



**UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO**  
**FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS**  
**ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRONÓMICA**



**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE BOFEDALES Y SU RELACIÓN  
CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA  
DE POTOJANI GRANDE, PERÍODO 2003 - 2023 PUNO, PERÚ**

**TESIS**

**PRESENTADA POR:**

**YONI CRISTIAN MAMANI CAHUI**

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:  
INGENIERO AGRÓNOMO**

**PUNO – PERÚ**

**2024**



## Reporte de similitud

### NOMBRE DEL TRABAJO

**ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE BOFEDALES Y SU RELACIÓN CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE POTOJANI GRANDE, PERÍODO 2003 - 2023 PUNO, PERÚ**

### AUTOR

**YONI CRISTIAN MAMANI CAHUI**

### RECUESTO DE PALABRAS

**25576 Words**

### RECUESTO DE CARACTERES

**122763 Characters**

### RECUESTO DE PÁGINAS

**116 Pages**

### TAMAÑO DEL ARCHIVO

**6.0MB**

### FECHA DE ENTREGA

**Jun 19, 2024 9:42 AM GMT-5**

### FECHA DEL INFORME

**Jun 19, 2024 9:45 AM GMT-5**

### ● 8% de similitud general

El total combinado de todas las coincidencias, incluidas las fuentes superpuestas, para cada base de datos.

- 7% Base de datos de Internet
- Base de datos de Crossref
- 5% Base de datos de trabajos entregados
- 2% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de contenido publicado de Crossref

### ● Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 11 palabras)

  
Ing. Mario Vera  
Codigo 2002414

  
D.B.  
Dr. Manuel A. Callahuanca  
Codigo 82081

Resumen



## DEDICATORIA

A Dios.

Dedico este trabajo a mi madre Benancia y mi padre Julian, por su amor, apoyo y aliento en todo momento. Gracias por ser mi fuente de inspiración y por enseñarme a perseguir mis sueños con pasión y determinación. Este logro no habría sido posible sin su constante apoyo y confianza en mí.

A mis queridos hermanos: Rosaria, Vidal, Francisca, Hermelinda, María, Victoria, Marleni y Diana. Pilares en mi vida y fuente inagotable de admiración, quienes nunca dudaron de mis capacidades. Los admiro no solo por las cualidades que cada uno posee, sino también por esa fuerza colectiva que me motiva constantemente a superar mis límites y seguir adelante.

**Yoni Cristian Mamani Cahui**



## AGRADECIMIENTOS

A la Universidad Nacional del Altiplano, Facultad de Ciencias Agrarias, la Escuela Profesional de Ingeniería Agronómica, docentes por haberme formado académicamente con sus conocimientos que contribuyeron en mi formación profesional.

Al servicio nacional de meteorología e hidrología (SENAMHI) DZ 13 - Puno por haberme brindado parte de la información hidrometeorológica para elaborar la presente tesis.

Mis agradecimientos al M.Sc. Marco Alexis Vera Zuñiga, asesor de la tesis, por la oportunidad y confianza brindada.

A los jurados M.Sc. Daniel Canaza Mamani, M.Sc. Abdon Charaja Villalta, e Ing. Rony Ciprian Carreon, cuyas observaciones críticas y apoyo han sido fundamentales en la culminación exitosa de esta investigación.

Especial agradecimiento al M.S.c. Hector Añamuro Luque, por su invaluable apoyo y compartir sus conocimientos durante mi investigación.

Al M.S.c. Aresio Castillo Mamani, por haberme brindado su apoyo y compartir sus conocimientos en esta investigación.

A mi novia Guadalupe Ramos por su apoyo y aliento en todo momento. Gracias

**Yoni Cristian Mamani Cahui**



# ÍNDICE GENERAL

	Pág.
<b>DEDICATORIA</b>	
<b>AGRADECIMIENTOS</b>	
<b>ÍNDICE GENERAL</b>	
<b>ÍNDICE DE TABLAS</b>	
<b>ÍNDICE DE FIGURAS</b>	
<b>ÍNDICE DE ANEXOS</b>	
<b>ACRÓNIMOS</b>	
<b>RESUMEN .....</b>	<b>16</b>
<b>ABSTRACT.....</b>	<b>17</b>
<b>CAPÍTULO I</b>	
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA.....</b>	<b>19</b>
1.1.1 Problema general.....	20
1.1.2 Problemas específicos .....	20
<b>1.2 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>21</b>
1.2.1 Hipótesis general.....	21
1.2.2 Hipótesis específicas .....	21
<b>1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>21</b>
<b>1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>23</b>
1.4.1 Objetivo general .....	23
1.4.2 Objetivos específicos .....	23

## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA



<b>2.1</b>	<b>ANTECEDENTES .....</b>	<b>24</b>
2.1.1	Locales. ....	24
2.1.2	Nacionales .....	25
2.1.3	Internacionales .....	27
<b>2.2</b>	<b>MARCO TEÓRICO .....</b>	<b>30</b>
2.2.1	Hidrología .....	30
2.2.2	El ciclo hidrológico .....	30
2.2.3	Humedales .....	30
2.2.4	Bofedal .....	31
2.2.5	Importancia de los bofedales.....	31
2.2.6	Clasificación de los bofedales .....	32
2.2.7	Sistemas de información geográfica .....	32
2.2.8	Teledetección.....	33
2.2.9	Espectro electromagnético .....	33
2.2.10	Firma espectral .....	34
2.2.11	Big Data .....	35
2.2.12	Análisis multitemporal .....	35
2.2.13	Imágenes satelitales y su uso.....	35
2.2.14	Programa Landsat.....	36
2.2.14.1	Descripciones de sensores Landsat 5 (TM).....	37
2.2.14.2	Descripciones de los sensores Landsat 8- 9 (OLI) y (TIRS)....	37
2.2.15	Google Earth Engine .....	37
2.2.16	Definición de índices espectrales .....	38
2.2.17	Clasificación supervisada.....	38
2.2.17.1	Random Forest .....	39



2.2.18	Indicadores de validación.....	39
2.2.19	Variabilidad climática.....	39
2.2.20	Series de tiempo. ....	40

### CAPITULO III

#### MATERIALES Y MÉTODOS

<b>3.1</b>	<b>ÁREA DE ESTUDIO .....</b>	<b>41</b>
<b>3.2</b>	<b>TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN .....</b>	<b>42</b>
<b>3.3</b>	<b>TAMAÑO DE MUESTRA .....</b>	<b>42</b>
3.3.1	Población.....	42
3.3.2	Muestra.....	42
<b>3.4</b>	<b>MATERIALES Y SOFTWARES .....</b>	<b>43</b>
<b>3.5</b>	<b>METODOLOGÍA DE TRABAJO.....</b>	<b>43</b>
3.5.1	Descripción de la metodología.....	45
3.5.2	Establecimiento de puntos de entrenamiento georreferenciados .....	46
3.5.3	Evaluación de la composición florística a través del método de transecto al paso.....	49
3.5.4	Preparación de la colección de imágenes Landsat .....	50
3.5.5	Clasificación por Random Forest.....	51
3.5.6	Convertir datos ráster a datos vectoriales.....	52
3.5.7	Herramientas para evaluar la Precisión de modelos de clasificación .....	53
3.5.7.1	Matriz de confusión.....	53
3.5.7.2	Índice Kappa .....	54
3.5.8	Validación de la clasificación supervisada .....	55
3.5.9	Información meteorológica .....	57
3.5.10	Procesamiento de datos climáticos.....	58



3.5.10.1 Relleno de datos faltantes.....	58
3.5.10.2 Pruebas estadísticas de saltos y tendencias con el método de Man-Kendall.....	59
3.5.10.3 Estimación anual de datos climáticos mediante el método de isoyetas e isotermas .....	61
3.5.11 Correlación de Pearson .....	63

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1 <b>Análisis de cambios multitemporales de bofedales y su relación con la variabilidad climática en la microcuenca de Potojani Grande.....</b>	<b>65</b>
4.2 <b>Determinación por teledetección espacial los cambios de área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande.....</b>	<b>67</b>
4.3 <b>Influencia de variables climáticas, con mayor influencia en el cambio de área de cobertura vegetal del bofedal, microcuenca Potojani Grande .....</b>	<b>74</b>
V. <b>CONCLUSIONES .....</b>	<b>80</b>
VI. <b>RECOMENDACIONES .....</b>	<b>82</b>
VII. <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....</b>	<b>83</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>93</b>

**Área** : Cambio climático y agricultura

**Tema** : Sistemas de Información Geográfica

**FECHA DE SUSTENTACIÓN:** 26 de junio del 2024



## ÍNDICE DE TABLAS

	<b>Pág.</b>
<b>Tabla 1</b> Misión cronológica Landsat.....	36
<b>Tabla 2</b> Rangos de longitud de onda de la constelación Landsat.....	45
<b>Tabla 3</b> Puntos de entrenamiento georreferenciados in situ 17/08/2023. ....	46
<b>Tabla 4</b> Índices espectrales Landsat.....	51
<b>Tabla 5</b> Valoración del índice Kappa .....	55
<b>Tabla 6</b> Estaciones meteorológicas cercanas al área de intervención .....	57
<b>Tabla 7</b> Test de tendencia.....	60
<b>Tabla 8</b> Descripción de la significancia del test Mann - Kendall.....	60
<b>Tabla 9</b> Criterio del coeficiente de correlación de Pearson .....	64
<b>Tabla 10</b> Riqueza y abundancia de especies de la composición florística del bofedal	67
<b>Tabla 11</b> Determinación de área de cobertura vegetal del bofedal período 2003 al 2023 .....	68
<b>Tabla 12</b> Matriz de confusión y índice de Kappa .....	74
<b>Tabla 13</b> Resultados de área de cobertura vegetal del bofedal y datos climáticos (2003- 2023) .....	75



## ÍNDICE DE FIGURAS

	<b>Pág.</b>
<b>Figura 1</b> Espectro fotomagnético .....	34
<b>Figura 2</b> Mapa de ubicación político de la investigación .....	41
<b>Figura 3</b> Diagrama de flujo que muestra la metodología.....	44
<b>Figura 4</b> Establecimiento y generación de ee.Feature de tres entradas.....	49
<b>Figura 5</b> Aplicación de filtros a la colección de imágenes Landsat.....	50
<b>Figura 6</b> Clasificación de imagen Landsat en formato Ráster del 2023 .....	52
<b>Figura 7</b> Flujo de procesos en el SIG para conversión datos .....	53
<b>Figura 8</b> Establecimiento aleatorio de puntos de evaluación de la precisión .....	56
<b>Figura 9</b> Flujo de procesos en el SIG para la clasificación supervisada.....	57
<b>Figura 10</b> Distribución de valores faltantes de precipitación pluvial (mm).....	58
<b>Figura 11</b> Distribución de valores completos precipitación pluvial (mm) .....	59
<b>Figura 12</b> Flujo de procesos en el (SIG) para el cálculo de la precipitación .....	63
<b>Figura 13</b> Comparación multitemporal de la cobertura vegetal del bofedal entre 2003 y 2023 .....	66
<b>Figura 14</b> Mapa de análisis multitemporal del bofedal en la microcuenca de Potojani Grande periodo 2003-2023 .....	69
<b>Figura 15</b> Evolución de área de cobertura vegetal del bofedal.....	71
<b>Figura 16</b> Porcentaje de cambio del área de cobertura vegetal del bofedal desde 2003 .....	72
<b>Figura 17</b> Validación de puntos de evaluación de la precisión .....	73
<b>Figura 18</b> Correlación de Pearson entre el Área de cobertura del bofedal (ha) y la Precipitación pluvial (mm).....	76



<b>Figura 19</b>	Correlación de Pearson entre el Área de cobertura vegetal del bofedal (ha) y la Temperatura máxima (°C) .....	77
<b>Figura 20</b>	Correlación de Pearson entre el Área de cobertura vegetal del bofedal (ha) y la Temperatura mínima (°C).....	78



## ÍNDICE DE ANEXOS

	<b>Pág.</b>
<b>ANEXO 1</b>	Solicitud enviada al presidente de la comunidad Talaca Huaylluni..... 93
<b>ANEXO 2</b>	Reporte final de Agisoft Metashape Profesional..... 94
<b>ANEXO 3</b>	Tabla de composición florística de la microcuenca de Potojani Grande 2023 ..... 95
<b>ANEXO 4</b>	Panel fotográfico ..... 97
<b>ANEXO 5</b>	Distribución de datos faltantes en las Estaciones Ilave, Laraqueri y Puno ..... 101
<b>ANEXO 6</b>	Distribución de datos completos en las Estaciones Ilave, Laraqueri y Puno ..... 102
<b>ANEXO 7</b>	Registro de precipitación acumulada mensual (mm) Estación Ilave periodo 2003-2023 ..... 103
<b>ANEXO 8</b>	Registro de temperatura máxima mensual (°C) Estación Ilave periodo 2003-2023 ..... 104
<b>ANEXO 9</b>	Registro de temperatura mínima mensual (°C) Estación Ilave periodo 2003-2023 ..... 105
<b>ANEXO 10</b>	Registro de precipitación acumulada mensual (mm) Estación Laraqueri periodo 2003-2023 ..... 106
<b>ANEXO 11</b>	Registro de temperatura máxima mensual (°C) Estación Laraqueri periodo 2003-2023 ..... 107
<b>ANEXO 12</b>	Registro de temperatura mínima mensual (°C) Estación Laraqueri periodo 2003-2023 ..... 108
<b>ANEXO 13</b>	Registro de precipitación acumulada mensual (mm) Estación Puno periodo 2003-2023 ..... 109



<b>ANEXO 14</b>	Registro de temperatura máxima mensual (°C) Estación Puno periodo 2003-2023 .....	110
<b>ANEXO 15</b>	Registro de temperatura mínima mensual (°C) Estación Puno periodo 2003-2023 .....	111
<b>ANEXO 16</b>	Resumen de test de tendencia Man-Kendall para los valores de estudio .....	112
<b>ANEXO 17</b>	Lista de mapas temáticos .....	114
<b>ANEXO 18</b>	Declaración jurada de autenticidad de tesis .....	115
<b>ANEXO 19</b>	Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional .	116



## ACRÓNIMOS

ASTER GDEM:	Aster Global Digital Elevation Model
BSI:	Índice de Suelo Desnudo
DEM:	Modelos Digitales de Elevación
DSI:	Índice de Severidad de Sequia
ETM+:	Enhanced Thematic Mapper Plus
GEE:	Google Earth Engine
GPS:	Global Positioning System
ha:	Hectáreas
IDW:	Distancia Inversa Ponderada
INAGEM:	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña
IRC:	Infrarrojo Cercano
IRM:	Infrarrojo Medio
LANDSAT:	Misión satelital de observación terrestre de la NASA y la USGS
M S.N.M.:	Metros Sobre el Nivel del Mar
MINAM:	Ministerio del Ambiente del Perú
MSS:	Multispectral Scanner
NDMI:	Normalized Difference Moisture Index
NDVI:	Normalized Difference Vegetation Index
NDWI:	Normalized Difference Water Index
OLI:	Operational Land Imager
PISCO:	Peruvian Interpolated data of the SENAMHI's Climatological and hydrological Observations



R <sup>2</sup> :	Coefficiente de Correlación
RAMSAR:	Grupo de Examen Científico y Técnico de la Convención sobre Humedales
SAVI:	Índice de Vegetación Ajustado al Suelo
SENAMHI:	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
SIG:	Sistemas de Información Geográfica
TIRS:	Thermal Infrared Sensor
TM:	Thematic Mapper
USGS / EROS:	Centro de Observación y Ciencia de los Recursos Terrestres
UTM:	Sistema de coordenadas Universal Transversal de Mercator
WGS:	World Geodesic System



## RESUMEN

Los bofedales son ecosistemas frágiles que desempeñan un papel crucial en el mantenimiento de la biodiversidad y en la economía de las regiones andinas. A pesar de su importancia, han sufrido una considerable degradación debido a perturbaciones tanto antropogénicas como naturales a lo largo de las últimas décadas. El estudio se realizó en la microcuenca de Potojani Grande, que tiene un área de 1450.68 ha, ubicada en la región de Puno. El clima se caracteriza por ser frío y moderadamente lluvioso, con una temperatura máxima promedio de 16.3°C y una mínima de 1.88°C. Las precipitaciones anuales promediaron 721.24 mm, con una tendencia decreciente en los últimos años. El objetivo principal del presente estudio es el análisis multitemporal del área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande en el periodo de 2003 a 2023 (21 años). La metodología del presente estudio se basó en el uso de clasificación supervisada de imágenes Landsat e índices espectrales NDVI, NDMI, NDWI, BI, SAVI y DSI a través del método Random Forest, implementada en la plataforma Google Earth Engine. Los resultados identifican una disminución significativa del área de cobertura vegetal del bofedal de 248.85 ha, a 187.92 ha, entre 2003 y 2023 lo que representa una pérdida de 60.93 ha, (24.48%). Las familias más abundantes en la composición florística son: Poaceae, Asteraceae, Cyperaceae, Plantaginaceae y Rosaceae. El análisis de correlación y regresión indicaron que la relación entre el área de cobertura vegetal del bofedal y la precipitación pluvial tiene un  $R^2$  de 0.53, mientras que la relación con la temperatura máxima presenta un  $R^2$  de -0.42. Se concluye que la precipitación y temperatura máxima son las que influyen en la dinámica espacial del bofedal.

**Palabras Clave:** Análisis multitemporal, Bofedales, Clasificación de imágenes, Índices espectrales, Random Forest.



## ABSTRACT

Wetlands are fragile ecosystems that play a crucial role in maintaining biodiversity and in the economy of the Andean regions. Despite their importance, they have suffered considerable degradation due to both anthropogenic and natural disturbances over the past decades. The study was conducted in the micro-watershed of Potojani Grande, which has an area of 1450.68 ha, located in the Puno region. The climate is characterized by being cold and moderately rainy, with an average maximum temperature of 16.3 ° C and a minimum of 1.88 ° C. Annual rainfall averaged 721.24 mm, with a declining trend in recent years. The main objective of this study is the multitemporal analysis of the plant cover area of the Potojani Grande micro-watershed in the period 2003 to 2023 (21 years). The methodology of this study was based on the use of supervised classification of Landsat images and spectral indices NDVI, NDMI, NDWI, BI, SAVI and DSI through the Random Forest method, implemented on the Google Earth Engine platform. The results identify a significant decrease in the area of vegetation coverage of the Wetlands from 248.85 ha to 187.92 ha between 2003 and 2023, representing a loss of 60.93 ha (24.48%). The most abundant families in the floristic composition are: Poaceae, Asteraceae, Cyperaceae, Plantaginaceae and Rosaceae. The correlation and regression analysis indicated that the relationship between the area of vegetation cover of the Wetlands and the rainfall has an  $R^2$  of 0.53, while the relation to the maximum temperature has an  $R^2$  of -0.42. It is concluded that precipitation and maximum temperature influence the spatial dynamics of the Wetlands.

**Keywords:** Multitemporal analysis, Wetlands, Classification of images, Spectral indices, Random Forest



# CAPÍTULO I

## INTRODUCCIÓN

Diversos estudios coinciden en que el cambio climático está afectando el funcionamiento de los ecosistemas. Y como consecuencia se evidencia la reducción o extinción de glaciares, lagunas y bofedales, lo que repercute significativamente en los recursos hídricos (Gutiérrez, 2018).

En la microcuenca de Potojani Grande, ubicada en la región de Puno, se extiende 187.92 has. de bofedal que constituyen un recurso vital para las comunidades locales, proporcionando servicios ecosistémicos esenciales, como la regulación hídrica y ser la principal fuente de alimentación para el ganado andino (Flores et al., 2014). A pesar de su importancia, estos ecosistemas enfrentan desafíos significativos derivados de cambios en las condiciones climáticas, amenazando su estabilidad y funcionalidad a mediano y largo plazo.

La presente investigación se basó en la técnica de análisis multitemporal mediante el uso de imágenes satelitales, así mismo, se examinó la correlación entre estos cambios y las variaciones climáticas registradas en la zona de investigación. Además, se realizó visitas de campo para establecer puntos georreferenciados para diferentes clases de cobertura que son necesarias para la clasificación supervisada de áreas de cobertura vegetal del bofedal; este proceso permite integrar las imágenes satelitales de manera efectiva en la plataforma Google Earth Engine (GEE), período 2003 - 2023 (21 años).

La investigación es relevante, ya que involucra a comunidades que dependen de su ganadería. Básicamente se desarrollan a base del forraje del bofedal, por estar en una



zona de puna donde los pastos no son de buena calidad; es importante considerar los cambios para la toma de decisiones.

## 1.1 PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

A nivel mundial, el cambio climático se ha convertido en el problema al cual todos los países sin excepción vienen enfrentando. Las masas glaciares, los bofedales o humedales altoandinos y la biodiversidad son los ecosistemas más vulnerables y están en constante amenaza debido a la variabilidad climática provocada por el cambio climático. Esta variabilidad afecta el área de cobertura vegetal de estos ecosistemas, poniéndolos en riesgo. Se considera que el cambio climático está provocando profundas modificaciones en los ecosistemas (Uribe, 2013).

El altiplano peruano, y en particular el clima de esta región, se encuentra inmerso en la variabilidad climática que se viene manifestando a nivel mundial como consecuencia del cambio climático. Al igual que en otras partes del mundo, Puno no es ajeno a la pérdida de bofedales debido a esta variabilidad climática.

En las últimas décadas del siglo XX y las dos primeras décadas del siglo XXI, se ha observado con mucha preocupación que la variabilidad climática se ha asentado especialmente en la zona andina. Esto se puede verificar mediante la alteración de las precipitaciones pluviales tanto en el tiempo como en el espacio. Es decir, hay años de mucha precipitación pluvial que alternan con años de precipitaciones mínimas, los cuales se aproximan con épocas de sequía. Asimismo, otras variables que afectan el área de cobertura vegetal del bofedal son las actividades antropogénicas, como el sobrepastoreo y el cambio de uso del suelo, convirtiendo los bofedales en áreas de cultivo. Se considera que la mayor influencia en la pérdida de área de cobertura vegetal está dada por las variables climáticas, en mayor medida por la precipitación y la temperatura. Si estos



cambios de variabilidad climática se mantienen o incrementan, los bofedales corren el riesgo de degradarse, lo que afectaría la seguridad hídrica, captura de carbono, forraje para alimentar el ganado y consecuentemente la economía del productor agropecuario.

En consecuencia, la investigación actual se enfoca en analizar los cambios en la reducción de área de cobertura vegetal del bofedal, utilizando Sistemas de Información Geográfica (SIG) y aplicando la técnica de análisis multitemporal durante el periodo 2003 – 2023 (21 años) empleando imágenes satelitales Landsat. Este enfoque nos permitirá establecer si se están produciendo cambios significativos en dicha cobertura. En caso de confirmarse la existencia de estos cambios, podríamos identificar y desarrollar estrategias que minimicen el efecto de la variabilidad climática. Esto permitiría el mantenimiento del bofedal y ofrecería una posibilidad de sostenibilidad para la economía de los productores andinos. El objetivo principal es analizar las áreas de cobertura vegetal donde se genera mayores cambios con la pérdida de cobertura vegetal.

### **1.1.1 Problema general**

- ¿En qué, medida el bofedal de la microcuenca de Potojani Grande ha disminuido su área de cobertura vegetal a lo largo del tiempo como consecuencia de la variabilidad climática periodo 2003 - 2023?

### **1.1.2 Problemas específicos**

- ¿Qué porcentaje de cambio se ha dado en el área de cobertura vegetal del bofedal, microcuenca Potojani Grande, período 2003 - 2023?
- ¿Cuál es la relación entre el cambio de área de cobertura vegetal del bofedal y la variabilidad climática en la microcuenca de Potojani Grande, período 2003 – 2023?



## **1.2 HIPÓTESIS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.2.1 Hipótesis general**

- El área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande se mantiene estable frente a la variabilidad climática periodo 2003 – 2023.

### **1.2.2 Hipótesis específicas**

- Mediante el uso de teledetección satelital es posible establecer los cambios de área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande, periodo 2003 – 2023.
- Las variables, precipitación pluvial y temperatura son las que ejercen una mayor influencia en el cambio de área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande, periodo 2003 – 2023.

