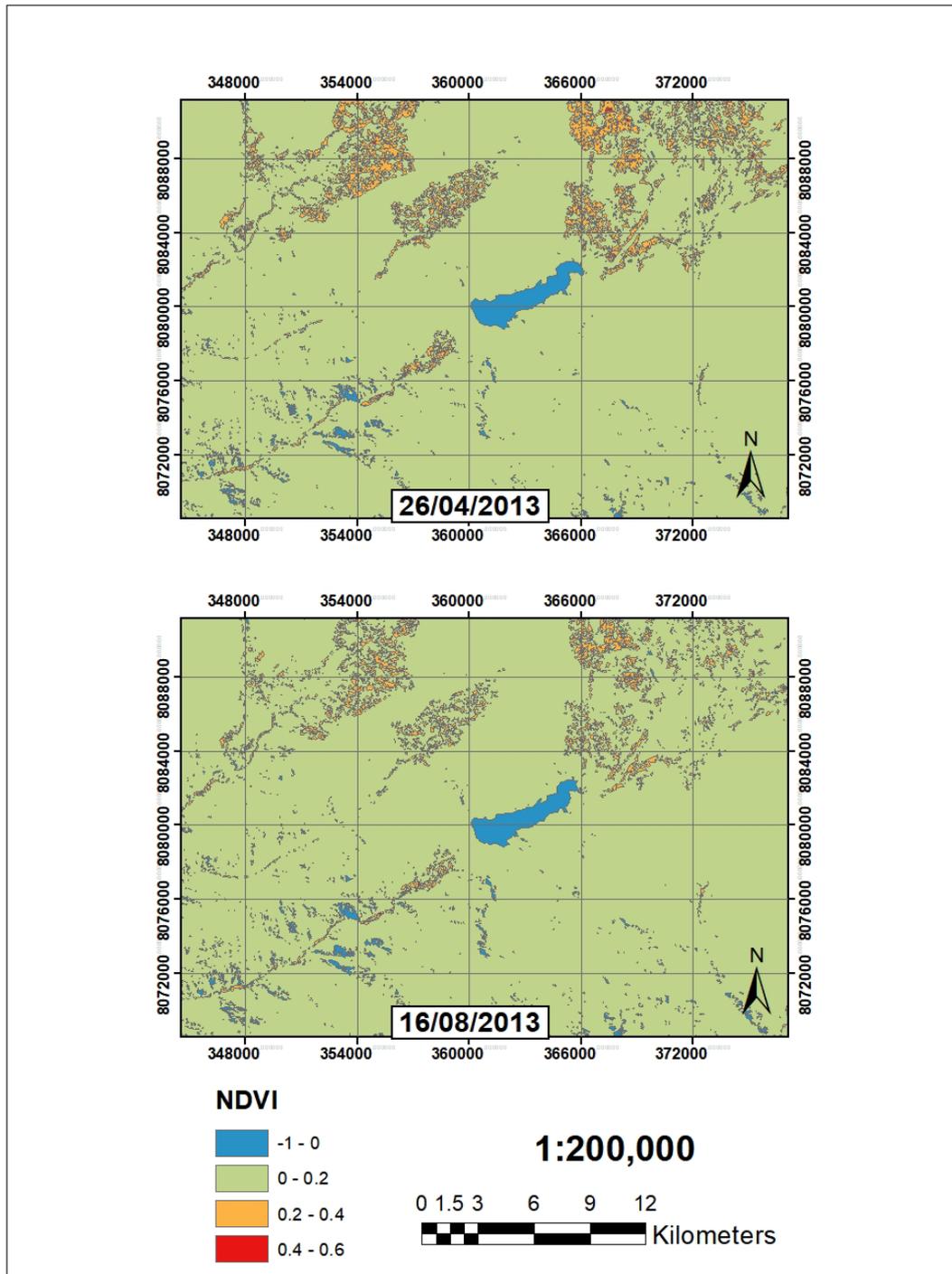
Imagen cortada banda 3 y 4 respectivamente

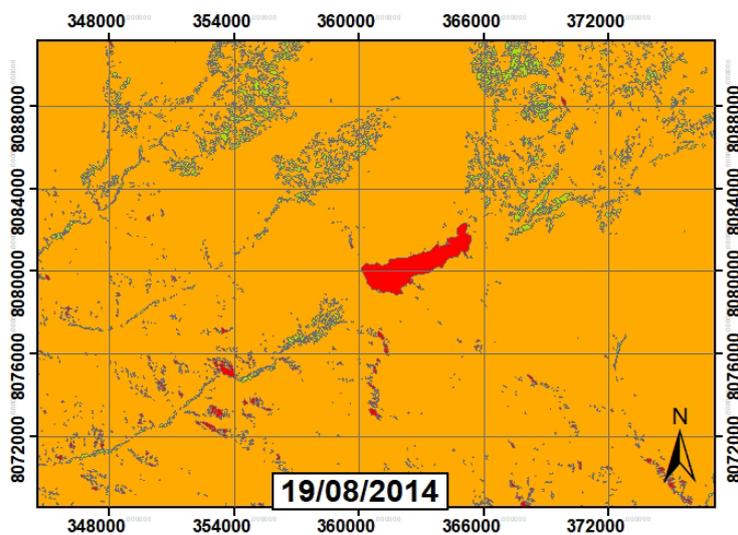
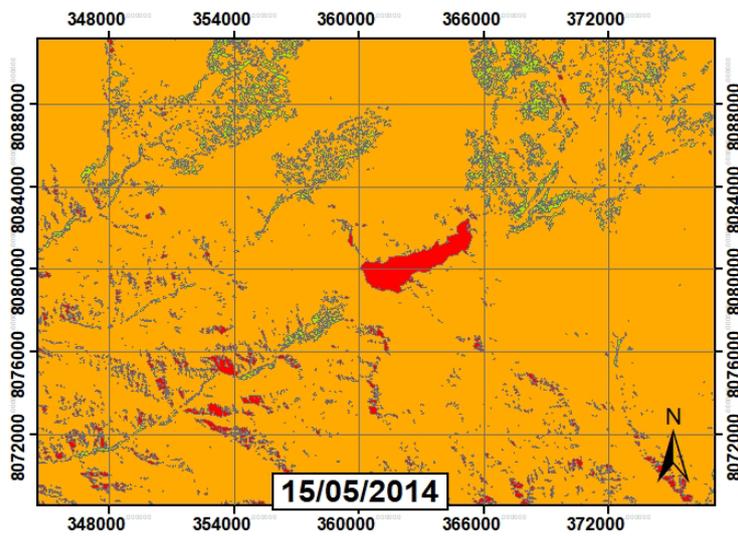


