

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y
AGRIMENSURA



**“DETERMINACIÓN DE LA DINÁMICA ESPACIAL DE BOFEDALES
MEDIANTE IMÁGENES SATELITALES LANDSAT FRENTE A ESCENARIOS
DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO COATA DURANTE EL
PERÍODO DE 1984-2016”**

TESIS

PRESENTADA POR:

YESSICA GUTIÉRREZ QUENTA

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO TOPÓGRAFO Y AGRIMENSOR

PROMOCIÓN: 2013-I

PUNO – PERÚ

2018

**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO
FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA TOPOGRÁFICA Y
AGRIMENSURA**

**“DETERMINACIÓN DE LA DINÁMICA ESPACIAL DE BOFEDALES MEDIANTE
IMÁGENES SATELITALES LANDSAT FRENTE A ESCENARIOS DEL CAMBIO
CLIMÁTICO EN LA CUENCA DEL RÍO COATA DURANTE EL PERÍODO DE 1984-
2016”**

TESIS

PRESENTADA POR:

YESSICA GUTIÉRREZ QUENTA



PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERO TOPÓGRAFO Y AGRIMENSOR

FECHA DE SUSTENTACIÓN: 27 DE DICIEMBRE DE 2018

APROBADA POR EL JURADO REVISOR CONFORMADO POR:

PRESIDENTE

:

M.Sc. Alberto Ramos Vilca

PRIMER MIEMBRO

:

Ing. Víctor Raúl Banegas Layme

SEGUNDO MIEMBRO

:

M.Sc. Omar Henry Marca Flores

DIRECTOR / ASESOR

:

Ing. Arturo Joels Ventura Mamani

PUNO – PERÚ

2018

Área : Ciencias naturales

Tema : Sistemas de información geográfica para ingenieros

DEDICATORIA

A Dios, por brindarme el regalo más grande, que es la oportunidad de vivir, por darme fortaleza, amor, sabiduría y no abandonarme, durante el transcurso de mis días.

A mí querida madre Sabina, por su amor incondicional, concejos y apoyo, lo cual permitió realizar mi formación profesional. A mis hermanos, Edwin, José, Yaneth, Patricia, Darwin y Melania, por su paciencia, apoyo, motivación y comprensión durante mi vida.

A mis amigos y amigas, por compartir momentos inmemoriales y agradables.

Yessica.

AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano de Puno, en especial a la escuela profesional de Ingeniería Topográfica y Agrimensura que, mediante los docentes, me brindaron los conocimientos y valores que permitieron mi desarrollo profesional.

A mi director y asesor Ing. Arturo Joels Ventura Mamani, por su disposición y orientación en la elaboración de dicha tesis.

A los miembros del jurado: M.Sc. Alberto Ramos Vilca, Ing. Víctor Raúl Banegas Layme y M.Sc. Omar Henry Marca Flores, por sus instrucciones y orientaciones lo cual permitieron la culminación de dicha tesis.

ÍNDICE

	Pág.
RESUMEN	12
ABSTRACT.....	13
I. INTRODUCCIÓN.....	14
1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	15
1.1.1. Pregunta General.	16
1.1.2. Preguntas Específicas.	16
1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.2.1. Hipótesis general.	17
1.2.2. Hipótesis específicas.....	17
1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN.....	17
1.3.1. Objetivo general.	17
1.3.2. Objetivos específicos.	17
II. REVISIÓN DE LITERATURA.....	18
2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN	18
2.2. MARCO TEÓRICO.....	21
2.2.1. Percepción remota.	21
2.2.1.1. <i>El espectro electromagnético</i>	21
2.2.1.2. <i>Resolución de los sensores remotos</i>	23
2.2.1.2.1. <i>Resolución espacial</i>	23
2.2.1.2.2. <i>Resolución espectral</i>	24
2.2.1.2.3. <i>Resolución radiométrica</i>	24
2.2.1.2.4. <i>Resolución temporal</i>	25
2.2.1.3. <i>Imágenes de satélite Landsat</i>	26
2.2.1.4. <i>Modelo digital de elevación</i>	26
2.2.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG).	27
2.2.2.1. <i>Componentes de un SIG</i>	27
2.2.2.2. <i>Modelos de representación</i>	28
2.2.2.3. <i>Fundamentos de bases de datos</i>	29
2.2.2.4. <i>Bases de datos espaciales</i>	30
2.2.3. El cambio climático reciente.....	30
2.2.3.1. <i>Calentamiento global y efecto invernadero</i>	30
2.2.3.2. <i>Evento extremo</i>	31
2.2.3.3. <i>Temperaturas extremas del aire</i>	32

2.2.3.4. <i>Temperaturas máximas y mínimas</i>	32
2.2.3.5. <i>Precipitaciones pluviales extremas</i>	32
2.2.4. Series de tiempo.	35
2.2.4.1. <i>Componentes que integran una serie de tiempo</i>	35
2.2.4.1.1. <i>Componente de tendencia</i>	36
2.2.4.1.2. <i>Componente estacional</i>	36
2.2.4.1.3. <i>Componente irregular</i>	36
2.2.4.1.4. <i>Componente cíclico</i>	36
2.2.5. Los humedales en el Perú.	36
2.2.5.1. <i>Bofedales</i>	37
III. MATERIALES Y MÉTODOS	38
3.1. MATERIALES E INSTRUMENTOS.....	38
3.2. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO.....	38
3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS	40
3.3.1. Selección del área de estudio.....	40
3.3.1.1. <i>Ubicación política</i>	40
3.3.1.2. <i>Ubicación geográfica</i>	41
3.3.2. Metodología para el objetivo 1.....	41
3.3.2.1. <i>Método de estimación de correlación</i>	41
3.3.3. Metodología para el objetivo 2.....	46
3.3.3.1. <i>Recopilación de información en campo</i>	46
3.3.3.1.1. <i>Recopilación de puntos de muestreo</i>	46
3.3.3.2. <i>Recopilación de información en gabinete</i>	48
3.3.3.2.1. <i>Recopilación de DEM</i>	48
3.3.3.2.2. <i>Recopilación de Imágenes satelitales Landsat</i>	49
3.3.3.3. <i>Procesamiento de datos</i>	50
3.3.3.3.1. <i>Calibración radiométrica</i>	51
3.3.3.3.2. <i>Radiancia espectral (Lλ)</i>	52
3.3.3.3.3. <i>Conversión a Reflectividad Top-of-Atmosphere (TOA)</i>	52
3.3.3.3.4. <i>Conversión a temperatura de brillo de la atmósfera</i>	54
3.3.3.3.5. <i>Índice de Diferencia Normalizado (NDVI)</i>	55
3.3.3.4. <i>Análisis estadístico</i>	59
3.3.4. Metodología para el objetivo 3.....	63
3.3.4.1. <i>Recopilación de información</i>	63
3.3.4.2. <i>Análisis de tendencia temporal</i>	65
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	67

4.1. RESULTADO Y DISCUSIÓN DE OBJETIVOS	67
4.1.1. Para objetivo principal	67
4.1.2. Para objetivo específico	67
CONCLUSIONES	71
RECOMENDACIONES	72
REFERENCIAS.....	73
ANEXOS.....	76

ÍNDICE DE FIGURAS

	Pág.
<i>Figura 1</i> Espectro electromagnético	23
<i>Figura 2</i> Formato de una imagen digital (7 x 9 píxeles).....	24
<i>Figura 3</i> Mayor resolución temporal gracias a la reorientación	25
<i>Figura 4</i> Celdas de una malla ráster con sus valores asociados.....	28
<i>Figura 5</i> Modelo de representación vectorial y ejemplos particulares.....	29
<i>Figura 6</i> Arquitectura dual para el manejo de datos espaciales y no espaciales.	30
<i>Figura 7</i> Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios.	34
<i>Figura 8</i> Procedimiento metodológico para la elaboración de la investigación.....	39
<i>Figura 9</i> Mapa de ubicación política de la Investigación	40
<i>Figura 10</i> Mapa de Ubicación de la cuenca del río Coata	41
<i>Figura 11</i> R ² entre Temperatura máxima y dinámica espacial de bofedales.	44
<i>Figura 12</i> Ecuación de la recta entre Temperatura y dinámica espacial de bofedales.	44
<i>Figura 13</i> R ² entre Precipitación acumulada y dinámica espacial de bofedales.	45
<i>Figura 14</i> Ecuación de la recta entre Precipitación y dinámica espacial de bofedales.	45
<i>Figura 15</i> Ubicación de puntos de muestreos.	46
<i>Figura 16</i> Bofedal del punto de muestreo 01.	47
<i>Figura 17</i> Bofedal del punto de muestreo 02.	47
<i>Figura 18</i> Bofedal del punto de muestreo 03.	48
<i>Figura 19</i> Modelo Digital de Elevación del área de intervención.	49
<i>Figura 20</i> Escenas de Imagen satelital Landsat 5.....	50
<i>Figura 21</i> Delimitación de cuenca del río Coata	51
<i>Figura 22</i> Mosaico de Imagen satelital Landsat 5.....	55
<i>Figura 23</i> Separabilidad espectral de clasificación	56
<i>Figura 24</i> Determinación de bofedales del año de 1984.	57
<i>Figura 25</i> Determinación de bofedales del año de 1990.	57
<i>Figura 26</i> Determinación de bofedales del año de 2000.	58
<i>Figura 27</i> Determinación de bofedales del año de 2005.	58
<i>Figura 28</i> Determinación de bofedales del año de 2010.	58
<i>Figura 29</i> Determinación de bofedales del año de 2016.	59
<i>Figura 30</i> Matriz de confusión de la clasificación supervisada.....	62
<i>Figura 31</i> Coeficiente de Kappa y bondad del mapa.....	68
<i>Figura 32</i> Series de tiempo de extensiones superficiales Bofedales.....	68
<i>Figura 33</i> Series de tiempo de Precipitación Promedia Acumulada (mm).....	69
<i>Figura 34</i> Series de tiempo de Temperatura máxima promedio (°C).	70

ÍNDICE DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1 Tabla ANOVA	43
Tabla 2 Coordenadas UTM de puntos de Muestreos	48
Tabla 3 Determinación de áreas de bofedales durante los años de 1984 al 2016.....	63
Tabla 4 Estaciones meteorológicas del área de intervención.	63
Tabla 5 Datos de precipitación acumulada(mm) de estaciones meteorológicas y PISCO	64
Tabla 6 Recopilación de temperatura máxima (°C) de estaciones meteorológicas y PISCO.....	65

ÍNDICE DE ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
AMS	American Meteorological Society
ASTER GDEM	Aster Global Digital Elevation Model
AVHRR	Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución
CEPAL	Comisión Económica para América Latina y el Caribe
DEM	Modelos Digitales De Elevación
ENSO	El fenómeno de El Niño - Oscilación Sur
ERTS	Earth Resources Technology Satellites
ETM+	Enhanced Thematic Mapper Plus
GPS	Global Positioning System
FAO	Organización de las Naciones Unidas para la Agricultura y la Alimentación
IRC	Infrarrojo cercano
IRM	Infrarrojo medio
I	Infrarrojo lejano o térmico
INPE	Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales
LANDSAT	Land Remote Sensing Satellite
M	Micro-ondas
METEOSAT	Satélites meteorológicos geoestacionarios
MDE	Modelo Digital de Elevaciones
MINAM	Ministerio del Ambiente del Perú
MODIS	Espectroradiómetro de Imágenes de Resolución Moderada
MSS	Escaner Multi-Espectral
NASA	National Aeronautics and Space Administration
NOAA	Administración Nacional Oceánica y Atmosférica
ND	Nivel Digital
NDVI	Normalized Difference Vegetation Index
OLI	Operational Land Imager
PISCO	Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations
PNUD	Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo

RAMSAR	Grupo de Examen Científico y Técnico de la Convención sobre Humedales
REM	Radiación Electromagnética
ROIs	Región de interés
R2	Coefficiente de Correlación
SIG	Sistemas de Información Geográfica
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Short Wave Infrared
TIN	Red de Triángulos Irregulares
TIRS	Thermal Infrared Sensor
TM	Thematic Mapper
TOA	Reflectividad Top-of-Atmosphere
TRMM	Misión de Medición de Lluvias Tropicales
USGS / EROS	Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres
UTM	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator

RESUMEN

La investigación se realizó en la cuenca del río Coata, que se encuentra entre las provincias de Lampa, San Román y Puno, cuyo objetivo fue determinar el grado de correlación entre la dinámica espacial de los bofedales durante los años de 1984 a 2016 y los factores climáticos como precipitación acumulada y temperatura máxima. La metodología consistió en determinar la extensión superficial de dichos bofedales utilizando algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), mediante imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, también se realizó recopilación de información de precipitación acumulada anual y temperatura máxima anual, y se analizó la tendencia que presentan dichos factores climáticos durante los años indicados, lo cual resultó una tendencia significativa en la temperatura máxima anual. Finalmente se realizó una regresión lineal múltiple y se tuvo como resultado, que el factor climático que más influye en el comportamiento de los bofedales es la temperatura máxima, debido a que el coeficiente de correlación resultó ($R^2 = 0.46$) lo que significa que existe una relación significativa. Se concluye que a medida que la temperatura máxima anual aumenta, la extensión superficial de los bofedales disminuye o en algunos casos los bofedales desaparecen, lo que implica que, uno de los factores en el comportamiento de los bofedales es el cambio climático.

Palabras Clave: Análisis espacial, Bofedales, Imágenes Landsat, NDVI, Precipitación.

ABSTRACT

The investigation was carried out in the Coata river basin, located between the provinces of Lampa, San Román and Puno, whose objective was to determine the degree of correlation between the spatial dynamics of the bofedales during the years of 1984 to 2016 and the factors climatic events such as accumulated precipitation and maximum temperature. The methodology consisted of determining the superficial extension of said bofedales using algorithms of Vegetation Index of Normalized Difference (NDVI), by means of satellite images Landsat 5 and Landsat 8, also compilation of information of accumulated annual precipitation and maximum annual temperature was made, and analyzed the trend of these climatic factors during the years indicated, which resulted in a significant trend in the annual maximum temperature. Finally, a multiple linear regression was carried out and the result was that the climatic factor that most influences the behavior of the bofedales is the maximum temperature, because the correlation coefficient resulted ($R^2 = 0.46$) which means that there is a significant relationship. It is concluded that as the maximum annual temperature increases, the surface area of the bofedales decreases or in some cases the bofedales disappear, which implies that one of the factors in the behavior of the bofedales is climate change.

Keywords: Spatial analysis, Bofedales, Landsat images, NDVI, Precipitation.

I. INTRODUCCIÓN

Muchas investigaciones concuerdan, que los efectos del cambio climático se están revelando en el funcionamiento de los ecosistemas. Por ejemplo, se puede apreciar que hay disminución y/o desaparición de glaciares, lagunas y bofedales lo cual esto afecta a los recursos hídricos.

Los ecosistemas frágiles son territorios que por su alto valor de conservación son vulnerables y por ende son ecosistemas muy difíciles de recuperar. Los humedales Alto Andinos o también llamados bofedales, son considerados como ecosistemas frágiles debido a su importancia como reguladores de recurso hídrico hacia las cuencas en épocas de estiaje.

Estos humedales andinos, son fuentes de sustento e ingresos para los pastores locales. También apoyan a muchas especies endémicas de alto valor ecológico (PNUD, 2001) y tienen el potencial de secuestrar grandes cantidades de carbono (Earle et al., 2003).

Por ello el objetivo de esta investigación es determinar el grado de correlación entre los factores climáticos y la dinámica espacial de los bofedales en la cuenca del río Coata, utilizando técnicas de teledetección, ya que la teledetección ha ido desarrollándose de forma espectacular y su aplicación ha sido utilizado en los recursos naturales, se fundamenta en que los elementos de la naturaleza tienen una respuesta espectral propia que se denomina *signatura espectral*. De esta forma estudia las variaciones espectrales, espaciales y temporales de las ondas electromagnéticas, y pone de manifiesto las correlaciones existentes entre éstas y las características de los diferentes materiales terrestres (Chuvieco, 2002).

1.1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

La vinculación del cambio climático con los humedales alto andinos es significativa, debido a que su función es esencial al garantizar la seguridad del agua en época seca. Por ello su importancia ha sido reconocida por el Grupo de Examen Científico y Técnico de la Convención sobre Humedales - RAMSAR que indica que los humedales por sus características y peculiaridades suelen ser ecosistemas sensibles a ser afectados por las variaciones del clima y los fenómenos extremos del tiempo (RAMSAR 2015), a su vez los bofedales tienen un papel importante que desempeñar en la mitigación del cambio climático debido a que actúan como depósitos de carbono y serán importantes para ayudar a los humanos a adaptarse.

Muchos humedales se están perdiendo de manera acelerada y a veces son irreversibles ya sea por falta de manejo y desconocimiento de su importancia económica y ecológica, o en consecuencia por la acción del clima y los fenómenos meteorológicos extremos. Cambios en la temperatura, en los patrones de precipitación, aumento del nivel del mar, son entre otras variaciones del clima que pueden producir sensibles impactos en los humedales. Para el caso peruano, un estudio reciente publicado por la Comisión Económica para América Latina y el Caribe (CEPAL) ha advertido que uno de los tipos de humedal (bofedales) pasarían de 0.5 a 0.2 millones de hectáreas entre el 2014 y fines de siglo (CEPAL, 2014). Lo cual es una cifra considerable la pérdida de hectáreas de estos humedales alto andinos.

Se debe tomar en cuenta también que los bofedales son sostenidos por una combinación de precipitaciones y contribuciones de nieve y glaciares a través del drenaje hacia arriba o por el flujo terrestre. Por lo tanto, son muy sensibles a los cambios en el

balance hídrico (Squeo et al. 2006). Por otra parte, se conoce muy poco sobre la relación de los humedales con la hidrología y climatología a nivel local y regional (E. García & M. Otto 2015) más aún en un contexto de cambio climático.

Por ello se ve la necesidad de realizar esta investigación aprovechando la existencia de nuevas tecnologías como es la Teledetección y los Sistemas de Información Geográfica (SIG), que hoy en día facilitan en identificar y/o solucionar múltiples problemas que se puedan presentar en la sociedad y el medio ambiente, ya sea mediante el uso de imágenes satelitales o información espacial, los cuales ayuda a analizar y gestionar de mejor manera el medio ambiente, así como es el caso de los efectos que genera el cambio climático frente a los humedales alto andinos en la región de Puno.

Por tanto, surgen las siguientes interrogantes como pregunta al problema de investigación:

1.1.1 Pregunta General.

¿Qué grado de correlación existe entre los factores climáticos y la dinámica espacial de bofedales en los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata?

1.1.2. Preguntas Específicas.

- ¿La extensión superficial de bofedales es determinado con los algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) en los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata?
- ¿Existe tendencia en los factores climáticos como precipitación y temperatura entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata?

1.2. HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN

1.2.1. Hipótesis general.

Existe correlación significativa entre los factores climáticos y la dinámica espacial de humedales entre los años 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.