## **1.3 JUSTIFICACIÓN DE LA INVESTIGACIÓN**

La presente investigación se realiza con el propósito de abordar el problema de los cambios dinámicos del área de cobertura vegetal del bofedal en la microcuenca de Potojani Grande, respondiendo a demandas sociales y científicas. Diversos estudios realizados en la región han evidenciado la necesidad de comprender y monitorear estos cambios debido a su potencial impacto en el medio ambiente y el bienestar de las comunidades locales (Gutiérrez, 2018).

En este contexto, se identifica la falta de estudios recientes que caractericen de manera integral los patrones de cambios que ocurren en los bofedales de la cuenca Ilave-Puno. Es fundamental contar con información actualizada y precisa sobre las tasas de



cambio y los factores impulsores de dichos cambios para poder desarrollar estrategias de manejo adecuadas y promover un desarrollo sostenible en la región de Puno.

Considerando la importancia de los bofedales, por ser ecosistemas heterogéneos, cuyas interacciones han sido poco estudiadas, en la región Puno, el estudio cobra relevancia, por ser ecosistemas altamente productivos; así mismo, por ser cuna de diversidad biológica y por su alta capacidad de retención de agua que favorece la producción primaria, la cual es vital para el desarrollo de la ganadería alto andina.

Ante este panorama, la población alto andina, se ve afectada colateralmente por estos problemas, cabe mencionar que, uno de los principales servicios ecosistémicos de los bofedales es la provisión de agua para las poblaciones asentadas cercanas a ellos, ya que, estas poblaciones viven de la crianza de animales que, se alimentan en estos ecosistemas y, son la base de su sustento económicos. Por lo que, si no se logra entender la problemática de su fragilidad ante los cambios por las alteraciones climáticas, en un futuro, estaríamos enfrentando un debilitamiento en la economía de los pobladores alto andinos, consiguientemente un incremento de procesos de migración a zonas urbanas, en donde estos pobladores tienen pocos recursos para su subsistencia.

Es en este sentido que, el presente estudio pretende identificar los cambios producidos en el área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande de la región Puno, realizando análisis multitemporal durante un periodo de 21 años, para proponer estrategias de manejo y conservación del bofedal en beneficio de los pobladores alto andinos.

En resumen, este estudio se justifica porque es necesario llenar los vacíos de conocimiento existentes y proporcionar información actualizada sobre los patrones de cambios que ocurren a través del tiempo en área de cobertura vegetal del bofedal de la



microcuenca de Potojani Grande. Se espera que el análisis multitemporal y las tasas de cambio ayude en la creación de políticas y estrategias de gestión que fomenten el progreso sostenible y la protección de los bofedales en la región.

## **1.4 OBJETIVOS DE LA INVESTIGACIÓN**

### **1.4.1 Objetivo general**

- Analizar de cambios multitemporales del bofedal y su relación con la variabilidad climática en la microcuenca de Potojani Grande, período 2003 - 2023 Puno, Perú.

### **1.4.2 Objetivos específicos**

- Determinar mediante teledetección espacial los cambios de área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande, periodo 2003 - 2023.
- Establecer qué variable climática, influye en mayor medida en el cambio de área de cobertura vegetal del bofedal, microcuenca Potojani Grande, durante el periodo 2003 – 2023.



## CAPITULO II

### REVISIÓN DE LITERATURA

#### 2.1 ANTECEDENTES

##### 2.1.1 Locales.

Loza & Taype, (2021), en su investigación “Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú”, presenta una importante contribución de nuevos registros para Puno, donde destacan: Que las áreas de cultivo aumentaron desde 5133 ha. (27 %) a 7115 ha. (37 %) de la superficie distrital; se extendieron suelos degradados desde 35 a 120 ha, áreas con escasa vegetación de 17 a 30 ha. y se redujeron humedales de 179 a 29.7 ha. La cobertura urbana crece a un 40.7 % anual. El aprovechamiento del suelo, sin base en un ordenamiento territorial, condujo al detrimento de la vegetación, y comprometió el aprovechamiento sostenible de recursos naturales.

En el estudio realizado por Cabana (2020), se llevó a cabo un análisis multitemporal de la dinámica de cambio en la cobertura/usos del suelo en el distrito de Paratía, provincia de Lampa, departamento de Puno, durante el período comprendido entre 1988 y 2016. Utilizando imágenes del sensor Landsat, se observó una pérdida anual promedio de cobertura vegetal (-0.05%) y cuerpos de agua (-0.23%), mientras que el suelo desnudo experimentó un incremento anual promedio (0.26%) y la superficie de rocas también aumentó (0.05%). Se determinó que la minería fue la principal causa espacial que influyó en la dinámica de cambio del suelo.



El estudio realizado por Gutiérrez (2018), titulado “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” se enfocó en determinar el grado de correlación entre la dinámica espacial de los bofedales los años 1984 a 2016. Con el uso de algoritmos de Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada (NDVI), mediante imágenes satelitales Landsat 5 y Landsat 8, como resultado obtuvo un coeficiente Kappa de 0.85, y una precisión de mapa de 96.68%. Concluye que el factor climático es el más determinante en el comportamiento de los bofedales.

### **2.1.2 Nacionales**

Castillo (2022), en su tesis titulado “Análisis multitemporal de la dinámica glaciaria y su influencia sobre lagunas y humedales altoandinos en la cordillera blanca - Perú, periodo 1989 - 2019” analizó la influencia, dinámica glaciaria sobre las lagunas y humedales altoandinos en la cordillera blanca, dentro de las unidades hidrográficas Lullán, Quillcay y Yanayacu. Mediante la técnica de análisis multitemporal (1989 - 2019), utilizando imágenes Landsat, luego, se aplicaron pruebas estadísticas de ACP y correlación lineal para evaluar el nivel influencia. Los resultados indican que los glaciares perdieron entre 22 - 56% y 24 - 63% de su área y volumen, respectivamente. El retroceso promedio del frente glaciario estuvo entre 10 -18 m/año y la ELA se elevó entre 137 - 227 m.

Por otro lado, Pamo & Oscco (2022), en su estudio titulado “Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección” evaluaron los cambios ocurridos en el bofedal de la comunidad de Ancomarca, ocurrido entre



1990 y 2021, mediante técnicas de teledetección. Los resultados revelan una disminución en el área de bofedal durante un período de 31 años, desde 1990 hasta 2021, con cifras de 629.01 ha. y 551.07 ha. respectivamente. Esta reducción totaliza 77.94 ha. con una tasa anual de cambio de -0,42%. (Pauca et al., 2020). La posible correlación de esta pérdida de área de bofedal se atribuye a la sobreexplotación de aguas subterráneas, el sobrepastoreo y las influencias del cambio climático.

Samaniego (2021), en su tesis de maestría titulada “Análisis multitemporal de cobertura y dinámica geomorfológica de la microcuenca Shucos, del cantón Loja”, sus resultados del análisis espacial muestran que la cobertura forestal disminuyó significativamente durante el período de análisis, es decir, pérdida de 218,46 ha. ocupada por un ligero aumento de vegetación arbustiva (34.50 ha.), bosque de ribera (19.59 ha.), tierra artificial. (58.76 ha.) y principalmente por el importante aumento de la superficie baldía (105.82 ha.). Mientras que la tasa anual de cambio de vegetación calculada para los cuatro tipos de uso de suelo identificados (bosque, vegetación arbustiva, pastizal, suelo desnudo) es de 2.26%, 3.83%, respectivamente, 3.84%, 4.48%, lo que demuestra la diferencia disponible, independientemente de si las diferentes medidas de cobertura están en la cuenta de pérdidas y ganancias.

Según Carranza & Tasilla (2020), en su investigación “Pérdida de cobertura vegetal en el distrito de Morales, San Martín, Perú (período 1987 – 2017)”, evaluaron la pérdida de cobertura vegetal. Utilizando el método de análisis multitemporal, mediante la técnica de clasificación supervisada con el Software ArcMap. Los resultados que obtuvieron fueron, en el período de 1987 - 1997 la se perdieron 948.42 ha. en el período 1997 - 2007 la reducción fue de



81.83 ha. y en el periodo 2007 - 2017 la pérdida fue de 59.26 ha. La conclusión a la que llegan es que el distrito de Morales está experimentando una disminución en su cobertura vegetal, siendo el aumento demográfico el factor principal.

Calvo (2016), en su tesis “Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de bofedales de alta montaña”, da a conocer que, mediante modelos de simulación se establece que, si el avance en el retroceso glacial continúa, la mitad de la superficie de los bofedales habría desaparecido para el año 2050; por lo que, su estudio contempla desarrollar un marco conceptual metodológico para estimar el estado de salud de bofedales en base a atributos e indicadores de estructura y función del ecosistema.

### **2.1.3 Internacionales**

Jing et al. (2024), es su investigación “Análisis de los cambios espaciotemporales en la cobertura terrestre global de 2001 a 2020”. Emplearon parámetros estadísticos como el grado dinámico de la cobertura terrestre, la probabilidad de transición y la matriz de transición para analizar las características espaciotemporales de los cambios globales en la cobertura terrestre de 2001 a 2020. Los resultados indicaron que la cobertura terrestre exhibe una distribución latitudinal en regiones de latitudes medias y una distribución longitudinal en regiones de latitudes altas y bajas. Durante el período de su estudio, las áreas de bosques de hoja perenne, bosques de hoja caduca, bosques de hoja ancha de hoja caduca, matorrales cerrados y humedales permanentes exhibieron cambios fluctuantes. Los bosques siempreverdes de hoja ancha y las tierras áridas han disminuido anualmente, mientras que los bosques mixtos, las sábanas leñosas, los



pastizales, las áreas urbanas y urbanizadas y los mosaicos de tierras de cultivo y vegetación natural han aumentado anualmente.

Como dicen Ngo et al. (2023), en su investigación “Evaluación de las fluctuaciones en las áreas de ecosistemas de humedales resultantes de actividades antropogénicas en la comuna de Dong Rui, provincia de Quang Ninh, Vietnam” En este estudio, utilizaron imágenes satelitales multitemporales integradas con un método de estudio de campo verificado para mapear la cobertura del ecosistema de humedales en la comuna de Dong Rui, distrito de Tien Yen, provincia de Quang Ninh, Vietnam, cinco veces durante cuatro períodos de 1975 a 2022. con alta precisión (precisión general = 92.3%, Kappa = 0.91). Los resultados mostraron que entre 1975 y 2000, la superficie de bosques de manglares disminuyó drásticamente (en casi 2000 ha.), debido principalmente a políticas de desarrollo y conversión del uso de la tierra. Entre 2000 a 2022, la superficie de manglares se restauró gradualmente, mientras que la superficie dedicada a la acuicultura se redujo.

Murugan et al. (2022), en su investigación “Evaluación de la detección de cambios en la cobertura del uso del suelo en imágenes satelitales multitemporales utilizando algoritmos de aprendizaje automático”. Donde su objetivo principal fue obtener un análisis cuantitativo de los cambios LULC en Madurai (3,742 km<sup>2</sup>), Tamil Nadu, India, utilizando el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) y maximum likelihood clasificación (MLC). Los resultados de esta investigación demostraron que las clases LULC se reconocieron con precisión en MLC con una precisión del 91 % con un valor Kappa de 0.89 y NDVI con una precisión del 92 % con un valor Kappa de 0.90. Por lo tanto, afirman que esta



técnica es conveniente para planificar y ejecutar decisiones de manejo críticas para preservar la biodiversidad.

Fahad et al. (2020), en su investigación titulada “Análisis espacial-temporal del uso del suelo y detección de cambios en la cobertura del suelo mediante técnicas de teledetección y SIG”. Exploraron la variación del uso y la cobertura del suelo que tuvo lugar durante aproximadamente 28 años, entre 1990 y 2018. Donde los resultados de precisión de la clasificación para 1990 y 2018 es 85.13% y 88.22% respectivamente. La detección de cambios explica que lo urbano ha subido un 3%, los humedales han disminuido un 17 %, y las zonas de vegetación también han disminuido un 5 %, al igual que las masas de agua 1 %. Mientras tanto, las superficies de suelo han aumentado un 20%. (Feng et al., 2017). Este enfoque permite comprender las dinámicas espaciales y temporales de la vegetación y el uso de la tierra, e identificar los factores que impulsan estos cambios.

Loza et al., (2015), en su investigación “Comunidades vegetales de bofedales de la Cordillera Real (Bolivia)”, concluye en que, los efectos del cambio climático podrían alterar las comunidades vegetales indirectamente.

Muro et al. (2020), efectuaron la investigación titulada “Métricas ópticas y de radar multitemporales para la cartografía de humedales a nivel nacional en Albania”, en esta investigación afirma que los humedales son muy dinámicos y muchos factores naturales y antropogénicos provocan cambios estacionales, periódicos o permanentes en su estructura y composición. Para ello, utilizaron series temporales de imágenes para realizar clasificaciones y seguimiento precisos. Utilizaron todas las imágenes Sentinel-1 y Sentinel-2 disponibles para



producir un mapa nacional de humedales para Albania, logrando una precisión general del 82%.

## **2.2 MARCO TEÓRICO**

### **2.2.1 Hidrología**

La hidrología es la ciencia que se encarga del estudio del agua en la naturaleza (Campos et al., 2016) , y de los procesos que ella se da, como la distribución, circulación, cantidad y calidad del agua sobre y debajo de la superficie terrestre, y su relación con el medio ambiente, incluyen a los seres vivos. (Gowri et al., 2021; Veettil et al., 2022; Villón, 2020).

### **2.2.2 El ciclo hidrológico**

Se denomina ciclo hidrológico, al conjunto de cambios que experimenta el agua en la naturaleza, tanto en su estado (sólido, líquido, gaseoso), como en su forma (agua superficial, agua subterránea, etc.). Como todo ciclo, el hidrológico no tiene ni principio ni fin, y su descripción puede comenzar en cualquier punto. El agua que se encuentra en la superficie terrestre, ríos, lagos y mares, se evapora bajo el efecto de la radiación solar y el viento (Villón, 2020). El ciclo hidrológico es irregular, y es precisamente contra estas irregularidades que lucha el hombre (Chereque, 2005).

### **2.2.3 Humedales**

Los humedales se definen como extensiones o superficies que están saturadas de agua, napa freática sobre o muy cerca al nivel del suelo (Fuentealba, 2019), ya sea bajo un régimen hídrico natural o artificial, que puede ser permanente o temporal y está regulado por factores climáticos (MINAM, 2015a).



Estos ecosistemas mantienen una constante interrelación con los seres vivos que los habitan, proporcionando diversos servicios ecosistémicos en la protección de los recursos hídricos la regulación del clima, la purificación del aire, la conservación de la ecología, la supervivencia de las especies, la resistencia a la sequía y el almacenamiento de agua y producir forraje para los animales además retiene nutrientes y secuestra carbono (Amani et al., 2021). Se pueden clasificar en categorías distintas, como humedales costeros, humedales andinos y humedales amazónicos, según (MINAM, 2015b).

#### **2.2.4 Bofedal**

El término “bofedales” se usa para describir zonas con vegetación hidrófila (INAIGEM, 2023; Maldonado, 2014), considerados como ecosistema andino hidromórfico, que se presenta en los Andes sobre suelos planos, su vegetación es densa y compacta siempre verde, de porte almohadillado o en cojín; la fisonomía de la vegetación corresponde a herbazales de 0.1 a 0.5 metros; este tipo de ecosistema es considerado un humedal andino (INAIGEM, 2023). En muchas partes del país estos ecosistemas son conocidos como “occonales” que en quechua significa “zona húmeda” sus aguas son subterráneas y se originan en los arroyos de los glaciares, el deshielo y la lluvia son las fuentes de agua de estas turberas. (Maldonado, 2014).

#### **2.2.5 Importancia de los bofedales**

Los bofedales desempeñan un papel fundamental como sistemas socio-hidrológicos que aportan a la sostenibilidad de los ecosistemas de montaña a lo largo de la cordillera de los Andes (Yager et al., 2021). Estos ecosistemas tienen la capacidad de regular tanto el almacenamiento como los flujos de agua, además



de destacarse por su riqueza en biodiversidad, al albergar una variada comunidad de especies vegetales y animales (Meneses et al., 2014). Indica que presentan tasas elevadas de captura de carbono, lo que los consolida como elementos esenciales dentro del sistema climático tanto a nivel regional como global. (Buytaert et al., 2011; Hribljan et al., 2015). Además, estos lugares son centros activos para las comunidades indígenas de las tierras altas, las cuales los administran para llevar a cabo actividades de pastoreo (Yager et al., 2019).

### **2.2.6 Clasificación de los bofedales**

Los bofedales actualmente son clasificados por diversos criterios, tales como el piso altitudinal, la ubicación, las condiciones climáticas, el almacenamiento de agua entre otros. (Alzérreca, 2001). Así, los bofedales se ubican en el Altoandino semihúmedo, altiplano semihúmedo, altiplano semiárido y altoandino semiárido y árido. Además, para los bofedales ubicados entre 4000 y 4500 m.s.n.m. encontraron tres tipos de bofedales: bofedales estacionales, bofedales siempre húmedos y bofedales con riego artificial. También, existen 3 tipos de bofedales según condiciones hídricas: bofedal con agua permanente, altamente productivo y de rápida recuperación; bofedal temporal que se seca temporalmente; y bofedal tipo halófilo con agua salada temporal. (Crispin, 2015; León, 2016).

### **2.2.7 Sistemas de información geográfica**

Los Sistemas de Información Geográfica (SIG) son una disciplina integral que combina componentes de topografía, geografía, teledetección y cartografía, además de la informática. De esta manera, proporciona herramientas fundamentales para áreas como la planificación urbana, logística, navegación y

cartografía, entre otros campos (Zhou et al., 2020). Compuesto por un conjunto ensamblado de hardware, software y datos geográficos, los SIG están diseñados para facilitar la adquisición, almacenamiento, modificación, gestión y el análisis de datos. También permite una comprensión profunda que es necesaria para evaluar los hábitats y crear inventarios para los administradores de recursos naturales. Esto los hace esenciales para el desarrollo de modelos y para identificar cambios en el paisaje a lo largo del tiempo (Merry et al., 2023; Vankova et al., 2021). En esencia, los SIG funcionan como sistemas sofisticados de bases de datos con capacidades avanzadas de procesamiento de datos, actuando efectivamente como mapas de orden superior que permiten análisis espaciales complejos y una toma de decisiones informada (Olaya, 2020).

#### **2.2.8 Teledetección**

La teledetección o percepción remota (Remote Sensing), es una disciplina científica (Di Leo, 2015), mediante la cual se puede identificar las características de objetos de interés o de igual forma se pueden analizar dichas características sin la necesidad de realizar contacto directo con el objeto (Congedo, 2022). Técnica que nos permite adquirir imágenes de la superficie terrestre desde sensores instalados en plataformas espaciales a través de la energía electromagnética que emiten o reflejan. (Chuvieco, 2008).

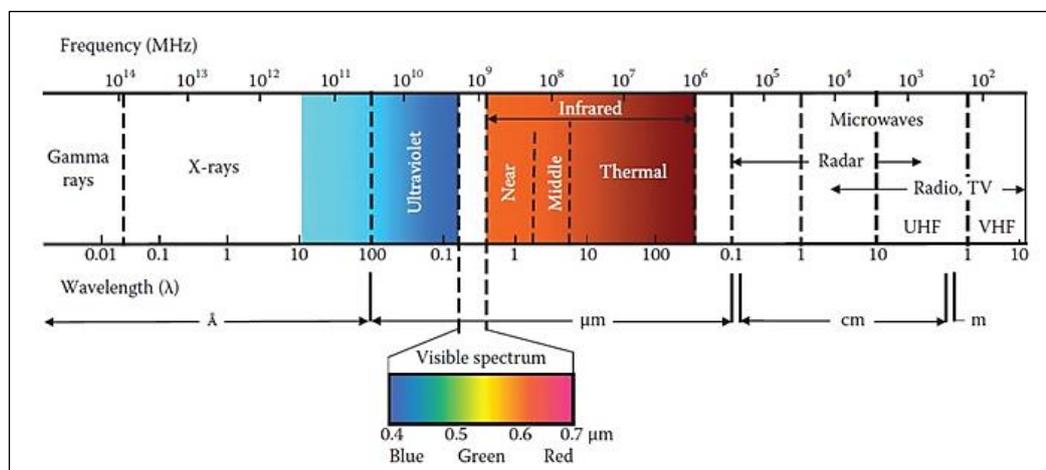
#### **2.2.9 Espectro electromagnético**

El espectro electromagnético engloba todas las formas de radiación electromagnética, organizándose en un continuo de longitudes de onda que varían desde los rayos gamma, con las longitudes de onda más cortas, hasta las ondas de radio, que presentan las longitudes más largas. Esta clasificación se estructura en

función de las longitudes de onda y las correspondientes frecuencias, las cuales se miden en Hertz, abarcando un espectro que va desde micrómetros hasta varios kilómetros. Según (Chuvieco, 2008), los sensores pasivos miden la energía en la región óptica del espectro electromagnético, que incluye el visible, infrarrojo cercano (IR), infrarrojo medio (SWIR), y el infrarrojo térmico. (Olaya, 2020).

**Figura 1**

*Espectro fotomagnético*



Nota: El espectro electromagnético es un espectro continuo de todos los tipos de radiación electromagnética (Chuvieco, 2008).

### 2.2.10 Firma espectral

Las firmas espectrales constituyen una herramienta clave en la identificación y clasificación de distintos objetos o materiales como rocas, vegetación, cuerpos de agua, nieve, suelo desnudo y zonas urbanas. (Castilla, 2016). Estas firmas se basan en la capacidad única de cada material para absorber o emitir radiación en determinadas longitudes de onda, un fenómeno captado tanto por sensores electromagnéticos como por el ojo humano. (Hernández & Montaner, 2009).

$$\% \text{ radiación reflejada} + \% \text{ de absorvida} + \% \text{ de transmitida}$$

### **2.2.11 Big Data**

Hernández-Leal et al. (2017), describen el Big Data como una tendencia creciente, enfocándose en la acumulación y análisis de grandes conjuntos de datos para generar conocimientos útiles en diversas áreas, incluida la ecología. (Guzmán, 2021), afirma que el Big Data es esencial para monitorear los impactos ambientales y abordar problemas y conflictos relacionados con el medio ambiente, gracias a la disponibilidad de información y datos de calidad. (Perilla & Mas, 2020), menciona a Google Earth Engine como una herramienta innovadora para el manejo de Big Data, permitiendo abordar problemas globales y ofreciendo soluciones efectivas en el campo de la ecología.

### **2.2.12 Análisis multitemporal**

Como dicen (Chuvienco, 2008; Ochoa, 2023; Otto et al., 2011; Ozesmi & Bauer, 2014; Ruiz et al., 2013), el análisis multitemporal es una técnica empleada en la interpretación de imágenes satelitales para estudiar los cambios en la superficie terrestre a lo largo del tiempo, que consiste en utilizar imágenes tomadas en diferentes fechas para comparar y analizar cambios. Los datos que se obtienen mediante estos análisis son utilizados para el monitoreo y la gestión efectiva de los recursos naturales, así como para la toma de decisiones en la planificación urbana y la gestión ambiental.

### **2.2.13 Imágenes satelitales y su uso**

Una imagen satelital es una representación visual de la información capturada por un sensor montado en un satélite artificial (Chuvienco, 2008). Estos sensores recogen información reflejada por la superficie de la tierra (Ochoa, 2023). Mediante el análisis estadístico de imágenes, se obtienen información

sobre áreas de interés y crean mapas temáticos que son usados en la interpretación de ciertos eventos naturales (geológicos, medio ambientales, entre otros) y antrópicos, así como en la toma de decisiones en proyectos de ingeniería, gestión del territorio, actividades productivas agricultura, monitorización ambiental, minería, infraestructura y la respuesta a desastres (Sajichandrachood & Sethunadh, 2023).