# ANEXO 4: Índice de diferencia normalizado (NDVI)



## ANEXO 5: Índice de diferencia normalizado (NDVI) Landsat 8



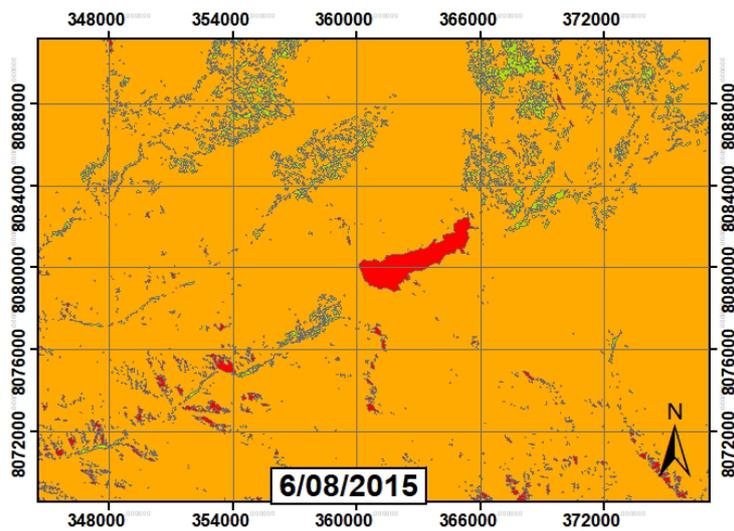
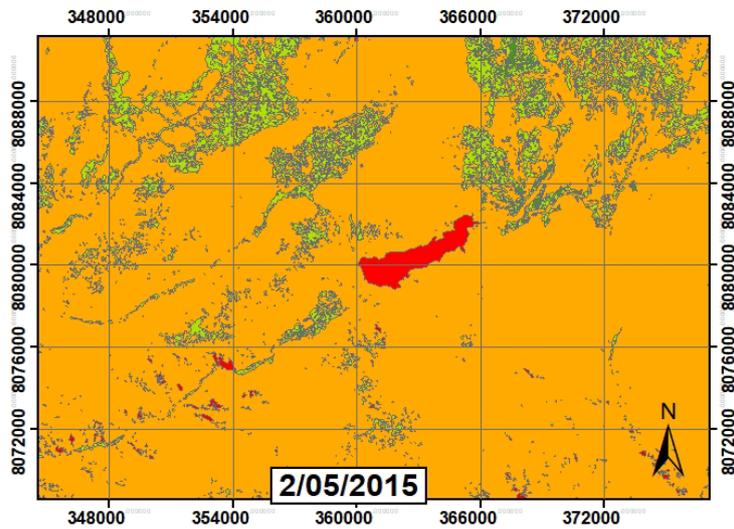


**NDVI**

- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**



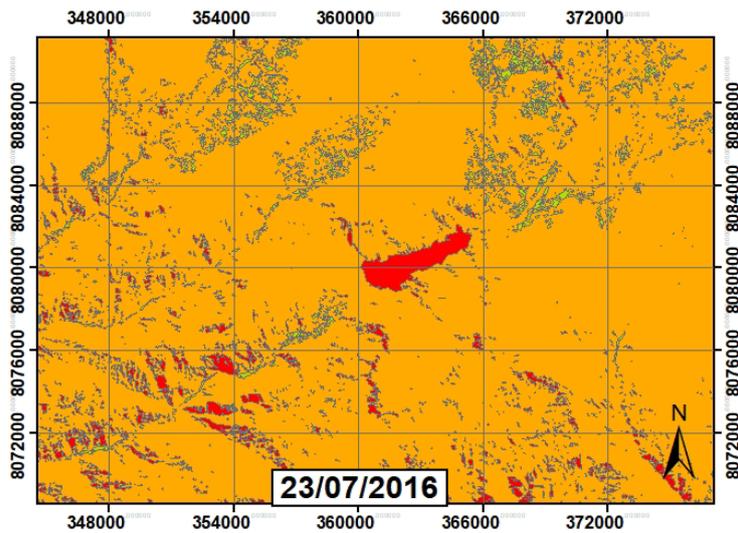
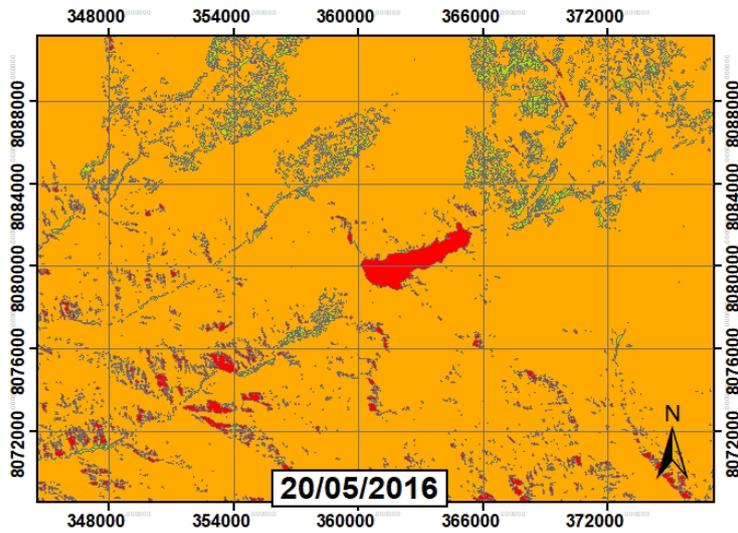


**NDVI**

- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**



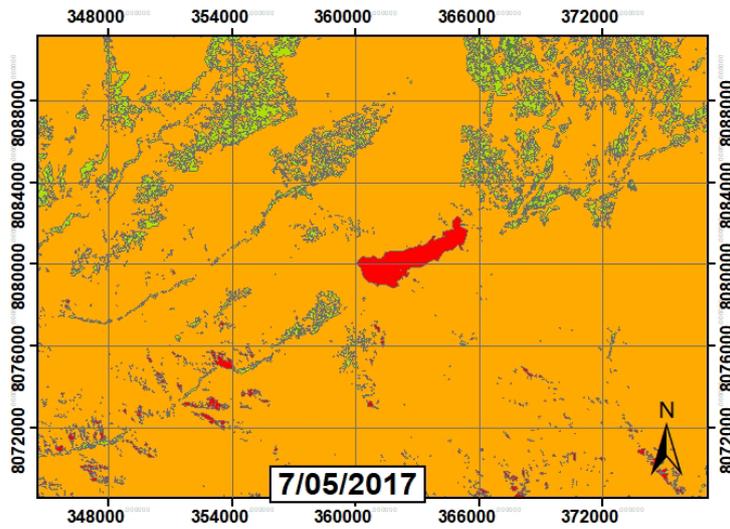


**NDVI**

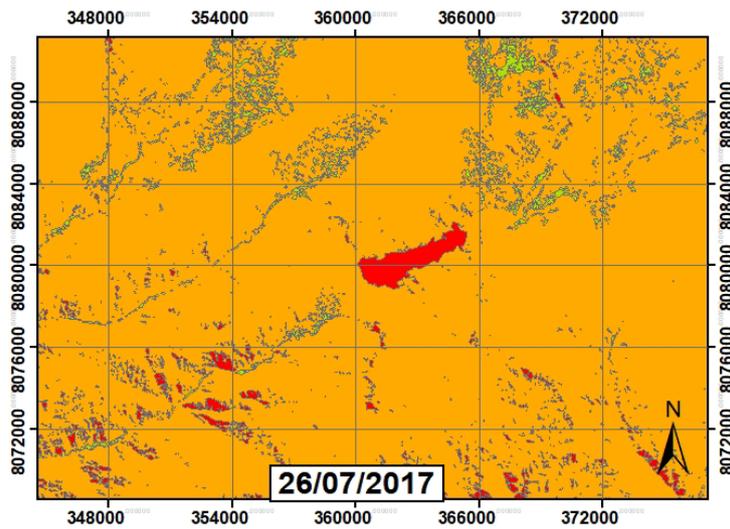
- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**