1.2.2. Hipótesis específicas.

- Los algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) determinan la extensión superficial de bofedales entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.
- En los factores climáticos como precipitación y temperatura existe tendencia entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.

1.3. OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN

1.3.1. Objetivo general.

Determinar el grado de correlación entre los factores climáticos y la dinámica espacial de los bofedales en los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.

1.3.2. Objetivos específicos.

- Determinar la extensión superficial de bofedales mediante algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.
- Determinar la tendencia de los factores climáticos como precipitación y temperatura entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.

II. REVISIÓN DE LITERATURA

2.1. ANTECEDENTES DE LA INVESTIGACIÓN

En una investigación examinaron las respuestas espaciales del NDVI a la precipitación y la temperatura durante un período de 9 años (1989–1997) en Kansas. Los mapas de la estación de crecimiento quincenal (de marzo a octubre) de NDVI lo construyeron utilizando imágenes de NDVI del Radiómetro Avanzado de Muy Alta Resolución (AVHRR) de la Administración Nacional Oceánica y Atmosférica (NOAA). El NDVI y la precipitación variaron en la misma dirección (ambos positivos o negativos) para el 60 – 95% de la superficie total. Las temperaturas mínimas se correlacionaron positivamente con el NDVI, pero la desviación de la temperatura del promedio generalmente no se correlacionó con la desviación del NDVI de la media (Wang & Rich, 2001).

Existe una investigación acerca de la relación entre el NDVI y la precipitación en la meseta del Tibet, conocido también como la meseta Qinghai-Tíbet. Mediante el uso de los datos de NOAA AVHRR NDVI-8 km de resolución multitemporales desde 1982 a 1999, realizaron una distribución espacial de coeficiente de correlación entre la precipitación anual y efectiva NDVI máximo anual, lo cual fue similar a la creciente lluvia de la temporada y el NDVI máximo anual; y no había buena relación entre el NDVI y precipitaciones en la pradera y pastizales con cubierta vegetal medio, y el efecto de las precipitaciones sobre la vegetación era mínimo en el área de bosque (Wei & Zhaofeng, 2007).

En una tesis de grado, en la cual se usaron imágenes satelitales del sensor Landsat 5TM para las regiones del Altiplano Norte del departamento de La Paz. Tuvieron como resultado que el bofedal Ucha Ucha redujo en tamaño para el año de 1997, pero hacia el

año 2009 su recuperación era casi total, el bofedal de San Calixto-Suriquiña también presentó este mismo comportamiento. El Bofedal Chojñapata tuvo una cobertura baja el año 1985 y aumento su cobertura el año 1997. Finalmente, el bofedal Tuni pampa mantiene una tendencia a subir de cobertura vegetal, debido al deshielo que alimentan a la represa de agua que se encuentran en cercanías del bofedal y lo mantiene con humedad constante durante todo el año (Esteban, 2013).

Un estudio realizado en la Cordillera Real de Bolivia, cuantificaron la variabilidad de los humedales dentro del contexto del cambio climático empleando imágenes Landsat. Realizaron un análisis de regresión lineal múltiple, contrastando la dinámica espacial de los humedales con datos de precipitación acumulada, y datos morfométricos de las cuencas. Tomando en cuenta que las coberturas totales de nieve y humedales pueden tener una alta variabilidad interanual. Se encontró un porcentaje de retroceso muy similar a lo obtenido con métodos Aero fotogramétricos (48% determinado por Soruco (2008), contra un 47% aplicando el método propuesto en su estudio) (Zeballos et al. 2014).

En una investigación se encontró como resultado, en la cabecera de cuenca del río Santa, Ancash, Perú, que el análisis espaciotemporal de la cubierta de nieve obtenida de las imágenes del Espectro radiómetro de Imágenes de Resolución Moderada (MODIS), mostró que el 71% ($R^2=0.71$) de la extensión espacial de bofedales puede ser explicada por la varianza de nieve entre los años 2000 y 2009. El análisis basado en la información anual de las imágenes de la Misión de Medición de Lluvias Tropicales (TRMM) indicó que el 68% ($R^2=0.68$) de la extensión espacial de bofedales puede ser explicada por la varianza de la lluvia caída en la época húmeda (E.Garcia & M.Otto, 2015).

En una tesis de grado, realizaron un análisis de tendencias de la proyección de las variables climáticas, como de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación, dicho estudio se realizó en la microcuenca del río Sururia, Bolivia. El resultado fue que la tendencia de la serie de datos de temperaturas máximas mensuales promedio, muestran ascensos de 3.4 °C, desde el año 1985 hasta 2055. Sin embargo, las tendencias de la serie de datos de temperaturas mínimas proyectadas para el 2055, muestra ascensos promedio levemente inferiores a los datos de temperatura máxima (2,5°C). En las tendencias de las precipitaciones presentan un descenso de 15,0 mm de precipitación (Viviana, 2015).

En la cuenca Nuñoa ubicada en los Andes del sur de Perú, realizaron un análisis de NDVI, derivado del Landsat 5-TM (Mapeador Temático), durante los años de 1985 a 2010. Para ello realizaron un modelo de regresión múltiple con la precipitación, la temperatura, el día juliano y el año de adquisición de imagen. Los resultados indican que aproximadamente el 30% de las zonas de humedales muestran una disminución del NDVI. La estación seca NDVI está moderadamente correlacionada con la precipitación de la estación húmeda ($R^2 = 0.56$, $p < 0.05$). Los cambios en el manejo de la tierra pueden resultar en un uso más intensivo de los humedales, causando la disminución de las tendencias de la vegetación en algunos lugares (M. Mazzarino & J. Finn, 2016).

En una tesis de maestría, se explica la evolución de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático, en la cual realizaron el análisis de tendencia de esta variable, estableciéndose que solo algunas estaciones evaluadas presentan tendencia al incremento o descenso de la precipitación; sin embargo, los datos de temperatura de la gran mayoría de las estaciones presentan tendencias significativas y positivas. Así mismo relacionó estas variables con diferentes índices climáticos, como los

índices ligados al ENSO con la precipitación y correlaciones directas con los valores de temperatura (Robert Ramos, 2018).

2.2. MARCO TEÓRICO

2.2.1. Percepción remota.

La percepción remota es la ciencia y el arte de obtener información sobre un objeto, área o fenómeno por el análisis de datos adquiridos por un instrumento que no está en contacto con el objeto, área o fenómeno bajo investigación (Lillesand et al., 2004). Estos instrumentos reciben el nombre de sensores remotos. Los sensores son sistemas fotográficos u óptico electrónicos capaces de recoger y registrar la energía proveniente de los blancos bajo investigación (objeto, material, área o fenómeno) para permitir un posterior procesamiento e interpretación de los registros por un analista. Por lo tanto, la transferencia de datos de un objetivo a un sensor se da a través de la energía. Los sensores más comunes operan con la energía o la Radiación Electromagnética (REM) (Inácio et al., 2005).

2.2.1.1. El espectro electromagnético.

La organización de estas bandas de longitudes de onda o frecuencia se denomina espectro electromagnético (Fig. 1) comprende desde las longitudes de onda más cortas (rayos gamma, rayosx), hasta las kilométricas (tele comunicaciones). Las unidades de medida más comunes se relacionan con la longitud de onda, las más cortas se utilizan micrómetros, mientras las más largas se miden en centímetros o metros. Normalmente a estas últimas (denominadas micro-ondas) se las designa también por valores de frecuencia (en Gigahertz, GHz= 10^9 Hz) (Chuvienco, 2002).

Desde el punto de vista de la teledetección, conviene destacar una serie de bandas espectrales, que son las más frecuentemente empleadas con la tecnología actual. Su

denominación y amplitud varían según distintos autores, sí bien la terminología más común es la siguiente:

- **Espectro visible (0.4 a 0.7 μm).** Se denomina así por tratarse de la única radiación electromagnética que pueden percibir nuestros ojos, coincidiendo con las longitudes de onda en donde es máxima la radiación solar. Dentro de esta región, suelen distinguirse tres bandas elementales, que se denominan azul (A: 0.4-0.5 μm), verde (V: 0.5-0.6 μm), y rojo (R: 0.6-0.7 μm), en razón de los colores primarios que nuestros ojos perciben a esas longitudes de onda.

- **Infrarrojo cercano (IRC: 0.7 a 1.3 μm).** También se denomina infrarrojo próximo, reflejado o fotográfico, puesto que parte de él puede detectarse a partir de películas dotadas de emulsiones especiales. Como veremos luego, resulta de especial importancia por su capacidad para discriminar masas vegetales y concentraciones de humedad.

- **Infrarrojo medio (IRM: 1.3 a 8 μm).** En esta región se entremezclan los procesos de reflexión de la luz solar y de emisión de la superficie terrestre. En el primer caso, hablamos de infrarrojo de onda corta (Short Wave Infrared, SWIR), que se sitúa entre 1.3 y 2.5 μm y resulta una región idónea para estimar el contenido de humedad en la vegetación o los suelos. La segunda banda de interés está comprendida entre 3 y 5 μm , y suele denominarse más propiamente como infrarrojo medio (IRM), siendo determinante para la detección de focos de alta temperatura (incendios o volcanes activos).

- **Infrarrojo lejano o térmico (IRT: 8 a 14 μm),** que incluye la porción emisiva del espectro terrestre, en donde se detecta el calor proveniente de la mayor parte de las cubiertas terrestres.

- **Micro-ondas (M: por encima de 1 mm)**, con gran interés por ser un tipo de energía bastante transparente a la cubierta nubosa. Más adelante se estudiará el comportamiento espectral de las principales cubiertas terrestres en cada una de estas bandas del espectro. Antes de ello, convendrá introducir algunos conceptos y unidades de medida comúnmente empleados en teledetección.

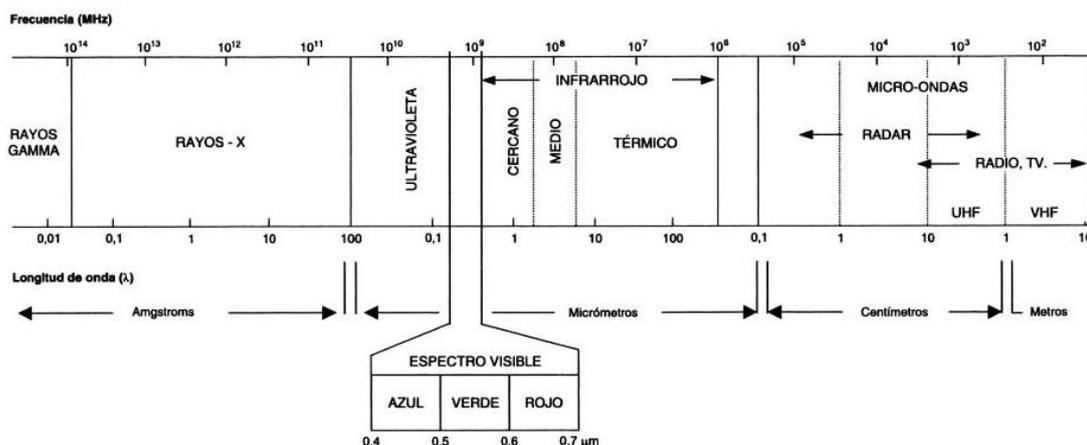


Figura 1 Espectro electromagnético

Fuente: (Chuvienco, 2002.)

2.2.1.2. Resolución de los sensores remotos.

Los sensores instalados en los satélites de teledetección poseen una serie de particularidades que determinan las características de las imágenes que van a proporcionar. Estas características vienen definidas básicamente por diferentes tipos de resolución (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012), las cuales son:

2.2.1.2.1. Resolución espacial.

La resolución espacial es una medida de la distancia angular o lineal más pequeña que puede captar un sensor remoto de la superficie de la Tierra, y viene representada por un píxel. Un píxel es la unidad mínima que conforma una imagen digital. El píxel es generalmente de forma cuadrada, por lo que la longitud medida sobre el terreno de un lado del píxel define la resolución espacial del sensor. La resolución espacial de un sensor

se suele expresar en metros o metros/píxel (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

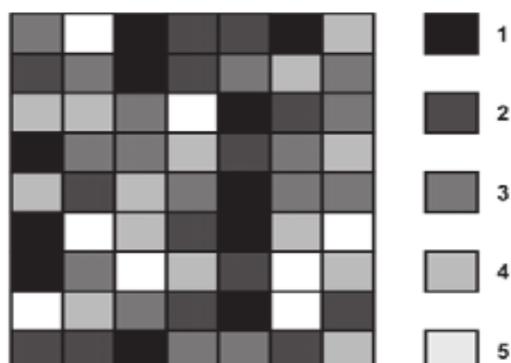


Figura 2 Formato de una imagen digital (7 x 9 píxeles).

Fuente: (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012)

2.2.1.2.2. Resolución espectral.

Como se comentó previamente, las distintas superficies responden de manera diferente a la radiación electromagnética. Esto significa que se puede obtener una firma espectral específica para cada superficie. Así, los diferentes tipos de superficie, naturales o no, se pueden identificar en base a sus firmas espectrales, pero será necesario que el espectro sea suficientemente detallado en términos de intervalos de longitud de onda y que cubra un rango espectral ancho (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

2.2.1.2.3. Resolución radiométrica.

La resolución radiométrica de los datos de teledetección se define como la cantidad mínima de energía requerida para incrementar el valor de un píxel en un nivel digital (ND).

Asimismo, se define la amplitud o extensión radiométrica como el intervalo dinámico, o máximo número de niveles digitales, que pueden ser detectados por un sensor particular. En los sensores más recientes lo habitual suele ser que los niveles vayan de 0

a 2047. En este caso hablaríamos de 11 bits de resolución radiométrica, ya que todos los valores de ese intervalo se pueden representar mediante 11 bits (dígitos binarios) en un sistema digital (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

2.2.1.2.4. Resolución temporal.

La resolución temporal es el ciclo de repetición, o intervalo de tiempo, entre dos adquisiciones de imágenes sucesivas de una misma porción de la superficie y depende, en gran medida, las características orbitales del satélite. Muchas veces también se la denomina período de revisita. Normalmente los satélites meteorológicos tienen una frecuencia diaria (NOAA) o incluso menor (METEOSAT), mientras que la de los satélites de recursos naturales (tipo LANDSAT) es de 16 a 18 días. Sin embargo, muchos satélites actuales tienen la capacidad de reorientar el sensor (Figura 3), lo que les permite aumentar su frecuencia de revisita para una zona determinada, muy importante en el seguimiento de desastres naturales o para detectar procesos que tienen poca perdurabilidad en el tiempo (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012).

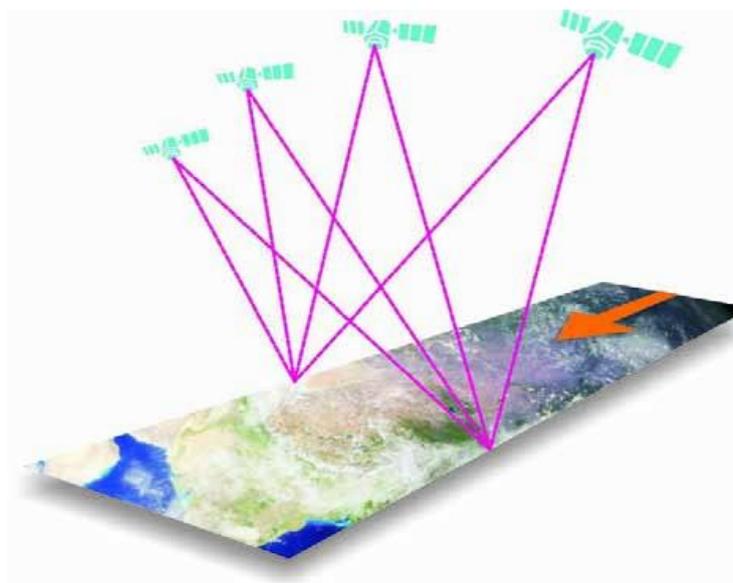


Figura 3 Mayor resolución temporal gracias a la reorientación

Fuente: (Labrador García, Evora Brondo, & Arbelo Pérez, 2012)

2.2.1.3. Imágenes de satélite Landsat.

La constelación de satélites LANDSAT (LAND=tierra y SAT=satélite), que inicialmente se llamaron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), fue la primera misión de los Estados Unidos para el monitoreo de los recursos terrestres. La forman 8 satélites de los cuales sólo se encuentran activos el 5 y el 8. Su mantenimiento y operación está a cargo de la Administración Nacional de la Aeronáutica y del Espacio (NASA) en tanto que la producción y comercialización de las imágenes depende del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS)

Los satélites LANDSAT llevan a bordo diferentes instrumentos. Su evolución buscó siempre captar más información de la superficie terrestre, con mayor precisión y detalle, de ahí las mejoras radiométricas, geométricas y espaciales que se incorporaron a los sensores pasivos; el primero, conocido como Multispectral Scanner Sensor (MSS), seguido de Thematic Mapper (TM) que tiene mayor sensibilidad radiométrica que su antecesor y por último, Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM+) que entre sus mejoras técnicas destaca una banda espectral (pancromática) con resolución de 15 metros.

Las imágenes LANDSAT están compuestas por 7 u 8 bandas espectrales, que al combinarse producen una gama de imágenes de color que incrementan notablemente sus aplicaciones. Dependiendo del satélite y el sensor se incluye un canal pancromático y/o uno térmico; asimismo las resoluciones espaciales varían de 15, 30, 60 y 120m (Instituto Nacional de Estadística y Geografía, n.d.).

2.2.1.4. Modelo digital de elevación.

Se denomina Modelo Digital de Elevaciones (MDE) a un modelo simbólico, de estructura numérica y digital (Felicísimo, 1994) que pretende representar la distribución espacial de la elevación del terreno, siendo la altura una variable escalar (sobre un nivel

de referencia) que se distribuye en un espacio bi-dimensional. Los modelos de datos para la representación de los MDE pueden ser vectoriales o ráster (grillados). En los primeros se encuentran las curvas de nivel, los perfiles y la Red de Triángulos Irregulares (TIN, por su acrónimo en inglés). En tanto que, en los segundos, se encuentran las matrices de celdas regulares, con cotas sobre una grilla de filas y columnas equidistantes (Burgos, 2015).

2.2.2. Sistemas de Información Geográfica (SIG).

Un SIG está definido como un sistema de información diseñado para trabajar con datos referenciados mediante coordenadas espaciales o geográficas. En otras palabras, un SIG es tanto un sistema de base de datos con capacidades específicas para datos georreferenciados, como un conjunto de operaciones para trabajar con esos datos. En cierto modo, un SIG es un mapa de orden superior (Olaya, 2012).

2.2.2.1. Componentes de un SIG.

Resulta más conveniente para su estudio práctico adoptar una evolución del esquema clásico de cinco elementos, y establecer unos nuevos componentes, cada uno de los cuales actúa como un pilar conceptual sobre el estudio de la disciplina de los SIG. Estos componentes son cinco:

- Datos.
- Procesos. Métodos enfocados al análisis de los datos.
- Visualización. Métodos y fundamentos relacionados con la representación de los datos.
- Tecnología. Software y hardware SIG
- Factor organizativo. Engloba los elementos relativos a la coordinación entre personas, datos y tecnología, o la comunicación entre ellos, entre otros aspectos.