#### 2.2.14 Programa Landsat

Landsat, es una serie de satélites de observación de la Tierra operados conjuntamente por la NASA y el Servicio Geológico de Estados Unidos, ha proporcionado imágenes multiespectrales y térmicas con cobertura global de la superficie de la Tierra durante más de 50 años. Su última generación, Landsat 9, se lanzó con éxito en septiembre de 2021 y proporciona imágenes de 30 m en 10 bandas espectrales y térmicas con un tiempo de revisita de 16 días. (Peng et al., 2019). Las imágenes de la serie de misiones Landsat se han utilizado ampliamente para rastrear de manera eficiente el uso de la tierra y documentar el cambio de la tierra debido al cambio climático, la urbanización, la sequía, los incendios forestales, los cambios en la biomasa (evaluaciones de carbono) y una serie de otros cambios naturales y causados por el hombre (USGS, 2024).

**Tabla 1**

*Misión cronológica Landsat*

Misión	Desde	Hasta
Landsat 1	julio-1972	enero-1978
Landsat 2	enero-1975	febrero-1982
Landsat 3	marzo-1978	marzo-1983
Landsat 4	julio-1982	diciembre-1993

Misión	Desde	Hasta
Landsat 5	enero-1984	enero-2013
Landsat 7	enero-1999	actualidad
Landsat 8	abril-2013	actualidad
Landsat 9	septiembre-2021	actualidad

Nota: Serie de Landsat y año de su lanzamiento

#### **2.2.14.1 Descripciones de sensores Landsat 5 (TM)**

Landsat 5 está dotado del sensor TM (Thematic Mapper) de siete canales, incluida una banda infrarrojo térmico. La resolución espacial es de 30 metros (USGS, 2024).

#### **2.2.14.2 Descripciones de los sensores Landsat 8- 9 (OLI) y (TIRS)**

Las imágenes consisten en nueve bandas espectrales con una resolución espacial de 30 metros para las bandas 1 a 7 y 9. La banda azul ultra 1 es útil para estudios costeros y de aerosoles. La banda 9 es útil para la detección de nubes cirrus. La resolución para la banda 8 (pancromático) es de 15 metros. Las bandas térmicas 10 y 11 son útiles para proporcionar temperaturas superficiales más precisas y se recogen a 100 metros (USGS, 2024).

#### **2.2.15 Google Earth Engine**

Gorelick et al. (2017), describe la plataforma de Google Earth Engine (GEE), como una herramienta que permite el análisis de datos geoespacial a escala global en la nube utilizando capacidades computacionales masivas de Google y conectado a programas satelitales para la recepción de imágenes. (Solórzano & Perilla, 2022), resaltan que es crucial para abordar problemas sociales y fenómenos ocurridos en la superficie terrestre como la deforestación, las sequías,

los desastres, las enfermedades, la seguridad alimentaria, el manejo del agua, el monitoreo del clima y la protección del medio ambiente.

#### **2.2.16 Definición de índices espectrales**

Los índices espectrales en teledetección son combinaciones matemáticas de las reflectancias capturadas en diferentes bandas del espectro electromagnético por sensores remotos (Hislop et al., 2018). Estas combinaciones están diseñadas para mejorar la correlación entre los índices y los datos obtenidos en campo, reduciendo al mismo tiempo las interferencias no deseadas, como el ruido atmosférico y las distorsiones topográficas, lo cual facilita la interpretación y el análisis de las imágenes satelitales. (Cocke et al., 2005; Matsushita et al., 2007). Su aplicación permite llevar a cabo estudios detallados sobre la salud de la vegetación, el contenido de agua, la detección de incendios forestales y la recuperación de áreas afectadas.

#### **2.2.17 Clasificación supervisada**

Como dicen (Xiang et al., 2023). La clasificación supervisada parte de un cierto conocimiento de la zona de estudio, adquirido por trabajos de campo, esta mayor familiaridad con la zona permite al intérprete delimitar sobre la imagen unas áreas piloto, que se consideran suficientemente representativas de las categorías que componen la leyenda, estas áreas se denominan campos de entrenamiento, el término indica que tales áreas sirven para “entrenar” al ordenador en el reconocimiento de las distintas categorías, en otras palabras, a partir de ellas el ordenador calcula los Niveles Digitales (ND) que definen cada una de las clases, para luego asignar el resto de los píxeles de la imagen a una de esas categorías en función de sus Niveles Digitales (ND). (Chuvieco, 2008).



### **2.2.17.1 Random Forest**

Según Espinosa (2020), Random Forest ofrece varias ventajas, como su capacidad para manejar grandes conjuntos de datos y su utilidad en múltiples campos, incluida la teledetección, esta técnica destaca por su eficacia en clasificación y regresión. (García et al., 2011). Random Forest incrementa la diversidad de los árboles de decisión haciéndolos crecer a partir de diferentes subconjuntos de datos creados mediante un procedimiento denominado bagging, este método está diseñada para la creación de datos de entrenamiento que remuestrea aleatoriamente el conjunto de datos originales con reemplazamiento (Xiang et al., 2023). Por tanto, algunos datos pueden ser usados más de una vez en el entrenamiento de los clasificadores individuales.

### **2.2.18 Indicadores de validación**

La validación de la exactitud temática permite definir el grado de fidelidad de los valores obtenidos en el análisis de cobertura y uso de la tierra, producido por la metodología aplicada con respecto a su verdadera característica encontrada en el mundo real y su clasificación correcta. (MINAM, 2014a). Para esta validación se emplea un conjunto de datos de campo y datos al azar para evaluar la consistencia del mapa, a través de métricas cuantitativas de evaluación: la matriz de confusión, el índice Kappa (IK) y el porcentaje correctamente clasificado (PCC). (MINAM, 2014b).

### **2.2.19 Variabilidad climática.**

Masson-Delmotte (2022). señala que la variabilidad y el cambio climático generan efectos perjudiciales tanto en los seres humanos como en los sistemas



naturales. (Robinson, 2020), advierte sobre los impactos significativos en los procesos hidrológicos y la ocurrencia de inundaciones/sequías extremas en las regiones montañosas, debido a lluvias más intensas y temperaturas más cálidas en el siglo XXI. Es crucial realizar modelados a largo plazo y detectar los caudales máximos de series de caudales para comprender el comportamiento de inundaciones y sequías. (Rao et al., 2015). Siendo la agricultura y la ganadería las actividades más vulnerables,

### **2.2.20 Series de tiempo.**

Desde la posición de (Bustamante, 2013). Los métodos de análisis de series de tiempo tienen en cuenta las posibles características de autocorrelación, tendencia y estacionalidad en los datos recopilados en diferentes períodos. Estos métodos se aplican con dos propósitos: comprender las influencias que actúan sobre los datos y descubrir la estructura que los produjo. La aplicación más común de series de tiempo son pronósticos y análisis hidrológico.

## CAPITULO III

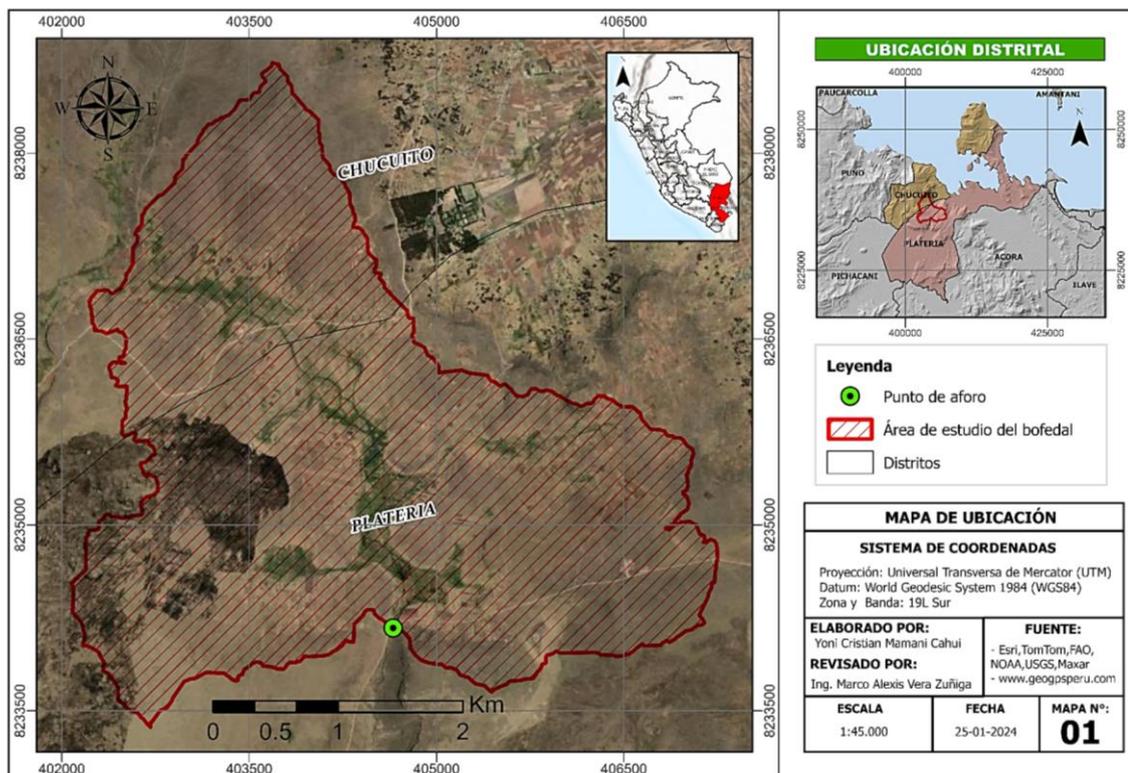
### MATERIALES Y MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDIO

El presente estudio se desarrolló, en el bofedal permanente de la microcuenca de Potojani Grande, ubicado entre los distritos de Chucuito y Platería, provincia y región Puno. Esta microcuenca abarca un área de 1450.68 hectáreas y se encuentra en las coordenadas geográficas UTM/WGS84: 404404mE, 8235593mN y una altitud media de 4041 msnm. Los límites de la microcuenca son: al norte, comunidad Potojani Grande; al este, la comunidad de Potojani Chico; al sur, la comunidad de Quimsapuju; y al oeste, la comunidad de Thalaca Huaylluni.

#### Figura 2

*Mapa de ubicación político de la investigación*





### 3.2 TIPO Y NIVEL DE INVESTIGACIÓN

Por el tipo de estudio, es no experimental debido a que, “las variables independientes ocurren y no es posible manipularlas, no se tiene control directo sobre dichas variables ni se pueden influir en ella, porque se basa principalmente en la observación de cambios a través de periodos de tiempo y sistematización de la estructura horizontal de los ecosistemas, para después hacer inferencias respecto al cambio en función al tiempo de estudio” (Hernández et al., 2014).

**Tipo de investigación:** Descriptivo

**Diseño de investigación:** No experimental - Longitudinal

**Método:** Cuantitativo

### 3.3 TAMAÑO DE MUESTRA

#### 3.3.1 Población

El presente trabajo de investigación considera el análisis de imágenes satelitales con una temporalidad de 21 años correspondientes a la microcuenca de Potojani Grande de la región Puno, cuya área de estudio actual es 187.92 hectáreas.

#### 3.3.2 Muestra

Considerando que, se trabajará con imágenes satelitales y datos climáticos la información data a partir de 21 años (2003 - 2023), sin embargo, para datos actuales, se aplicará el muestreo estratificado aleatorio correspondiente al área de cobertura vegetal del bofedal, agua y escasa vegetación. Los cuales estarán debidamente georreferenciados.



### 3.4 MATERIALES Y SOFTWARES

#### **Materiales:**

- Colección de Imágenes Landsat 5, 8 y 9.
- Drone - DJI Phantom 4 RTK

#### **Software:**

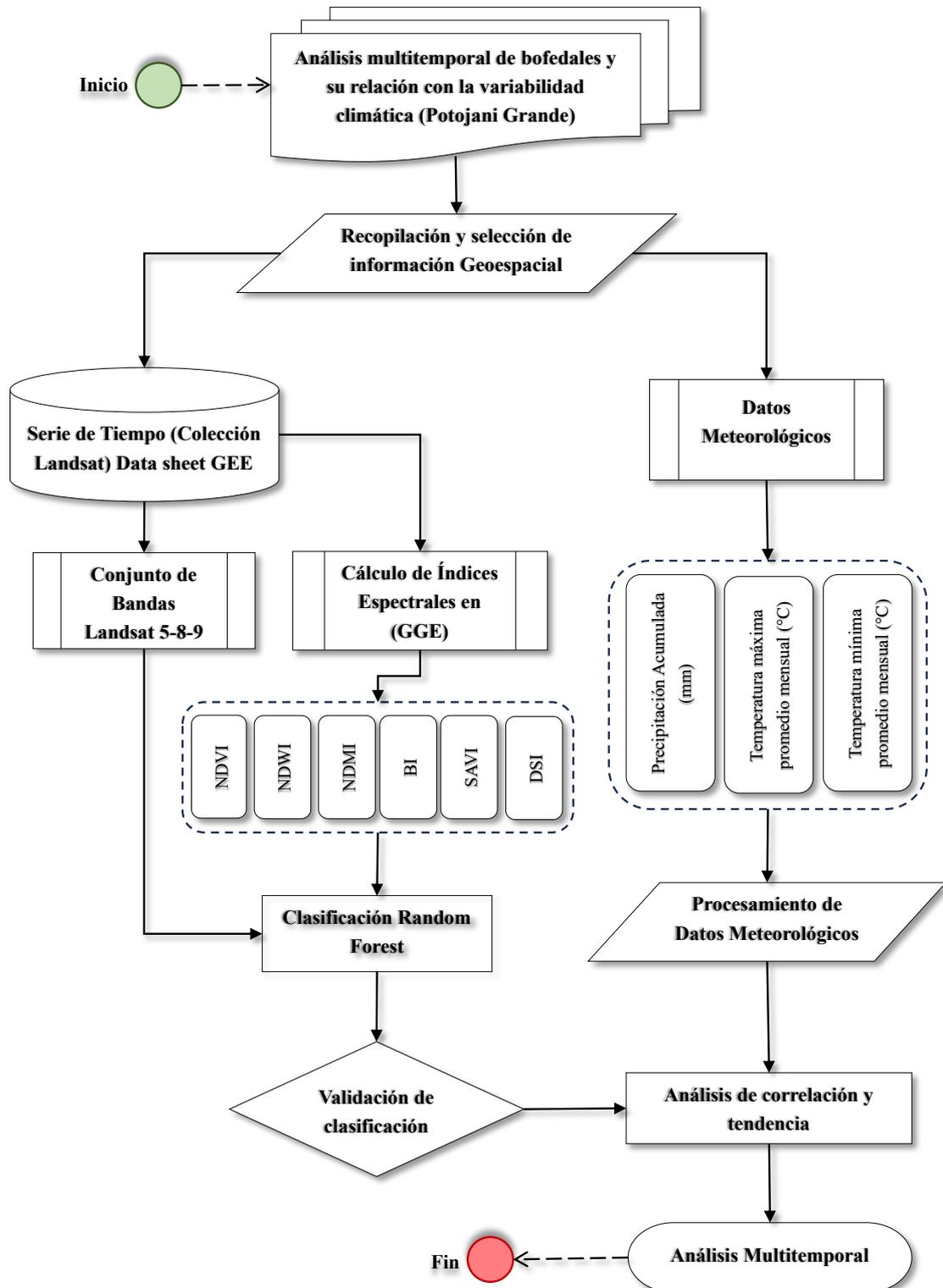
- ArcGIS PRO 3.0.2
- Agisoft Metashape
- Draw.io
- Microsoft Office 365
- RStudio 4.3.2
- Trend V1.0.2

### 3.5 METODOLOGÍA DE TRABAJO

Para este proyecto de investigación se empleó los siguientes procesos como se puede apreciar en la figura N° 3.

**Figura 3**

*Diagrama de flujo que muestra la metodología*



### 3.5.1 Descripción de la metodología

La metodología empleada en esta investigación comienza con la recopilación de información a partir de imágenes satelitales provenientes de diversos sensores, específicamente Landsat 5, 8 y 9 de diferentes años, utilizando 6 bandas multiespectrales en cada una de ellas, los cuales tiene en común, teniendo una resolución espacial de 30 m. según se muestra en la tabla N° 4. Estas imágenes son posteriormente procesadas dentro de la plataforma en línea GEE. Durante el proceso de análisis, se calculan diferentes índices espectrales, como el NDVI, NDMI, NDWI, BI, SAVI y DSI. Estos índices se integran posteriormente a un conjunto de datos provenientes de Landsat, que servirán como la base para la aplicación de la clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest. Este enfoque integral proporciona una base robusta y detallada para el análisis y la interpretación de los datos obtenidos.

**Tabla 2**

*Rangos de longitud de onda de la constelación Landsat*

<b>Bandas</b>	<b>Landsat 5</b>	<b>Landsat 8</b>	<b>Landsat 9</b>
	(TM)	OLI y TIRS	OLI-2 y TIRS-2
Blue	(0.45 – 0.52)	(0.45 – 0.51)	0.452 - 0.512
Green	(0.52 – 0.60)	(0.53 – 0.59)	0.533 - 0.590
Red	(0.63 – 0.69)	(0.64 – 0.67)	0.646 - 0.673
NIR	(0.76 – 0.90)	(0.85 – 0.88)	0.851 - 0.879
SWIR1	(1.55 – 1.75)	(1.57 – 1.65)	1.566 - 1.651
SWIR2	(2.08 – 2.35)	(2.11 – 2.29)	2.107 - 2.294

Nota: La tabla muestra las bandas de las imágenes satelitales utilizadas para calcular los índices espectrales.

### 3.5.2 Establecimiento de puntos de entrenamiento georreferenciados

Se establecieron puntos (georreferenciados para el entrenamiento Random Forest. *in-situ* y gabinete dentro de la plataforma de GEE, para el entrenamiento Random Forest tabla N° 5. Y posteriormente aplicar la clasificación supervisada tomando en cuenta los tipos de cobertura como son: Agua de simbología azul (6), cobertura vegetal del bofedal de simbología verde (67), Escasa vegetación y/o suelo desnudo de simbología rosada (77) como se muestra en la figura N° 4.

**Tabla 3**

*Puntos de entrenamiento georreferenciados in situ 17/08/2023.*

Cód.	Coord E	Coord N	Clase	Descripción
1	403359	8236802	Bofedal	<i>Plantago tubulosa, Elodea potamogetum, Myriophyllum quitense, Azorella diapensioides</i>
2	403342	8236933	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata, Calamagrostis vicunarum, Festuca dolichophylla, Carex spp.</i>
3	403206	8236862	Bofedal	<i>Cyperus rotundus, Plantago tubulosa, Elodea potamogetum, Myriophyllum quitense, Azorella diapensioides, Scirpus rigidus, Carex spp.</i>
4	403129	8236997	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata, Calamagrostis vicunarum, Festuca dolichophylla, Carex spp.</i>
5	402984	8236895	Bofedal	<i>Plantago tubulosa, Elodea potamogetum, Myriophyllum quitense, Alchemilla pinnata, Cyperus rotundus, Scirpus rigidus, Carex spp.</i>
6	403015	8236847	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
7	403100	8236813	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata, Calamagrostis vicunarum, Festuca dolichophylla,</i>
8	403165	8236787	Escasa vegetación	<i>Festuca dolichophylla, Stipa ichu, Carex spp.</i>
9	403627	8236607	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
10	403658	8236591	Escasa vegetación	Trocha, <i>Stipa ichu</i>



Cód.	Coord E	Coord N	Clase	Descripción
11	403728	8236457	Escasa vegetación	<i>Festuca dolichophylla</i> , <i>Carex spp.</i> , <i>Taraxacum officinale</i>
12	403660	8236456	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
13	404540	8236651	Escasa vegetación	Área rural
14	404000	8234640	Bofedal	<i>Scirpus rigidus</i> , <i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> , <i>Azorella diapensioides</i> , <i>Carex spp.</i>
15	403595	8236408	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
16	403666	8236320	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
17	404320	8235557	Escasa vegetación	Área rural
18	404615	8235317	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Scirpus rigidus</i> .
19	403710	8234681	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Scirpus rigidus</i> , <i>Carex spp.</i>
20	404914	8234532	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Scirpus rigidus</i> .
21	404595	8235287	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> , <i>Azorella diapensioides</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Scirpus rigidus</i> , <i>Carex spp.</i>
22	403407	8236675	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Azorella diapensioides</i> , <i>Cyperus rotundus</i> , <i>Scirpus rigidus</i> , <i>Carex spp.</i>
23	403406	8236625	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
24	403431	8236611	Escasa vegetación	Suelo desnudo
25	403472	8236641	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Calamagrostis vicunarum</i> , <i>Festuca dolichophylla</i> ,
26	403329	8236642	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> ,
27	403317	8236557	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Plantago tubulosa</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Cyperus rotundus</i>



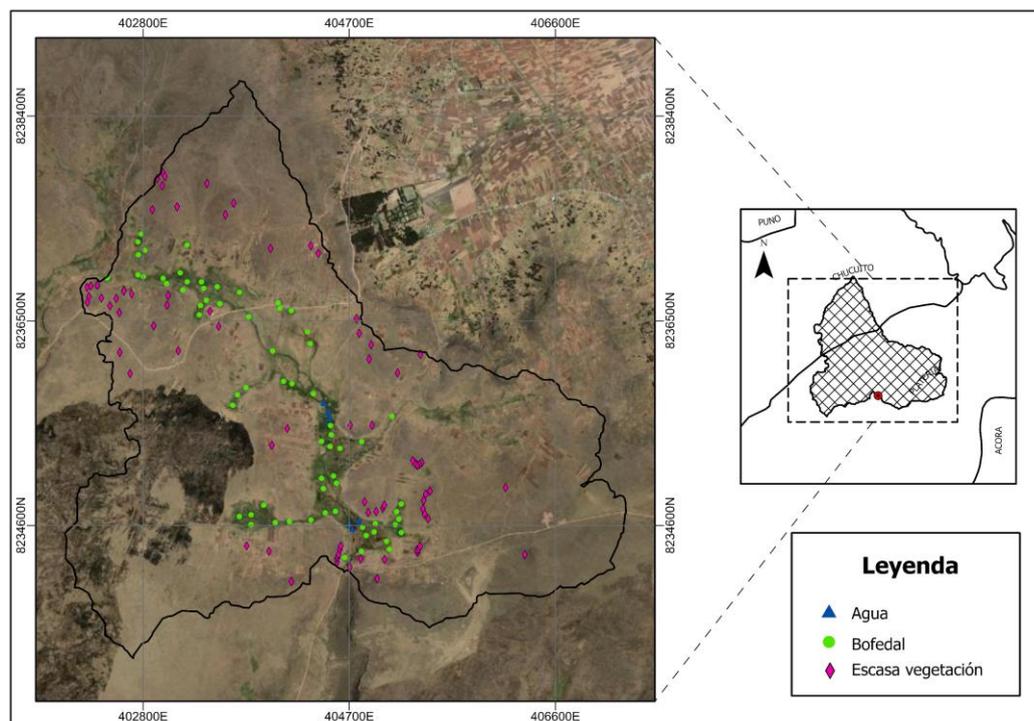
Cód.	Coord E	Coord N	Clase	Descripción
28	403357	8236541	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
29	403387	8236538	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
30	403421	8236578	Escasa vegetación	<i>Tetraglochin cristatum</i> , Suelo desnudo
31	403480	8236590	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
32	403512	8236576	Escasa vegetación	<i>Festuca dolichophylla</i> , <i>Carex</i> spp. <i>Tetraglochin cristatum</i> , <i>Stipa ichu</i>
33	403565	8236615	Escasa vegetación	<i>Festuca dolichophylla</i> , <i>Carex</i> spp., <i>Tetraglochin cristatum</i> , <i>Stipa ichu</i>
34	403773	8236539	Agua	<i>Scirpus rigidus</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> , <i>Cyperus rotundus</i> ,
35	404115	8234605	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Calamagrostis vicunarum</i> , <i>Festuca dolichophylla</i> ,
36	404621	8234633	Bofedal	<i>Cyperus rotundus</i> , <i>Elodea potamogetum</i> , <i>Myriophyllum quitense</i> , <i>Scirpus rigidus</i> , <i>Carex</i> spp.
37	404658	8234176	Escasa vegetación	Rocas, Carretera trocha
38	404805	8234292	Escasa vegetación	Áreas de cultivo
39	404701	8234257	Bofedal	<i>Scirpus rigidus</i> , <i>Festuca dolichophylla</i>
40	404980	8234527	Bofedal	<i>Cyperus rotundus</i> , <i>Isoetes andicola</i> , <i>Scirpus rigidus</i> , <i>Carex</i> spp.
41	405026	8234287	Escasa vegetación	Área de cultivo
42	404707	8234629	Agua	Espejo de agua
43	405133	8234586	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Cyperus rotundus</i> ,
44	404876	8234722	Escasa vegetación	Aforamiento rocoso
45	404887	8235193	Escasa vegetación	Área de cultivo
46	404486	8235100	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Cyperus rotundus</i>
47	404077	8235638	Escasa vegetación	Área de cultivo
48	404462	8235969	Escasa vegetación	Suelo desnudo

Cód.	Coord E	Coord N	Clase	Descripción
49	404507	8235594	Bofedal	<i>Plantago tubulosa</i> , <i>Cyperus rotundus</i>
50	404211	8236286	Bofedal	<i>Alchemilla pinnata</i> , <i>Calamagrostis vicunarum</i> , <i>Festuca dolichophylla</i> , <i>Carex ecuadorica</i> .
51	403336	8237134	Escasa vegetación	Área de cultivo

Nota: El nombre común de las especies se puede ver en el anexo N° 3.