7/05/2017



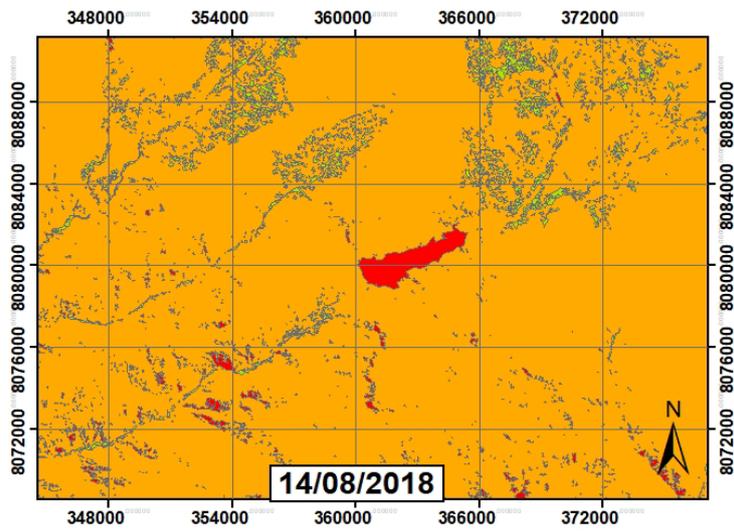
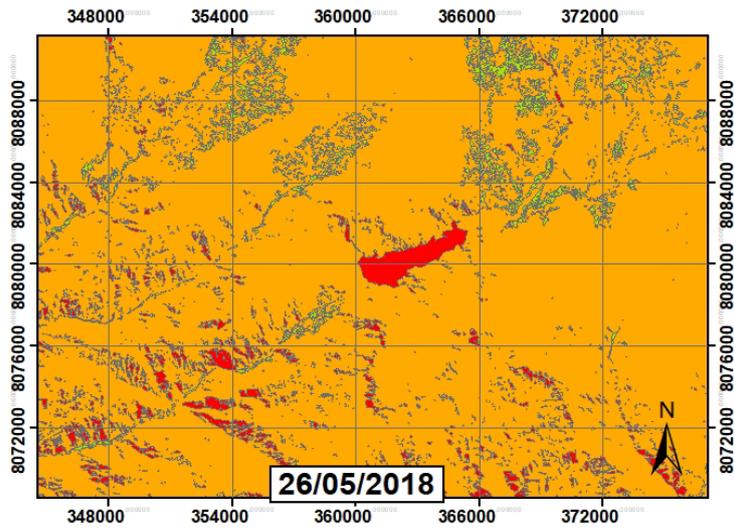
26/07/2017

**NDVI**

- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**



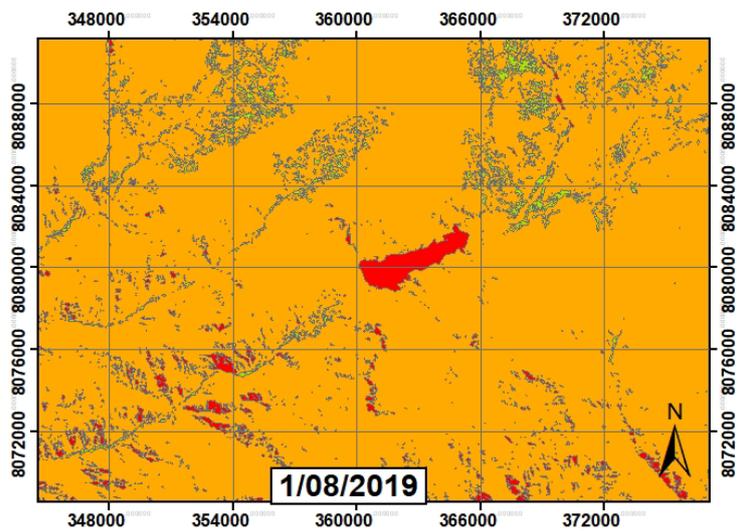
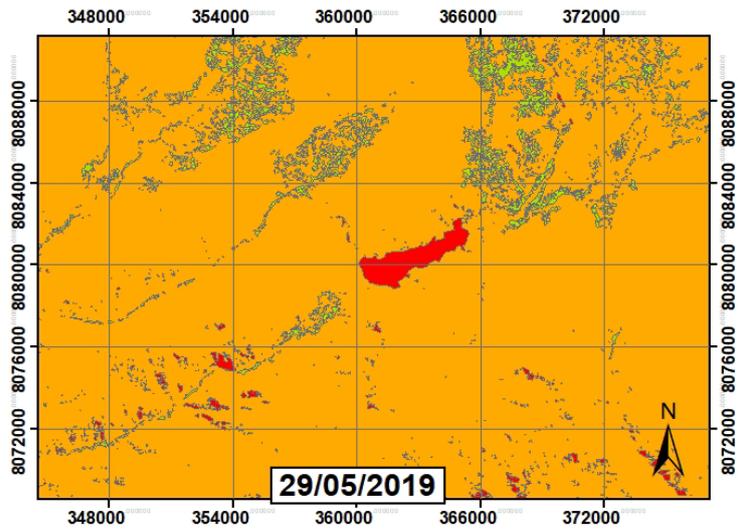