2.2.2.2. Modelos de representación.

Los modelos geográficos nos ofrecen una concepción particular del espacio geográfico y sus atributos. En base a ellos, el siguiente paso es reducir las propiedades de dichos modelos a un conjunto infinito de elementos, de tal modo que el registro de dichos elementos sirva para almacenar la realidad que los modelos geográficos describen. Para ello, se emplea los modelos de representación, también denominados modelos de datos (Olaya, 2012).

- Modelo ráster

En el modelo ráster, la zona de estudio se divide de forma sistemática en una serie de unidades mininas (denominadas habitualmente celdas), y para cada una de estas se recoge la información pertinente que la describe. Se puede ver esto en detalle en la figura, que muestra aumentada una porción la malla ráster de elevaciones de modo que los límites de las celdas se hacen patentes y puede además representarse en cada una de ellas su valor asociado (Olaya, 2012).

132.90	133.90	135.60	139.20	140.60	144.40
126.80	128.50	131.40	133.90	135.90	139.90
122.30	124.10	125.80	128.50	131.80	135.60
118.70	119.90	121.90	124.30	128.20	131.50

Figura 4 Celdas de una malla ráster con sus valores asociados.

Fuente: (Olaya, 2012)

- Modelo vectorial

En este modelo, no existen unidades fundamentales que dividan la zona recogida, sino que se recoge la variabilidad y características de esta mediante entidades

geométricas, para cada una de las cuales dichas características son constantes. La forma de estas entidades (su frontera), se codifica de modo explícito, a diferencia del modelo ráster, donde venía implícita en la propia estructura de la malla.

Si el modelo ráster era similar al modelo conceptual de campos, el vectorial lo es al de entidades discretas, pues modeliza el espacio geográfico mediante una serie de primitivas geométricas que contienen los elementos más destacados de dicho espacio. Estas primitivas son de tres tipos: puntos, líneas y polígonos.

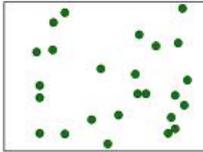
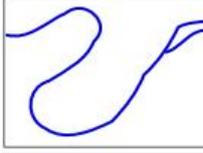
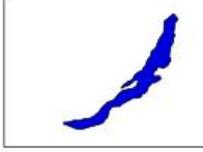
Primitiva	Entidad espacial	Representación	Atributos																								
Puntos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Altura</th> <th>Díámetro Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>17,5</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>45,0</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> <td>27,2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>19,7</td> <td>36,7</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>.</td> <td></td> <td></td> </tr> <tr> <td>.</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ID	Altura	Díámetro Normal	1	17,5	35	2	22	45,0	3	15	27,2	4	19,7	36,7		
ID	Altura	Díámetro Normal																									
1	17,5	35																									
2	22	45,0																									
3	15	27,2																									
4	19,7	36,7																									
...																											
.																											
.																											
Líneas			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho máx(m)</th> <th>Calado máx(m)</th> <th>Longitud(km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>4,3</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>10,3</td> <td>3,0</td> <td>5,2</td> </tr> </tbody> </table>	Ancho máx(m)	Calado máx(m)	Longitud(km)	15	4,3	35	10,3	3,0	5,2															
Ancho máx(m)	Calado máx(m)	Longitud(km)																									
15	4,3	35																									
10,3	3,0	5,2																									
Polígonos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie(km²)</th> <th>Profundidad máx(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31494</td> <td>1637</td> </tr> </tbody> </table>	Superficie(km ²)	Profundidad máx(m)	31494	1637																				
Superficie(km ²)	Profundidad máx(m)																										
31494	1637																										

Figura 5 Modelo de representación vectorial y ejemplos particulares.

Fuente: (Olaya, 2012)

2.2.2.3. Fundamentos de bases de datos.

Base de Datos es un conjunto de datos estructurado y almacenado de forma sistemática con objeto de facilitar su posterior utilización. Una base de datos puede, por tanto, constituirse con cualquier tipo de datos, incluyendo los de tipo puramente espacial (geometrías, etc.) tales como los que se utilizan en un SIG, así como, por supuesto, datos numéricos y alfanuméricos como los que constituyen la componente temática de la información geoespacial. Los elementos clave de la base de datos son esa estructuración y sistematicidad, pues ambas son las responsables de las características que hacen de la base de datos un enfoque superior a la hora de gestionar datos (Olaya, 2012).

2.2.2.4. Bases de datos espaciales.

Las bases de datos espaciales representan una de las áreas dentro del manejo de datos donde se ha desarrollado últimamente una mayor evolución, especialmente debido a la gran importancia que los SIG, usuarios primordiales de este tipo de bases de datos, han cobrado recientemente. Esta evolución ha ido paralela a la forma en que los SIG han trabajado con esas bases de datos y como se han integrado en ellos las operaciones y funcionalidades que ofrecen. (Olaya, 2012)

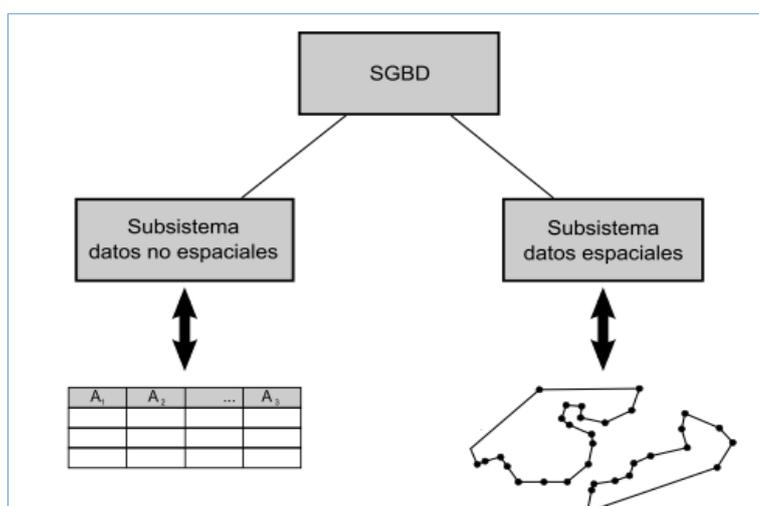


Figura 6 Arquitectura dual para el manejo de datos espaciales y no espaciales.

Fuente: (Olaya, 2012)

2.2.3. El cambio climático reciente.

2.2.3.1. Calentamiento global y efecto invernadero.

La clave de los cambios climáticos acontecidos a lo largo de la historia de la Tierra radica en los cambios de la energía que llega procedente del Sol a la Tierra y del estado de equilibrio en que se encuentra el sistema tierra-océano-atmósfera.

Estos cambios pueden tener un origen natural externo:

- Variaciones en la excentricidad de la órbita terrestre, con una periodicidad aproximada de 100,000 años,

- Modificaciones en la inclinación del eje de rotación de la Tierra, cuya periodicidad es de unos 41,000 años,
- Cambios en la actividad solar o el número de manchas solares, que varían cada 11 años.

También pueden estar motivados por causas naturales internas o terrestres:

- La distinta distribución de la tierra y el mar,
- Temperaturas y precipitaciones extremas,
- Las erupciones volcánicas o
- Las corrientes oceánicas.

2.2.3.2. Evento extremo.

El glosario de la American Meteorological Society (AMS) define un evento extremo en base a la climatología donde un extremo es la más alta y, en algunos casos, el valor más bajo de un elemento climático observado durante un intervalo de tiempo dado o durante un determinado mes o la temporada de ese período. Si este valor fuese el mayor extremo para todo el período de registro para el que se dispone de observaciones, el valor sería el extremo absoluto.

Otras definiciones de evento extremo se basan en la intensidad, eventos que se caracterizan por valores relativamente pequeños o grandes (es decir, eventos que tienen grandes desviaciones de magnitud respecto a su normal) y en la severidad, eventos que se traducen en grandes pérdidas socioeconómicas. La gravedad es un criterio complejo porque los impactos perjudiciales pueden ocurrir en la ausencia de un evento climático raro o intenso (Beninson, 2007).

2.2.3.3. Temperaturas extremas del aire.

La temperatura es la variable meteorológica en que se manifiesta el calentamiento del suelo, agua y aire, producido por la radiación solar. Los factores que determinan la variabilidad de la temperatura son: la hora local, la estación del año, la ubicación geográfica del lugar, cercanía/lejanía a algún cuerpo de agua y la constitución del suelo. Las temperaturas extremas promedio, constituyen un aspecto importante y su presencia está dada por las fluctuaciones diarias y estacionales a lo largo del año y debido a su influencia en el medio es quizá de manera más sobresaliente que la temperatura media anual ya que constituyen el marco térmico que diversos seres vivos son capaces de soportar (Aguilar, n.d.).

2.2.3.4. Temperaturas máximas y mínimas.

El glosario de la American Meteorological Society (2000) define a la temperatura máxima (mínima) como la más alta (más baja) temperatura del aire registrada en una localidad específica en un determinado periodo.

Por su parte la FAO (1998) define la temperatura máxima y la temperatura mínima del aire, respectivamente, como el máximo y mínimo valor de temperatura del aire observada y registrada en 24 horas, a partir de la medianoche. Temperatura máxima y mínima para largos periodos como semanas, 10 días o meses son obtenidas de la división de la suma respectiva de los valores diarios por el número de días del periodo.

2.2.3.5. Precipitaciones pluviales extremas.

La American Meteorological Society (2002), define a la precipitación pluvial como a las partículas líquidas que tienen su origen en la atmosfera y caen a la superficie de la tierra. La cantidad, es expresada generalmente en milímetros o centímetros de altura de agua líquida, de la sustancia del agua que ha caído en un punto dado en un período de

tiempo específico. (Carvalho, 2002), define un evento de precipitación extrema, para una determinada estación, como aquel evento en el que se produce 20% o más de la precipitación climática estacional total en un día en una determinada localidad.

2.2.3.6. PISCO.

El SENAMHI ha generado la base de datos PISCO (Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations) por sus siglas en inglés. El producto PISCO de precipitación (PISCOp) en su versión diaria y mensual es el resultado de la combinación de datos de estaciones terrenas con climatologías, re análisis y productos satelitales de estimación de lluvias para obtener una base de datos grillada a nivel nacional de alta resolución espacial (5*5 km); los datos grillados abarcan una serie temporal que se inicia el 1ro de enero 1981 hasta el 31 de diciembre del 2016, facilitando de este modo mayor disponibilidad de los datos de precipitación para su uso en diferentes actividades ligadas al análisis hidrológico (SENAMHI, 2017).

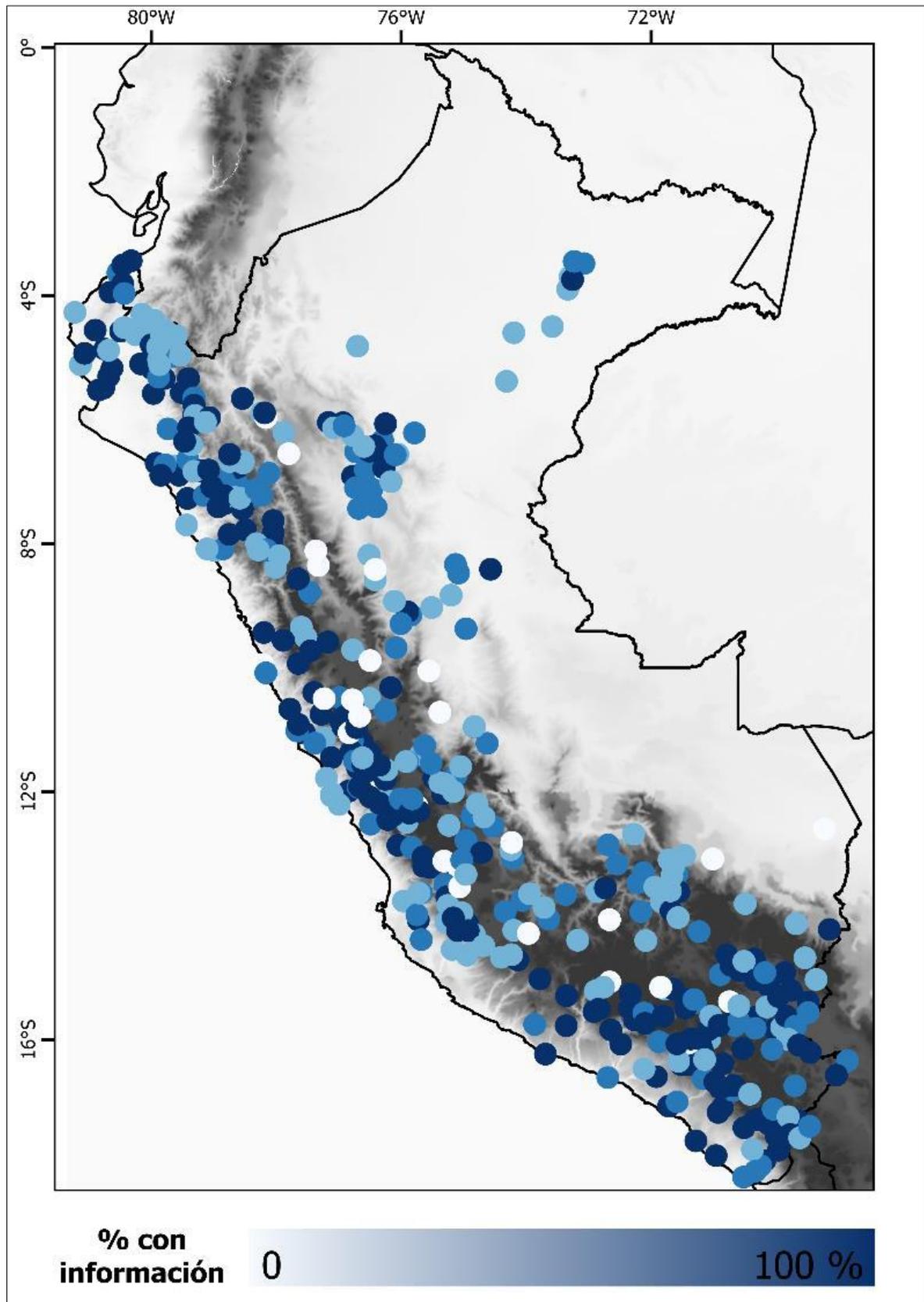


Figura 7 Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios.

Fuente: (SENAMHI, 2017)

2.2.4. Series de tiempo.

Los métodos de análisis de series de tiempo consideran el hecho que los datos tomados en diversos periodos pueden tener algunas características de auto correlación, tendencia o estacionalidad que se debe tomar en cuenta, para modelar el comportamiento de la serie observada. La aplicación de estos métodos tiene dos propósitos: comprender las fuerzas de influencia en los datos y descubrir la estructura que los produjo. Las aplicaciones de la teoría de series de tiempo suelen ser: pronósticos económicos, análisis de presupuesto, análisis del mercado y análisis hidrológico, entre otros (Bustamante, 2013).

2.2.4.1. Componentes que integran una serie de tiempo.

Una manera de examinar una serie de tiempo es dividiéndola en componentes. Un enfoque estándar consiste en encontrar componentes que correspondan a una tendencia a largo plazo, algún comportamiento cíclico, un componente estacional y una parte irregular, residual. Algunos de estos aspectos esenciales de los procesos no son directamente observables, es por ello que es importante disponer de procedimientos que permitan extraer esos aspectos de las observaciones (Bustamante, 2013).

A continuación, se muestran y se definen los componentes que integran una serie de tiempo de acuerdo a Chatfield (2003).

- Componente de tendencia
- Componente estacional
- Componente irregular
- Componente cíclico

2.2.4.1.1. Componente de tendencia.

Es el componente que recoge la parte de la variable vinculada principalmente con factores de largo plazo. En la práctica resulta difícil distinguir la tendencia del componente cíclico, por tanto, se combina en un solo componente llamado tendencia-ciclo (Bustamante, 2013).

2.2.4.1.2. Componente estacional.

Son oscilaciones cuasi-cíclicas de media cero, las cuales tienen periodicidad anual o de un submúltiplo del año (trimestrales, mensuales, etc.) y se conocen como oscilaciones estacionales (Bustamante, 2013).

2.2.4.1.3. Componente irregular.

Son oscilaciones no sistemáticas que en general afectan a la serie en el momento en que ocurren y normalmente tienen una estructura puramente aleatoria (Bustamante, 2013).

2.2.4.1.4. Componente cíclico.

Son oscilaciones con periodicidad de entre año y medio y hasta diez años, dependiendo de la definición del ciclo que se utilice. Suelen ser menos frecuentes y menos sistemáticas que las estacionales (Bustamante, 2013).

2.2.5. Los humedales en el Perú.

Se define como humedales, a las extensiones o superficies cubiertas o saturadas de agua, bajo un régimen hídrico natural o artificial, permanente o temporal, dulce, salobre o salado, y que albergan comunidades biológicas características, que proveen servicios eco sistémicos. Por ello se consideran humedales a los siguientes (MINAM, 2015).

- Humedales costeros: manglares, lagunas, estuarios, albuferas, deltas, oasis' pantanos.
- Humedales andinos: lagos, lagunas, bofedales, manantiales, puquios, turberas, humedales de páramos, kársticos andinos.

- Humedales amazónicos: lagos y lagunas, complejos de oríllales, karsticos amazónicos, pantanos amazónicos (aguajales, renacales, pungales, pantanos mixtos de palmeras, pantanos herbeceos, pantanos arbustivos), bosques de tahuampa, sabanas inundables de palmeras, varillales húmedos.

2.2.5.1. Bofedales.

De acuerdo con el mapa de Humedales del Perú (ANA, 2012), se tiene una extensión estimada de 549 156 ha. de bofedales u occonales (del quechua oqo que significa mojado), lo que corresponde al 6.91 % del total de humedales, todos ellos distribuidos en la zona alto andina de la sierra peruana.

Los bofedales u occonales son humedales propios de las regiones alto andinas ubicados en general por encima de los 3 500 m.s.n.m. Estas zonas se caracterizan por ser extensas áreas húmedas, parcial o totalmente inundadas debido a la materia orgánica en el suelo, lo que provoca un escaso drenaje del mismo, ayudando así al mantenimiento de la humedad. Se debe reconocer la importancia de la población alto andina en el mantenimiento y creación de bofedales, parte de los cuales se consideran bofedales construidos, ampliados o creados (MINAM, 2015).

Son encontrados en zonas próximas a lugares donde se almacena el agua, tales como riachuelos, lagunas y pantanos, o sobre acuíferos subterráneos. La mayor parte del año estos suelos permanecen inundados, constituyendo un refugio para la biodiversidad que habita en estos ambientes (MINAM, 2015).