#### Figura 4

*Establecimiento y generación de ee.Feature de tres entradas*



Nota: La imagen detalla que la simbología asigna 3 distintas clases de cobertura. Ficha de puntos de entrenamiento georreferenciados en in-situ 17/08/2023

### 3.5.3 Evaluación de la composición florística a través del método de transecto al paso

Se registró un total de 400 puntos por transecto lineal. Para determinar la composición florística (N° de especies). Se utilizó el método de transecto al paso, estableciéndose 100 metros lineales para cada transecto; para la identificación de especies se utilizó el método de anillo censador a intervalos de 1 metro. Las

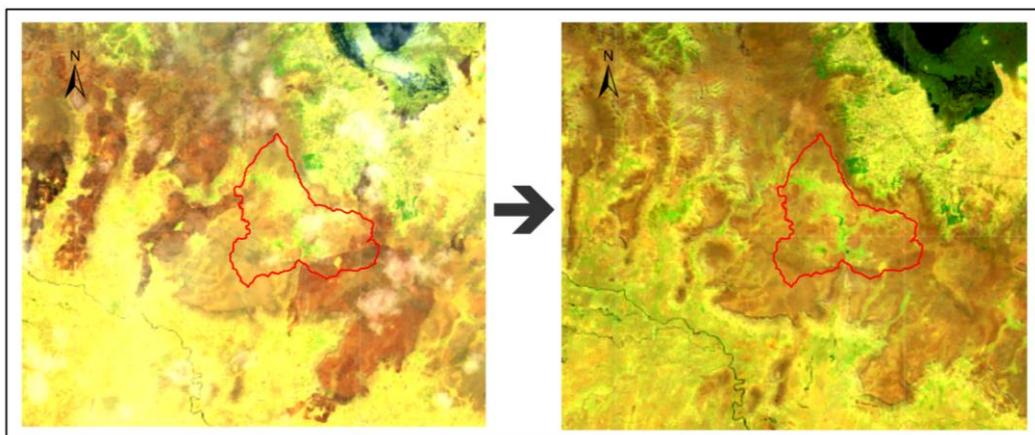
lecturas se realizaron colocando el anillo censador en la punta del pie izquierdo. Para facilitar la toma de datos se empleó claves y fotografías de identificación. Ver anexo N° 3.

### 3.5.4 Preparación de la colección de imágenes Landsat

Debido a que GEE trabaja con colecciones completas de imágenes Landsat, es necesario aplicar filtros con la variable años 2003 - 2023 creando un polígono denominada área de estudio, luego se une colecciones Landsat 5, 8 y 9 en uno y homogenizar ya que cada sensor dispone de diferentes bandas seguidamente se realiza un filtro de nubes de 50% de los metadatos reduciendo imágenes por año y área. Por último, aplicamos las funciones de cálculo de índices espectrales a la variable Mosaic. En la figura N° 5 se muestra una imagen corregida para el año 2023.

#### Figura 5

*Aplicación de filtros a la colección de imágenes Landsat*



Nota: La imagen muestra que el área de estudio esta filtrada del año 2023.

**Tabla 4**

*Índices espectrales Landsat*

Índice	Abreviación	Fórmula	Referencia
Normalized Difference Vegetation Index	NDVI	$NDVI = \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$	(Rouse et al., 1974)
Normalized Difference Moisture Index	NDMI	$NDMI = \frac{NIR - SWIR1}{NIR + SWIR1}$	(Taloor et al., 2021)
Normalized Difference Water Index	NDWI	$NDWI = \frac{GREEN - RED}{GREEN + RED}$	(Beers & GIS, 2017)
Drought Severity Index	DSI	$DSI = \frac{SWIR1 - RED}{NIR + SWIR1 + L} * (1 + L)$	(Camalleri et al., 2016)
Soil-Adjusted Vegetation Index	SAVI	$SAVI = (1 + L) \frac{NIR - RED}{NIR + RED + L}$ with L= 0.5	(Huete et al., 2004)
Bare Soil Index	BI	$BI = \frac{((RED - SWIR) - (NIR + BLUE))}{((RED + SWIR) + (NIR + BLUE))}$	(Prasad et al., 2022)

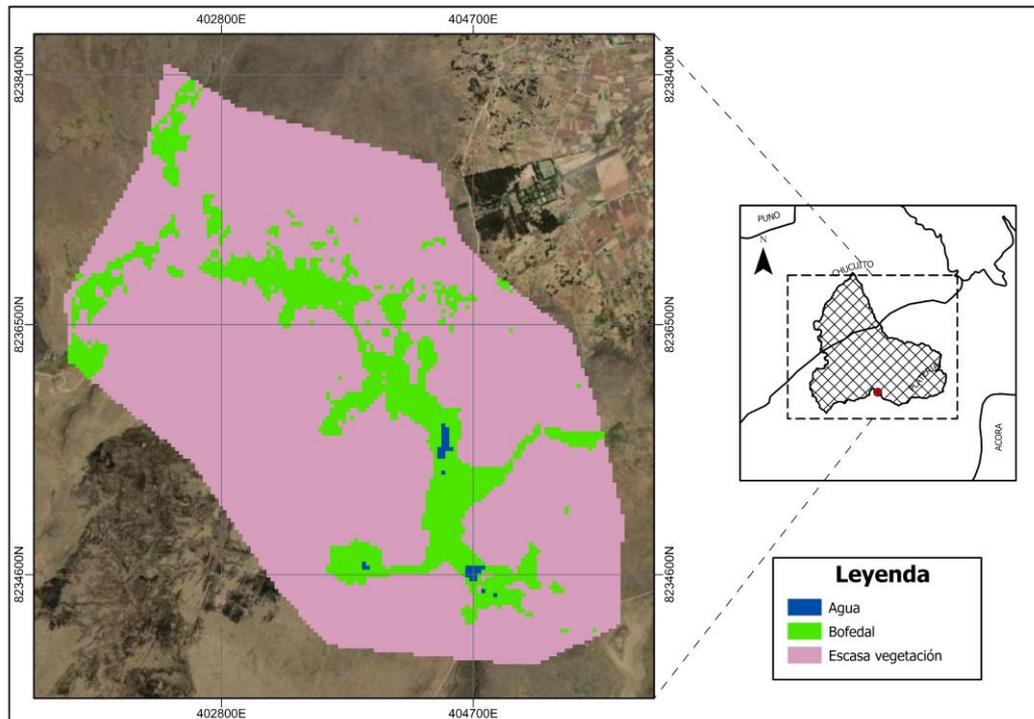
Nota: A partir de las imágenes Landsat compuestas, se generan los índices espectrales

### 3.5.5 Clasificación por Random Forest

La clasificación supervisada es un método que permite separar objetos o caracteres de la imagen (por medio de muestras en campo). Tiene una base de entrenamiento, que se inicia en un polígono que identifica la zona de estudio en la cual se clasifican mediante códigos: agua, bofedal y escasa vegetación; junto al producto del mosaico de imágenes procesadas para cada año respectivamente, seguidamente aplicamos el clasificador Random Forest para poder clasificar las tres variables. Finalmente obtenemos y exportamos las imágenes procesadas en formato .tif (ráster) a Google Drive. Véase la figura N° 6.

## Figura 6

### Clasificación de imagen Landsat en formato Ráster del 2023



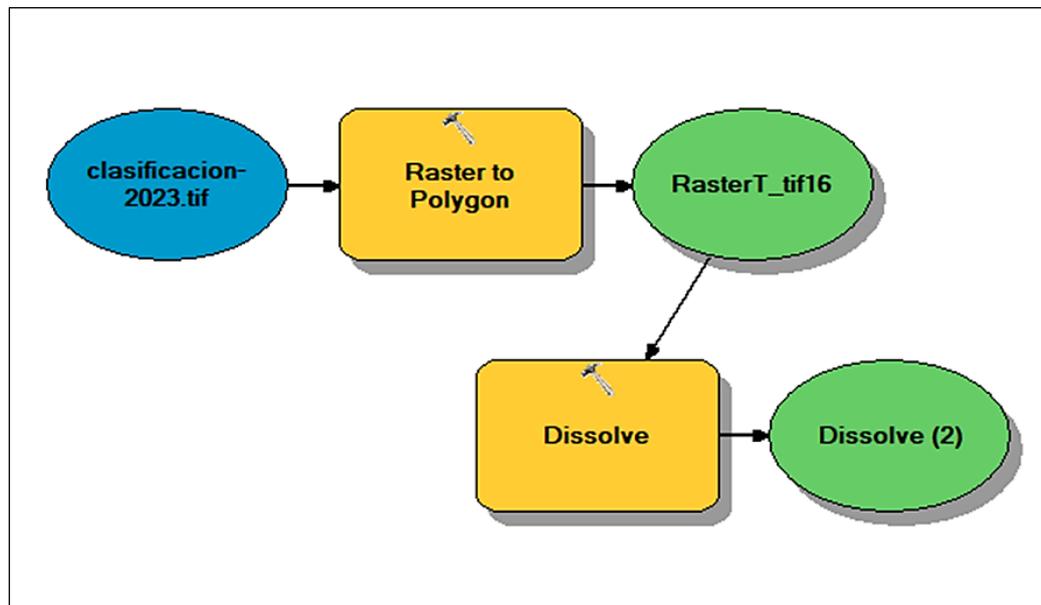
Nota: El grafico representa el resultado de la clasificación Random Forest

### 3.5.6 Convertir datos ráster a datos vectoriales

Para determinar el área en hectáreas se utilizó la caja de herramientas de ArcToolbox del programa ArcMap 10.8.2 primero se crea un nuevo proyecto en el cual se conecta la carpeta de trabajo e insertamos la imagen ráster en formato .tif utilizamos las siguientes herramientas geoespaciales <<Raster To Polygon>> <<Dissolve>> <<Open Attribute Table – Add Field de tipo Double>>. Tal como se muestra en la figura N° 7.

**Figura 7**

*Flujo de procesos en el SIG para conversión datos*



Nota: Utilizando ModelBuilder se determinó las áreas de cobertura vegetal del bofedal en ha.

### **3.5.7 Herramientas para evaluar la Precisión de modelos de clasificación**

#### **3.5.7.1 Matriz de confusión**

Según Navarro et al. (2020). La matriz de confusión es una herramienta esencial en la evaluación de modelos de clasificación, comparando predicciones con datos reales. Organizada en filas y columnas, muestra coincidencias en su diagonal y desacuerdos fuera de ella, permitiendo identificar errores de omisión y comisión. Esta matriz facilita el cálculo de la precisión global del modelo, relacionando aciertos directos con el total evaluado, proporcionando una medida clara del rendimiento del modelo.

### 3.5.7.2 Índice Kappa

El índice Kappa mide la exactitud de un mapa, ya que incluye dentro del cálculo todos los valores de la matriz y no solamente de los extremos. (Sánchez, 2011).

$$K = \frac{P_o - P_e}{1 - P_e}$$

Siendo:

$P_o$  = Número de aciertos / Número total de clases

$P_e$  = Calculo generado desde la matriz de confusión

A continuación, según Congalton, citado por (Sánchez, 2011), se muestra cómo se calcula el índice Kappa:

$$K = \frac{N \sum_{i=1}^r x_{ii} - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}{N^2 - \sum_{i=1}^r (x_{i+} * x_{+i})}$$

Donde:

r: número de filas

$x_{ii}$ : número de observaciones en una fila  $i$  y una columna  $i$

$x_{i+}$  y  $x_{+i}$ : son los totales marginales de una fila  $i$  y de una columna  $i$  respectivamente.

N: total de número de observaciones.

MINAM (2014), indica que la valoración del Índice Kappa puede tomar valores entre 0 y 1: mientras más cercano a 1, mayor es el grado de

concordancia entre las observaciones; por el contrario, mientras más cercano a 0, mayor es el grado de discordancia entre ellas. Este coeficiente toma en cuenta los errores de comisión y de omisión.

**Tabla 5**

*Valoración del índice Kappa*

Índice Kappa	Fuerza de Concordancia
0.00	Pobre
0.01 – 0.20	Leve
0.21 – 0.40	Aceptable
0.41 – 0.60	Moderada
0.61 – 0.80	Considerable
0.81 – 1.00	Casi perfecta

Fuente: Landis y Koch, citado por (Cerde L & Villarroel del P, 2008).

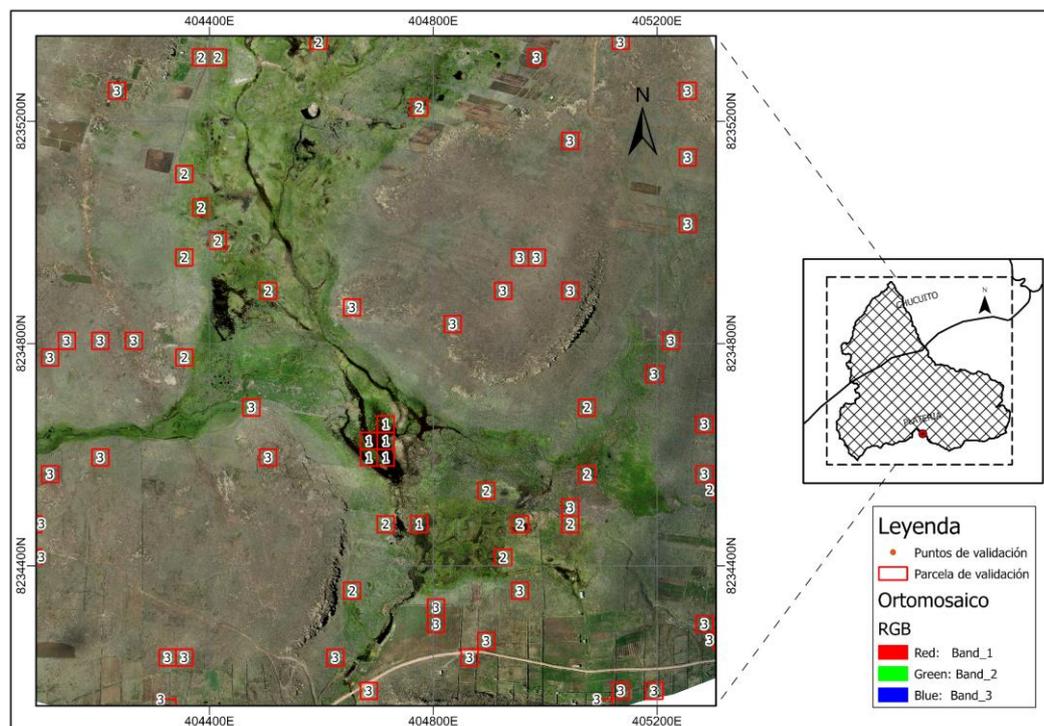
### 3.5.8 Validación de la clasificación supervisada

Para la validación de los datos se tomó como guía el protocolo de “Evaluación de la Exactitud Temática del Mapa de Deforestación” ejecutado por el Ministerio del Ambiente. Para llevar a cabo este procedimiento, insertamos la imagen de la clasificación de máxima veracidad con sus respectivas clases de cobertura en el programa ArcMap 10.8.2 y se utilizaron las siguientes herramientas: “Segmentation and Classification” > “Create Accuracy Assessment Points” > “Stratified\_Random”. Este proceso creo 209 puntos aleatorios estratificados en toda el área de estudio, como muestra la figura N° 8. “Add XY Coordinates” > “Graphic Buffer” > “Compute Confusion Matrix”. Estos tres procesos nos ayudaron a proyectar las coordenadas UTM, graficar la parcela de validación de 30 x 30 m<sup>2</sup> y generar la matriz de confusión. El detalle del proceso puede ser observada en la figura N° 9.

La validación de veracidad se realizó con una imagen compuesta (ortomosaico) de alta resolución (0.03 m.), capturada por un dron anexo N° 2, en esta imagen compuesta se aplicó el análisis de la matriz de confusión y el cálculo del índice de kappa, que nos permitió una evaluación precisa de la precisión y exactitud de los datos recolectados, interpretando los resultados con la valoración del coeficiente de Kappa.

### Figura 8

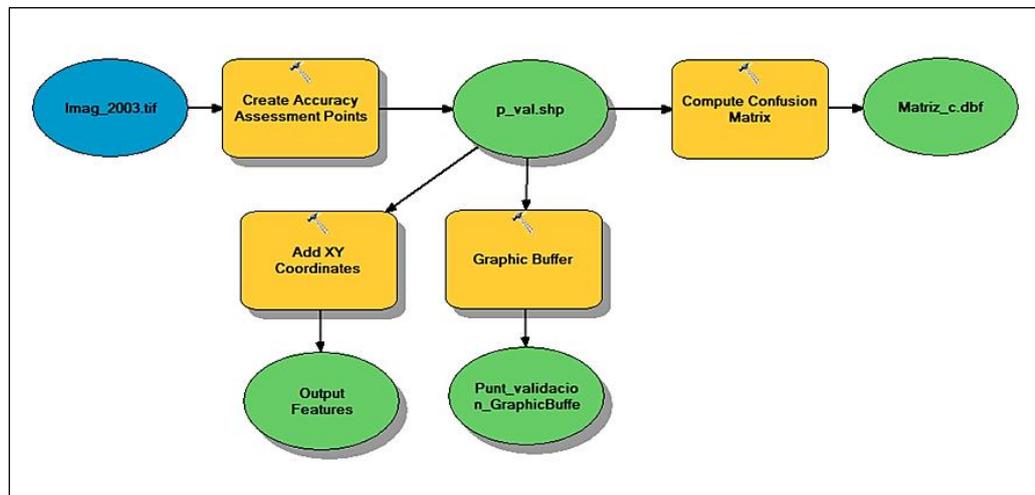
*Establecimiento aleatorio de puntos de evaluación de la precisión*



Nota: La imagen muestra los puntos de precisión según las 3 clases de cobertura, donde: (1 = agua), (2 = Bofedal) y (Escasa vegetación = 3)

**Figura 9**

*Flujo de procesos en el SIG para la clasificación supervisada*



Nota: Mediante el uso de ModelBuilder se optimiza el proceso

### 3.5.9 Información meteorológica

La información hidrometeorológica recopilada se llevó a cabo mediante una solicitud realizada a la Dirección Zonal 13 Puno del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología – SENAMHI. Dicha solicitud se focalizó específicamente a las estaciones meteorológicas de Puno, Ilave y Laraqueri, anexo N° 7 al 15.

La información recopilada abarca las siguientes variables climáticas esenciales: precipitación pluvial (mm), temperatura máxima (°C) y temperatura mínima (°C). Estas variables son cruciales para analizar el comportamiento climático.

**Tabla 6**

*Estaciones meteorológicas cercanas al área de intervención*

N°	Estación Meteorológica	Este	Norte	Altitud (msnm)
1	Puno	391618	8250023	3825

Nº	Estación Meteorológica	Este	Norte	Altitud (msnm)
2	Laraqueri	385967	8213658	3939
3	Ilave	431020	8221195	3874

Fuente: SENAMHI (2023). véase en el anexo N° 18. Mapa N° 03.

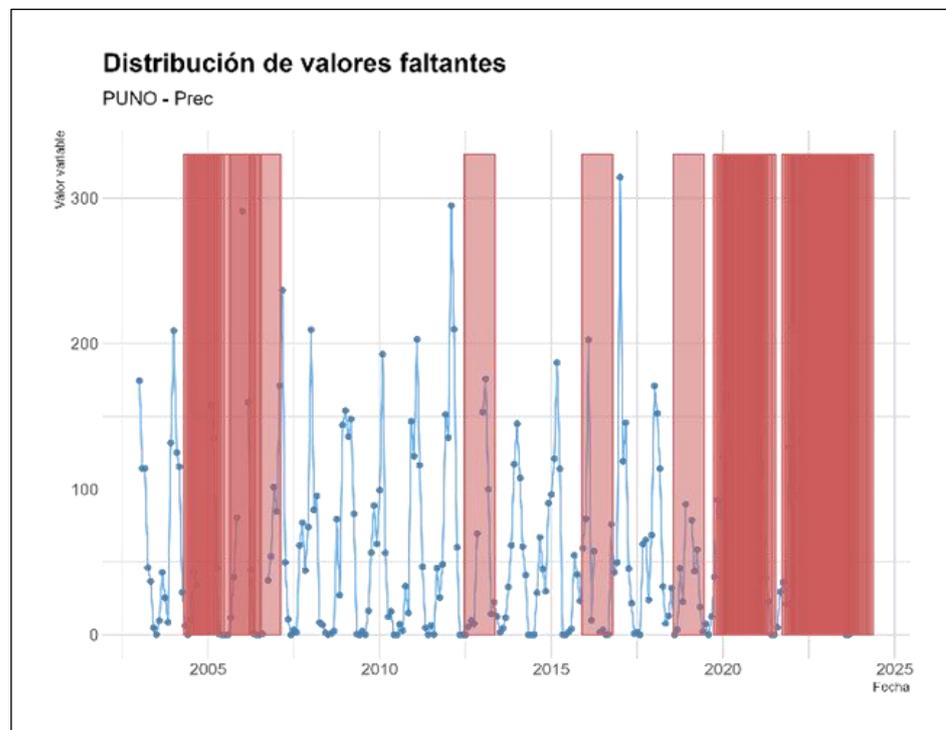
### 3.5.10 Procesamiento de datos climáticos

#### 3.5.10.1 Relleno de datos faltantes

Se realizó la imputación de datos faltantes de las tres estaciones con el Package 'imputeTS' específicamente "Missing Value Imputation by Interpolation", en el programa RStudio 4.2.3 este método se especializa en la imputación de series temporales (Moritz & Bartz-Beielstein, 2017), como se muestran en la figuras N° 10 y 11.