**NDVI**

- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**



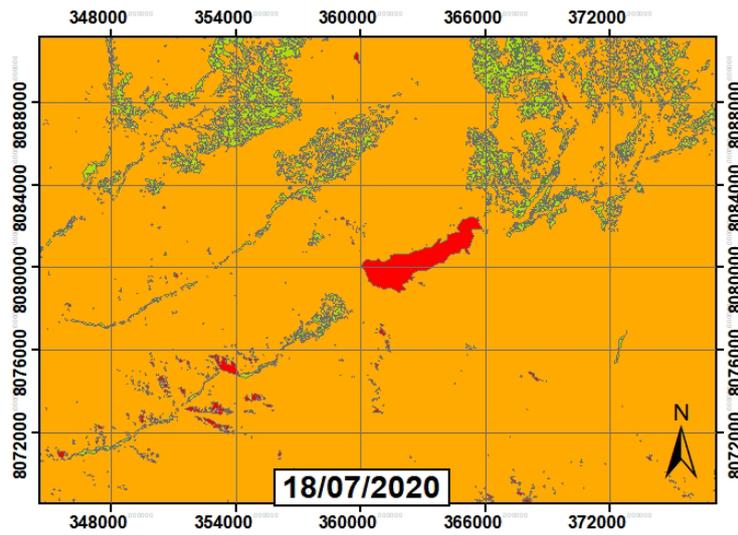
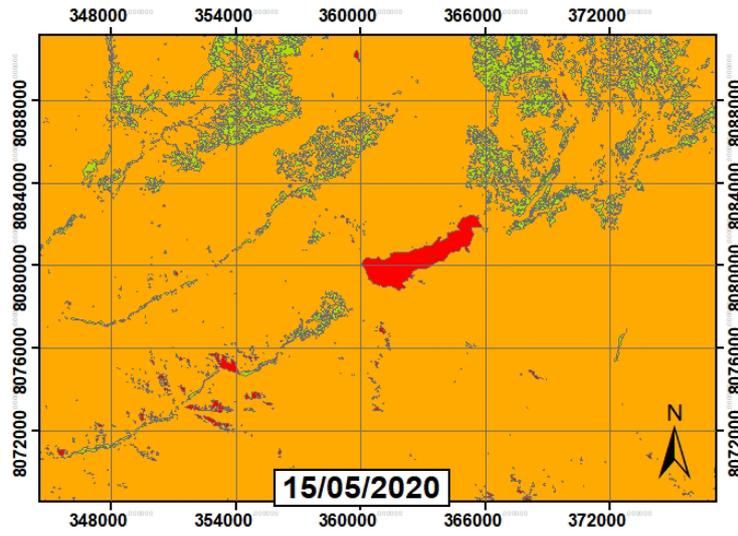


**NDVI**

- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**





**NDVI**

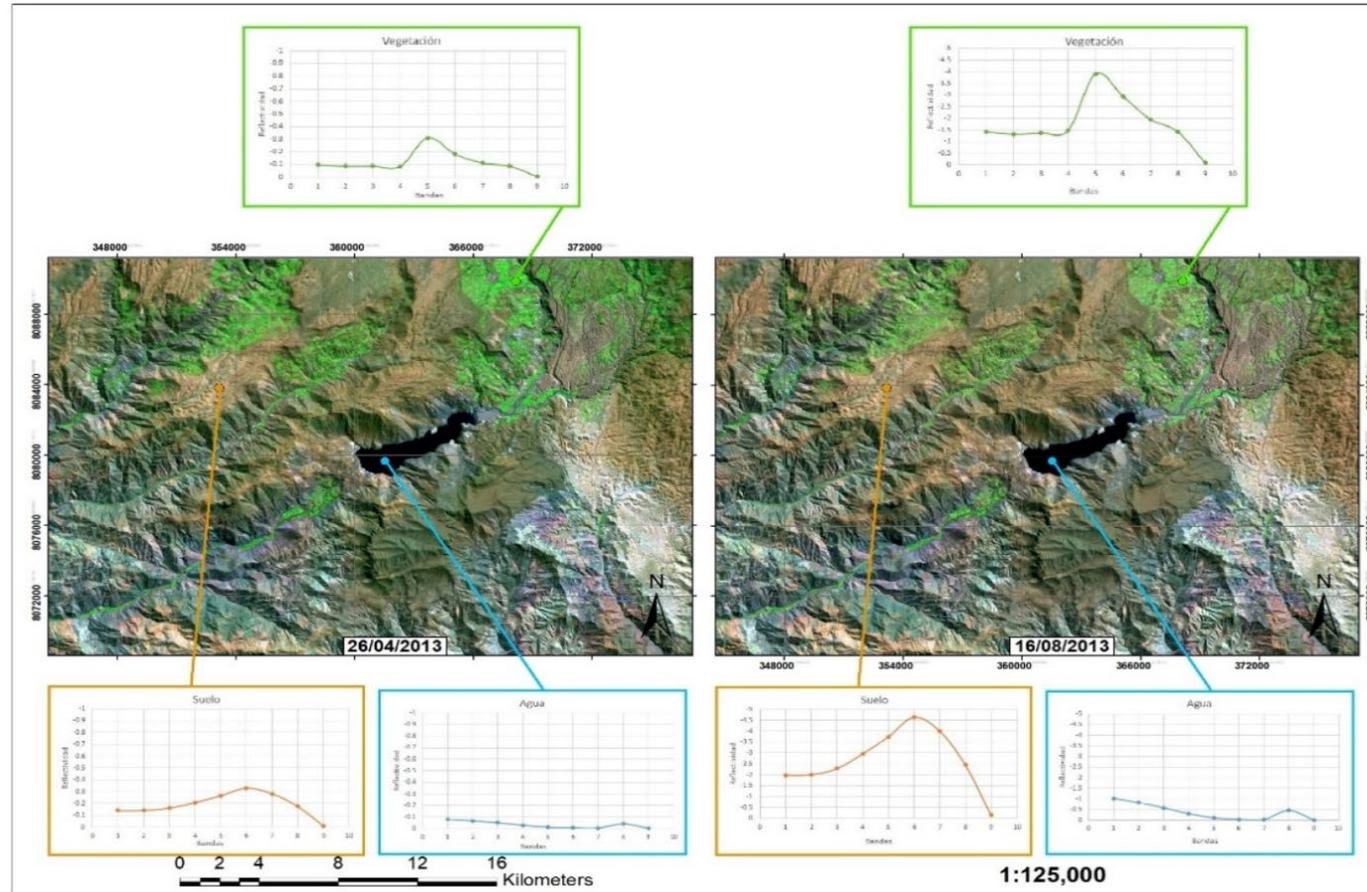
- Vegetación Muy Buena
- Vegetación Buena
- Vegetación Regular
- Cuerpos Denudados