III. MATERIALES Y MÉTODOS

3.1. MATERIALES E INSTRUMENTOS

Materiales:

- Imágenes Satelitales Landsat 5 y Landsat 8
- Modelo Digital de Elevación
- GPS navegador
- Cámara fotográfica
- Materiales de escritorio

Hardware:

- Computadora
- Laptop
- Impresora
- Plotter

Software:

- QGIS
- ArcGIS
- ENVI
- Microsoft Excel
- Microsoft Word
- RStudio

3.2. METODOLOGÍA PARA EL DESARROLLO DEL TRABAJO

La investigación es de tipo relacional, este método trata de describir el comportamiento de la dinámica espacial de los bofedales, en relación con los factores climatológicas como precipitación y temperatura. La secuencia y los métodos que se emplearon en el proceso de investigación se detallan a continuación:

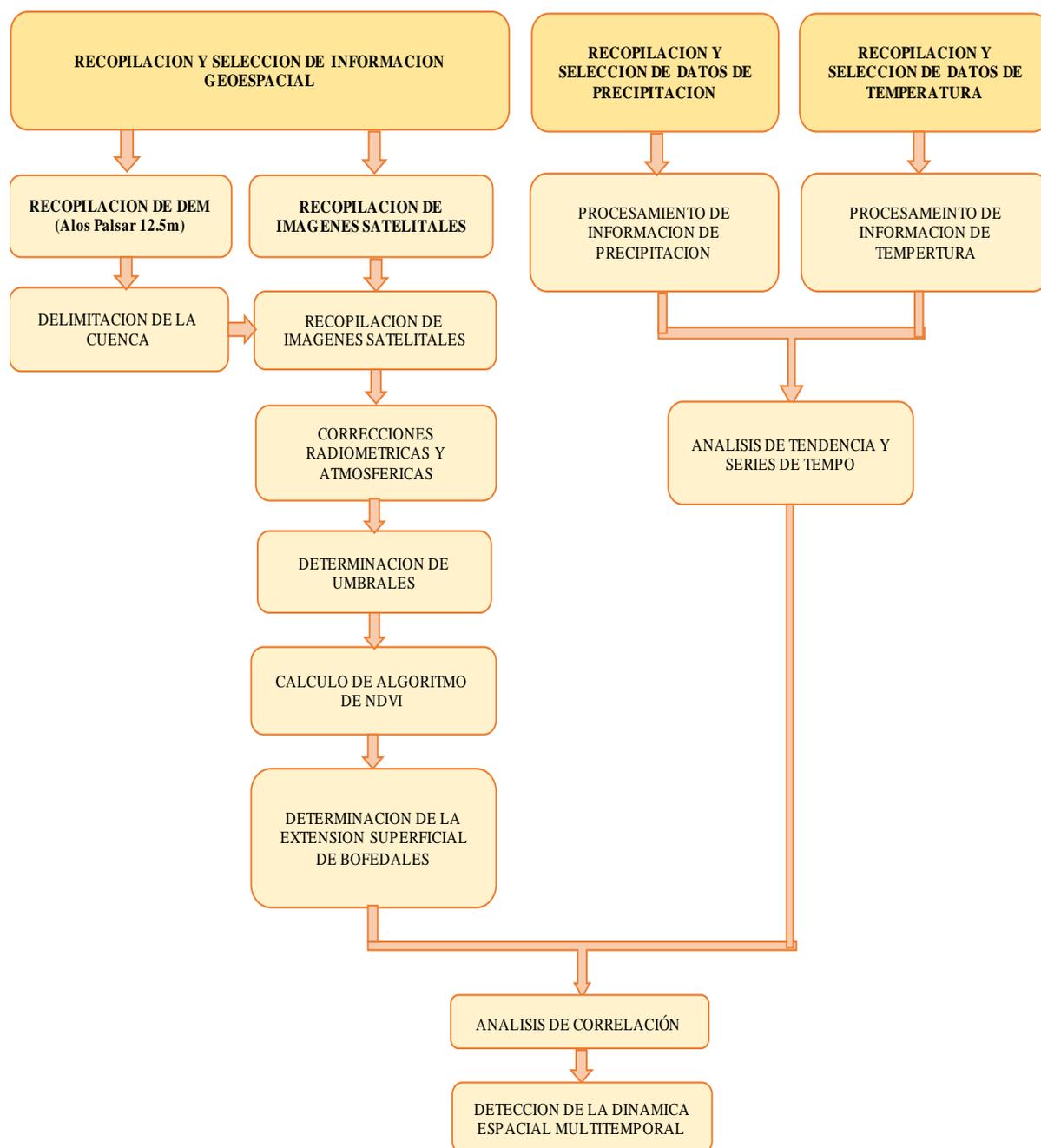


Figura 8 Procedimiento metodológico para la elaboración de la investigación.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3. MÉTODOS Y TÉCNICAS DE RECOLECCIÓN DE DATOS

A continuación, se detalla el proceso de recolección de datos para la investigación:

3.3.1. Selección del área de estudio.

3.3.1.1. Ubicación política.

La cuenca del río Coata se ubica íntegramente dentro del Departamento de Puno, ocupa las superficies de las provincias de San Román, Lampa y parte de las provincias de Puno y Huancané. El 24.30% de área de la cuenca se ubica en San Román, el 74.98% en Lampa y el 0.52% en Puno y 0.20% en Huancané (Instituto Nacional de Recursos Naturales, 2007).

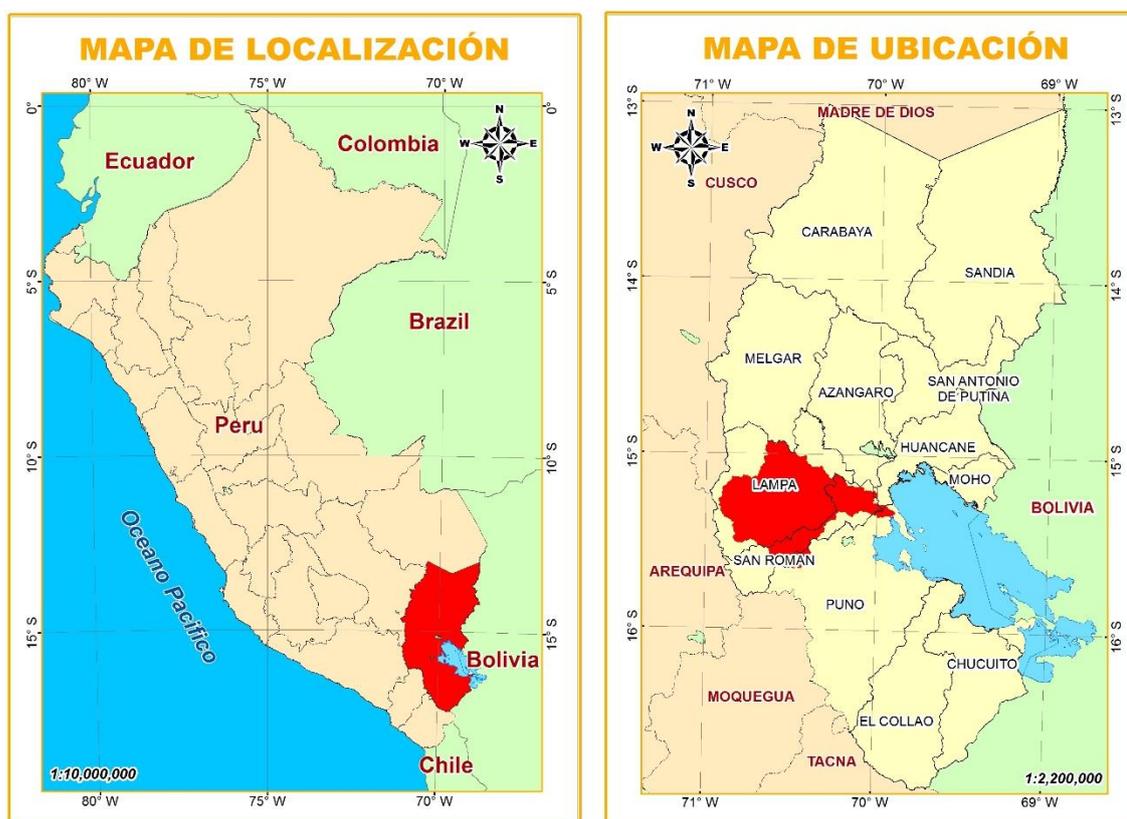


Figura 9 Mapa de ubicación política de la Investigación

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.1.2. Ubicación geográfica.

La cuenca del río Coata geográficamente se ubica entre las coordenadas UTM (WGS84) Norte ($8'328,509 - 8'239,696$), Este ($282,907 - 401,525$) y altitud comprendida entre 5,300 m.s.n.m. a 3,800 m.s.n.m. la cual se ubica íntegramente dentro del Departamento de Puno.

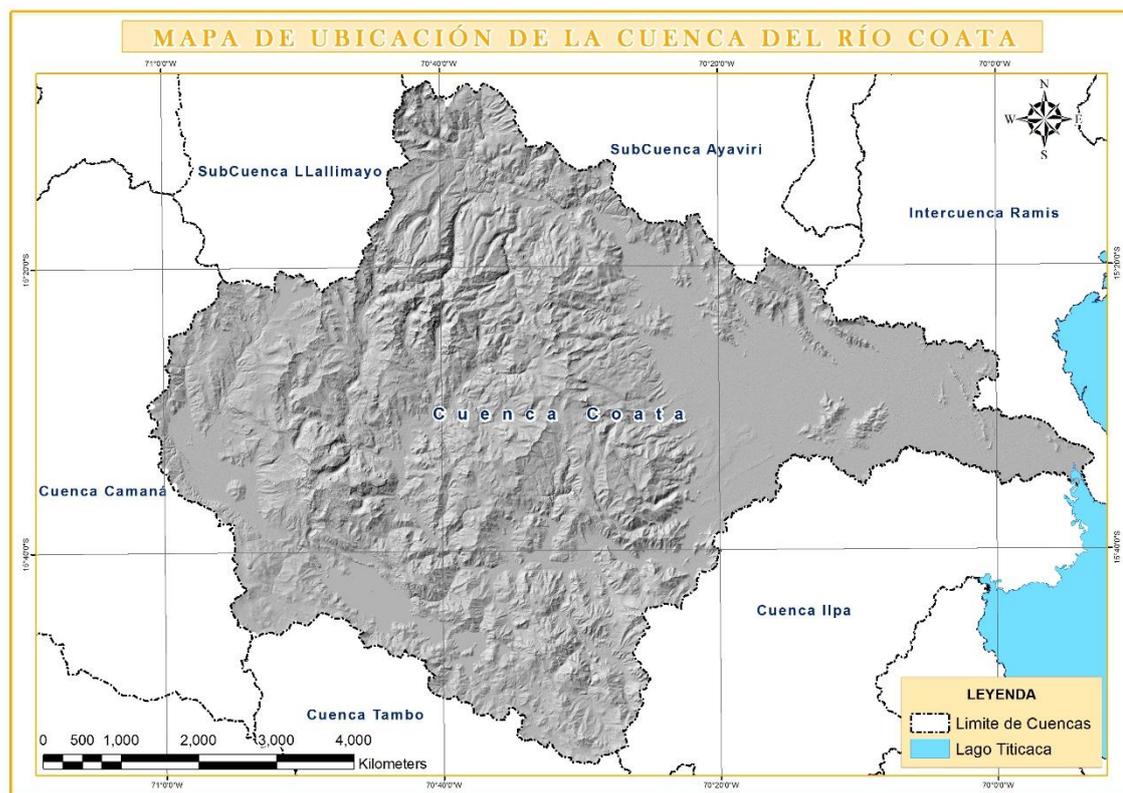


Figura 10 Mapa de Ubicación de la cuenca del río Coata

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.2. Metodología para el objetivo 1.

3.3.2.1. Método de estimación de correlación.

Para obtener la correlación que presenta los factores climáticos como la precipitación acumulada anual y la temperatura máxima con la dinámica espacial de bofedales, se tuvo que realizar los siguientes procesos:

- Primeramente, se tuvo que realizar un procedimiento para obtener las extensiones superficiales (áreas) de los bofedales durante los años de 1984 al 2016. Lo cual se explica en párrafos posteriores la metodología usada para la obtención de dichas extensiones superficiales, ya que forma parte del primer objetivo específico de dicha investigación.
- Seguidamente se recopiló información de la precipitación acumulada anual y la temperatura máxima anual, durante los años de 1984 al 2016. Que se explicarán en los párrafos siguientes, puesto que forma parte del segundo objetivo específico de esta investigación.

Estos dos pasos se realizaron con el fin de determinar el grado de relación que presenta la variación de la extensión superficial de bofedales con la precipitación y temperatura, en los años indicados. A continuación, se muestra el análisis estadístico que se utilizó para llegar al objetivo propuesto.

a. Variables:

La variable dependiente es el comportamiento de la dinámica espacial de bofedales, y las variables independientes, son los factores climáticos específicamente la temperatura máxima anual y la precipitación acumulada.

Y= Dinámica espacial de bofedales

X1, X2= Temperatura máxima anual, Precipitación acumulada

b. Análisis Estadístico:

- *Regresión lineal múltiple*

En la regresión lineal múltiple de Y sobre X_1, \dots, X_K la función de regresión tiene la expresión:

$$Y = \beta_0 + \beta_1 X_1 + \dots + \beta_K X_K + U$$

Las variables X_j son significativas para explicar Y.

$$H_0 : \beta_0 = 0 \quad (X_j \text{ no influye sobre } Y)$$

$$H_1 : \beta_1 \neq 0 \quad (X_j \text{ influye sobre } Y)$$

- *Análisis de la varianza*

$$Y_i - \bar{Y} = (Y_i - \bar{Y}_i) + (\bar{Y}_i - \bar{Y})$$

- *Ecuación básica del análisis de la varianza*

$$\sum (Y_i - \bar{Y})^2 = \sum (Y_i - \bar{Y}_i)^2 + \sum (\bar{Y}_i - \bar{Y})^2$$

$$SCT = SCE + SCR_{eg}$$

SCT: Suma de cuadrados total

SCE: Suma de cuadrados residual

SCR_{eg}: Suma de cuadrados de la regresión

Tabla 1
Tabla ANOVA

Fuentes de Variación	Suma de Cuadrados	Grados de Libertad	Cuadrados Medios	F_{exp}
Regresión	$B^t X^t Y^t - \frac{1}{n} (\sum Y_i)^2$	k	$CMR_{eg} = \frac{SCR_{eg}}{k}$	$\frac{CMR_{eg}}{CME}$
Error	$Y^t Y - B^t X^t Y$	n - k - 1	$CME = \frac{SCE_{eg}}{n - k - 1}$	
Total	$Y^t Y - \frac{1}{n} (\sum Y_i)^2$	n - 1		

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

- *Coefficiente de determinación (R²):* Es una medida de la bondad del ajuste en el modelo de regresión múltiple:

$$R^2 = \frac{SCR_{eg}}{SCT} = 1 - \frac{SCE}{SCT}$$

El valor de R² debe oscilar entre: $0 \leq R^2 \leq 1$.

Cuando R² = 1 existe una relación entre dichas variables

Cuando R² = 0 sucede que no existe relación lineal aparente entre Y, y las Xi

Un valor de p < 0,05 significa que la hipótesis nula es falsa sin embargo un valor de p > 0,05 significa que la hipótesis nula es cierta.

Tomando en consideración el análisis estadístico, se puede apreciar el resultado en el siguiente gráfico, donde, R² = 0.47, lo que significa que existe una ligera relación entre la extensión superficial de los bofedales y la temperatura máxima promedia, y el resultado

del p-valor indica que la hipótesis nula se rechaza (p-valor=0.0003), a continuación, se muestra el análisis estadístico realizado con el software RStudio.

```
Call:
lm(formula = AÑO ~ AREAS + TEMPERATURA)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.659  -3.979   1.635   5.993   8.099

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.874e+03  3.517e+01  53.282 < 2e-16 ***
AREAS        -8.468e-04  3.646e-04  -2.322  0.02987 *
TEMPERATURA  8.122e+00  2.191e+00   3.707  0.00123 **
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 6.677 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.5102, Adjusted R-squared:  0.4656
F-statistic: 11.46 on 2 and 22 DF, p-value: 0.0003894
```

Figura 11 R² entre Temperatura máxima y dinámica espacial de bofedales.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

La ecuación de la recta es la siguiente:

$$Y = -3E-05X + 16.019$$

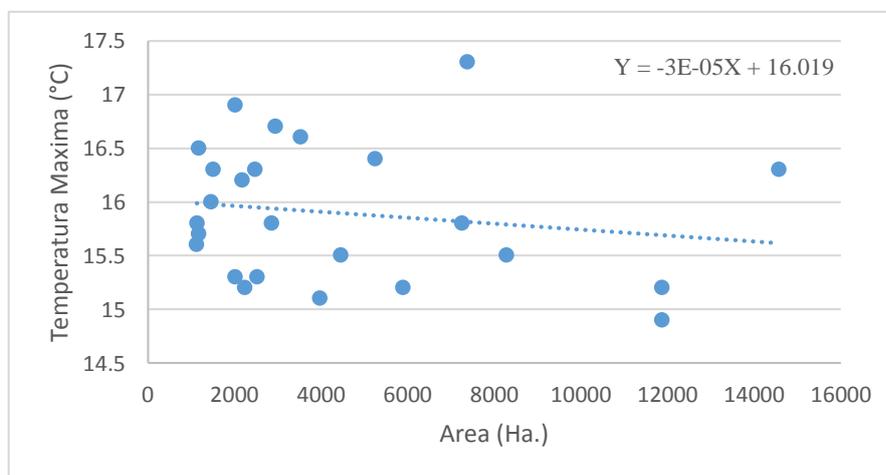


Figura 12 Ecuación de la recta entre Temperatura y dinámica espacial de bofedales.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

A continuación, se muestra el resultado de la regresión lineal múltiple de la extensión superficial de los bofedales y la precipitación promedio acumulada, se puede apreciar que el coeficiente de correlación R²=0.23, lo que indica que no es tan significativa. Sin

embargo, considerando el p-valor indica que también se rechaza la hipótesis nula (p-valor=0.02)

```
Call:
lm(formula = AÑO ~ AREAS + PRECIPITACION)

Residuals:
    Min       1Q   Median       3Q      Max
-11.3583  -6.6427   0.1273   4.1725  13.6471

Coefficients:
            Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
(Intercept)  1.991e+03  8.456e+00  235.422 < 2e-16 ***
AREAS        -1.443e-03  4.811e-04  -3.001  0.00659 **
PRECIPITACION  2.064e-02  1.237e-02   1.668  0.10945
---
Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1

Residual standard error: 8.018 on 22 degrees of freedom
Multiple R-squared:  0.2936, Adjusted R-squared:  0.2294
F-statistic: 4.572 on 2 and 22 Df, p-value: 0.02186
```

Figura 13 R² entre Precipitación acumulada y dinámica espacial de bofedales.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

La ecuación de la recta es la siguiente:

$$Y = 0.0174X + 652.03$$

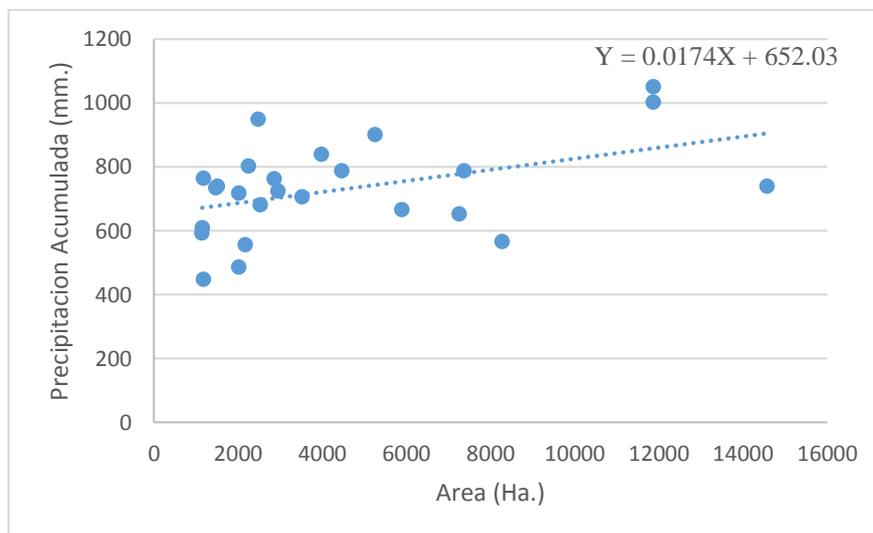


Figura 14 Ecuación de la recta entre Precipitación y dinámica espacial de bofedales.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.3. Metodología para el objetivo 2.