#### Figura 10

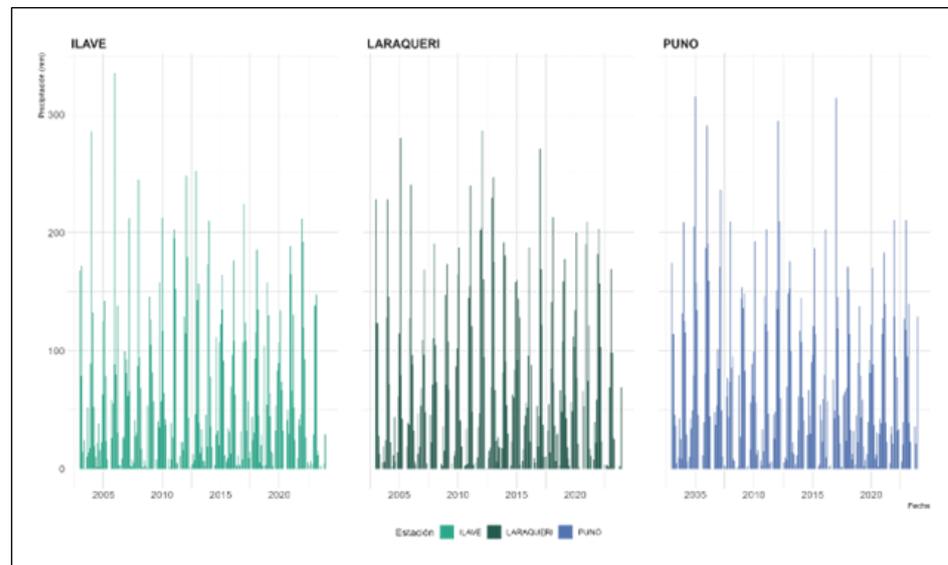
*Distribución de valores faltantes de precipitación pluvial (mm)*



Nota: La figura indica que en las franjas rojas faltan datos

**Figura 11**

*Distribución de valores completos precipitación pluvial (mm)*



Nota: La figura indica que la serie de datos están completas

### 3.5.10.2 Pruebas estadísticas de saltos y tendencias con el método de Man-Kendall

El software Trend V1.0.2 está diseñado para hidrólogos que facilita las pruebas estadísticas de tendencia, cambio y aleatoriedad en los datos hidrológicos. (Chiew & Siriwardena, 2005), en consecuencia, se utilizó este software para determinar las tendencias en el área de cobertura del bofedal y en los datos meteorológicos. Para preparar los datos de entrada, cada variable, incluyendo el área de cobertura vegetal del bofedal, precipitación, temperatura máxima y temperatura mínima, se organizó en dos columnas en formato CSV UTF-8 (delimitado por comas) (\*.csv). Este proceso permitió eliminar los datos dudosos y garantizar la calidad de los datos utilizados en el análisis.

$$S = \sum_{k=1}^{n-1} \sum_{j=k+1}^n \text{sgn}(X_j - X_k)$$



$$\begin{aligned} \text{sgn} &= (X_j - X_k) = 1 \text{ if } X_j - X_k > 0 \\ \text{sgn} &= (X_j - X_k) = 0 \text{ if } X_j - X_k = 0 \\ \text{sgn} &= (X_j - X_k) = -1 \text{ if } X_j - X_k < 0 \end{aligned}$$

Donde:

n= número de años

$X_j$  &  $X_k$  = valores anuales en los años 'j' y 'k',  $j > k$ , respectivamente

$$\text{VAR}(S) = \frac{1}{18} [n(n-1)(2n+5)]$$

q = número de grupos vinculados (igual valor

$$Z = \frac{S - 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \text{ if } S > 0$$

$$Z = 0 \text{ if } S = 0$$

$$Z = \frac{S + 1}{\sqrt{\text{VAR}(S)}} \text{ if } S < 0$$

### Tabla 7

Test de tendencia

Hipótesis	Descripción
$H_0$	Sin tendencia
$H_1$	Aumento o disminución monótona tendencia
Criterio	$H_0$ rechazado si $Z > Z_{1-\alpha/2}$

Nota: El test de Mann-Kendall se utiliza para determinar si existe una tendencia significativa en los datos, de aumento o disminución.

### Tabla 8

*Descripción de la significancia del test Mann - Kendall*

Significancia	Simbología	Z
Sin tendencia	ST	0

<b>Significancia</b>	<b>Simbología</b>	<b>Z</b>
Tendencia significativa creciente	TSC	$> + 1.96$
Tendencia significativa decreciente	TSD	$< - 1.96$
Tendencia no significativa creciente	TNSC	$< + 1.96$
Tendencia no significativa decreciente	TNSD	$> - 1.96$

Fuente: (Alves et al., 2018).

Debido a la falta de consistencia en algunos de los valores climáticos recopilados, no fue posible llevar a cabo un análisis de consistencia convencional. En vista de esta limitación, se recurrió al método de las isoyetas e isothermas para estimar los valores medios en el área de estudio. Dado que para analizar la correlación de bofedales se requiere datos del mismo lugar, se optó por emplear la interpolación espacial de IDW (Inversa de la Distancia Ponderada) para calcular los valores de precipitación pluvial (mm), temperatura máxima y temperatura mínima (°C).

### **3.5.10.3 Estimación anual de datos climáticos mediante el método de isoyetas e isothermas**

El método de las isoyetas determina las líneas de igual altura de precipitación. Este proceso implica la creación de un mapa donde se muestra las isolíneas en todo el plano, lo que permite visualizar la distribución espacial de la precipitación. Posteriormente, se calcula el área de la microcuena entre las isoyetas para determinar la cantidad de precipitación caída dentro del área de estudio y, finalmente, obtener la precipitación media anual. Estas isolíneas son generadas en base a un ráster el cual es el producto de la interpolación de los puntos que tienen información. Véase el anexo N°17 (mapa N° 04).

El cálculo de la precipitación se determina mediante:

$$P_{med} = \frac{1}{A_t} \sum_{i=1}^n \frac{P_{I-1} + P_i}{2} A_i$$

Donde:

$P_{med}$  = precipitación media

$A_t$  = área total de la cuenca

$P_i$  = altura de la precipitación de las isoyetas  $i$

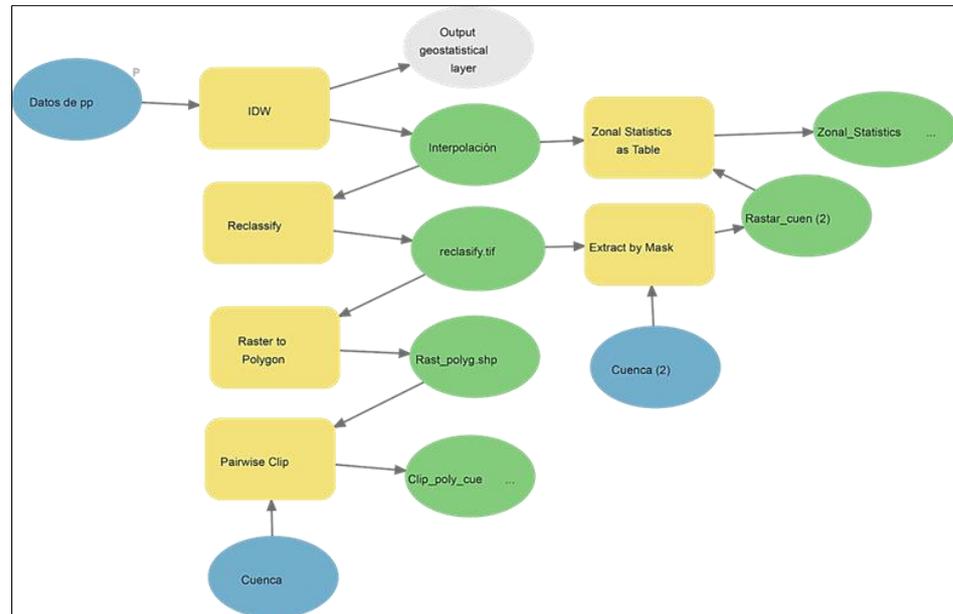
$A_i$  = área parcial comprendida entre las isoyetas  $P_{I-1}$  Y  $P_i$

$N$  = número de áreas parciales

Para realizar este método de interpolación espacial, se utilizó el lenguaje de programación ModelBuilder para automatizar el flujo de geoprocésamiento. Se empleó la interpolación del tipo IDW (Distancia Inversa Ponderada), disponible en la caja de herramientas de Spatial Analyst Tools de ArcGIS Pro. A continuación, se describe el flujo de trabajo. “Datos de precipitación pluvial (Punto de partida)” > “IDW (Los datos de precipitación, generan una capa geoespacial de salida)” > “Interpolate (Crea una nueva capa raster.)” > “Reclassify .tif (La capa raster interpolada se reclasifica)” > “Raster to Polygon.shp (La capa raster reclasificada se convierte en una capa vectorial)” > “Extract by Mask (Utilizamos una máscara de la microcuenca)” > “Pairwise Clip (La capa de polígonos se recorta mediante una operación de clip por paridad)” > “Zonal Statistics as Table (Finalmente, se calculan las estadísticas zonales de la capa resultante y se presentan en forma de tabla.)”. Tal como muestra la figura N° 12.

**Figura 12**

*Flujo de procesos en el (SIG) para el cálculo de la precipitación*



Nota: La figura ilustra el uso de ModelBuilder, una herramienta automatizada dentro de ArcGIS PRO

### 3.5.11 Correlación de Pearson

Se aplicó la correlación de Pearson a cada factor climático de evaluación, utilizando la serie temporal de valores de área de cobertura vegetal del bofedal denominado (Área ha.) del periodo 2003-2023.

El coeficiente de correlación de Pearson ( $r$ ), es una medida estadística que evalúa la fuerza y la dirección de la relación lineal entre dos variables cuantitativas. Fue desarrollada por (Pearson, 1896), se expresa de un valor que oscila entre -1 y 1. El estadístico aplicable es el siguiente:

$$r = \frac{n(\sum xy) - (\sum x)(\sum y)}{\sqrt{[n \sum x^2 - (\sum x)^2][n \sum y^2 - (\sum y)^2]}}$$



Donde:

$N$  = N° de datos pares

$\sum xy$  = Suma del producto de datos pares

$\sum x$  = Suma de los valores de la variable X

$\sum y$  = Suma de los valores de la variable Y

$\sum x^2$  = Suma de los cuadrados de los valores de la variable X

$\sum y^2$  = Suma de los cuadrados de los valores de la variable Y

### Tabla 9

*Criterio del coeficiente de correlación de Pearson*

Valor de r	Grado de correlación
1	Correlación positiva perfecta
0.7 a 0.9	Correlación positiva fuerte
0.4 a 0.6	Correlación positiva moderada
0.1 a 0.3	Correlación positiva débil
0	No hay correlación
-0.1 a -0.3	Correlación negativa débil
-0.4 a -0.6	Correlación negativa moderada
-0.7 a -0.9	Correlación negativa fuerte
-1	Correlación negativa perfecta

Nota: Estos valores indican el grado de asociación lineal entre las variables



## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

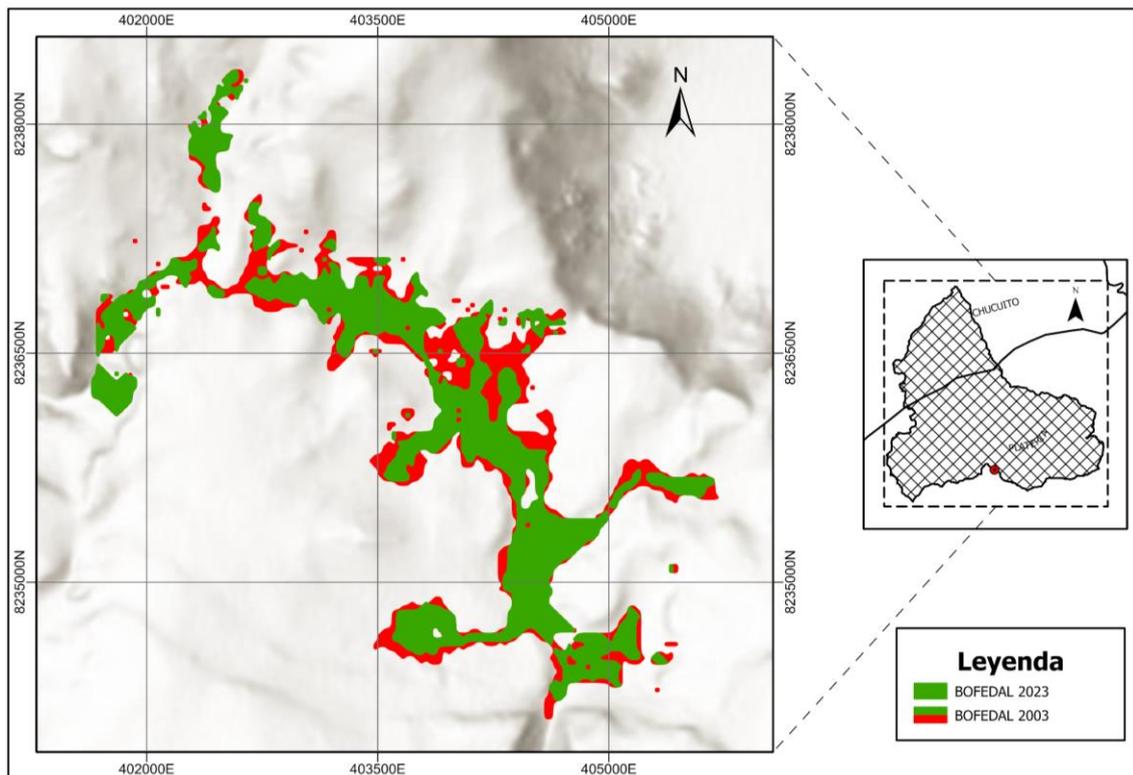
#### 4.1 Análisis de cambios multitemporales de bofedales y su relación con la variabilidad climática en la microcuenca de Potojani Grande

En respuesta al objetivo general, los resultados obtenidos a través de la técnica de análisis multitemporal dentro de la plataforma GEE, utilizando imágenes Landsat (5,8 y 9), índices espectrales y el algoritmo de clasificación Random Forest, fueron consistentes. Se realizó una superposición de las imágenes procesadas Landsat del 2003 y 2023 para observar la pérdida de área de cobertura vegetal del bofedal. Se estableció que el color rojo corresponde a la imagen de 2003, mientras que el color verde representa la imagen de 2023. Esta codificación cromática permite una clara identificación de las áreas donde ha habido una disminución de la cobertura vegetal del bofedal, la cual fue de 60.93 hectáreas a lo largo de las dos décadas. Tal como se muestra en la figura N° 13, evidenciándose una tendencia negativa en la serie temporal. Semejante al hallazgo de Pamo & Oscoco (2022), en su trabajo “Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990–2021, con técnicas de teledetección”. Quienes también reportaron una disminución en el área del bofedal de 77.94 hectáreas durante 31 años. De igual manera Fahad et al. (2020) en su investigación titulada “Análisis espacial-temporal del uso del suelo y detección de cambios en la cobertura del suelo mediante técnicas de teledetección y SIG”. reportaron una disminución del 17% en las áreas de humedales. Además, Gutiérrez (2018), en su estudio titulado “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” informo una reducción de 9,484.29 hectáreas en la

cuenca del río Coata. Estos resultados evidencian la gravedad de la situación y la urgencia de tomar medidas de conservación para proteger estos ecosistemas críticos.

### Figura 13

*Comparación multitemporal de la cobertura vegetal del bofedal entre 2003 y 2023*



Nota: El mapa con mayor detalle se encuentra en anexo N° 17 en el mapa N° 2.

Se registraron 24 especies distribuidas en 10 familias en el área de cobertura vegetal del bofedal. En relación a la abundancia y riqueza de las especies presentes en esta área, se identificaron 5 familias que presentan mayor porcentaje e índice de palatabilidad siendo las familias, Poaceae (51%), Cyperaceae (12.5%), Plantaginaceae (12%), Asteraceae (7%) y Rosaceae (6.5%). Estas familias se destacan por ser las más abundantes y palatables para el ganado tabla N° 10.

**Tabla 10***Riqueza y abundancia de especies de la composición florística del bofedal*

N°	Familia	Registro	Porcentaje (%)	Palatabilidad	
				Ovinos	Vacunos
1	Poaceae	102	51	D	D
2	Cyperaceae	25	12.5	ND	D
3	Plantaginaceae	24	12	PD	D
4	Asteraceae	14	7	D	PD
5	Rosaceae	13	6.5	D	D
6	Apiaceae	4	2	ND	ND
7	Potamogetonaceae	2	1	PD	PD
8	Haloragaceae	2	1	D	D
9	Orobanchaceae	2	1	D	D
10	Fabaceae	1	0.5	D	D
11	Mantillo	9	4.5	-	-
12	Suelo desnudo	2	1	-	-
Total		200	100%		

Nota: D (Deseables), PD (Poco deseable), ND (No deseable). Según (Farfán & Farfán, 2012).

En cuanto a la composición florística presente en el área de cobertura vegetal del bofedal; las familias identificadas con mayor presencia son: Poaceae (14 spp.) Cyperaceae (4 spp), Plantaginaceae (3 spp). Asteraceae (7 spp), Rosaceae (3 spp). Las especies más frecuentes fueron *Festuca dolichophylla* (Poaceae), *Eleocharis albibracteata* (Cyperaceae), *Plantago tubulosa* (Plantaginaceae) *Hypochaeris Taraxacoides* (Asteraceae) y *Alchemilla pinnata* (Rosaceae). En áreas colindantes del bofedal se identificaron con mayor predominancia la especie *Stipa ichu* de la familia (Poaceae). Para ver la composición florística completa consultar anexo N° 3.

#### **4.2 Determinación por teledetección espacial los cambios de área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande**

En respuesta al objetivo específico N° 1, utilizando la plataforma Google Earth Engine (GEE) y aplicando técnicas de teledetección espacial, se llevó a cabo un análisis multitemporal de la cobertura vegetal del bofedal en la microcuenca de Potojani Grande.

A lo largo de un periodo de 21 años, desde 2003 hasta 2023, determinamos anualmente el área de cobertura vegetal del bofedal. Para detallar estos resultados, se proporciona la siguiente tabla N° 11, que muestra la variación anual del área de cobertura del bofedal.

**Tabla 11**

*Determinación de área de cobertura vegetal del bofedal periodo 2003 al 2023*

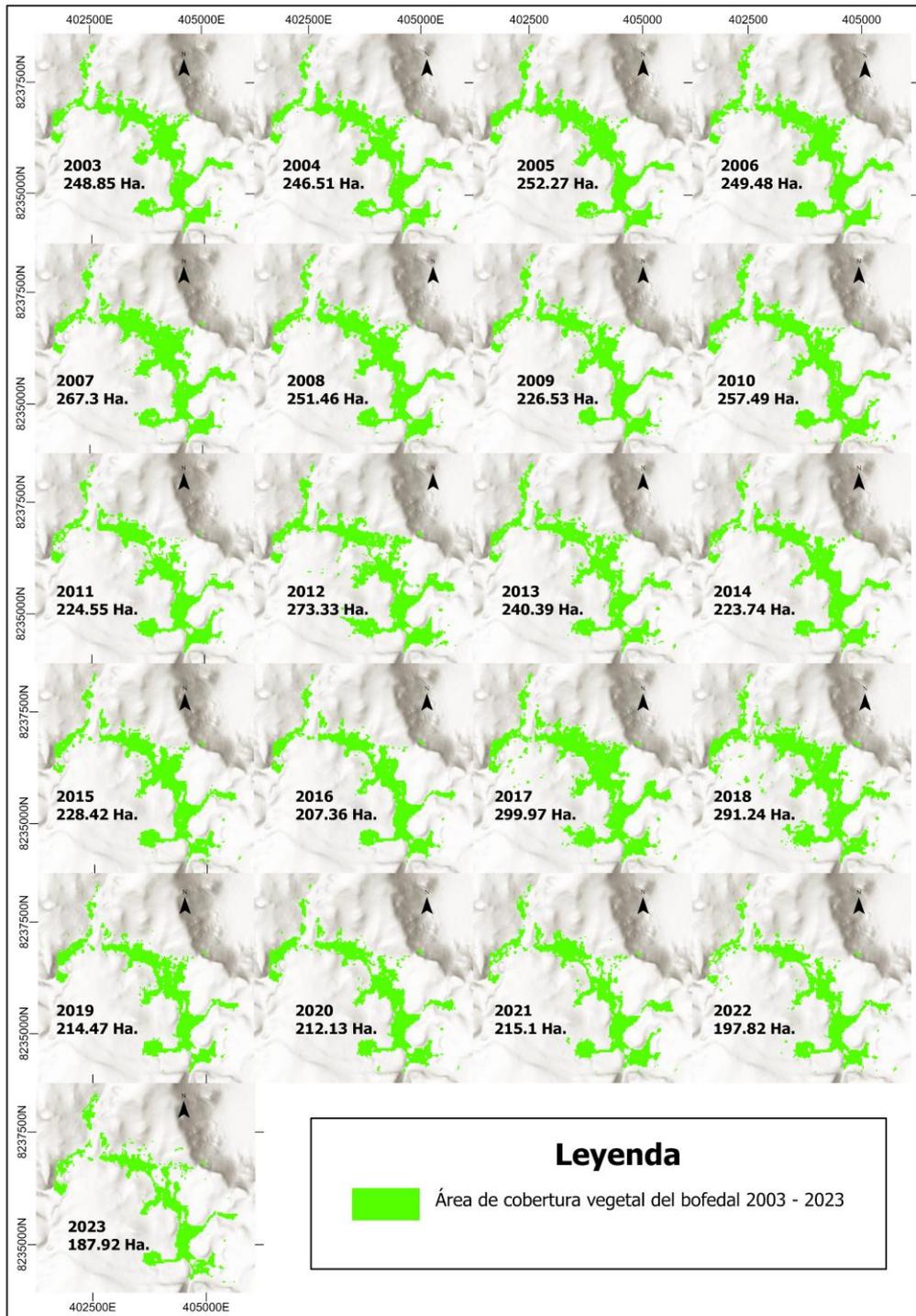
<b>Año</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>Δ Área (ha)</b>	<b>Área ganada (ha)</b>	<b>Área perdida (ha)</b>	<b>% de área perdida</b>
2003	248.85	-	-	-	100%
2004	246.51	-2.34	0	2.34	-0.94%
2005	252.27	5.76	5.76	0	1.37%
2006	249.48	-2.79	0	2.79	0.25%
2007	267.3	17.82	17.82	0	7.41%
2008	251.46	-15.84	0	15.84	1.05%
2009	226.53	-24.93	0	24.93	-8.97%
2010	257.49	30.96	30.96	0	3.47%
2011	224.55	-32.94	0	32.94	-9.76%
2012	273.33	48.78	48.78	0	9.84%
2013	240.39	-32.94	0	32.94	-3.40%
2014	223.74	-16.65	0	16.65	-10.09%
2015	228.42	4.68	4.68	0	-8.21%
2016	207.36	-21.06	0	21.06	-16.67%
2017	299.97	92.61	92.61	0	20.54%
2018	291.24	-8.73	0	8.73	17.03%
2019	214.47	-76.77	0	76.77	-13.82%
2020	212.13	-2.34	0	2.34	-14.76%
2021	215.1	2.97	2.97	0	-13.56%
2022	197.82	-17.28	0	17.28	-20.51%
2023	187.92	-9.90	0	9.90	-24.48%
<b>Total</b>	<b>-</b>	<b>60.93</b>	<b>203.58</b>	<b>264.51</b>	<b>-</b>

Nota: Área (ha) = Área de cobertura del bofedal (ha), Δ Área (ha) = Δ Área de cobertura de cobertura del bofedal (ha), Área ganada (ha) = Área de cobertura del bofedal ganada (ha), Área perdida (ha) = Área de cobertura del bofedal perdida (ha), % de área perdida = Porcentaje de área cobertura del bofedal perdida (%)

A lo largo de un periodo de 21 años, desde 2003 hasta 2023, determinamos anualmente el área de cobertura vegetal del bofedal, como se muestra en la figura N° 16.