**1:200,000**

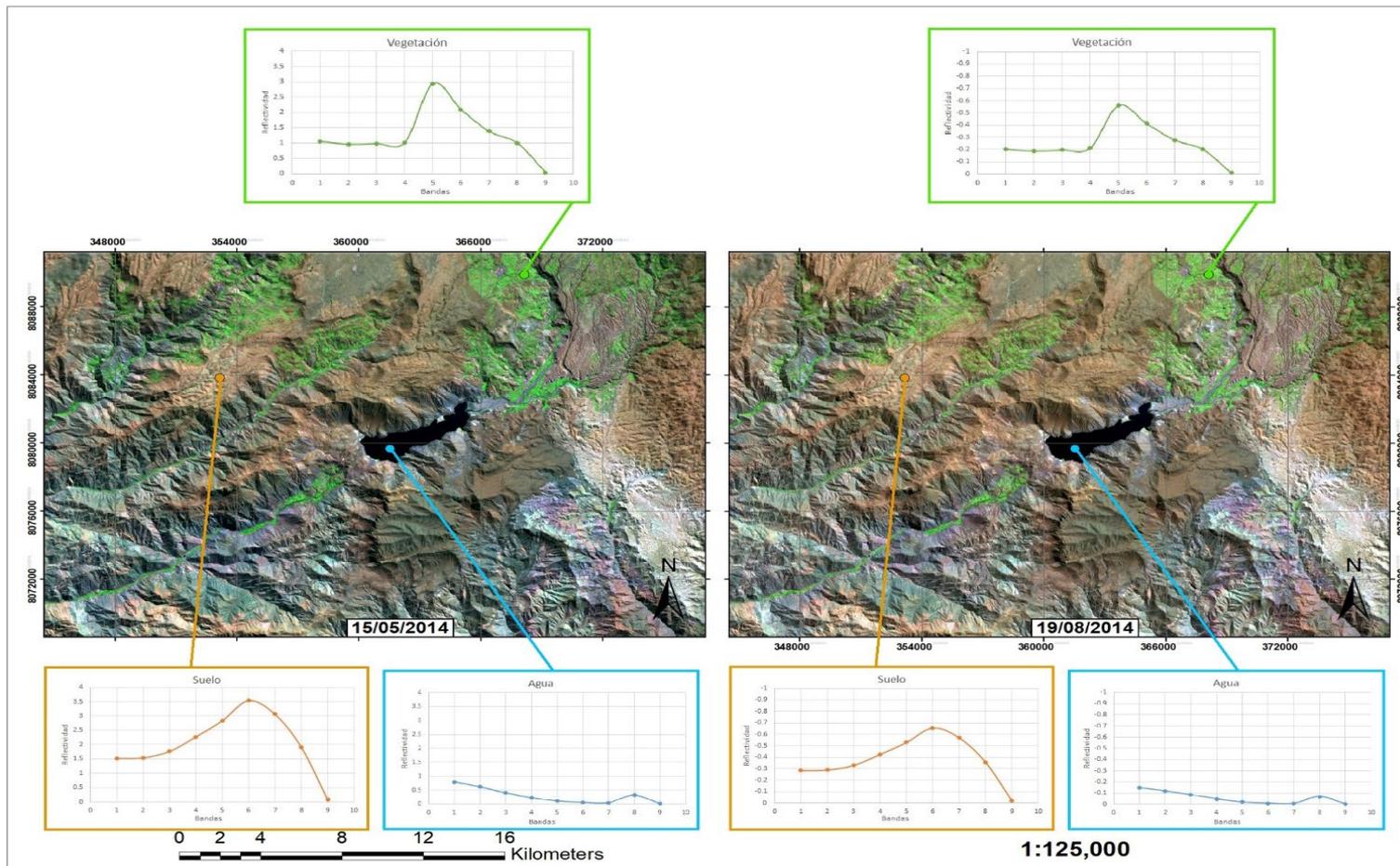


# ANEXO 6: Firmas espectrales

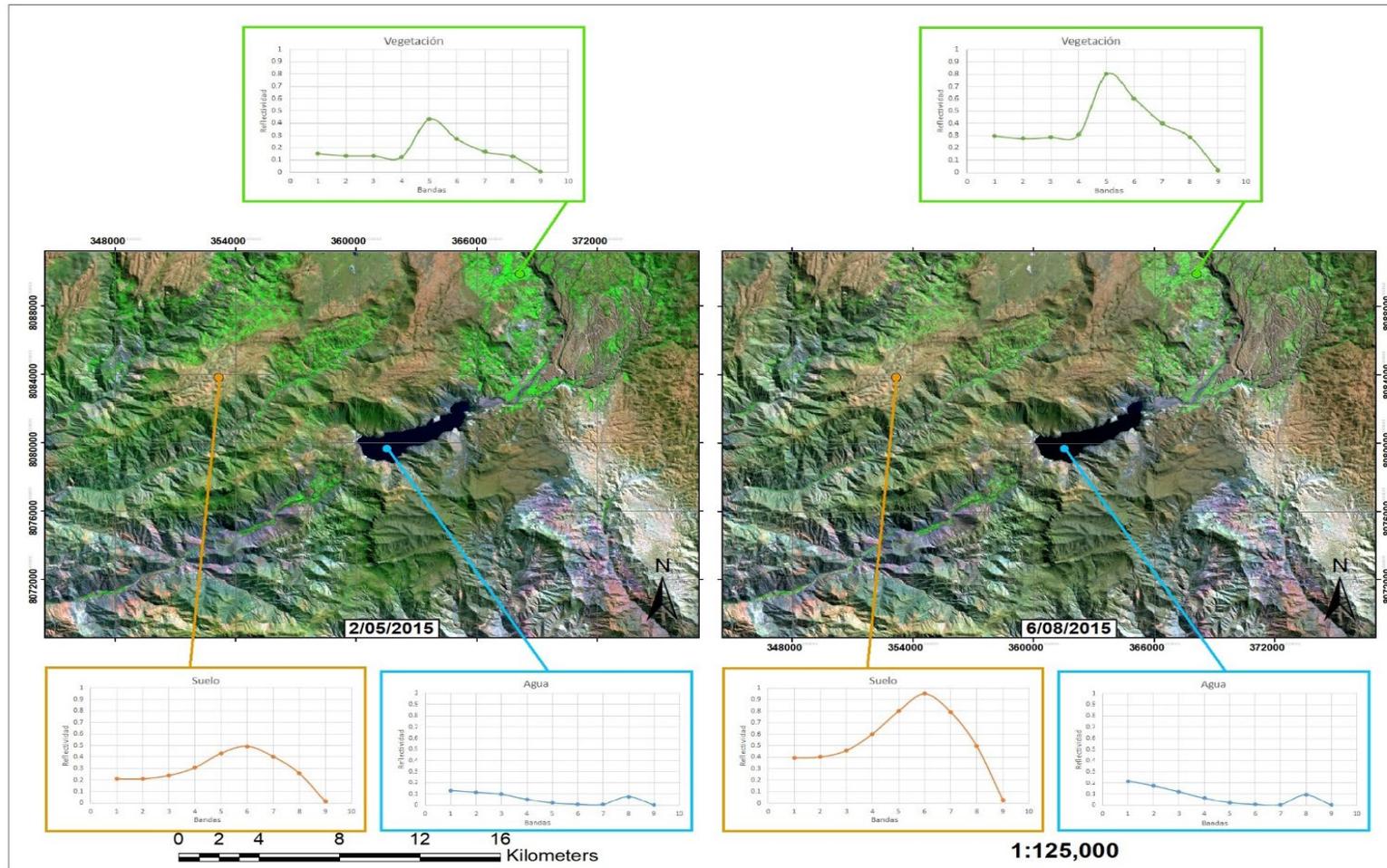
## Firmas Espectrales año 2013



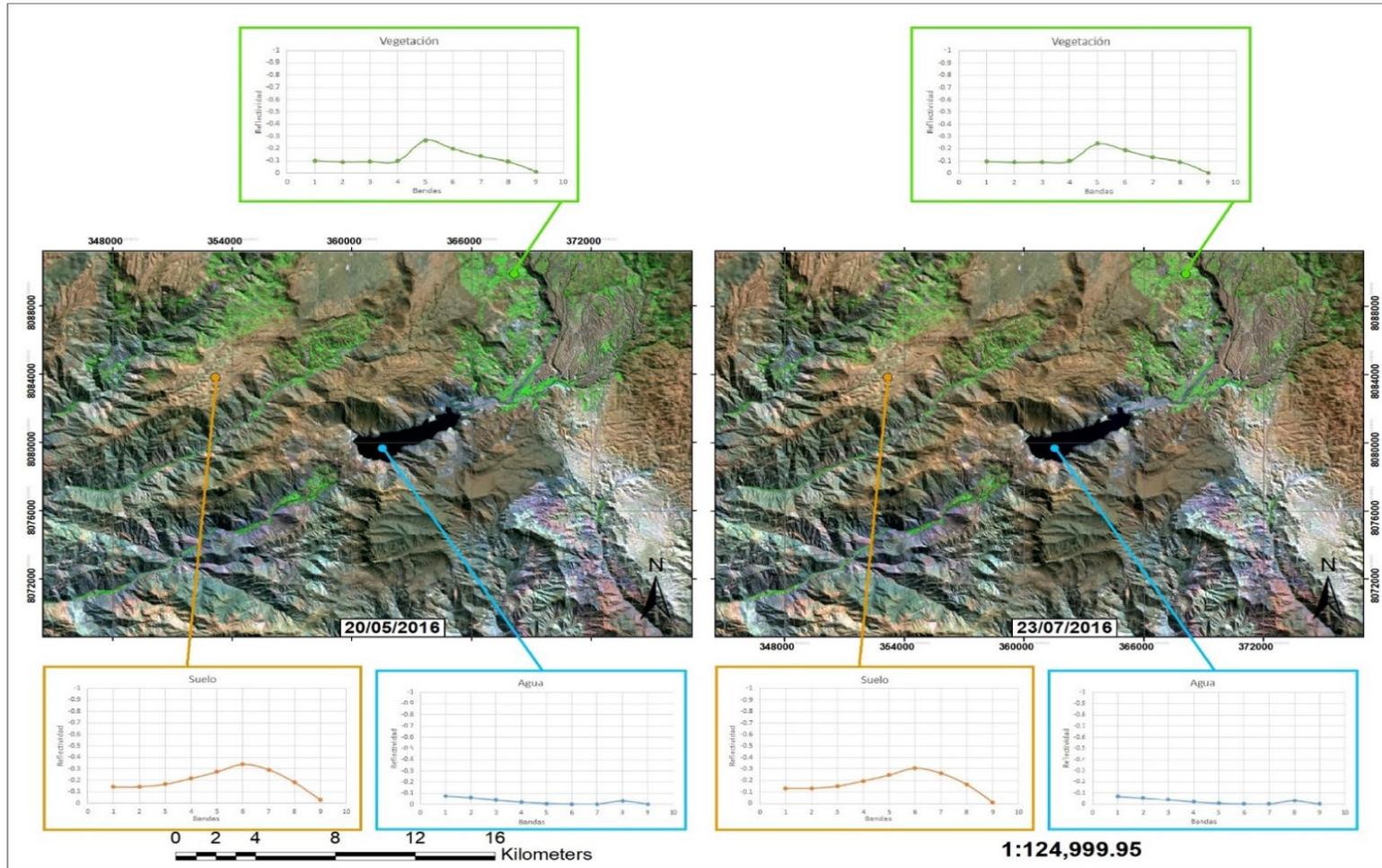
## Firmas Espectrales año 2014



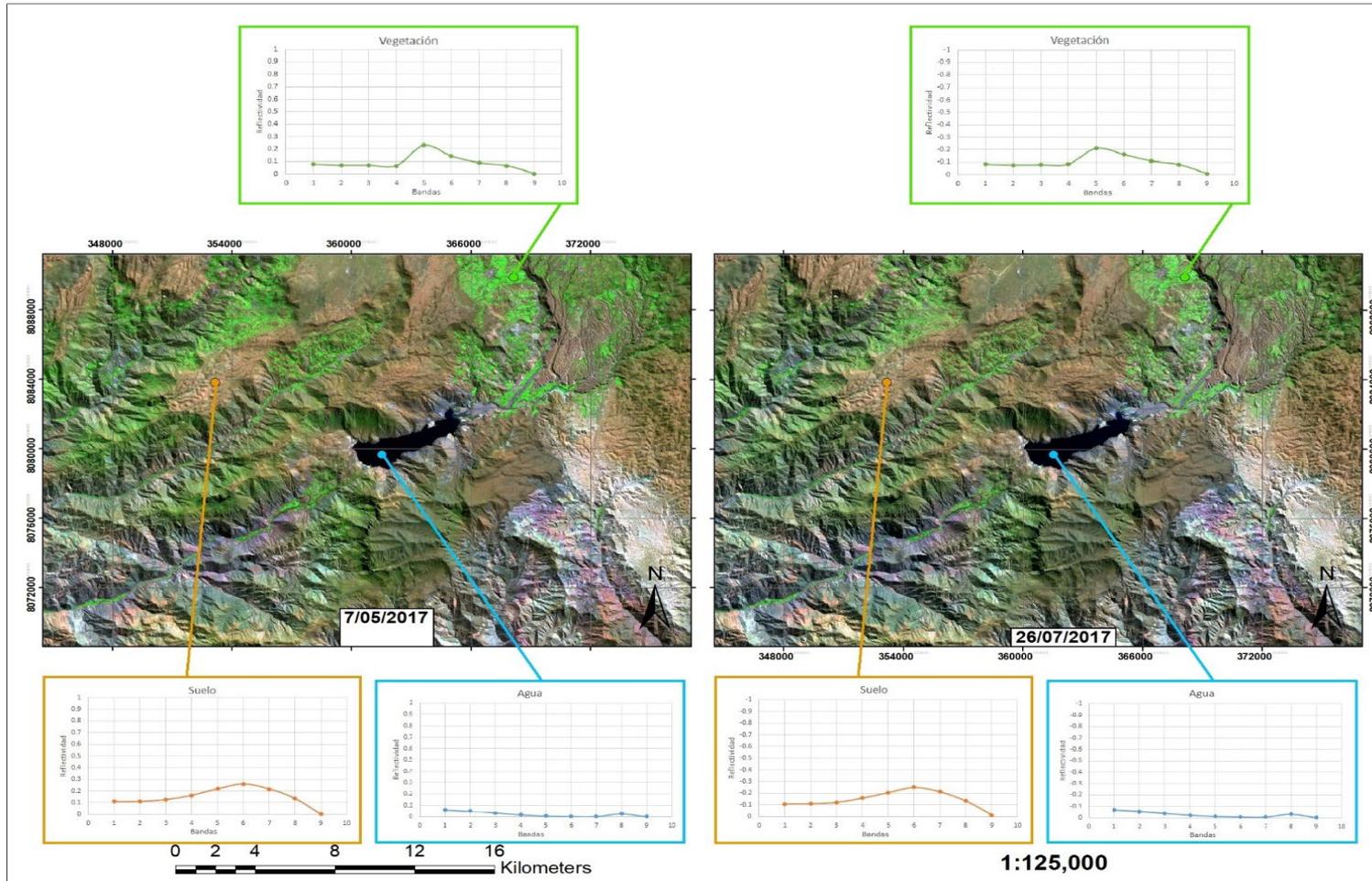
## Firmas Espectrales año 2015



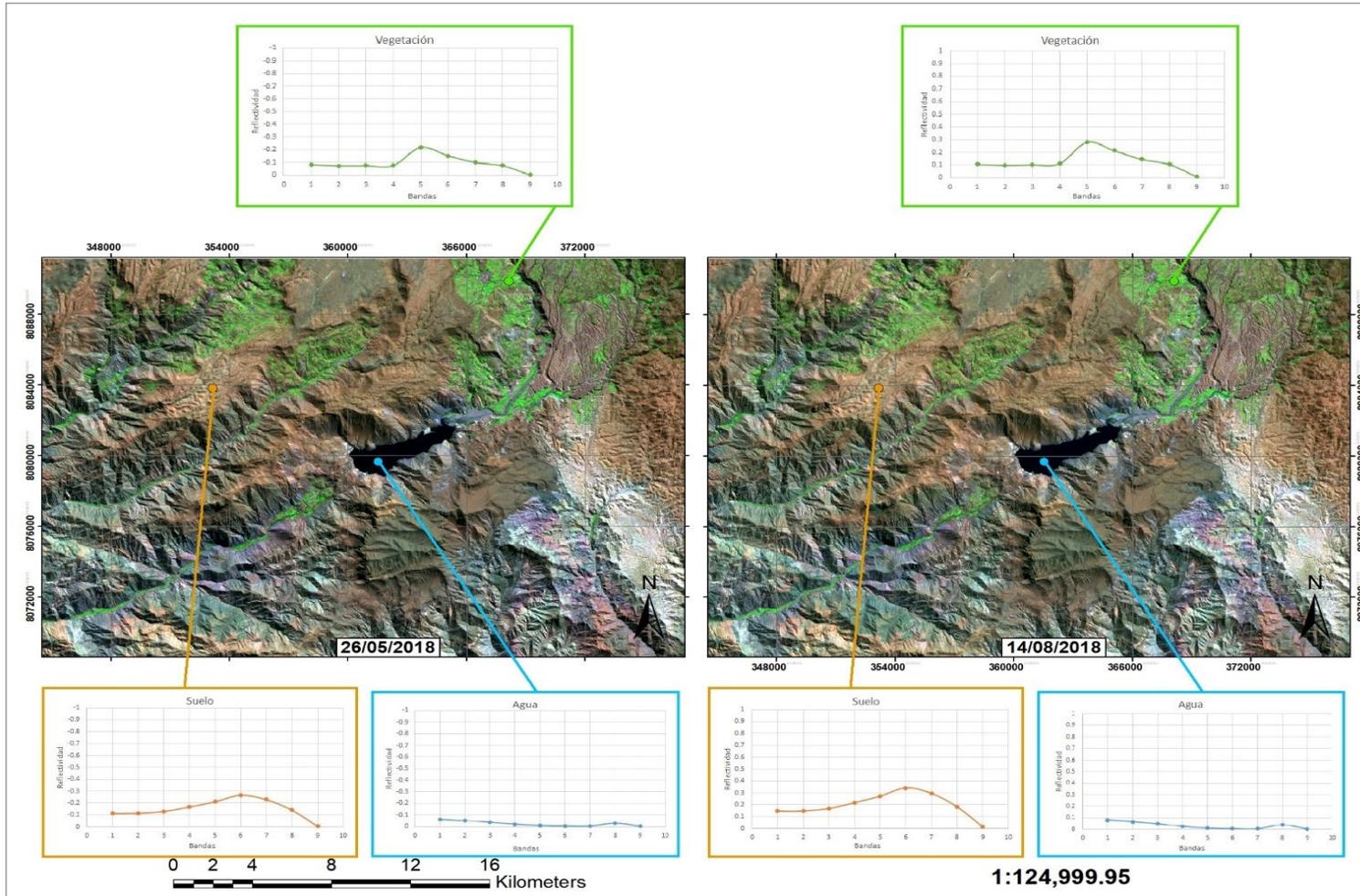
## Firmas Espectrales año 2016



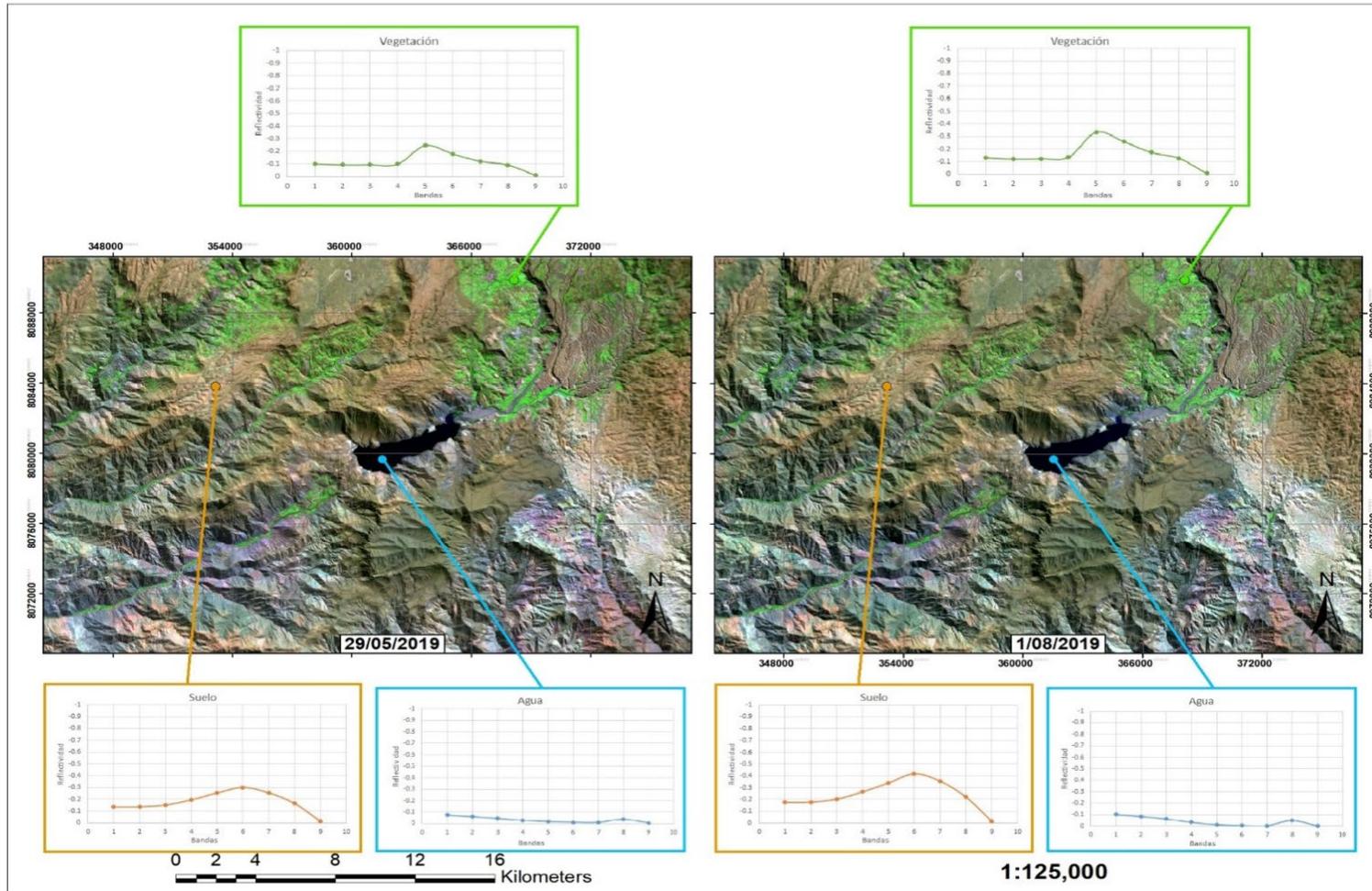
## Firmas Espectrales año 2017



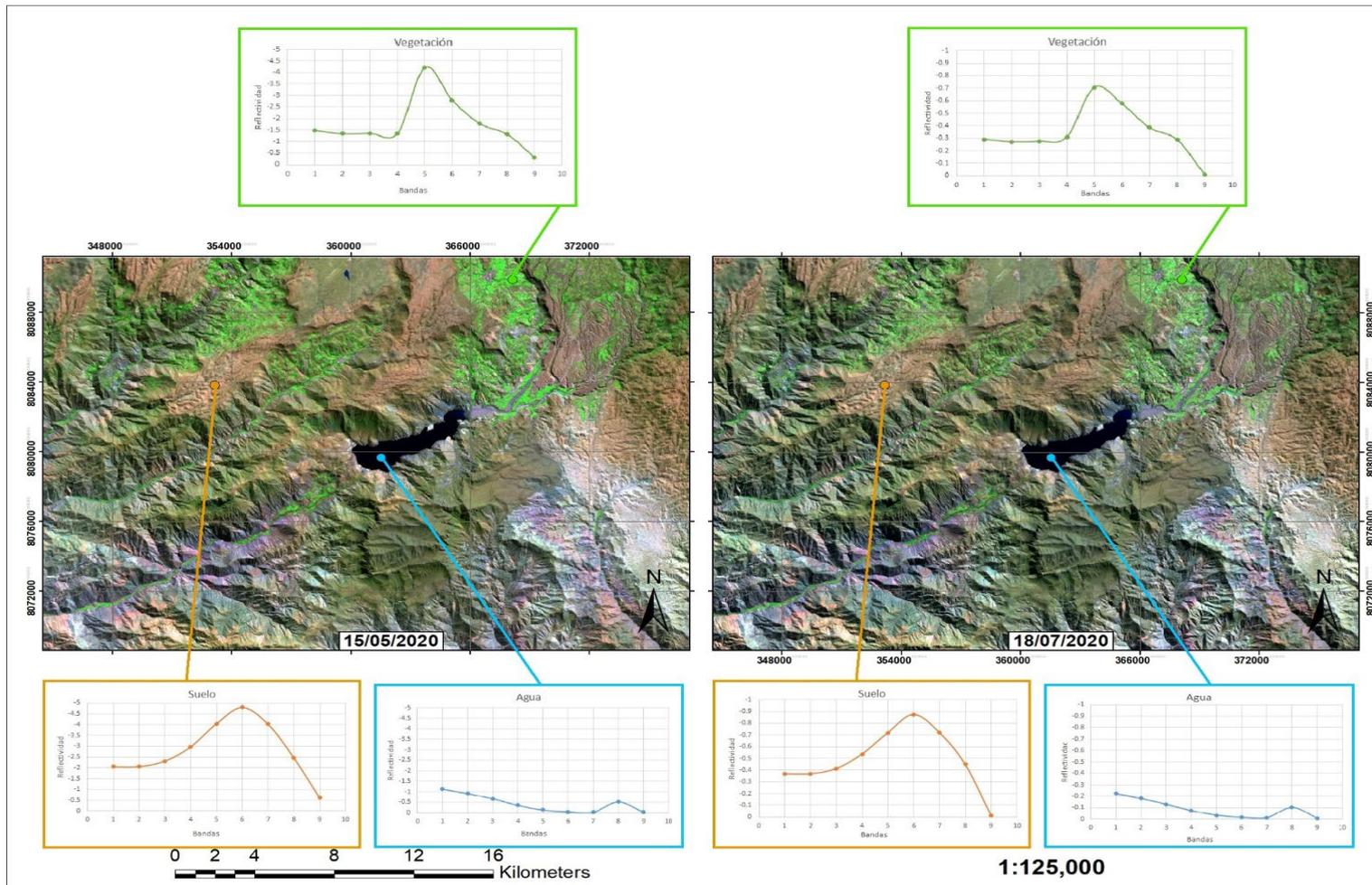