3.3.3.1. Recopilación de información en campo.

3.3.3.1.1. Recopilación de puntos de muestreo.

La recopilación de puntos de muestreo, consistió en identificar y seleccionar puntos que se tomaron en consideración para la verificación in-situ, para ello se identificaron 06 punto estratégicos de muestreo, esto se realizó con la ayuda de la imagen satelital. Dichos putos se verificaron en campo, tomando sus ubicaciones con el uso del GPS navegador. Los puntos tomados in-situ, se importaron al ArcGIS, de manera que se consideraron como puntos de validación para la clasificación supervisada.

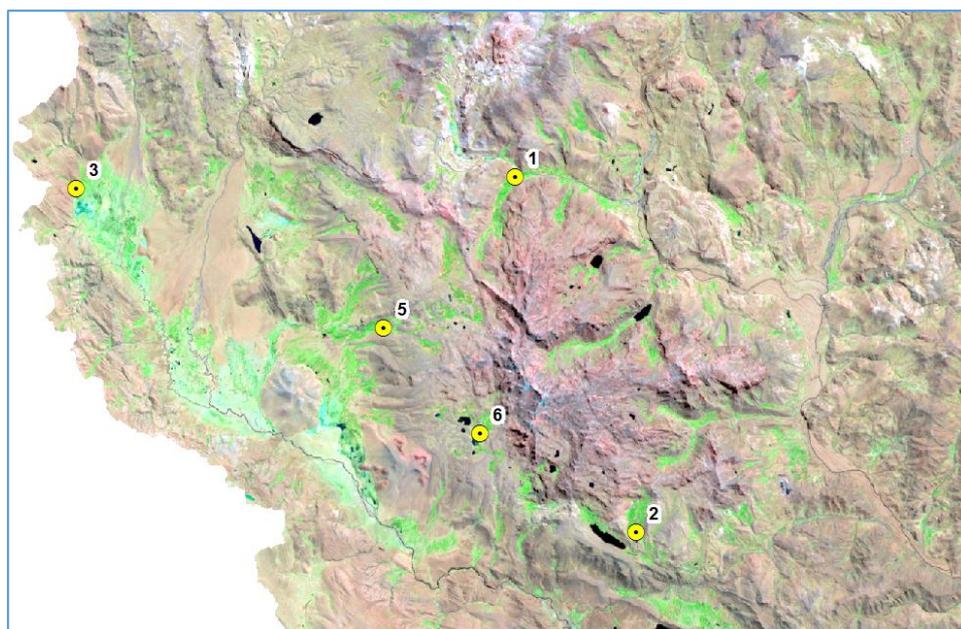


Figura 15 Ubicación de puntos de muestreos.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).



Figura 16 Bofedal del punto de muestreo 01.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).



Figura 17 Bofedal del punto de muestreo 02.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).



Figura 18 Bofedal del punto de muestreo 03.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

A continuación, se muestra los puntos de muestreo que se tomaron in-situ.

Tabla 2
Coordenadas UTM de puntos de Muestras.

N° Punto	Este	Norte
1	303908	8284246
2	308814	8269679
3	286045	8283762
4	314843	8310388
5	298566	8278039
6	302465	8273729

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.3.2. Recopilación de información en gabinete.

3.3.3.2.1. Recopilación de DEM.

Los modelos digitales de elevación (DEM) de 12.5 m de resolución espacial, se obtuvieron de la página web de manera gratuita de la Nasa, denominado como, Alaska Satellite Facility - NASA. En total se descargaron 06 DEMs, de manera que cubrió el área de intervención de la investigación. Específicamente se obtuvo de la siguiente página web: <https://vertex.daac.asf.alaska.edu/>

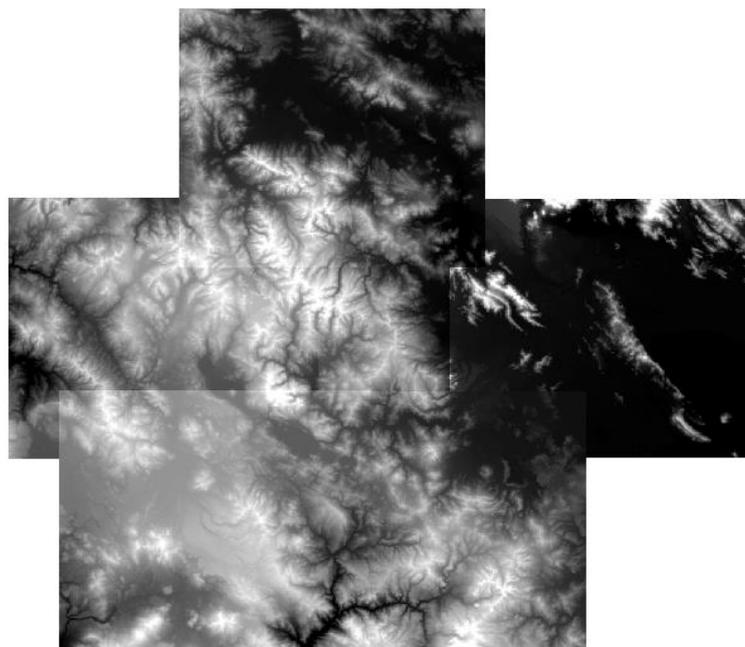


Figura 19 Modelo Digital de Elevación del área de intervención.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.3.2.2. Recopilación de Imágenes satelitales Landsat.

Las imágenes satelitales analizados fueron Landsat 5 (TM) y Landsat 8 (OLI) las cuales se recopilaron a través de la página web de USGS / EROS (Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres) y el Instituto Nacional de Investigaciones Espaciales (INPE). Las imágenes seleccionadas fueron aquellas imágenes relativamente libres de nubosidad, de los meses de junio a agosto (época seca) desde los años de 1984 al 2016. Específicamente se obtuvieron de forma gratuita de la siguiente página web: <https://earthexplorer.usgs.gov/>. Las especificaciones técnicas de dichas imágenes se detallan en los anexos.

Se descargaron 03 escenas de cada año, de manera que cubrió el área de intervención.

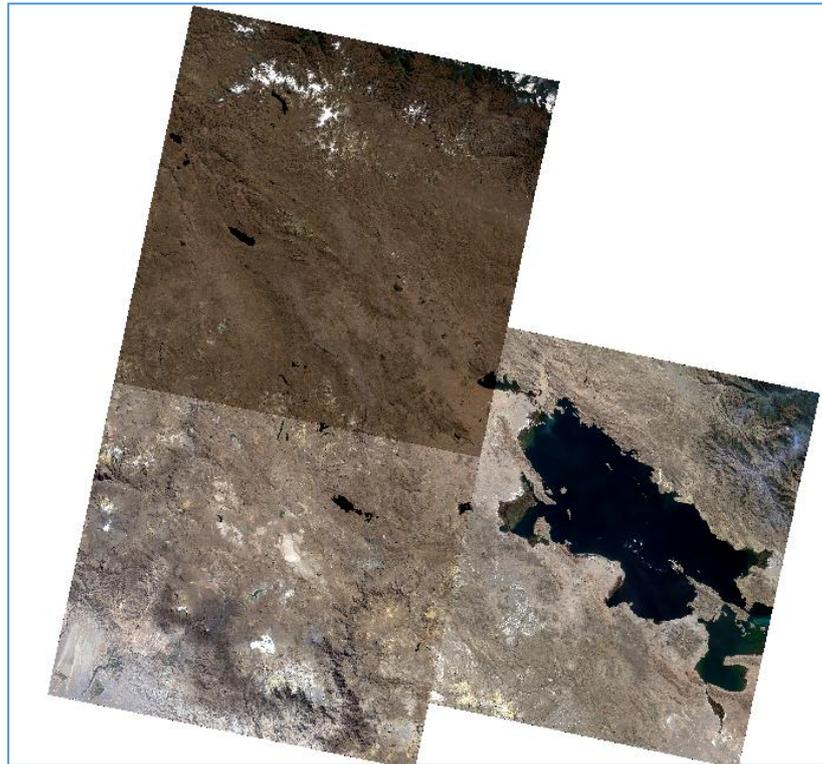


Figura 20 Escenas de Imagen satelital Landsat 5.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.3.3. *Procesamiento de datos.*

Inicialmente, se delimitó la cuenca del río Coata con ayuda de los DEMs. Lo cual se realizó utilizando herramientas SIG del software ArcGIS. Para ello luego se cargó los DEMs al workspace de ArcMap y se juntaron todas las escenas de los DEM que contiene el área de intervención, seguidamente se determinó el punto de desfogue o drenaje de la cuenca, , utilizando las herramientas del ArcToolbox, se eliminaron las imperfecciones (huecos y sumideros) del DEM, seguidamente se estableció la dirección del flujo hidrológico, luego se determinó la acumulación del flujo de las celdas que fluyen hacia cada celda, finalmente se crea un ráster con la dirección del flujo y el punto de desfogue interpolado, teniendo como resultado la cuenca del área de estudio, lo cual se muestra en la siguiente figura.

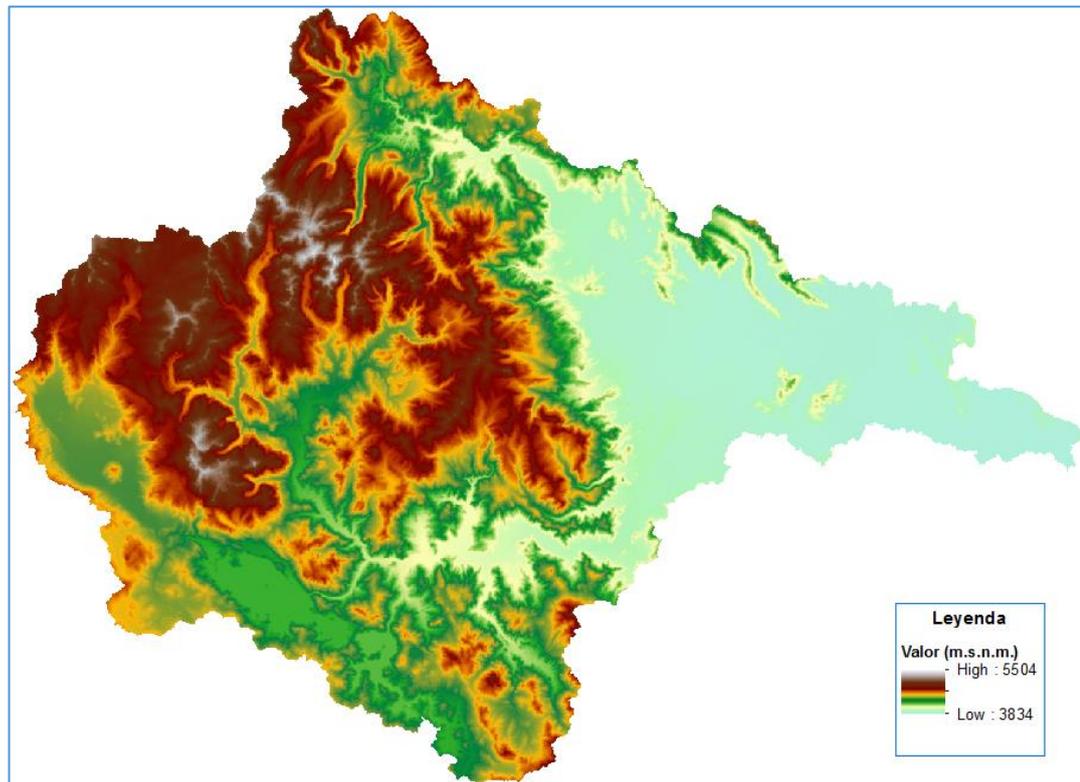


Figura 21 Delimitación de cuenca del río Coata

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

Seguidamente, antes de realizar el procedimiento para determinar la extensión superficial de los bofedales, se realizaron las correcciones radiométricas y atmosféricas a cada escena de la imagen satelital Landsat, 5 y Landsat 8 cuyo procedimiento se explica a continuación:

3.3.3.3.1. Calibración radiométrica.

La capacidad de detectar y cuantificar los cambios en el medio ambiente de la Tierra depende de los sensores que pueden proporcionar mediciones calibradas (exactitud y precisión) y consistentes de las características de la superficie de la Tierra a través del tiempo (Chander et al., 2009). La interpretación correcta de la información científica de una serie global a largo plazo de productos de teledetección requiere la capacidad de distinguir entre los artefactos del producto y los cambios en los procesos de la Tierra que se monitorean (Roy et al., 2002). Por tanto, la calibración radiométrica es un requisito

indispensable y previo para la creación de datos científicos de alta calidad y, en consecuencia, generar productos posteriores de mayor nivel.

3.3.3.3.2. Radiancia espectral (L_λ).

El cálculo de radiancia espectral es el paso fundamental para convertir los valores de una imagen de distintos sensores y plataformas a una escala radiométrica común físicamente significativa (Chander et al., 2009). La calibración radiométrica de los sensores (e.g., TM, ETM+ y OLI) consiste en ajustar los números digitales sin procesar (Q), transmitidos desde el satélite, a números digitales calibrados (Qcal). Esto implica que todas las escenas de un mismo sensor tengan una misma escala radiométrica en un periodo específico de toma de la imagen. Para imágenes de tipo Landsat adquiridos por el Operational Land Imager (OLI) y el Thermal Infrared Sensor (TIRS) la siguiente ecuación se usa para realizar la conversión a radiancia (L_λ):

$$L_\lambda = M_L Q_{cal} + A_L$$

Donde,

- L_λ = radiancia espectral TOA (W atts/m²* srad * μ m)
- M_L = Factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda de los metadatos (RADIANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)
- A_L = Factor de reescalamiento aditivo específico de banda de los metadatos (RADIANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda)
- Q_{cal} = Valores de píxel del producto estándar cuantificados y calibrados (DN)

3.3.3.3.3. Conversion a Reflectividad Top-of-Atmosphere (TOA).

La conversión a reflectancia TOA, también conocida como albedo planetario, es un paso intermedio antes de realizar cualquier corrección atmosférica. Hay tres ventajas en

usar la reflectancia TOA en lugar de la radiancia espectral at-sensor: i) elimina el efecto coseno de diferentes ángulos cenitales solares debido a la diferencia de tiempo entre las adquisiciones de datos, ii) la reflectancia de TOA compensa los diferentes valores de la irradiancia solar exoatmosférica que surge de las diferencias de bandas espectrales, y iii) la reflectancia TOA corrige la variación en la distancia Tierra-Sol entre diferentes fechas de adquisición de datos. Estas variaciones pueden ser significativas geográficamente y temporalmente. (Chander et al., 2009). De acuerdo al United States Geological Survey (USGS) y Earth Resources Observation and Science (EROS) la reflectancia TOA se calcula de acuerdo con la ecuación:

$$P\lambda' = M_p Q_{cal} + A_p$$

Donde:

- $P\lambda'$ = Reflectancia planetaria TOA, sin corrección por ángulo solar. Tenga en cuenta que $\rho\lambda$ no contiene una corrección para el ángulo del sol.
- M_p = Factor de reescalamiento multiplicativo específico de banda de los metadatos (REFLECTANCE_MULT_BAND_x, donde x es el número de banda)
- A_p = Factor de reajuste aditivo específico de banda de los metadatos (REFLECTANCE_ADD_BAND_x, donde x es el número de banda)
- Q_{cal} = Valores de píxel del producto estándar cuantificados y calibrados (DN)

La reflectancia TOA con una corrección para el ángulo solar es

$$P\lambda = \frac{p\lambda'}{\cos(\theta_{sz})} = \frac{p\lambda'}{\sin(\theta_{sE})}$$

Donde:

- $\rho\lambda$ = Reflectancia planetaria TOA
- θ_{sE} = Ángulo de elevación solar local. El ángulo de elevación del sol del centro de escena en grados se proporciona en los metadatos (SUN_ELEVATION).

- θ_{SZ} = Ángulo solar cenital local; $\theta_{SE} = 90^\circ - \theta_{SZ}$

$$P_\lambda = \frac{\pi * L_\lambda * d^2}{ESUN_\lambda * \cos(\theta_S)}$$

- ρ_λ = Reflectancia planetaria TOA
- π = Constante matemática igual a ~ 3.14159 (sin unidad)
- L_λ = Resplandor espectral en la apertura del sensor ($W \text{atts/m} * \text{srad} * \mu\text{m}$)
- d^2 = Distancia Tierra-Sol (unidades astronómicas)
- $ESUN_\lambda$ = Irradiancia solar exoatmosférica media ($W \text{atts/m}\mu\text{m}$)
- θ_S = Ángulo cenital solar (grados)

3.3.3.3.4. Conversión a temperatura de brillo de la atmósfera.

Los datos de la banda TIRS de Landsat 8 se pueden convertir de la luminosidad espectral a la temperatura de brillo de la atmósfera superior utilizando las constantes térmicas proporcionadas en el archivo de metadatos. La ecuación es:

$$T = \frac{K_2}{\ln\left(\frac{K_1}{L_\lambda} + 1\right)}$$

Donde,

- T = Parte superior de la temperatura de brillo de la atmósfera (K)
- L_λ = radiancia espectral TOA ($W \text{atts/m}^2 * \text{srad} * \mu\text{m}$)
- K_1 = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos ($K1_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de banda térmica)
- K_2 = Constante de conversión térmica específica de banda de los metadatos ($K2_CONSTANT_BAND_x$, donde x es el número de banda térmica)

Luego de realizar dichas correcciones, se realizó el mosaico de la imagen satelital, es

decir se juntaron las tres escenas de manera que cubra toda el área de intervención. Así como se puede apreciar en la siguiente imagen.