### Figura 14

*Mapa de análisis multitemporal del bofedal en la microcuenca de Potojani Grande periodo 2003-2023*

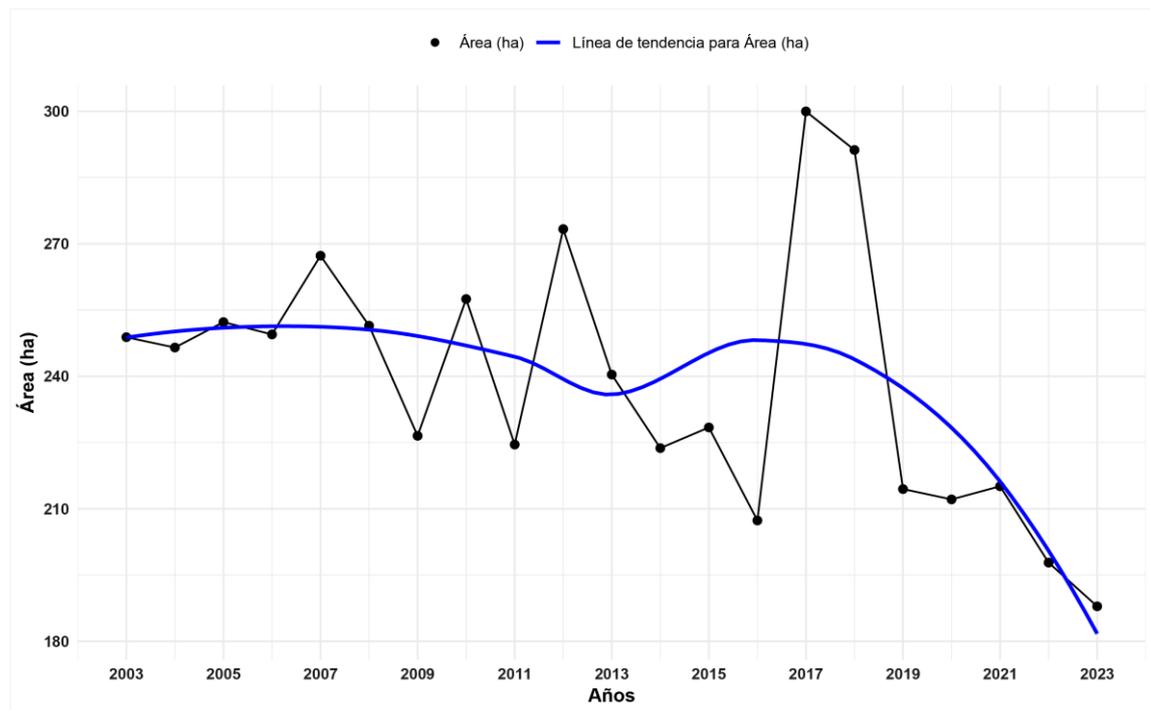




Analizamos los resultados del área de cobertura vegetal del bofedal en una serie temporal donde se puede ver que el área de cobertura vegetal del bofedal ha experimentado fluctuaciones significativas a lo largo de 21 años, comenzando con 248.85 hectáreas. en 2003 a alcanzar un máximo de 299.97 hectáreas. en 2017. Sin embargo, tras este pico, se observó un marcado declive hasta llegar a 187.92 hectáreas. en 2023, indicando una tendencia general a la disminución de la cobertura a pesar de fluctuaciones periódicas de recuperación y retroceso como se ilustra en la figura N°15. La prueba estadística de Mann-Kendall arrojó un valor de tendencia ( $Z$ ) de -2.576, anexo N° 16, que indica una tendencia descendente estadísticamente significativa, lo que permite rechazar la hipótesis nula de ausencia de tendencia en la serie de tiempo. Coincidiendo con las conclusiones de varios estudios, Gutiérrez (2018) reportó la disminución del área de los bofedales de la cuenca del río Coata es atribuible principalmente a la variabilidad climática y actividades humanas. De manera similar Loza et al. (2015) “Comunidades vegetales de los bofedales de la Cordillera Real (Bolivia) bajo el calentamiento global” destacaron que la variabilidad climática afecta la diversidad florística de los bofedales. Por otra parte (Pamo & Oscco, 2022; Pauca et al., 2020), investigación que se realizaron en el bofedal de la comunidad de Ancomarca de la región de Tacna. indican que la disminución del área de bofedal es atribuible a la interacción de la variabilidad climática y las actividades humanas. Esta tendencia negativa subraya la urgencia de adoptar estrategias de manejo y conservación del bofedal.

**Figura 15**

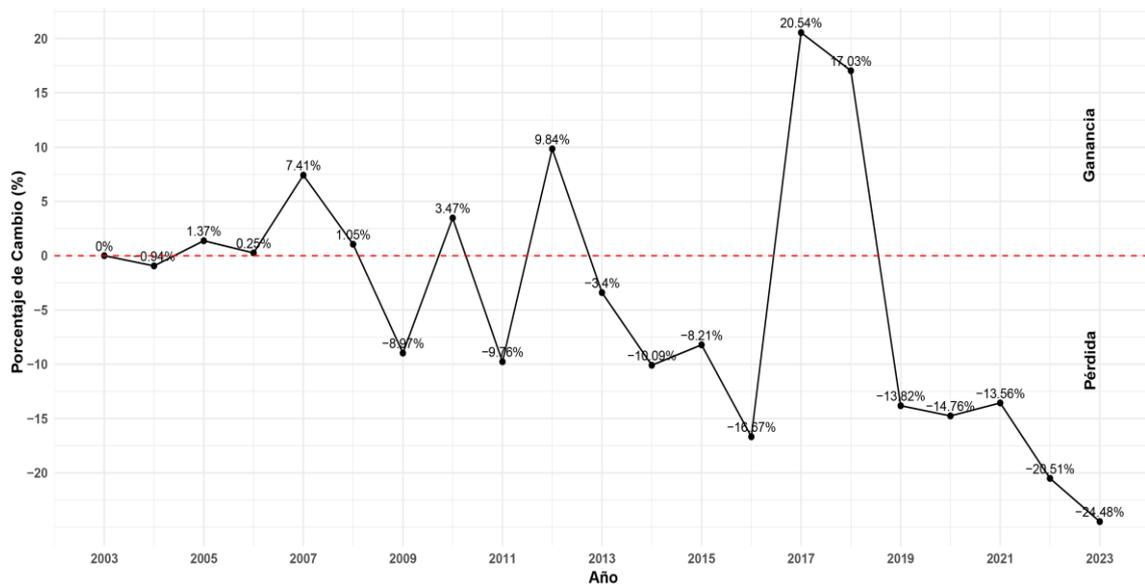
*Evolución de área de cobertura vegetal del bofedal*



Para el análisis de pérdida o ganancia porcentual del área de cobertura vegetal del bofedal, se adoptó 2003 como año base y se generó una gráfica creada mediante funciones (Packages), de RStudio. El eje X representa los años y el eje Y representa el porcentaje de cambio en área del bofedal en base área del año 2003. El año 2017 marca el pico de recuperación más alto (20.54%), mientras que el año 2023 muestra la mayor disminución (-24.48). En conclusión, la figura N° 15 nos muestra el área de cobertura vegetal del bofedal ganada total: (203.58 ha.) y área de cobertura vegetal del bofedal pérdida total: (264.51 ha.), como se muestra en la figura N°16.

**Figura 16**

*Porcentaje de cambio del área de cobertura vegetal del bofedal desde 2003*

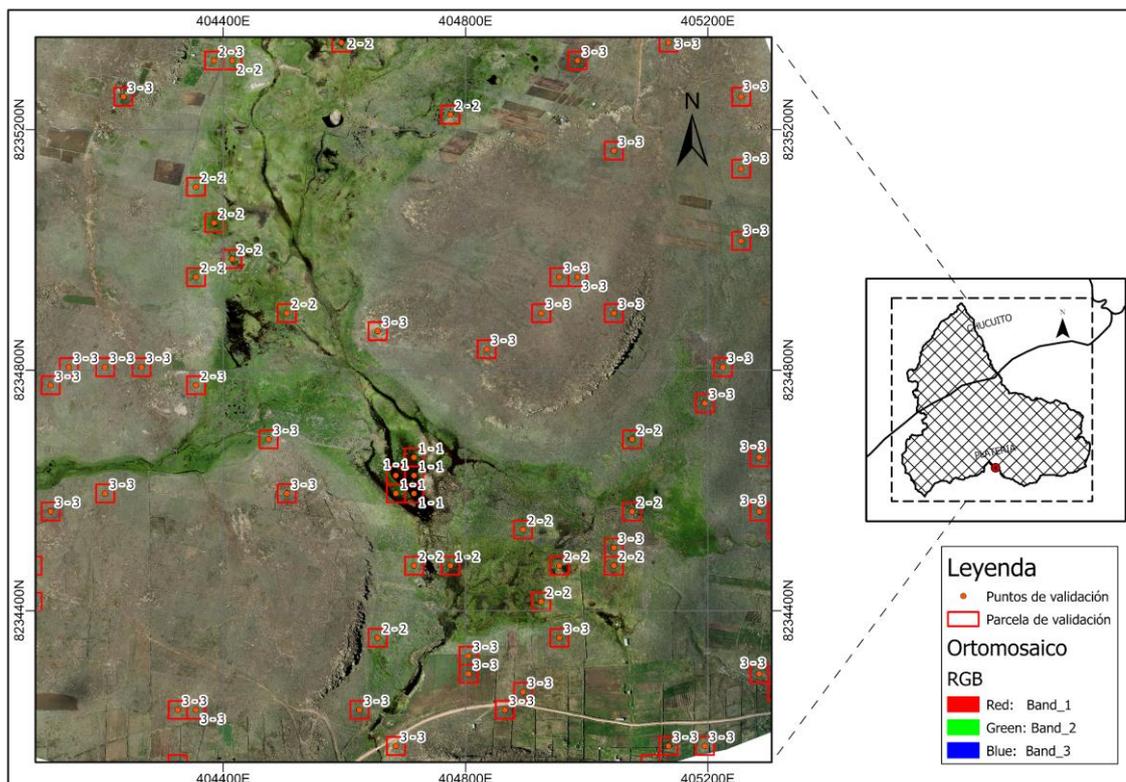


Por último, analizamos la validación la veracidad de la clasificación supervisada, se generó 209 puntos aleatorios de evaluación de precisión aleatorios utilizando la opción “Stratified Random” y se aplicó un buffer grafico de 30 x 30 metros a todos los puntos de precisión. Finalmente, se procedió a calcular la matriz de confusión. Esta validación se realizó utilizando una imagen compuesta (ortomosaico) de alta resolución capturada por un dron como se muestra en la figura N°17. El coeficiente Kappa resultante fue de 0.87, indicando un acuerdo casi perfecto entre las clasificaciones y los valores reales. Además, la precisión general del mapa alcanzo un 94.74% tal y como se muestra la tabla N° 12, lo cual indica que la clasificación supervisada de área de cobertura vegetal del bofedal en la microcuenca de Potojani Grande se realizó con la exactitud necesaria para el análisis multitemporal, es decir las áreas de entrenamiento realizado en gabinete y el trabajo de campo tienen un buen contraste. Nuestro resultado coincide con la investigación de Pauca et al (2020) “Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección”. Lograron una exactitud global de un 95% y un índice de Kappa de 0.9. Del mismo modo, Gutiérrez

(2018), “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”. Reportó un coeficiente de Kappa 0.85 y una precisión de mapa de 96.68%. (Ngo et al., 2023) en su investigación “Evaluación de las fluctuaciones en las áreas de ecosistemas de humedales resultantes de actividades antropogénicas en la comuna de Dong Rui, provincia de Quang Ninh, Vietnam”, lograron una alta precisión en sus resultados, con una precisión general de 92.3% y un coeficiente de Kappa 0.91. Estos resultados respaldan la fiabilidad de nuestro estudio y sugieren que los métodos utilizados son consistentes.

### Figura 17

#### *Validación de puntos de evaluación de la precisión*



Nota: La imagen muestra los puntos de precisión validados dentro de la parcela de validación para las 3 clases de cobertura, GrndTruth donde: (1 = agua), (2 = Bofedal) y (3 = Escasa vegetación). Cuando se muestra 1:1, 2:2, 3:3 significan que hay un acuerdo entre la clasificación realizada y la clasificación de referencia, los números que no coinciden representan errores de comisión y omisión.

**Tabla 12***Matriz de confusión y índice de Kappa*

Clases	Cuerpo de agua	Cobertura bofedal	Esc. Vegetación	Total	Error de comisión	Kappa
<b>Cuerpo de agua</b>	6	4	0	10	0.6	0
<b>Cobertura bofedal</b>	0	43	6	49	0.877551	0
<b>Esc. Vegetación</b>	0	1	149	150	0.993333	0
<b>Total</b>	6	48	155	209	0	0
<b>Error de omisión</b>	1	0.895833	0.96129	0	0.947368	0
<b>Kappa</b>	0	0	0	0	0	0.872412

Nota: La Precisión de clasificación del índice de Kappa alcanzo un valor de 87.2, lo que indica una concordancia casi perfecta según la valoración de Kappa tabla N° 9.

#### **4.3 Influencia de variables climáticas, con mayor influencia en el cambio de área de cobertura vegetal del bofedal, microcuenca Potojani Grande**

En respuesta al objetivo específico N° 2, para poder identificar los factores climáticos que tienen mayor influencia en la variación del área de cobertura vegetal del bofedal utilizamos el coeficiente de correlación de Pearson y análisis de tendencia ya que estos dos estadísticos nos indican el grado de asociación. En la tabla N°13 muestra los resultados de la cuantificación del área de cobertura vegetal del bofedal mediante teledetección, así como los resultados de la interpolación espacial (IDW), obtenidos a través del método de isoyetas e isotermas para determinar el cálculo de la precipitación (mm), temperatura máxima (°C) y temperatura mínima (°C) media anual de la microcuenca de Potojani Grande a partir de los datos climáticos base para el periodo 2003–2023. Estos datos climáticos son esenciales para determinar el coeficiente de correlación de Pearson (figura N° 18 al 20).

**Tabla 13**

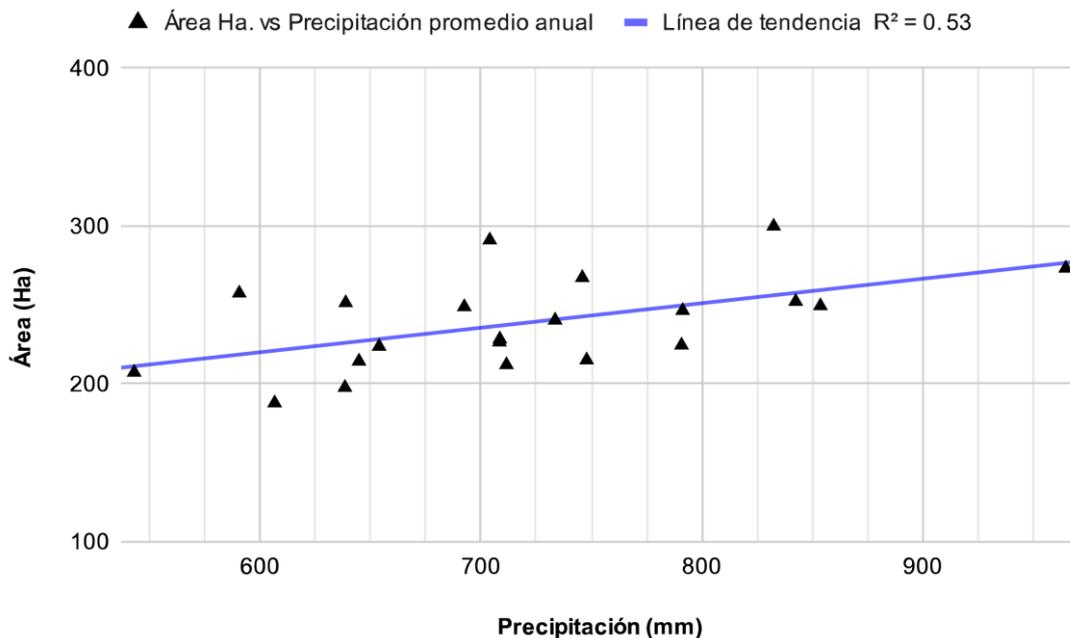
*Resultados de área de cobertura vegetal del bofedal y datos climáticos (2003-2023)*

<b>Año</b>	<b>Área (ha)</b>	<b>PP_mm</b>	<b>Tmax°C</b>	<b>Tmin°C</b>
2003	248.85	692.17	15.65	1.43
2004	246.51	780.85	15.76	1.75
2005	252.27	837.24	16.19	1.62
2006	249.48	836.23	16.01	1.79
2007	267.30	743.11	16.27	1.93
2008	251.46	636.02	16.24	0.9
2009	226.53	705.92	16.43	1.35
2010	257.49	591.75	17.34	1.87
2011	224.55	793.63	15.84	1.91
2012	273.33	971.90	15.5	1.76
2013	240.39	739.32	15.79	2.04
2014	223.74	655.24	16.23	2.28
2015	228.42	717.75	16.15	2.07
2016	207.36	543.09	17.05	1.84
2017	299.97	831.22	16.29	2.23
2018	291.24	706.35	16.03	2.22
2019	214.47	650.93	16.62	2.43
2020	212.13	671.97	16.71	2.38
2021	215.10	747.96	16.47	2.27
2022	197.82	668.98	16.64	1.77
2023	187.92	624.43	16.7	1.55

Nota: Área\_ha = Área de cobertura vegetal del bofedal (hectáreas), PP\_mm = Precipitación pluvial (mm), Tmax\_°C = Temperatura máxima (°C), Tmin\_°C = Temperatura mínima (°C).

**Figura 18**

*Correlación de Pearson entre el Área de cobertura del bofedal (ha) y la Precipitación pluvial (mm)*



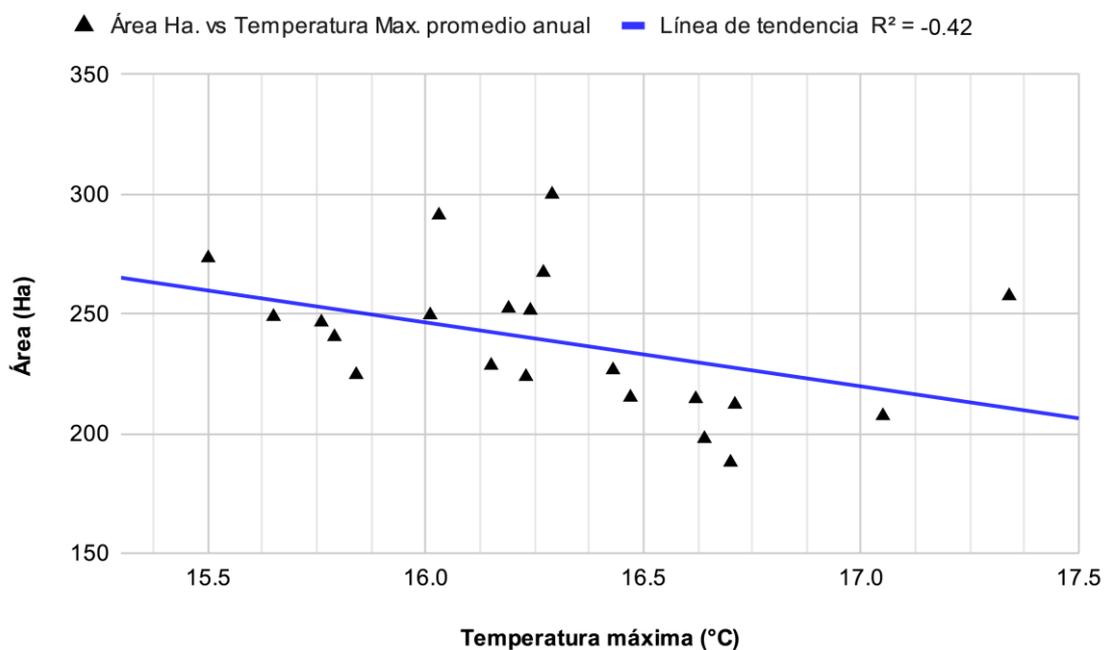
– **Área de cobertura vegetal del bofedal vs Precipitación pluvial (mm):**

El análisis del coeficiente de correlación de Pearson entre las variables de área de cobertura de bofedal y precipitación, nos da un coeficiente de correlación ( $R^2$ ) = 0.53. Según el Criterio del coeficiente de correlación de Pearson (tabla N° 9), nos indica que es una correlación moderada positiva. Es decir que a medida que aumenta la precipitación pluvial, tiende a incrementar el área de cobertura vegetal del bofedal. En comparación a Wang et al. (2020) en su investigación titulado “El cambio de vegetación y su respuesta al cambio climático entre 2000 y 2016 en las marismas de la llanura de Songnen, noreste de China”. Quienes también reportaron un coeficiente de correlación de ( $R^2$ ) = 0.559, entre el NDVI mensual y la precipitación. Por otra parte Chang et al. (2023), en su investigación

titulado “Cambios en la cubierta vegetal de los humedales y su respuesta a los cambios climáticos en la cuenca del río Heilongjiang-Amur”. Reportaron un coeficiente de correlación de  $(R^2) = 0.643$ , entre el LAI (Índice de Área de la Hoja) y la precipitación.

### Figura 19

*Correlación de Pearson entre el Área de cobertura vegetal del bofedal (ha) y la Temperatura máxima (°C)*

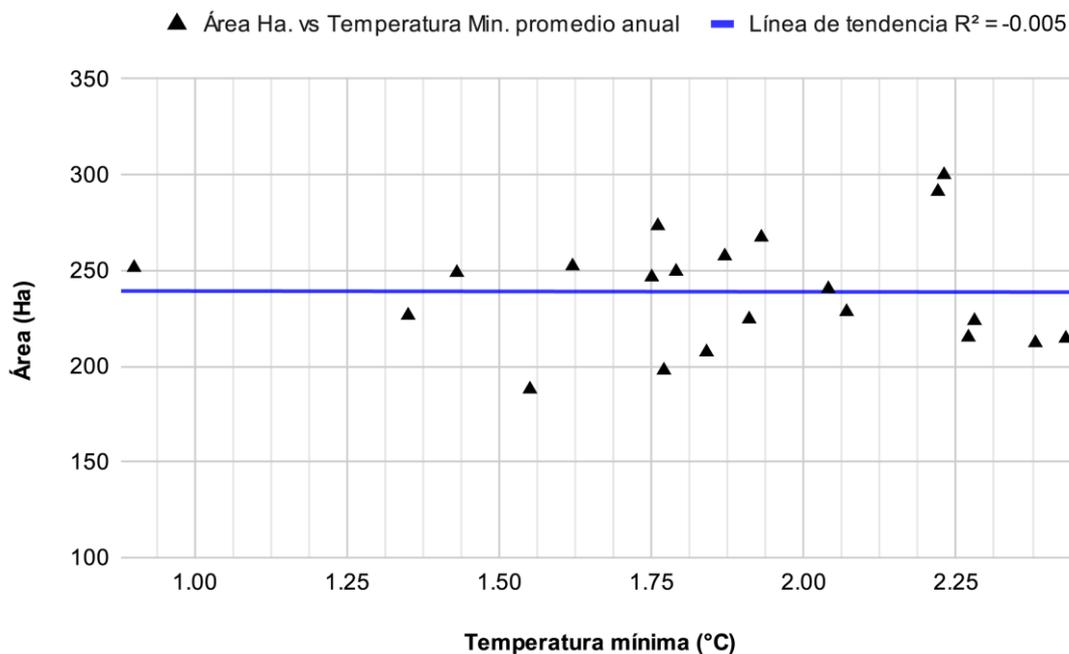


- **Área de cobertura vegetal del bofedal vs Temperatura máxima (°C):** Indica un coeficiente  $R^2 = (-0.42)$ , Según el Criterio del coeficiente de correlación de Pearson (tabla N° 9), nos indica que este valor es una correlación negativa moderada. Es decir, que a medida que la temperatura máxima (°C) incrementa, el área de cobertura vegetal del bofedal tiende a disminuir. Nuestro resultado coincide con la investigación de Wang et al. (2020), “El cambio de vegetación y su respuesta al cambio climático entre 2000 y 2016 en las marismas de la llanura de Songnen, noreste de China”.

Reportaron una correlación entre el NDVI mensual y temperatura máxima y la resultante fue una asociación negativa de  $(R^2) = -0.409$ . Aunque Chang et al. (2023), en su investigación titulado “Cambios en la cubierta vegetal de los humedales y su respuesta a los cambios climáticos en la cuenca del río Heilongjiang-Amur”. Reporto un coeficiente de correlación de  $(R^2) = -0.204$ , entre el LAI (Índice de Área de la Hoja) y la Temperatura máxima, donde el NDVI de la temporada de crecimiento estuvo fuertemente asociado negativamente con T max. Sin embargo, en las regiones de praderas áridas y semiáridas de la llanura de Songnen y Mongolia Interior Oriental, las altas temperaturas de la temporada de crecimiento podrían prohibir el crecimiento de la vegetación posiblemente debido al alto nivel de limitación hídrica inducido por el calentamiento.

### Figura 20

*Correlación de Pearson entre el Área de cobertura vegetal del bofedal (ha) y la Temperatura mínima (°C)*





– **Área de cobertura vegetal del bofedal vs Temperatura mínima (°C):**

Indica un coeficiente de correlación de  $(R^2) = -0.0051$ , Según el Criterio del coeficiente de correlación de Pearson (tabla N° 9), sugiere que no hay correlación entre las dos variables.