## Firmas Espectrales año 2018



## Firmas Espectrales año 2019



## Firmas Espectrales año 2020



## ANEXO 7: Índice de Kappa

Año 2013				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	12	1	13
Vegetación	0	2	29	31
<b>Total (Producer)</b>	2	14	30	46
<b>Overall Accuracy =</b>	93.48	<b>kappa=</b>	86.20	%

Año 2014				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	11	2	13
Vegetación	0	1	30	31
<b>Total (Producer)</b>	2	12	32	46
<b>Overall Accuracy =</b>	93.48	<b>kappa=</b>	85.68	%

Año 2015				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	10	3	13
Vegetación	0	1	30	31
<b>Total (Producer)</b>	2	11	33	46
<b>Overall Accuracy =</b>	91.30	<b>kappa=</b>	80.55	%

Año 2016				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	11	2	13
Vegetación	0	2	29	31
<b>Total (Producer)</b>	2	13	31	46
<b>Overall Accuracy =</b>	91.30	<b>kappa=</b>	81.26	%

Año 2017				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	10	3	13
Vegetación	0	2	29	31
<b>Total (Producer)</b>	2	12	32	46
<b>Overall Accuracy =</b>	89.13	<b>kappa=</b>	76.14	%

Año 2018				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	11	2	13
Vegetación	0	2	29	31
<b>Total (Producer)</b>	2	13	31	46
<b>Overall Accuracy =</b>	91.30	<b>kappa=</b>	81.26	%

Año 2019				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	12	1	13
Vegetación	0	1	31	32
<b>Total (Producer)</b>	2	13	32	47
<b>Overall Accuracy =</b>	97.83	<b>kappa=</b>	94.99	%

Año 2020				
Clases	Agua	Suelo	Vegetación	Total (User)
Agua	2	0	0	2
Suelo	0	11	2	13
Vegetación	0	1	31	32
<b>Total (Producer)</b>	2	12	33	47
<b>Overall Accuracy =</b>	95.65	<b>kappa=</b>	89.78	%