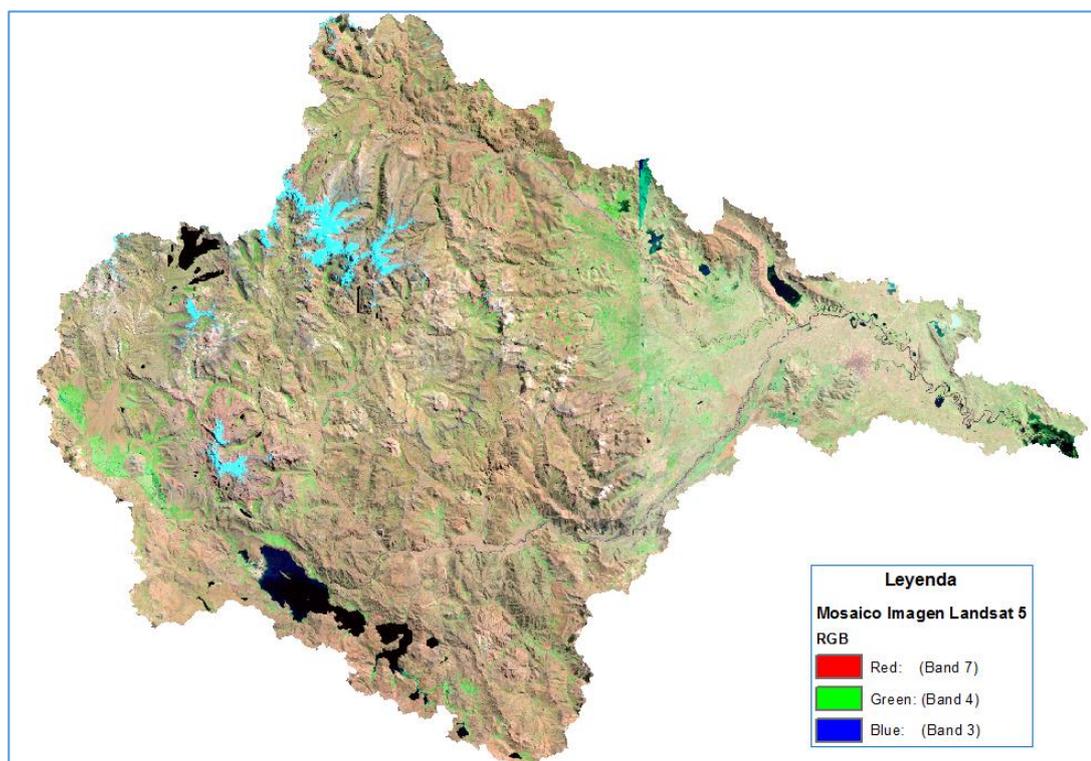


Figura 22 Mosaico de Imagen satelital Landsat 5.

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.3.3.5. Índice de Diferencia Normalizado (NDVI).

El NDVI, es uno de varios índices de vegetación de detección remota usados para representar las características de la vegetación (por ejemplo, índice de área foliar, cubierta vegetal) en un área (píxel) (Rouse, John, Space, Schell, & W, 1973; Tucker, Townshend, Goff, & Goff, 1985). El índice es un valor único derivado de la relación de la diferencia de las bandas espectrales que son sensibles a las características espectrales del tejido foliar (la reflectancia infrarroja es sensible a las células vegetales y el contenido de agua mientras que la reflectancia en las longitudes de onda rojas es sensible a la clorofila), por ello el NDVI se calcula como reflectividad en el infrarrojo cercano (IRC) y la reflectividad en el rojo (R).

$$NDVI = \frac{(IRC-R)}{(IRC+R)}$$

Seguidamente para la determinación de bofedales se realizó los siguientes procedimientos:

- Selección de áreas de entrenamientos y de validación (ROIs): Se Identificaron las áreas de entrenamiento en la imagen satelital como, lagunas, bofedales, nevados, etc.
- Determinación de clases: Se crearon clases de clasificación en el software Envi, recolectando las áreas de entrenamiento y de validación.
- Evaluación de Separabilidad espectral: La separabilidad espectral indica que el clasificador no se confundirá al realizar la clasificación supervisada.

Consiste en analizar la separabilidad espectral de las clases en un gráfico con visualización de la banda infrarroja cercano y roja, que indica donde se está caracterizando sus espectros similares, viendo la dispersión de los datos, si la separabilidad espectral es continua quiere decir que la caracterización es buena.

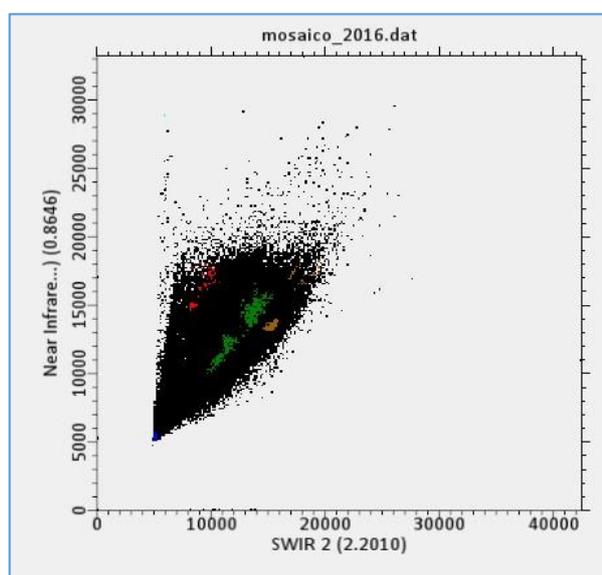


Figura 23 Separabilidad espectral de clasificación

Fuente: (Elaboración propia,2018).

La separabilidad espectral de las clases y ROIs son también analizados con la transformación de divergencia (Transformed Divergence) de Jeffries - Matusita, la cual

muestra valores que indica si los ROIs tienen buena separabilidad espectral.

- Ejecutar clasificador: Realiza la clasificación, utilizando el método de máxima verosimilitud.
- Derivación de mapa temático: Obtención del mapa clasificado.

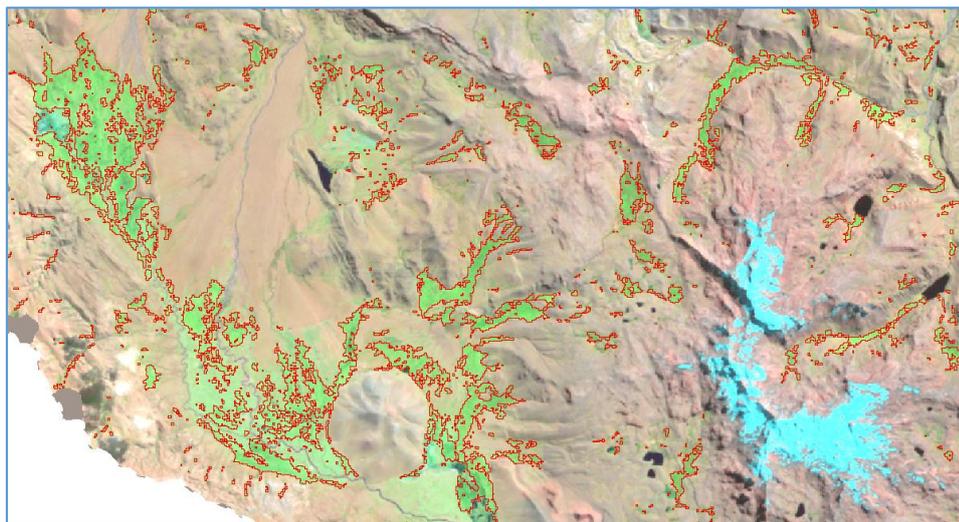


Figura 24 Determinación de bofedales del año de 1984.

Fuente: (Elaboración propia,2018).

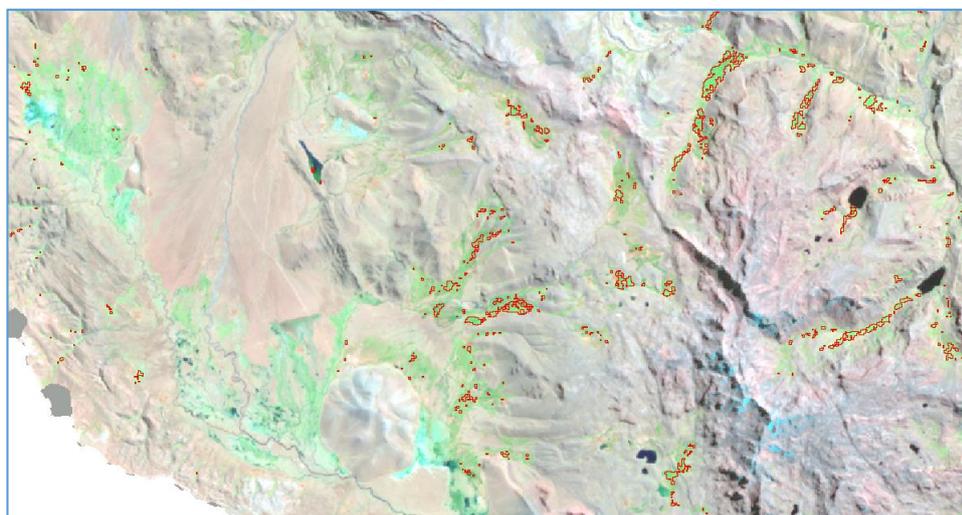


Figura 25 Determinación de bofedales del año de 1990.

Fuente: (Elaboración propia,2018).

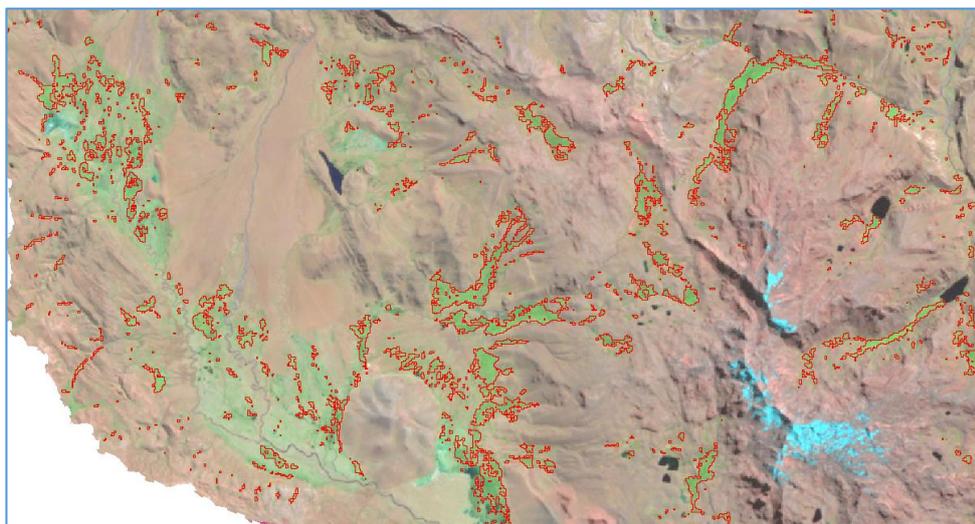


Figura 26 Determinación de bofedales del año de 2000.
Fuente: (Elaboración propia,2018).

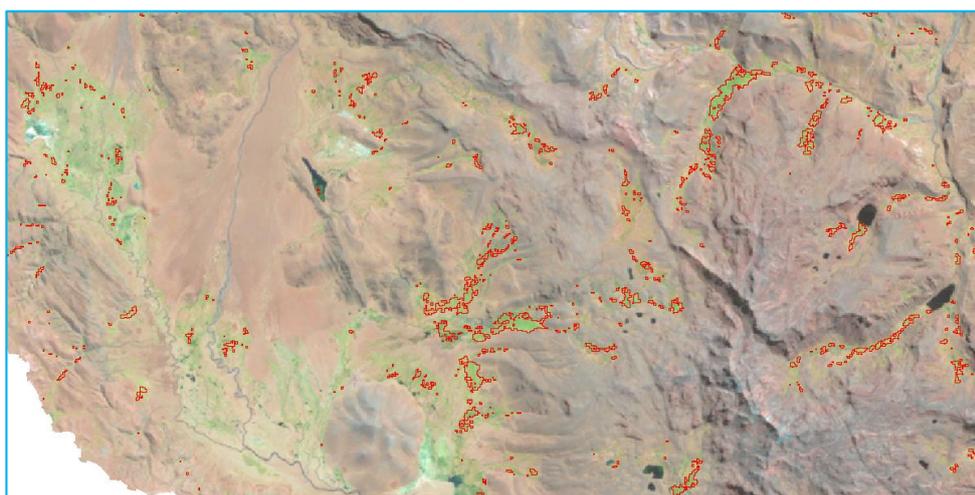


Figura 27 Determinación de bofedales del año de 2005.
Fuente: (Elaboración propia,2018).

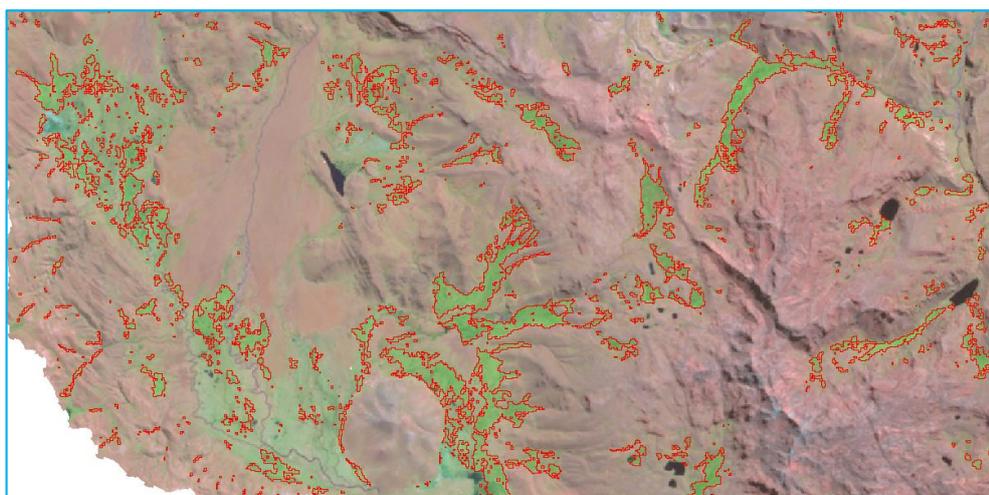


Figura 28 Determinación de bofedales del año de 2010.
Fuente: (Elaboración propia,2018).

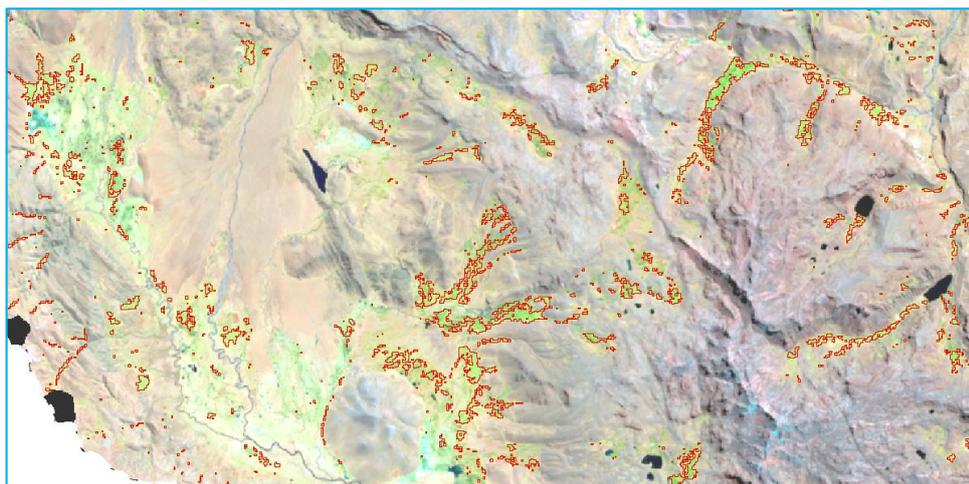


Figura 29 Determinación de bofedales del año de 2016.
Fuente: (Elaboración propia,2018).

- Determinación de la bondad del mapa: Consiste en el análisis del mapa clasificado, con los ROIs de validación, utilizando herramientas del software ENVI, cuyo resultado se muestra en una matriz de confusión.

3.3.3.4. Análisis estadístico.

- Matriz de Confusión: Consecuencia de la fase de muestreo será un listado de puntos test, para los que poseemos tanto su cobertura real como la deducida por la clasificación. Con estos datos puede formarse una matriz, denominada de confusión, puesto que recoge los conflictos que se presentan entre categorías. Se trata de una matriz bidimensional, en donde las filas se ocupan por las clases de referencia, y las columnas por las categorías deducidas de la clasificación. lógicamente ambas tendrán el mismo número y significado; se trata, en suma, de una matriz cuadrada; $n \times n$, donde n indica el número de categorías (Chuvieco, 1995).

Medidas Globales de fiabilidad: A partir de la matriz de confusión pueden desarrollarse toda una serie de medidas estadísticas que concluyan el proceso de validación. la más simple consiste en calcular la fiabilidad global del mapa, relacionando los elementos de la diagonal con el total de puntos muestreados:

$$F_m = \frac{\sum X_i}{\sum \sum X_{ij}} * 100$$

Si $F_m = 100\%$, significa que el mapa clasificado es fiable.

Fiabilidad del usuario y del productor: Tener en cuenta que este valor puede ocultar importantes diferencias entre categorías. Por ello, un análisis más riguroso debe también considerar las celdillas marginales de la matriz. En el caso de las filas, los marginales indican el número de píxeles que, perteneciendo a una determinada categoría, no fueron incluidos en ella. Estos se denominan errores de omisión (E_o). Para cada clase se calculan como:

$$E_{oi} = \frac{X_{it} - X_{ij}}{X_{it}}$$

Dónde: X_{it} indica el marginal de la fila i , y X_{ij} la diagonal de dicha fila.

De igual forma, las celdillas no diagonales de las columnas expresan los errores de comisión; esto es, píxeles que se incluyeron en una determinada categoría perteneciendo realmente a otra:

$$E_{ci} = \frac{X_{ti} - X_{ij}}{X_{ti}}$$

Dónde: X_{ti} indica el marginal de la columna i , y X_{ij} la diagonal de dicha columna.