De acuerdo con los resultados del análisis de correlación de Pearson, las variables que determinan y se relacionan significativamente con los cambios en el área de cobertura vegetal del bofedal es la precipitación pluvial (mm) y la temperatura máxima (°C). Contrariamente a los resultados de Gutiérrez (2018), “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”. En dicho estudio, atribuye que la temperatura máxima era el factor climático que más influía en el comportamiento de los bofedales, pero el coeficiente de correlación era positiva moderada ( $R^2=0.46$ ). este resultado se debe a que solo utilizo la regresión lineal (coeficiente de determinación). |

Sin embargo nuestra investigación concuerda con el estudio de (Pamo & Oscco, 2022), “Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección” En este estudio, determino que la precipitación pluvial tiene una mayor relación con la cobertura del bofedal, similar a nuestro hallazgo.



## V. CONCLUSIONES

**PRIMERO:** Existe una disminución acelerada del área de cobertura vegetal del bofedal en la microcuenca de Potojani Grande, habiéndose determinado una disminución de 60.93 ha., durante el periodo de 21 años. En cuanto a la composición florística las 5 familias con mayor abundancia y riqueza en la actualidad son: Poaceae (14 spp), Cyperaceae (4 spp), Plantaginaceae (3 spp), Asteraceae (7 spp) y Rosaceae (3 spp). Por otro lado, dentro de las variables climáticas que tienen influencias en los cambios de área de cobertura vegetal del bofedal son la precipitación pluvial y la temperatura máxima.

**SEGUNDO:** La clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest utilizada nos da un valor de coeficiente Kappa de 0.87, lo que indica una precisión general del 94.73%, mostrando una fuerza de concordancia casi perfecta entre, representación y ajuste de datos. La cuantificación de área de cobertura vegetal del bofedal de la microcuenca de Potojani Grande, estableció que, en el año 2003 el bofedal contaba con un área de cobertura bofedal de 248.85 ha.; así mismo, estableció para el año 2023 un área de 187.92 has lo que implica una reducción 60.93 ha., que representa una pérdida de 24.48 % del área de cobertura vegetal.

**TERCERO:** La reducción de área de cobertura vegetal del bofedal está parcialmente condicionada por factores climáticos. Los resultados de la correlación de área de cobertura vegetal del bofedal y precipitación pluvial (mm) fue una correlación moderada positiva, con un coeficiente de  $R^2 = 0.53$ . En contraste, se estableció una correlación moderada negativa entre el área de



cobertura vegetal del bofedal y temperatura máxima ( $^{\circ}\text{C}$ ), con un coeficiente de  $R^2 = -0.42$ . Por otro lado, la correlación entre el área de cobertura vegetal del bofedal y temperatura mínima ( $^{\circ}\text{C}$ ), es prácticamente nula, con un coeficiente de  $R^2 = -0.0051$ . Finalmente, se puede inferir que existen otros factores que podrían tener influencia en la pérdida de área de cobertura vegetal del bofedal como son las actividades antrópicas relacionadas con el sobrepastoreo y una deficiente gestión de cuidado y mantenimiento del bofedal.



## VI. RECOMENDACIONES

Dado los resultados encontrados en la presente investigación nos permitimos dar las siguientes recomendaciones:

**PRIMERA:** Se recomienda utilizar imágenes satelitales de alta resolución como Sentinel-2, para continuar con futuros estudios y monitoreos de bofedales para obtener una evaluación precisa de los cambios multitemporales de las áreas cobertura vegetal de bofedales.

**SEGUNDO:** Se recomienda utilizar la teledetección espacial y clasificación supervisada mediante el algoritmo Random Forest en la plataforma Google Earth Engine (GEE) para llevar a cabo un monitoreo continuo y sistemático del área de cobertura vegetal del bofedal para proponer una mejor la gestión de los recursos hídricos mediante estrategias como la siembra y cosecha de agua en las laderas circundantes del bofedal.

**TERCERO:** Llevar a cabo un análisis integral y detallado de los efectos del cambio climático en los bofedales y de las actividades antropogénicas de la microcuenca de Potojani Grande, a fin de desarrollar estrategias de adaptación y mitigación de los impactos climáticos. Asimismo, identificar e implementar buenas prácticas ganaderas para evitar el sobrepastoreo, reduciendo de esta manera la presión sobre este ecosistema frágil.



## VII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alves, T. L. B., Azevedo, P. V. de, Santos, C. A. C. dos, & Santos, F. A. C. (2018). Evolução espaço-temporal do albedo e da cobertura vegetal da superfície na bacia hidrográfica do alto curso do Rio Paraíba. *Geosul*, 33(66), 147–171. <https://doi.org/10.5007/2177-5230.2018v33n66p147>
- Alzérreca, H. (2001). *Los campos naturales de pastoreo del parque nacional sajama (PNS) y su capacidad de carga* (p. 154 p).
- Amani, M., Mahdavi, S., Kakooei, M., Ghorbanian, A., Brisco, B., Delancey, E., Toure, S., & Reyes, E. L. (2021). Wetland Change Analysis in Alberta, Canada Using Four Decades of Landsat Imagery. *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, 14, 10314–10335. <https://doi.org/10.1109/JSTARS.2021.3110460>
- Beers & GIS. (2017). *Cálculo del índice NDWI*. <http://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-ndwi-diferencial-de-agua-normalizado/>
- Bustamante, A. M. (2013). *Series de tiempo: Una aplicación a registros hidrométricos en una cuenca del Estado de Oaxaca*. <https://n9.cl/ldsqtu>
- Buytaert, W., Cuesta-Camacho, F., & Tobón, C. (2011). Potential impacts of climate change on the environmental services of humid tropical alpine regions. *Global Ecology and Biogeography*, 20(1), 19–33. <https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2010.00585.x>
- Cabana, W. E. (2020). *Dinámica de cambio en la cobertura/uso del suelo, caso distrito de Paratía—Puno, periodo (1988 – 2016)*. Universidad Nacional del Altiplano.
- Calvo, V. (2016). *Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de bofedales de alta montaña* [Universidad Nacional Agraria La Molina Facultad de Zootecnia.]. <https://repositorio.concytec.gob.pe/handle/20.500.12390/2017>
- Camalleri, C., Micale, F., & Vogt, J. (2016). A novel soil moisture-based drought severity index (DSI) combining water deficit magnitude and frequency. *Hydrological Processes*, 30(2), 289–301. <https://doi.org/10.1002/hyp.10578>



- Campos, C. A., Konstantinovich, S. E., & Igorevich, G. I. (2016). *Hidráulica e hidrología para ingeniería* (pp. 163–163).
- Carranza, G. J., & Tasilla, M. F. E. (2020). Pérdida de cobertura vegetal en el distrito de Morales, San Martín, Perú (periodo 1987 – 2017). *Revista de Investigación Ciencia, Tecnología y Desarrollo*, 6(1), 1–2. <https://doi.org/10.17162/rictd.v6i1.1400>
- Castilla, J. (2016). *IPICIM: Módulo Clasificador de Imágenes Ópticas Multiespectrales Aplicado al Área de Geociencias* [Instituto Potosino de Investigación Científica y Tecnológica, A.C]. <https://n9.cl/2k1kz8>
- Castillo, F. (2022). Análisis multitemporal de la dinámica glaciar y su influencia sobre lagunas y humedales alto andinos en la cordillera blanca - Perú, periodo 1989-2019 [Universidad Nacional “Santiago Antúnez de Mayolo”]. In *Ciencia e Investigación* (Vol. 4, Issue 1). <https://www.mendeley.com/catalogue/santiago-antunez-mayolo/>
- Cerda L, J., & Villarroel del P, L. (2008). Evaluación de la concordancia inter-observador en investigación pediátrica: Coeficiente de Kappa. *Revista Chilena de Pediatría*, 79(1). <https://doi.org/10.4067/S0370-41062008000100008>
- Chang, X., Yu, L., Li, G., Li, X., & Bao, L. (2023). Wetland vegetation cover changes and its response to climate changes across Heilongjiang-Amur River Basin. *Frontiers in Plant Science*, 14. <https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1169898>
- Chereque, M. (2005). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*.
- Chiew, F., & Siriwardena, L. (2005). Trend / change detection software. © CRC for *Capchment Hydrology*, 25. <https://toolkit.ewater.org.au/Tools/TREND/downloads?id=1000022>
- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: la observación de la tierra desde el espacio* (ARIEL (ed.)).
- Cocke, A. E., Fulé, P. Z., & Crouse, J. E. (2005). Comparison of burn severity assessments using Differenced Normalized Burn Ratio and ground data. *International Journal of Wildland Fire*, 14(2), 189. <https://doi.org/10.1071/WF04010>
- Congedo, L. (2022). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation. Version*



7.9.7.1. 216. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.29474.02242/1>

- Crispin, C. M. (2015). *Valoración económica ambiental de los bofedales del distrito de Pilpichaca, Huancavelica, Perú* [Universidad Nacional Agraria la Molina]. <https://n9.cl/cpzvp>
- Di Leo, N. (2015). *Drones: nueva dimensión de la teledetección agroambiental y nuevo paradigma para la agricultura de precisión*. <https://n9.cl/nsbx4>
- Espinosa, Z. J. J. (2020). Aplicación de algoritmos Random Forest y XGBoost en una base de solicitudes de tarjetas de crédito. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(3), 1–16. <https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21.3.022>
- Fahad, K. H., Hussein, S., & Dibs, H. (2020). Spatial-Temporal Analysis of Land Use and Land Cover Change Detection Using Remote Sensing and GIS Techniques. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*, 671(1). <https://doi.org/10.1088/1757-899X/671/1/012046>
- Farfán, L. R., & Farfán, T. E. (2012). *Producción de pasturas cultivadas y manejo de pastos naturales altoandinos* (Depósito L, pp. 203–204).
- Feng, Y., Lu, D., Moran, E. F., Dutra, L. V., Calvi, M. F., & de Oliveira, M. A. F. (2017). Examining Spatial Distribution and Dynamic Change of Urban Land Covers in the Brazilian Amazon Using Multitemporal Multisensor High Spatial Resolution Satellite Imagery. *Remote Sensing*, 9(4). <https://doi.org/10.3390/rs9040381>
- Flores, E., Tácuna, R., & Calvo, V. (2014). Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de bofedales. In *Laboratorio de Ecología y Utilización de Pastizales*. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/bitstream/handle/UNALM/2604/P01-C349-T.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Fuentealba, B. (2019). Bofedales: características y su importancia frente al cambio climático. *Inaigem*, 1–8. <https://bit.ly/3iwHpcq>
- García, A. K., Piriz Carrillo, V., & Gasparri, N. I. (2011). Cambio en la cobertura del suelo en la cuenca media y alta del río Lules. *La Cuenca Del Río Lules: Una Aproximación Multidisciplinaria a Su Complejidad*, May, 1–13. <https://www.researchgate.net/publication/259139918>



- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Gowri, R., Dey, P., & Mujumdar, P. P. (2021). A hydro-climatological outlook on the long-term availability of water resources in Cauvery river basin. *Water Security*, 14, 100102. <https://doi.org/10.1016/j.wasec.2021.100102>
- Gutiérrez, Y. (2018). 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 [Universidad Nacional del Altiplano Puno]. In *Tesis*. [http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/12303/Yana\\_Aydee\\_Quispe\\_Patricia.pdf?sequence=1&isAllowed=y](http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/12303/Yana_Aydee_Quispe_Patricia.pdf?sequence=1&isAllowed=y)
- Guzmán, J. L. F. . (2021). *Los derechos de acceso a la justicia ambiental en el ordenamientos jurídicos colombiano y español* Universidad Externado de Colombia [Universidad Externado de Colombia]. <https://publicaciones.uexternado.edu.co/gpd-los-derechos-de-acceso-a-la-justicia-ambiental-en-el-ordenamientos-juridicos-colombiano-y-espanol-9789587904840.html>
- Hernández-Leal, E. J., Duque-Méndez, N. D., & Moreno-Cadavid, J. (2017). Big Data: una exploración de investigaciones, tecnologías y casos de aplicación. *Tecnológicas*, 20(39), 15–38. <https://doi.org/10.22430/22565337.685>
- Hernández, J., & Montaner, D. (2009). Patrones de respuesta espectral. In *Tecnologías Geoespaciales: Experiencias Aplicadas al Estudio y Gestión del Territorio*. (Carlos Men, pp. 978-956.).
- Hernández, S., Fernández, C., & Baptista, L. (2014). *Metodología de la investigación* (McGraw-Hill (ed.); 6a. ed.).
- Hislop, S., Jones, S., Soto-Berelov, M., Skidmore, A., Haywood, A., & Nguyen, T. (2018). Using Landsat Spectral Indices in Time-Series to Assess Wildfire Disturbance and Recovery. *Remote Sensing*, 10(3), 460. <https://doi.org/10.3390/rs10030460>



- Hribljan, J. A., Cooper, D. J., Sueltenfuss, J., Wolf, E. C., Heckman, K. A., Lilleskov, E. A., & Chimner, R. A. (2015). Carbon storage and long-term rate of accumulation in high-altitude Andean peatlands of Bolivia. *Mires and Peat*, 15(12), 1–14. <http://www.mires-and-peat.net/>,
- Huete, A., Didan, K., Jacobson, Yuan, Y., Ratana, P., Sirikul, N., & Pichai, P. (2004). *Modis Spectral Vegetation Indices*. [modis.gsfc.nasa.gov/sci\\_team/pres/](http://modis.gsfc.nasa.gov/sci_team/pres/)
- INAIGEM. (2023). *Memoria descriptiva inventario nacional de bofedales*. [www.gob.pe/inaigem%0AAutores](http://www.gob.pe/inaigem%0AAutores):
- Jing, Q., He, J., Li, Y., Yang, X., Peng, Y., Wang, H., Yu, F., Wu, J., Gong, S., Che, H., & Zhang, X. (2024). Analysis of the spatiotemporal changes in global land cover from 2001 to 2020. *Science of The Total Environment*, 908, 168354. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2023.168354>
- León, A. Y. (2016). *Reserva de carbono en bofedales y su relación con la florística y condición del pastizal* [Universidad Nacional Agraria la Molina]. <https://n9.cl/n2fi7>
- Loza, D. A., & Taype, H. I. (2021). Análisis multitemporal de asociaciones vegetales y cambios de uso del suelo en una localidad altoandina, Puno-Perú. *Uniciencia*, 35(2), 1–19. <https://doi.org/10.15359/ru.35-2.3>
- Loza, S., Meneses, R., & Anthelme, F. (2015). Comunidades vegetales de los bofedales de la Cordillera Real (Bolivia) bajo el calentamiento Olaya, V. (2014). Sistemas de Información Geográfica (Issue 1).global. *Ecología En Bolivia*, 50(1), 39–56. [http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci\\_pdf&pid=S1605-25282015000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es](http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_pdf&pid=S1605-25282015000100004&lng=en&nrm=iso&tlng=es)
- Maldonado, F. M. (2014). Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana. *Mires and Peat*, 13(2006), 1–13.
- Masson-Delmotte, V. (2022). *Global warming of 1.5°C: An IPCC Special Report on impacts of global warming of 1.5°C above pre-industrial levels and related global greenhouse gas emission pathways, in the context of strengthening the global response to the threat of climate change, su* (Valérie). Publicado por Cambridge University Press. <https://cir.nii.ac.jp/crid/1130574323982454028>



- Matsushita, B., Yang, W., Chen, J., Onda, Y., & Qiu, G. (2007). Sensitivity of the Enhanced Vegetation Index (EVI) and Normalized Difference Vegetation Index (NDVI) to Topographic Effects: A Case Study in High-density Cypress Forest. *Sensors*, 7(11), 2636–2651. <https://doi.org/10.3390/s7112636>
- Meneses, R. I., Loza Herrera, S., Lliully, A., Palabral, A., Anthelme, F., Meneses, R. I., Loza Herrera, S., Lliully, A., Palabral, A., & Anthelme, F. (2014). Métodos para cuantificar diversidad y productividad vegetal de los bofedales frente al cambio climático. *Ecología En Bolivia*, 49(3), 42–55. [https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins\\_textes/divers15-09/010065196.pdf](https://horizon.documentation.ird.fr/exl-doc/pleins_textes/divers15-09/010065196.pdf)
- Merry, K., Bettinger, P., Crosby, M., & Boston, K. (2023). Remote sensing. In K. B. Krista Merry, Pete Bettinger, Michael Crosby, G. I. S. S. for F. and N. R. Managers, & Elsevier (Eds.), *Geographic Information System Skills for Foresters and Natural Resource Managers* (pp. 269–301). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-323-90519-0.00001-7>
- MINAM. (2014a). Protocolo: Evaluacion de la Exactitud Tematica del Mapa de Deforestación. *Ministerio Del Ambiente*, 1–32. <https://n9.cl/xwf2r>
- MINAM. (2014b). Protocolo: Evaluacion de la Exactitud Tematica del Mapa de Deforestación. *Ministerio Del Ambiente*, 1–32. <http://www.minam.gob.pe/ordenamientoterritorial/wp-content/uploads/sites/18/2013/10/Protocolo-Validacion-Mapa-Deforestacion.pdf>
- MINAM. (2015a). Estrategia Nacional de Humedales. In *Diario El Peruano*. <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2015/01/Anexo-Decreto-Supremo-N°-004-2015-MINAM2.pdf>
- MINAM. (2015b). Mapa Nacional de Cobertura Vegetal. *Memoria Descriptiva*, 108. <https://www.gob.pe/minam>
- Moritz, S., & Bartz-Beielstein, T. (2017). imputeTS: Time series missing value imputation in R. *R Journal*, 9(1), 207–218. <https://doi.org/10.32614/rj-2017-009>
- Muro, J., Varea, A., Strauch, A., Guelmami, A., Fitoka, E., Thonfeld, F., Diekkrüger, B., & Waske, B. (2020). Multitemporal optical and radar metrics for wetland mapping



- at national level in Albania. *Heliyon*, 6(8), e04496.  
<https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2020.e04496>
- Murugan, M., Selvaraj, R., & Nagarajan, S. (2022). Assessment of land use land cover change detection in multitemporal satellite images using machine learning algorithms. In A. K. S. I. C. D. S. in S. C. Yu-Dong Zhang, C. S. and S. P. in I. Processing, & A. Press (Eds.), *Cognitive Systems and Signal Processing in Image Processing* (pp. 27–45). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-824410-4.00006-4>
- Navarro, J. C. T., Rivera, C. J. P., Cepeda, M. J. C. A., & Meza, R. E. (2020). Análisis de métodos de fusión de imágenes Landsat 8 sobre coberturas y uso del suelo en el municipio de Bahía de Banderas, Nayarit. *EDUCATECONCIENCIA*, 10(11), 58–72. <https://doi.org/10.58299/edu.v10i11.201>
- Ngo, D. T., Nguyen, H. D., & Nguyen, H. C. (2023). Assessment of fluctuations in wetland ecosystem areas resulting from anthropogenic activities in the Dong Rui commune, Quang Ninh Province, Vietnam. *Heliyon*, 9(6), e16984. <https://doi.org/10.1016/j.heliyon.2023.e16984>
- Ochoa, F. (2023). *¿Qué es un análisis multitemporal?* 20 de Enero. <https://acolita.com/que-es-un-analisis-multitemporal/>
- Olaya, V. (2020). *Sistemas de Información Geográfica* (Issue 1). <https://volaya.github.io/libro-sig/>
- Otto, M., Scherer, D., & Richters, J. (2011). Hydrological differentiation and spatial distribution of high altitude wetlands in a semi-arid Andean region derived from satellite data. *Hydrology and Earth System Sciences*, 15(5), 1713–1727. <https://doi.org/10.5194/hess-15-1713-2011>
- Ozesmi, S., & Bauer, M. (2014). Satellite remote sensing of wetlands. *Wetlands Ecology and Management*, 10, 381–402. <https://doi.org/https://doi.org/10.1023/A:1020908432489>
- Pamo, J., & Oscco, C. E. (2022). Análisis espacio temporal del bofedal de la comunidad de Ancomarca (Tacna - Perú) durante el período 1990 – 2021, con técnicas de teledetección. *Revista Ciencias Biológicas y Ambientales*, 1(1), 43–53.



<https://doi.org/10.33326/29585309.2022.1.1587>

- Pauca, A., Ramos, C., Luque, C. R., Talavera, C., Villasante, J. F., Quispe, J. P., & Villegas, L. (2020). Análisis espacio temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el periodo 1986-2016. *Revista de Teledetección*, 55, 105. <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>
- Pearson, K. (1896). VII. Mathematical contributions to the theory of evolution.—III. Regression, heredity, and panmixia. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London. Series A, Containing Papers of a Mathematical or Physical Character*, 187, 253–318. <https://doi.org/10.1098/rsta.1896.0007>
- Peng, B., Meng, Z., Huang, Q., & Wang, C. (2019). Patch similarity convolutional neural network for urban flood extent mapping using bi-temporal satellite multispectral imagery. *Remote Sensing*, 11(21). <https://doi.org/10.3390/rs11212492>
- Perilla, G. A., & Mas, J.-F. (2020). Google Earth Engine (GEE): una poderosa herramienta que vincula el potencial de los datos masivos y la eficacia del procesamiento en la nube. *Investigaciones Geográficas*, 101. <https://doi.org/10.14350/rig.59929>
- Prasad, A. D., Ganasala, P., Hernández-Guzmán, R., & Fathian, F. (2022). Remote sensing satellite data and spectral indices: an initial evaluation for the sustainable development of an urban area. *Sustainable Water Resources Management*, 8(1), 19. <https://doi.org/10.1007/s40899-022-00607-2>
- Rao, K. P. C., Sridhar, G., Mulwa, R. M., Kilavi, M. N., Esilaba, A., Athanasiadis, I. N., & Valdivia, R. O. (2015). *Impacts of Climate Variability and Change on Agricultural Systems in East Africa* (pp. 75–124). [https://doi.org/10.1142/9781783265640\\_0015](https://doi.org/10.1142/9781783265640_0015)
- Robinson, S. ann. (2020). Climate change adaptation in SIDS: A systematic review of the literature pre and post the IPCC Fifth Assessment Report. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Climate Change*, 11(4), 1–21. <https://doi.org/10.1002/wcc.653>
- Rouse, J. W., Haas, R. H., Schell, J. A., Deering, D. W., & Harlan, J. C. (1974). Monitoring the vernal advancements and retrogradation of natural vegetation. *NASA/GSFC, Final Report, Greenbelt, MD, USA, September 1972*, 1–137.