Los errores de omisión y comisión expresan dos enfoques del mismo problema. Los primeros se refieren a una definición imperfecta de la categoría. Los segundos, a una delimitación excesivamente amplia. La primera está relacionada con los errores de comisión, mientras que la segunda lo está con los de omisión:

$$F_{oi} = \frac{X_{ij}}{X_{it}} \times 100 \quad y \quad E_{ci} = \frac{X_{ij}}{X_{ti}} \times 100$$

Aplicación del análisis categórico multi-variante: Hasta ahora hemos estudiado lo que ocurre en la diagonal y en los residuales de filas y columnas. También resulta de gran

interés analizar las relaciones múltiples entre las distancias categóricas. Uno de los índices más empleados, en este sentido, es el estadístico Kappa (K), que mide la diferencia entre el acuerdo mapa – realidad observado, y el que cabría esperar simplemente por azar. En definitiva, intenta delimitar el grado de ajuste debido solo a la exactitud de la clasificación procediendo del causado por actores aleatorios. La estimación de K se obtiene a partir de la siguiente formula:

$$K = \frac{N \sum X_{ij} - \sum X_{it} X_{ti}}{N^2 \sum X_{it} X_{ti}}$$

En donde X_{ij} indica el acuerdo observado, y $X_{it} X_{ti}$ (producto de marginales) el acuerdo observado aparece en la diagonal de la matriz, mientras el esperado nos sirve para calcular el ajuste entre mapa y realidad que puede deberse al azar. La estimación de K nos sirve para conocer el grado de significación de este estadístico, y, por tanto, si el acuerdo observado se aleja o no significativamente del acuerdo es azar. En definitiva, el test pretende evaluar si la clasificación ha discriminado las categorías de interés con precisión significativamente mayor a la que se hubiere obtenido con una asignación aleatoria.

$K= 1$, indica que la clasificación es significativamente buena.

```

File
Confusion Matrix: E:\PROCESO TESIS IMG\2016\clsificacion\CLASIFICA_SUP
Overall Accuracy = (26059/26955) 96.6759%
Kappa Coefficient = 0.8514

  Class      Ground Truth (Pixels)
  NEVADO_TES LAGUNA_TEST SUELO_TEST VEGET_TEST BOFED_TEST
Unclassified 0           0           0           0           0
NEVADO_Train 326         1           0           0           0
LAGUNA_Train 0           23166      0           0           0
SUELO_Train 0           0           159         15          0
VEGET_Train 0           774        27          2343        0
BOFED_Train 0           79         0           0           65
Total        326         24020     186         2358        65

  Class      Ground Truth (Pixels)
  Total
Unclassified 0
NEVADO_Train 327
LAGUNA_Train 23166
SUELO_Train 174
VEGET_Train 3144
BOFED_Train 144
Total        26955

  Class      Ground Truth (Percent)
  NEVADO_TES LAGUNA_TEST SUELO_TEST VEGET_TEST BOFED_TEST
Unclassified 0.00         0.00         0.00         0.00         0.00
NEVADO_Train 100.00       0.00         0.00         0.00         0.00
LAGUNA_Train 0.00         96.44        0.00         0.00         0.00
SUELO_Train 0.00         0.00         85.48        0.64         0.00
VEGET_Train 0.00         3.22         14.52        99.36        0.00
BOFED_Train 0.00         0.33         0.00         0.00         100.00
Total        100.00       100.00       100.00       100.00       100.00

  Class      Ground Truth (Percent)
  Total
Unclassified 0.00
NEVADO_Train 1.21
LAGUNA_Train 85.94
SUELO_Train 0.65
VEGET_Train 11.66
BOFED_Train 0.53
Total        100.00

  Class      Commission      Omission      Commission      Omission
  (Percent)   (Percent)     (Fixels)     (Fixels)
NEVADO_Train 0.31             0.00          1/327          0/326
LAGUNA_Train 0.00             3.56          0/23166       854/24020
SUELO_Train 8.62             14.52         15/174         27/186
VEGET_Train 25.48           0.64          801/3144       15/2358
BOFED_Train 54.86           0.00          79/144         0/65
    
```

Figura 30 Matriz de confusión de la clasificación supervisada
 Fuente: (Elaboración propia, 2018).

Como se puede apreciar en la matriz de confusión, se puede ver que el coeficiente de Kappa es 0.85, lo que significa que la clasificación realizada esta correctamente clasificada.

Así se tuvo las extensiones superficiales de los bofedales con la ayuda del software ArcGIS, teniendo como resultado lo siguiente:

Tabla 3
Determinación de áreas de bofedales durante los años de 1984 al 2016.

AÑO	AREAS (ha)	AÑO	AREAS (ha)
1984	11,880.54	2001	3,985.56
1985	11,880.54	2004	7,259.31
1988	14,576.22	2005	1,469.52
1989	8,286.84	2006	2,864.97
1990	1,136.61	2007	5,253.93
1991	1,149.75	2008	1,518.12
1992	1,176.48	2009	1,180.98
1993	4,467.51	2010	7,381.17
1995	2,177.82	2011	2,486.16
1996	2,024.28	2013	3712.59
1997	2,248.92	2014	2950.47
1998	2,016.99	2015	3527.91
1999	2,531.34	2016	2396.25
2000	5,902.02		

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.4. Metodología para el objetivo 3.

3.3.4.1. Recopilación de información.

Para el procesamiento de precipitaciones para esta investigación se recopiló información de seis estaciones meteorológicas de la cuenca del río Coata del corto periodo de registro desde el año de 1984 hasta el 2016, que se obtuvieron del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI) – Perú. Así mismo se completó información faltante con la información de PISCO.

Tabla 4
Estaciones meteorológicas del área de intervención.

N°	Estación Meteorológica	Latitud	Longitud	Altitud (m.s.n.m.)
1	Cabanillas	-15.6391	-70.3462	3,892
2	Juliaca	-15.4442	-70.2078	3,826
3	Lampa	-15.3568	-70.3707	3,892
4	Pampahuta	-15.4835	-70.6758	4,400
5	Quillisani	-15.3836	-70.7503	4,600
6	Santa Lucia	-15.7000	-70.6000	3,970

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

La información recopilada de precipitaciones acumuladas promedias anuales, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 5
Datos de precipitación acumulada (mm) de estaciones meteorológicas y PISCO.

AÑO	QUILLISANI	PAMPAHUTA	SANTA LUCIA	LAMPA	JULIACA	CABANILLAS	PROMEDIO
1984	1,055.00	852.70	1,044.60	1,158.60	1,202.00	984.47	1,049.56
1985	1,135.80	834.30	845.90	1,369.10	984.10	836.87	1,001.01
1986	1,099.30	841.50	690.60	739.50	1,071.10	844.31	881.05
1987	729.70	530.10	491.40	641.50	513.70	354.04	543.41
1988	845.60	811.80	704.60	751.30	731.70	588.45	738.91
1989	721.57	539.80	495.10	500.20	640.10	490.30	564.51
1990	683.09	650.80	446.60	551.70	684.20	533.31	591.62
1991	704.12	584.30	499.40	616.10	748.40	500.69	608.84
1992	507.28	394.50	381.20	516.90	492.20	383.69	445.96
1993	967.23	733.40	683.30	664.60	924.00	743.48	786.00
1994	1,038.21	681.30	642.60	636.60	933.00	785.93	786.27
1995	701.66	416.40	526.00	482.70	669.20	534.70	555.11
1996	880.73	672.70	375.00	708.40	957.90	700.87	715.93
1997	765.11	924.80	727.90	857.70	852.40	683.44	801.89
1998	678.63	488.40	0.00	568.00	629.50	541.09	484.27
1999	1,014.45	661.80	0.00	744.10	930.80	727.91	679.84
2000	882.77	787.00	0.00	686.60	928.00	706.67	665.17
2001	1,068.19	852.40	498.20	787.20	993.10	825.08	837.36
2002	908.30	929.00	802.20	828.50	980.50	850.87	883.23
2003	739.51	698.00	646.10	702.60	868.70	619.01	712.32
2004	723.57	537.30	618.80	748.30	721.90	564.26	652.36
2005	693.36	662.10	720.80	861.60	812.70	648.74	733.22
2006	896.75	743.60	621.30	692.20	862.10	749.91	760.98
2007	960.43	716.32	961.32	1,129.20	929.85	700.09	899.54
2008	758.37	623.56	770.30	929.61	760.39	585.46	737.95
2009	821.62	597.33	795.33	975.15	761.96	626.11	762.92
2010	909.00	612.09	635.64	904.10	908.59	745.12	785.76
2011	1,163.32	703.11	891.66	1,210.59	973.82	743.70	947.70
2012	1,324.60	884.63	1,023.37	1,373.80	1,285.70	988.04	1,146.69
2013	751.65	663.74	855.39	1,020.03	741.60	657.40	781.64
2014	731.39	613.91	738.47	936.83	753.23	561.36	722.53
2015	674.92	639.51	792.51	901.59	661.23	564.27	705.67
2016	647.77	554.58	733.52	873.20	642.98	547.20	666.54

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

La información recopilada de temperatura máxima anual, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 6
Recopilación de temperatura máxima (°C) de estaciones meteorológicas y PISCO.

AÑO	QUILLISANI	PAMPAHUTA	SANTA LUCIA	LAMPA	JULIACA	CABANILLAS	PROMEDIO
1984	12.6	17.3	16.4	15.4	14.2	15.2	15.2
1985	12.5	16.9	16.3	15.0	13.9	15.1	14.9
1986	12.7	15.8	16.4	16.2	14.3	15.2	15.1
1987	14.0	16.7	18.2	17.7	15.7	16.5	16.5
1988	13.9	16.3	18.1	17.5	15.5	16.5	16.3
1989	13.0	15.6	17.4	16.8	14.8	15.5	15.5
1990	13.2	15.6	17.3	17.1	14.6	15.7	15.6
1991	13.4	15.8	17.8	17.0	14.8	16.1	15.8
1992	13.4	16.1	17.7	16.0	15.3	15.9	15.7
1993	12.9	15.5	18.3	15.6	15.0	15.5	15.5
1994	13.3	15.1	19.0	16.0	14.5	15.7	15.6
1995	14.0	16.9	19.1	16.8	13.7	16.4	16.2
1996	13.2	16.4	17.5	16.3	12.6	15.8	15.3
1997	13.0	16.0	17.6	16.1	12.6	15.7	15.2
1998	14.8	18.1	19.0	18.1	14.3	17.2	16.9
1999	12.9	16.3	17.1	15.6	14.5	15.4	15.3
2000	12.9	15.7	17.4	15.7	14.3	15.5	15.2
2001	12.9	15.3	17.3	15.6	14.2	15.4	15.1
2002	12.6	15.6	16.9	15.5	13.7	15.0	14.9
2003	13.4	16.4	17.5	16.1	14.7	15.7	15.7
2004	13.5	16.7	17.7	16.3	14.8	16.0	15.8
2005	13.8	17.1	17.7	16.5	14.9	16.3	16.0
2006	13.5	16.6	17.6	16.3	14.5	16.1	15.8
2007	13.9	17.2	18.3	16.6	15.2	17.1	16.4
2008	14.0	17.2	18.2	16.5	15.6	16.4	16.3
2009	14.2	17.4	18.4	16.7	15.7	16.4	16.5
2010	14.9	18.4	19.3	17.5	16.5	17.0	17.3
2011	13.9	17.6	18.2	16.5	15.6	16.3	16.3
2012	13.6	17.3	17.9	16.3	15.1	16.0	16.0
2013	14.3	17.5	18.3	16.7	16.3	16.5	16.6
2014	14.4	17.6	18.5	16.9	16.3	16.6	16.7
2015	14.3	17.6	18.3	16.8	16.1	16.5	16.6

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

3.3.4.2. Análisis de tendencia temporal.

La tendencia es el componente a largo plazo que representa el crecimiento o decremento en las series de tiempo durante un amplio periodo. Una tendencia positiva significa que la variable aumenta a través del tiempo, aunque puede ser o no ser lineal.

Por el contrario, una tendencia negativa significa que disminuye en lo largo del tiempo.

La evaluación de la tendencia de los factores climáticos se realizará con la siguiente prueba:

Prueba de regresión lineal: Esta es una prueba paramétrica que supone que los datos se distribuyen normalmente. Prueba si existe una tendencia lineal examinando la relación entre el tiempo (x) y la variable de interés (y).

El gradiente de regresión se estima mediante:

$$b = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})(Y_i - \bar{Y})}{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}$$

y la intersección se estima como:

$$\alpha = \bar{Y} - b\bar{X}$$

La ecuación obtenida de la Precipitación Promedia Acumulada (mm) es la siguiente:

$$Y = 2.3582X - 3969.9$$

y la ecuación obtenida de la Temperatura máxima promedio es la siguiente:

$$Y = 0.0363X - 56.694$$

El análisis estadístico en este proyecto se realizó utilizando las herramientas Excel y programación en el software RStudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. RESULTADO Y DISCUSIÓN DE OBJETIVOS

4.1.1. Para objetivo principal.

Las variables que determinan significativamente la dinámica espacial de cualquier zona es principalmente la precipitación, seguido de las temperaturas máximas como sugiere García (2012). Lo mismo sucede en un estudio que elaboraron en la cuenca de Nuñoa ubicada en los Andes del sur de Perú, puesto que la variación de los bofedales resultó que, está moderadamente correlacionada con la precipitación de la estación húmeda ($R^2 = 0.56$, $p < 0.05$) según indica M. Mazzarino & J. Finn (2016). Sin embargo, el resultado obtenido en la investigación dio el siguiente resultado, la correlación de la dinámica espacial de bofedales con respecto a la temperatura máxima promedio fue $R^2=0.47$, $p\text{-valor}=0.0003$, no obstante la correlación con respecto a la precipitación fue $R^2=0.23$, $p\text{-valor}=0.2186$, es decir, que el comportamiento de las variaciones de las extensiones superficiales de los bofedales de la cuenca del río Coata depende más de la temperatura que de la precipitación ya que la correlación que presenta es significativa.

4.1.2. Para objetivo específico.

a) Determinación de la extensión superficial de bofedales mediante algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI) entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.

Mediante los algoritmos de NDVI se pudo determinar la extensión superficial de bofedales, teniendo como resultado que el coeficiente Kappa resultó 0.85, así mismo, la precisión general del mapa resultó 96.68% , lo cual indica que la metodología usada para la clasificación de bofedales en la cuenca del río Coata está muy bien clasificada, es decir las áreas de entrenamiento realizado en gabinete y en trabajo de campo se diferencian

correctamente lo que indica que en la clasificación supervisada el software no se confunde al realizar las áreas de entrenamiento que han sido plasmados para la elaboración del NDVI, tomando en cuenta que los umbrales para la identificación de bofedales van de 0.35 a 0.7, a continuación se muestra el resultado indicado.

Confusion Matrix: E:\PROCESO TESIS IMG\2016\clsificacion\CLASIFICA_SUP					
Overall Accuracy = (26059/26955) 96.6759%					
Kappa Coefficient = 0.8514					
Class	Ground Truth (Pixels)				
	NEVADO_TES	LAGUNA_TEST	SUELO_TEST	VEGET_TEST	BOFED_TEST
Unclassified	0	0	0	0	0
NEVADO_Train	326	1	0	0	0
LAGUNA_Train	0	23166	0	0	0
SUELO_Train	0	0	159	15	0
VEGET_Train	0	774	27	2343	0
BOFED_Train	0	79	0	0	65
Total	326	24020	186	2358	65

Figura 31 Coeficiente de Kappa y bondad del mapa
Fuente: (Elaboración propia, 2018).

En el siguiente grafico se puede apreciar, el comportamiento de los bofedales durante los años de 1984 al 2016, en la cual se puede apreciar que existe un descenso considerable durante los años de 1988 al 1990.

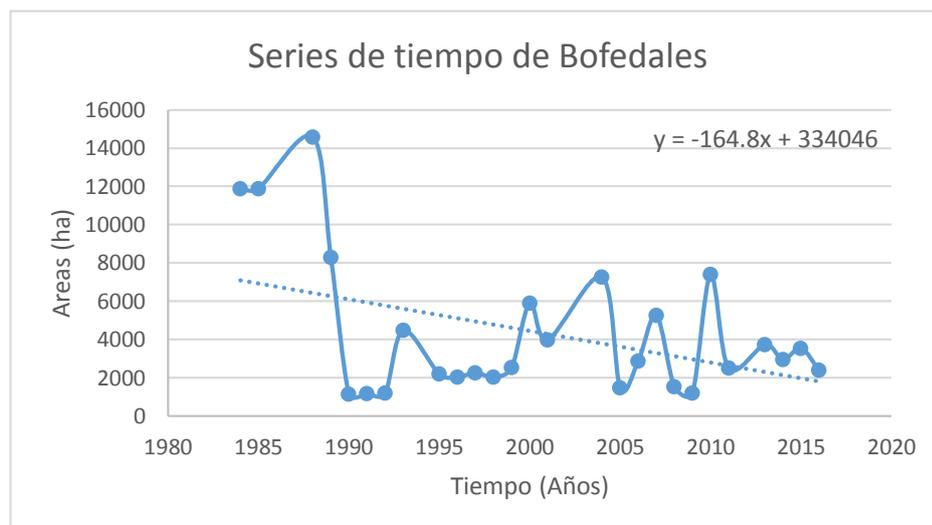


Figura 32 Series de tiempo de extensiones superficiales Bofedales.
Fuente: (Elaboración propia, 2018).

b) Determinación de la tendencia de los factores climáticos como precipitación y temperatura entre los años de 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata.

Se puede apreciar el comportamiento de las precipitaciones acumuladas anuales, donde la tendencia no es tan significativa, es decir el comportamiento de la tendencia que presenta la precipitación acumulada durante los años de 1984 al 2016 oscila normalmente, no presenta una tendencia negativa.

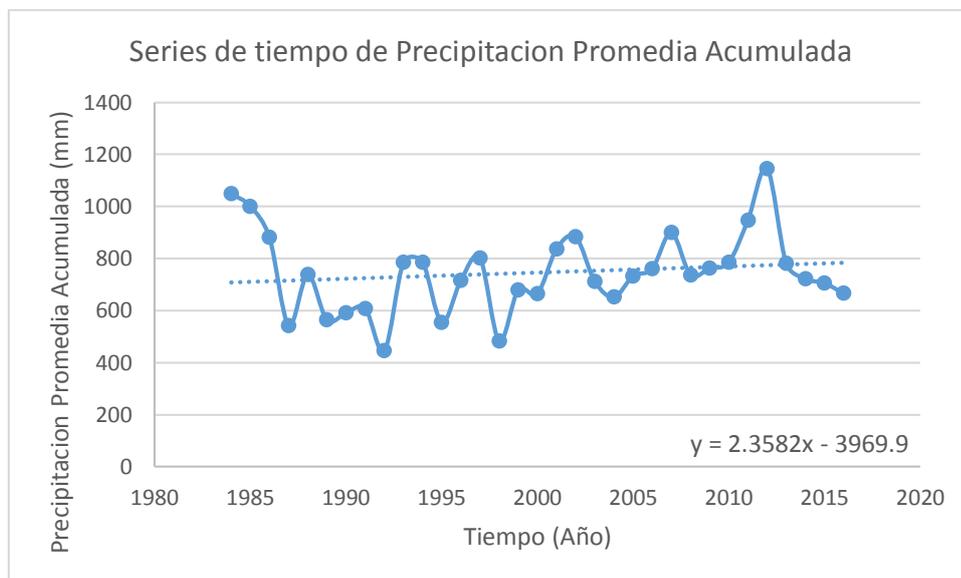


Figura 33 Series de tiempo de Precipitación Promedia Acumulada (mm)

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

Sin embargo, la tendencia que presenta las temperaturas máximas durante los años de 1984 al 2016, es positiva por ende es muy significativa, es decir que el cambio en la temperatura es brusca y notoria, ya que muestran ascensos de 1.4°C , lo cual es un indicador considerable de los efectos del cambio climático, es decir que a medida que la temperatura aumenta la extensión superficial de los bofedales disminuye, lo que indica que la desaparición de bofedales es a causa del cambio climático.

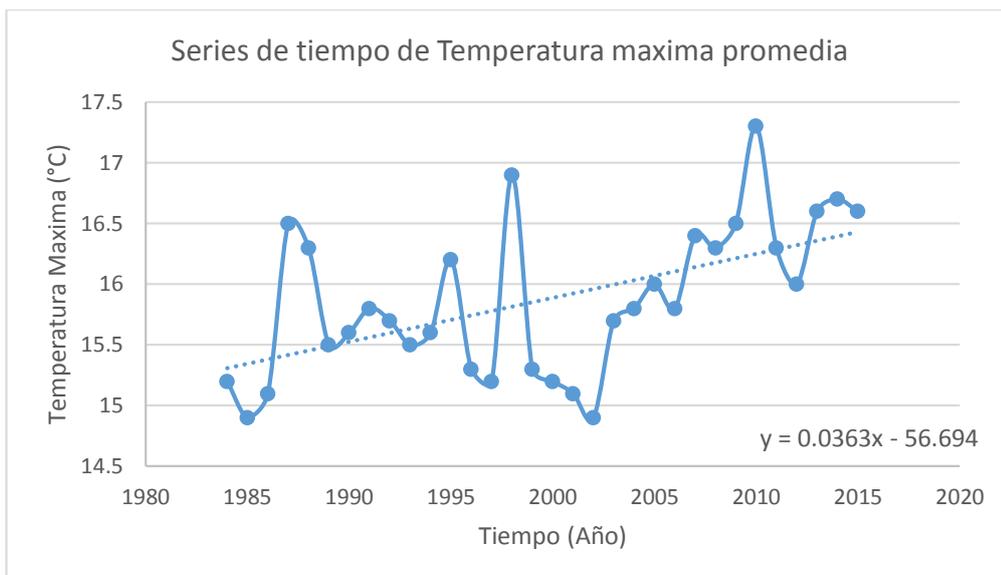


Figura 34 Series de tiempo de Temperatura máxima promedio (°C).

Fuente: (Elaboración propia, 2018).

CONCLUSIONES

Del objetivo general

- Se concluye que, existe una correlación significativa ($R^2=0.47$, p-valor 0.0003) entre la temperatura máxima promedio y la dinámica espacial de bofedales durante los años 1984 a 2016 en la cuenca del río Coata. Es decir, que uno de los factores de la disminución y/o desaparición de los bofedales es a causa del cambio climático, puesto que la temperatura es un elemento considerable del cambio climático.

De los objetivos específicos

- La metodología usada para obtener la extensión superficial de los bofedales de la cuenca del río Coata, usando algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), fue óptimo, debido a que el valor del coeficiente Kappa dio como resultado 0.85, lo que indica que la precisión general de la identificación de dichos bofedales dio como resultado como 96.68%. Lo cual se pudo determinar que durante el año 1984 al 2016 hubo una disminución de 9,484.29 ha. de bofedales, lo cual es una pérdida considerable.
- El método realizado para analizar las tendencias que presentaron los factores climáticos, como son la precipitación acumulada y la temperatura máxima anual, fueron claves para poder describir el comportamiento de los bofedales durante los años de 1984 al 2016. Por ende, se puede decir que a medida que existe variación de la temperatura existe variación de extensión superficial de bofedales, lo que implica que el clima afecta de alguna manera a los humedales alto andinos.

RECOMENDACIONES

- Se recomienda realizar una comparación entre la dinámica espacial de bofedales, con la dinámica espacial de nevados, puesto que generalmente muchos de los bofedales se ubican alrededor de nevados.
- También se recomienda realizar trabajos de monitoreo del comportamiento de bofedales con imágenes de satélite con mayor resolución espacial, de manera que se pueda tener un análisis mucho más exacto.
- Se recomienda analizar los factores climáticos durante años de 25 a más, ya que es el periodo recomendado para evaluar y/o analizar factores climáticos según estudios hidrológicos.

REFERENCIAS

- Aguilar, R. D. D. (n.d.). Umbrales de temperatura y las cuencas de los ríos Coata e Ilave-región Puno. *Servicio Nacional De Meteorología E Hidrología Del Perú - SENAMHI*, 1–32.
- AMS (American Meteorological Society), (2000). Glossary of Meteorology (en línea), segunda edición. Consultado el 20 de junio de 2014. Disponible en: <http://amsglossary.allenpress.com/glossary/>
- Beniston M., Stephenson D.B., Christensen O.B., Ferro C.A.T., Frei C., Goyette S., Halsnaes K., Holt T., Jylhä K., Koffi B., Palutikof J., Schöll R., Semmler T, & Woth K. (2007) Future extreme events in European climate: an exploration of regional climate model projections.
- Burgos, V. H. (2015). Fuentes de información Modelos Digitales de Elevación : Tendencias, correcciones hidrológicas y nuevas fuentes de información, (April). Retrieved from <https://www.researchgate.net/publication/274893404%0AModelos>
- Bustamante, A. M. (2013). Series de tiempo: Una aplicación a registros hidrométricos en una cuenca del Estado de Oaxaca (Tesis de Grado).
- CEPAL. 2014. *La Economía del Cambio Climático en el Perú*.
- Chatfield, C. (2003). *The Analysis of Time Series, An Introduction*. Chapman and Hall/CRC, Blvd, Boca Raton, Florida 33431. United States of America, 6 edition. The consent of CRC Press LLC does not extend to copying for general distribution, for promotion, for creating new works, or for resale.
- Chander, G., Markham, B.L., Helder, D.L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113, 893-903.
- Chuvieco, E. (1995). *Fundamentos De Teledetección Espacial*. <https://doi.org/23.304-1995>
- Chuvieco, E. (2002). *Teledetección Ambiental*. Barcelona, España.
- EarleL. ,B. Warner & R. Aravena. (2003). Rapid development of fan unusual peataccumulating ecosystem in the Chilean Altiplano. *Quaternary Research* 59: 2-11.
- E.Garcia & M.Otto. (2015). Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del Río Santa, Ancash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(2), 115–125. Retrieved from file:///scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1726-22162015000200004&lang=pt
- Esteban, V. H. H. (2013). *Identificación y análisis multitemporal de cuatro bofedales en el altiplano norte del departamento de La Paz (Ulla Ulla, Ancoraimes, Peñas y Tuni Condoriri) (Tesis de Grado), Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia*.

- Felicísimo, A. M., 1994. Modelos Digitales del Terreno. Oviedo (España): Pentalfa. ISBN:84-7848-475-2
- FAO (Food and Agriculture Organization of the United Nations). (1998). Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements - FAO Irrigation and drainage (en línea). Consultado el 20 de junio de 2014. Disponible en: <http://www.fao.org/docrep/x0490e/x0490e00.htm#Contents>
- Inácio, L., Agricultura, M., Abastecimento, P., Rodrigues, R., Crestana, S., & Pires, A. K. (2005). República Federativa do Brasil.
- Instituto Nacional de estadística y Geografía. (n.d.). LANDSAT. Retrieved May 21, 2018, from <http://www.inegi.org.mx/geo/contenidos/imgpercepcion/imgsatelite/landsat.aspx>
- Instituto Nacional de Recursos Naturales. (2007). Evaluación de los Recursos Hídricos en las Cuencas de los Ríos Cabanillas y Lampa, 240.
- Labrador García, M., Evora Brondo, J. A., & Arbelo Pérez, M. (2012). *Satelites de Teledeteccion para la Gestion del Territorio*.
- Lillesand, *et al.*, 2004. Remote Sensing and Image Interpretation. John Wiley & Sons, Inc. 5ª Edición. 748 pp.
- M. Mazzarino & J. Finn. (2016). An NDVI Analysis of Vegetation Trends in an Andean watershed. *Wetlands Ecology and Management*, 24(6), 623–640. <https://doi.org/10.1007/s11273-016-9492-0>
- MINAM. (2015). Estrategia Nacional de Humedales. *Biomass Chem Eng*, 49(23–6).
- Olaya, V. (2012). *Sistemas de Información Geográfica* (Vol. 1). Retrieved from http://wiki.osgeo.org/wiki/Libro_SIG.
- PNUD.; 2001. Evaluación de las características y distribución de los bofedales en el ámbito peruano del sistema PDTS. (En línea). http://www.altperubolivia.org/Web_Bio/PROYECTO/Docum_bolivia/21.12.pdf
- RAMSAR. 2015. “La Importancia de Los Humedales.” <http://www.ramsar.org/es/acerca-de/la-importancia-de-los-humedales> (September 13, 2017).
- Robert Ramos. (2018). *Evolución de la cobertura glaciar del nevado Coropuna y su relacion con el entorno climatico*. Universidad Nacional Agraria La Molina, Lima, Perú.
- Rouse, J., John, W., Space, Schell, A., & W, D. (1973). MONITORING THE VERNAL ADVANCEMENT AND RETROGADATION (GREEN WAVE EFFECT) OF NATURAL VEGETATION. *Texas A&M University Remote Sensing Center*.
- Roy, D., Borak, J., Devadiga, S., Wolfe, R., Zheng, M., & Descloitres, J. (2002). TheMODIS land product quality assessment approach. *Remote Sensing of Environment*, 83, 62-67.
- SENAMHI. (2017). Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios,

- Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico, 1–22.
- Tucker, C. J., Townshend, J. R. G., Goff, T. E., & Goff, T. E. I. (1985). African Land-Cover Classification Using Satellite Data. *Advancement Of Science*, 227(4685), 369–375.
- Viviana, C. A. (2015). Efecto De La Variabilidad Climática Como Indicador Del Cambio Climático En El Sistema Productivo Dependiente De Los Bofedales De Altura (Estudio De Caso). *Universidad Mayor De San Andrés*.
- Wang, J. U. E., & Rich, P. M. (2001). Spatial patterns of NDVI in response to precipitation and temperature in the central Great Plains, 22(18), 3827–3844.
- Wei, Z., & Zhaofeng, W. (2007). La relación entre el NDVI y la precipitación en la meseta del Tíbet, (2005), 259–268.
- Zeballos, G., Soruco, A., Cusicanqui, D., Joffre, R., & Rabatel, A. (2014). Uso de imágenes satelitales, modelos digitales de elevación y sistemas de información geográfica para caracterizar la dinámica espacial de glaciares y humedales de alta montaña en Bolivia. *ResearchGate*, 49(Julio 2015), 1–13.

ANEXOS

ANEXO A

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE IMAGEN SATELITAL LANDSAT 5.

Parámetros	LANDSAT-5		
Altitud de Órbita	705km		
Bandas Espectrales	Bandas	Longitud de Onda (nm)	GSD (m)
	MSS (Escaner Multi-Espectral)		
	4 - VERDE	500 - 600	57x79
	5 – ROJO	600 – 700	57x79
	6 – NEAR INFRARED	700 – 800	57x79
	7 – INFRAROJOS	800 - 1100	57x79
	TM (Mapeo Telemático)		
	1- AZUL	450 - 520	30
	2 - VERDE	520 - 600	30
	3 - ROJO	630 - 690	30
	4- INFRAROJOS	760 - 900	30
	5- INFRAROJOS	1550 - 1750	30
	6 – INFRAROJOS TÉRMICOS	10400 -12500	120
	7 – MID-INFRAROJOS	2080 - 1350	30
Ancho Pasada	185km		
Distancia de Muestreo (GSD)	30-120		
Lanzamiento/Expectativa de vida	1984 - 2013		
Tiempo Revisita	16 días		

ANEXO B

ESPECIFICACIONES TÉCNICAS DE IMAGEN SATELITAL LANDSAT 8.

Parámetros	LANDSAT-8		
Altitud de Órbita	705km		
Bandas Espectrales	Bandas	Longitud de Onda (nm)	GSD (m)
	1 - COASTAL AEROSOL	300	30
	2 – AZUL	450 - 510	30
	3 – VERDE	530 – 590	30
	4 – ROJO	640 - 670	30
	5- INFRAROJOS	850 – 880	30
	6 - SWIR 1	1570 - 1650	30
	7 - SWIR 2	2110 – 2290	30
	8- PANCROMÁTICA	500 - 680	15
	9- CIRRUS	1360 – 1380	30
	10- INFRAROJOS TÉRMICOS 1	10600 - 11190	100 (*30)
	11- INFRAROJOS TÉRMICOS 2	11500 - 12510	100 (*30)
* Las bandas TIRS se obtienen a resoluciones de 60m pero son remuestados a 30m para información del producto final			
Ancho Pasada	185km		
Distancia de Muestreo (GSD)	15-30km		
Lanzamiento/Expectativa de vida	2013-2018 (tiene suministros hasta 2023)		
Tiempo Revisita	16 días		

ANEXO C

LISTA DE IMÁGENES SATELITALES DESCARGADAS PARA LA
INVESTIGACION

N°	Satélite/Sensor	Escena	Fecha de Adquisición
1	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19840715_20170220_01_T1	07/15/1984
2	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19840722_20170220_01_T1	07/22/1984
3	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19840620_20170220_01_T1	06/20/1984
4	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19850718_20170219_01_T1	07/18/1985
5	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19850725_20170219_01_T1	07/25/1985
6	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19850725_20170219_01_T1	07/25/1985
7	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19880608_20170208_01_T1	06/08/1988
8	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19880615_20170208_01_T1	06/15/1988
9	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19880615_20170208_01_T1	06/15/1988
10	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19890611_20170203_01_T1	06/11/1989
11	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19890720_20170202_01_T1	07/20/1989
12	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19890720_20170202_01_T1	07/20/1989
13	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19900716_20170130_01_T1	07/16/1990
14	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19900808_20170129_01_T1	08/08/1990
15	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19900808_20170130_01_T1	08/08/1990
16	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19910703_20170126_01_T1	07/03/1991
17	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19910710_20170126_01_T1	07/10/1991
18	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19910710_20170126_01_T1	07/10/1991
19	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19920619_20170123_01_T1	06/19/1992
20	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19920610_20170122_01_T1	06/10/1992
21	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19920610_20170124_01_T1	06/10/1992
22	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19930622_20170118_01_T1	06/22/1993
23	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19930629_20170118_01_T1	06/29/1993
24	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19930629_20170118_01_T1	06/29/1993
25	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19950831_20170106_01_T1	08/31/1995
26	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19950705_20170107_01_T1	07/05/1995
27	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19950721_20170107_01_T1	07/21/1995
28	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19960716_20170103_01_T1	07/16/1996
29	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19960723_20170103_01_T1	07/23/1996
30	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19960723_20170103_01_T1	07/23/1996
31	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19970719_20161231_01_T1	07/19/1997
32	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19970726_20161230_01_T1	07/26/1997
33	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19970726_20161230_01_T1	07/26/1997
34	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19980722_20161223_01_T1	07/22/1998
35	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19980729_20161223_01_T1	07/29/1998
36	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19980729_20161223_01_T1	07/29/1998
37	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_19990725_20161219_01_T1	07/25/1999
38	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_19990801_20161217_01_T1	08/01/1999
39	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_19990817_20161216_01_T1	08/17/1999
40	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20000711_20161214_01_T1	07/11/2000
41	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20000702_20161214_01_T1	07/02/2000
42	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20000702_20161214_01_T1	07/02/2000

N°	Satélite/Sensor	Escena	Fecha de Adquisición
43	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20010730_20161210_01_T1	07/30/2001
44	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20010721_20161210_01_T1	07/21/2001
45	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20010721_20161210_01_T1	07/21/2001
46	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20040722_20161201_01_T1	07/22/2004
47	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20040611_20161202_01_T1	06/11/2004
48	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20040611_20161202_01_T1	06/11/2004
49	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20050826_20161124_01_T1	08/26/2005
50	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20050817_20161125_01_T1	08/17/2005
51	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20050716_20161125_01_T1	07/16/2005
52	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20060712_20161120_01_T1	07/12/2006
53	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20060703_20161120_01_T1	07/03/2006
54	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20060719_20161120_01_T1	07/19/2006
55	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20070629_20161112_01_T1	06/29/2007
56	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20070823_20161112_01_T1	08/23/2007
57	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20070722_20161112_01_T1	07/22/2007
58	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20080802_20161030_01_T1	08/02/2008
59	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20080825_20161030_01_T1	08/25/2008
60	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20080724_20161030_01_T1	07/24/2008
61	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20090805_20161022_01_T1	08/05/2009
62	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20090828_20161021_01_T1	08/28/2009
63	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20090711_20161023_01_T1	07/11/2009
64	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20100824_20161013_01_T1	08/24/2010
65	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20100815_20161014_01_T1	08/15/2010
66	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20100612_20161015_01_T1	06/12/2010
67	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_002071_20110827_20161006_01_T1	08/27/2011
68	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003070_20110717_20161008_01_T1	07/17/2011
69	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_003071_20110818_20161008_01_T1	08/18/2011
70	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_002071_20130816_20170503_01_T1	08/16/2013
71	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_003070_20130908_20170502_01_T1	09/08/2013
72	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_003071_20130908_20170502_01_T1	09/08/2013
73	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_002071_20140803_20170420_01_T1	08/03/2014
74	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_003070_20140709_20170421_01_T1	07/09/2014
75	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_003071_20140709_20170421_01_T1	07/09/2014
76	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_002071_20150806_20170406_01_T1	08/06/2015
77	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_003070_20150829_20180129_01_T1	08/29/2015
78	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_003071_20150829_20180129_01_T1	08/29/2015
79	Landsat 8 OLI	LC80020712016205LGN00	23/07/2016
80	Landsat 8 OLI	LC80030702016212LGN00	30/07/2016
81	Landsat 8 OLI	LC80030712016212LGN00	30/07/2016

ÍNDICE DE MAPAS

	N°
<i>Mapas de ubicación de la cuenca del rio Coata del año 1984.....</i>	<i>00</i>
<i>Mapas de bofedales de la cuenca del rio Coata del año 1984.....</i>	<i>01</i>
<i>Mapas de bofedales de la cuenca del rio Coata del año 1990.....</i>	<i>02</i>
<i>Mapas de bofedales de la cuenca del rio Coata del año 2000.....</i>	<i>03</i>
<i>Mapas de bofedales de la cuenca del rio Coata del año 2005.....</i>	<i>04</i>
<i>Mapas de bofedales de la cuenca del rio Coata del año 2010.....</i>	<i>05</i>
<i>Mapas de bofedales de la cuenca del rio Coata del año 2016.....</i>	<i>06</i>