- [http://scholar.google.com/scholar?q=related:kfZY0xukQScJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as\\_sdt=0,5%5Cnpapers2://publication/uuid/FB22B85B-B2F9-442E-AF63-58F3517012FC](http://scholar.google.com/scholar?q=related:kfZY0xukQScJ:scholar.google.com/&hl=en&num=20&as_sdt=0,5%5Cnpapers2://publication/uuid/FB22B85B-B2F9-442E-AF63-58F3517012FC)
- Ruiz, V., Savé, R., & Herrera, A. (2013). Multitemporal analysis of land use change in the Terrestrial Protected Landscape Miraflor Moropotente Nicaragua, 1993-2011. *Ecosistemas*, 22(3), 117–123. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2013.22-3.16>
- Sajichandrachood, O. ., & Sethunadh, R. (2023). Detection and segmentation of radio frequency interference from satellite images using attention-GANs. In *Astronomy and Computing* (Vol. 45, p. 100769). <https://doi.org/10.1016/j.ascom.2023.100769>
- Samaniego, O. J. L. (2021). Análisis multitemporal de cobertura y dinámica geomorfológica de la microcuenca Shucos, del cantón Loja [Universidad de Piura]. In *Universidad de Piura*. <https://pirhua.udep.edu.pe/handle/11042/5347>
- Sánchez, R. A. A. (2011). Análisis multitemporal de la cobertura de la tierra en la Cuenca del Valle de Jesús de Otoro, entre los años 2000-2006, aplicando técnicas de teledetección. *Dialnet*, págs. 224-237. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=4406678>
- Solórzano, J., & Perilla, G. (2022). *Cómo usar Google Earth Engine y no Fallar en el Intento*. Universidad Nacional Autónoma de México, Centro de Investigaciones en Geografía Ambiental. <https://doi.org/10.22201/ciga.9786073066969e.2022>
- Taloor, A. K., Manhas, D. S., & Kothyari, C. G. (2021). Retrieval of land surface temperature, normalized difference moisture index, normalized difference water index of the Ravi basin using Landsat data. *Applied Computing and Geosciences*, 9(August 2020), 100051. <https://doi.org/10.1016/j.acags.2020.100051>
- Uribe, B. E. (2013). El cambio climático y sus efectos en la biodiversidad en América latina. In *Revista Cubana de Higiene y Epidemiología* (Vol. 51, Issue 3).
- USGS. (2024). *¿Cuáles son las designaciones de bandas de los satélites Landsat?* <https://www.usgs.gov/faqs/what-are-band-designations-landsat-satellites>
- Vankova, L., Krejza, Z., Kocourkova, G., & Laciga, J. (2021). Geographic Information System Usage Options in Facility Management. *Procedia Computer Science*,



- 196(2021), 708–716. <https://doi.org/10.1016/j.procs.2021.12.067>
- Veettil, A. V., Mishra, A. K., & Green, T. R. (2022). Explaining water security indicators using hydrologic and agricultural systems models. *Journal of Hydrology*, 607, 127463. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127463>
- Villón, B. M. (2020). *Hidrología* (2da ed. Ce).
- Wang, Y., Shen, X., Jiang, M., & Lu, X. (2020). Vegetation Change and Its Response to Climate Change between 2000 and 2016 in Marshes of the Songnen Plain, Northeast China. *Sustainability*, 12(9), 3569. <https://doi.org/10.3390/su12093569>
- Xiang, H., Xi, Y., Mao, D., Mahdianpari, M., Zhang, J., Wang, M., Jia, M., Yu, F., & Wang, Z. (2023). Mapping potential wetlands by a new framework method using random forest algorithm and big Earth data: A case study in China's Yangtze River Basin. *Global Ecology and Conservation*, 42, e02397. <https://doi.org/10.1016/j.gecco.2023.e02397>
- Yager, K., Prieto, M., & Meneses, R. I. (2021). Reframing Pastoral Practices of Bofedal Management to Increase the Resilience of Andean Water Towers. *Mountain Research and Development*, 41(4), A1–A9. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-21-00011.1>
- Yager, K., Valdivia, C., Slayback, D., Jimenez, E., Meneses, R. I., Palabral, A., Bracho, M., Romero, D., Hubbard, A., Pacheco, P., Calle, A., Alberto, H., Yana, O., Ulloa, D., Zeballos, G., & Romero, A. (2019). Socio-ecological dimensions of Andean pastoral landscape change: bridging traditional ecological knowledge and satellite image analysis in Sajama National Park, Bolivia. *Regional Environmental Change*, 19(5), 1353–1369. <https://doi.org/10.1007/s10113-019-01466-y>
- Zhou, J., Wu, Y., Wu, C., He, F., Zhang, B., & Liu, F. (2020). A geographical information system based multi-criteria decision-making approach for location analysis and evaluation of urban photovoltaic charging station: A case study in Beijing. *Energy Conversion and Management*, 205(August 2019), 112340. <https://doi.org/10.1016/j.enconman.2019.112340>



## ANEXOS

### ANEXO 1. Solicitud enviada al presidente de la comunidad Talaca Huaylluni

*"Año de la unidad, la paz y el desarrollo"*

**SOLICITO:** Permiso para realizar  
Trabajo de Investigación

**SEÑOR FELIX PILCO FLORES**  
**PRESIDENTE DE LA COMUNIDAD TALACA HUAYLLUNI**

*Fuél  
01260351*

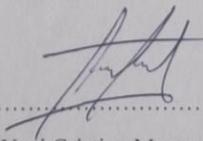
Yo, **YONI CRISTIAN MAMANI CAHUI**,  
identificado con DNI N° 75364642 Código de matrícula:  
186000 con domicilio Jirón san miguel # 124 de la  
provincia de puno. Ante Ud. Respetuosamente me  
presento y expongo:

Que habiendo culminado la carrera profesional de **INGENIERÍA  
AGRONÓMICA** en la **UNIVERSIDAD NACIONAL DEL ALTIPLANO PUNO** es  
requisito realizar un proyecto de tesis para lo cual propuse el tema de **"análisis  
multitemporal de bofedales en la comunidad de Potojani grande y su relación con  
la variabilidad climática"**. Es por ello que solicito a Ud. Permiso para realizar dicho  
trabajo de investigación en su comunidad de **TALACA HUALLUNI** para poder optar  
el grado de **INGENIERO AGRONOMO**.

**POR LO EXPUESTO:**

Ruego a usted acceder a mi solicitud.

Puno, 17 de agosto de 2023.

  
.....  
Yoni Cristian Mamani Cahui  
DNI N° 75364642



## ANEXO 2. Reporte final de Agisoft Metashape Profesional

# Agisoft Metashape Profesional

Informe de Procesamiento HMNB-PUNO

14 January 2024



Número de imágenes: 2,538  
Altitud media de vuelo: 138 m  
Resolución en terreno: 3.44 cm/pix  
Área cubierta: 5.48 km<sup>2</sup>

Panorámicas multicámara: 2,538  
Puntos de paso: 2,611,604  
Proyecciones: 9,478,379  
Error de reproyección: 0.237 pix

ANEXO 3. Tabla de composición florística de la microcuenca de Potojani Grande 2023

N°	N. Especie	N. Común	Familia	T1 Clase - Bofedal		T2 Clase - Pastizal		T3 Clase - Bofedal		T4 Clase - Pastizal		Total
				UTM	403317	8236557	403336	8237134	404486	8235100	404876	
1	<i>Bouteloua simplex</i>	Cola de zorro		0	0	3	3	0	0	5	5	8
2	<i>Bromus unioloides</i>	Cebadilla		0	0	1	1	3	3	0	0	4
3	<i>Calamagrostis rigescens</i>	Tullu pasto		2	2	2	2	2	2	1	1	7
4	<i>Calamagrostis vicinarum</i>	Crespillo		5	5	0	0	6	6	0	0	11
5	<i>Festuca dollichophylla</i>	Chilligua		17	17	4	4	23	23	6	6	50
6	<i>Festuca dichoclada</i>	Yurac ichu		2	2	1	1	3	3	1	1	7
7	<i>Festuca orthophylla</i>	Iru ichu	Poaceae	1	1	10	10	0	0	12	12	23
8	<i>Hordeum muticum</i>	Cola de raton	(46.5%)	3	3	0	0	4	4	0	0	7
9	<i>Muhlenbergia ligularis</i>	Jatun chiji		4	4	1	1	6	6	3	3	14
10	<i>Muhlenbergia fastigiata</i>	Chiji Grama dulce		8	8	2	2	4	4	2	2	16
11	<i>Pennisetum clandestinum</i>	Kikuyo		0	0	2	2	0	0	1	1	3
12	<i>Poa scaberula</i>	K acho		3	3	0	0	3	3	0	0	6
13	<i>Poa pratensis</i>	Poa		2	2	0	0	1	1	0	0	3
14	<i>Stipa ichu</i>	Ichu		0	0	11	11	0	0	16	16	27
15	<i>Chersodoma candida</i>	Yurac tola		0	0	5	5	0	0	6	6	11
16	<i>Baccharis tricuneata</i>	Pampa tola		0	0	3	3	0	0	2	2	5
17	<i>Grindelia boliviana</i>	Chiri chiri		0	0	3	3	0	0	2	2	5
18	<i>Parastrephia lepidophylla</i>	Tola	Asteraceae	0	0	2	2	0	0	3	3	5
19	<i>Hypochoeris meyeniana</i>	Pilli	(11.75%)	2	2	0	0	2	2	1	1	5
20	<i>Hypochoeris Taraxacoides</i>	Misqui pilli		4	4	1	1	3	3	0	0	8
21	<i>Gnaphalium spp.</i>	Vira vira		0	0	3	3	0	0	2	2	5
22	<i>Taraxacum officinale</i>	Diente de leon		2	2	0	0	1	1	0	0	3
23	<i>Carex andinus</i>	Carex		0	0	9	9	0	0	6	6	15
24	<i>Carex ecuadorica</i>	Qoran qoran	Cyperaceae	3	3	2	2	1	1	2	2	8
25	<i>Eleocharis albibractea</i>	Quemillo	(11%)	6	6	0	0	6	6	0	0	12
26	<i>Scirpus rigidus</i>	Totorilla matara		3	3	0	0	6	6	0	0	9
27	<i>Astragalus garbancillo</i>	Garbancillo		0	0	1	1	0	0	1	1	2
28	<i>Lupinus spp.</i>	Tarwi silvestre	Fabaceae	0	0	1	1	0	0	2	2	3
29	<i>Trifolium amabile</i>	Layo	(1.75%)	0	0	1	1	1	1	0	0	2

N°	N. Especie	N. Común	Familia	T1 Clase - Bofedal		T2 Clase - Pastizal		T3 Clase - Bofedal		T4 Clase - Pastizal		Total
				UTM	403317	8236557	403336	8237134	404486	8235100	404876	
30	<i>Tetraglochin cristatum</i>	Orco kanlli		0		8		0		3		11
31	<i>Alchemilla diplophylla</i>	Libro-libro	Rosaceae (6%)	1		0		1		0		2
32	<i>Alchemilla pinnata</i>	Sillu sillu		6		0		5		0		11
33	<i>Plantago major</i>	Llanten	Plantaginaceae	1		0		1		0		2
34	<i>Plantago rigida</i>	Cojin	Plantaginaceae (6%)	1		0		2		0		3
35	<i>Plantago tubulosa</i>	Pilli pilli		14		0		5		0		19
36	<i>Azorella diapensioides</i>	Pampa yareta	Apiaceae	1		0		1		0		2
37	<i>Hydrocotyle ranunculoides</i>	Sombrellillo chanco	Plantaginaceae (1%)	1		0		1		0		2
38	<i>Clinopodium bolivianum</i>	Pata muña	Lamiaceae	0		3		0		2		5
39	<i>Lepechinia meyenii</i>	Salvia	Lamiaceae (2%)	0		2		0		1		3
40	<i>Oenothera nana</i>	Yawar chonqa	Onagraceae	0		1		0		0		1
41	<i>Oenothera multicaulis</i>	Yawar chonqa	Onagraceae (0,5%)	0		1		0		0		1
42	<i>Ephedra rupestris</i>	Pinco pinco	Ephedraceae (1%)	0		2		0		2		4
43	<i>Elodea sp</i>	Llachu	Potamogetonaceae (0,5%)	1		0		1		0		2
44	<i>Echinopsis maximitana</i>	Sancayo	Cactaceae (0,75%)	0		1		0		2		3
45	<i>Caiophora andina</i>	Ortiga	Loasaceae (0,5%)	0		1		0		1		2
46	<i>Castilleja pumila</i>	Phusa phusa	Orobanchaceae (0,5%)	1		0		1		0		2
47	<i>Myriophyllum quitensi</i>	Llachu	Haloragaceae (0,5%)	1		0		1		0		2
48	<i>Manitillo</i>		0,25%	4		0		5		0		9
49	<i>Roca</i>		3,25%	0		7		0		6		13
50	<i>Suelo desnudo</i>		4,25%	1		6		1		9		17
<b>TOTAL</b>				<b>100</b>		<b>100</b>		<b>100</b>		<b>100</b>		<b>400</b>

#### ANEXO 4. Panel fotográfico



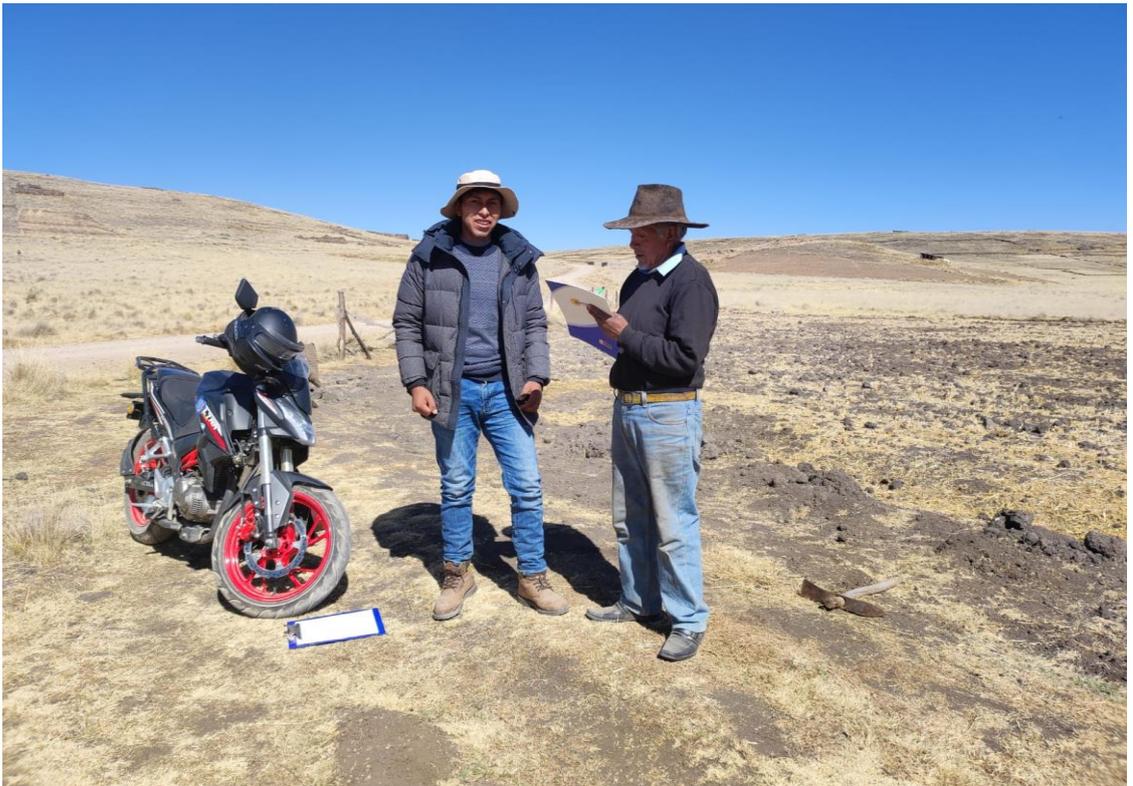
Nota: Establecimiento de puntos de entrenamiento georreferenciados



Nota: Transecto al paso con el anillo censador (T1 clase bofedal)



Nota: Censo de vegetación del bofedal



Nota: Llegada al bofedal de la microcuenca de Potojani Grande conversación con un productor agropecuario.



Nota: Pastoreo de vacunos en el bofedal



Nota: Pastoreo de ovinos en el bofedal

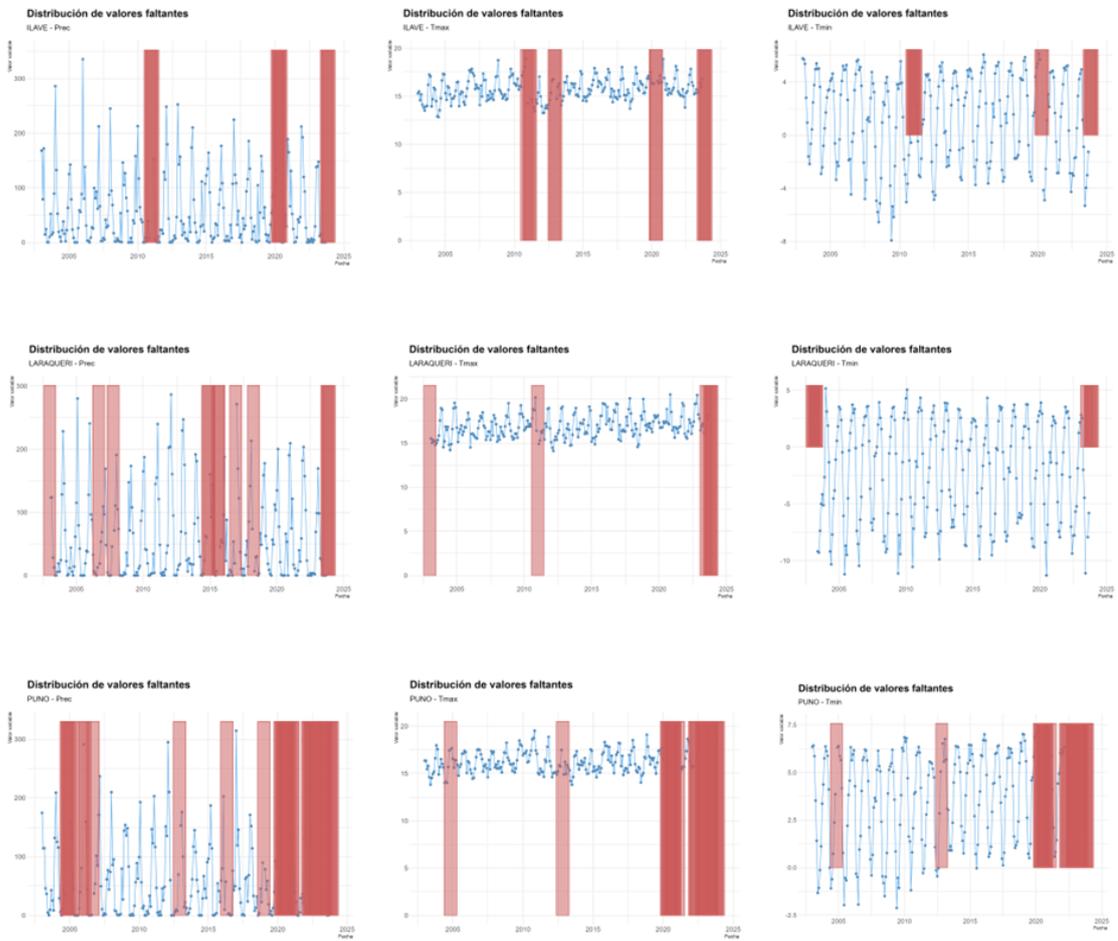


Nota: Vista panorámica del punto de aforo de la microcuenca de Potojani Grande

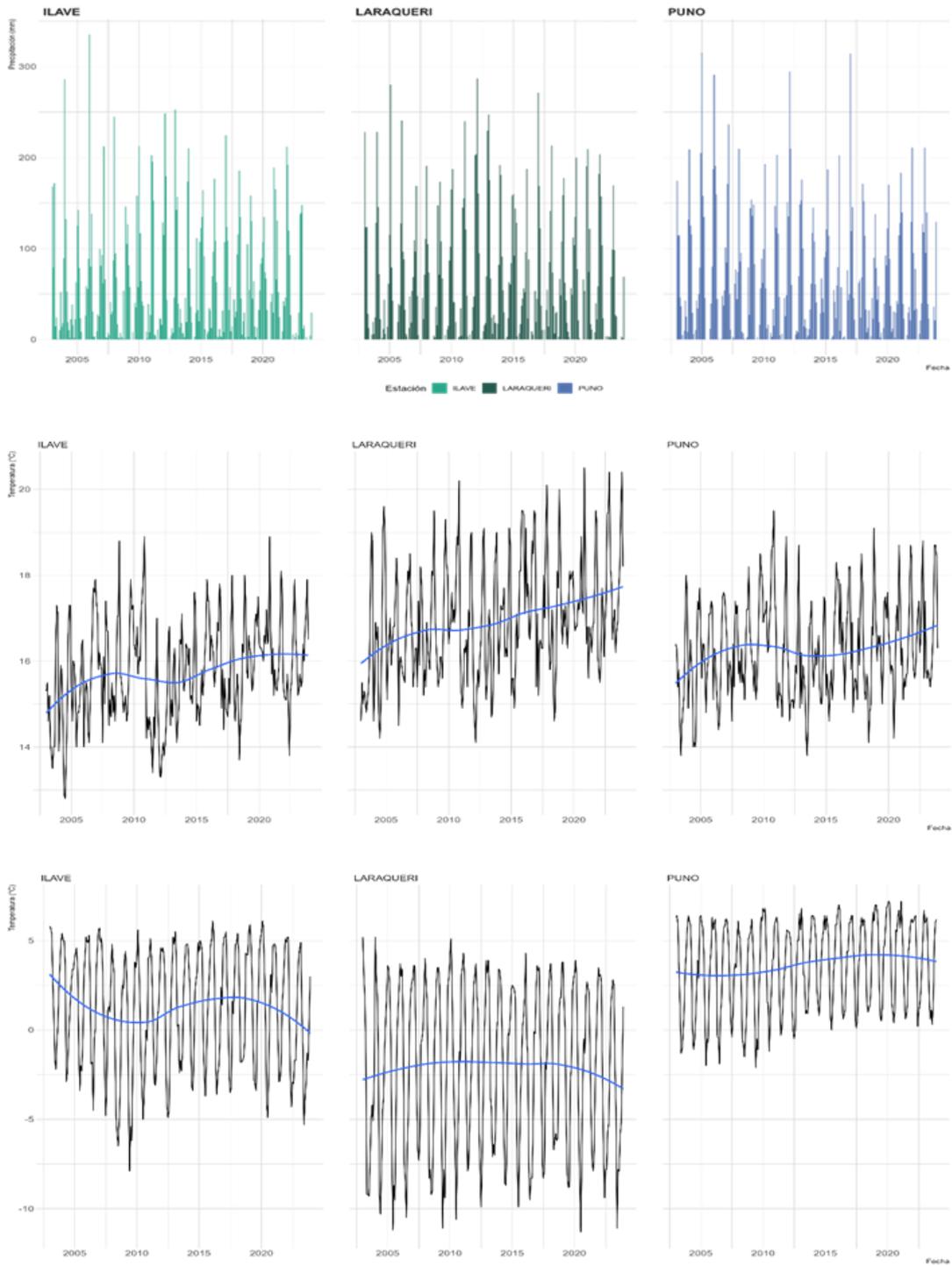


Nota: Punto de control N° 2 (Levantamiento fotogramétrico con Dron)

## ANEXO 5. Distribución de datos faltantes en las Estaciones Ilave, Laraqueri y Puno



## ANEXO 6. Distribución de datos completos en las Estaciones Ilave, Laraqueri y Puno





## ANEXO 7. Registro de precipitación acumulada mensual (mm) Estación Ilave periodo 2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2003	168.1	78.9	172.0	14.5	24.3	0.5	0.0	10.3	52.2	14.1	17.9	89.3	642.1
2004	286.1	132.5	52.6	19.4	10.2	1.6	22.1	38.3	15.9	2.0	22.4	63.2	666.3
2005	125.1	142.5	78.7	23.6	8.3	0.0	0.0	0.0	26.2	58.7	55.7	88.5	607.3
2006	335.4	80.1	138.3	30.8	3.2	3.0	0.0	8.9	27.7	25.6	99.6	81.1	833.7
2007	92.9	61.8	212.4	66.2	2.5	2.1	7.8	5.2	41.5	27.5	30.6	87.1	637.6
2008	245.1	94.7	68.5	17.0	1.8	1.4	7.2	3.2	1.4	53.7	0.6	146.2	640.8
2009	105.1	126.7	81.7	57.5	0.0	0.0	8.2	0.0	40.5	35.2	158.0	57.4	670.3
2010	212.9	116.9	64.4	42.1	37.2	0.0	0.0	8.7	1.2	39.0	7.8	26.8	557.0
2011	202.7	195.3	152.6	5.6	4.0	0.0	11.0	0.0	23.1	22.6	16.0	128.9	761.8
2012	115.0	248.4	179.6	43.5	0.0	1.2	0.0	4.2	12.5	7.5	46.3	252.6	910.8
2013	142.8	157.0	39.3	13.4	33.7	18.3	7.2	6.5	2.5	46.0	19.1	173.6	659.4
2014	210.4	78.2	36.0	18.6	0.0	0.0	3.3	29.2	111.5	32.3	20.1	107.3	646.9
2015	122.6	135.0	164.2	91.5	11.6	0.0	6.1	9.2	34.5	31.9	12.9	69.6	689.1
2016	96.7	176.8	108.5	63.2	3.4	2.2	11.4	3.8	2.4	32.0	8.2	107.3	615.9
2017	224.6	123.8	108.5	32.3	57.7	9.1	14.5	0.0	44.1	24.3	30.8	93.4	763.1
2018	115.8	185.6	134.9	45.0	5.4	20.0	29.5	2.7	0.0	104.7	3.1	54.5	701.2
2019	158.0	130.2	44.7	64.2	14.6	2.3	13.3	0.0	32.4	54.0	83.4	89.6	686.7
2020	107.3	134.5	74.0	66.9	32.4	0.0	0.0	0.0	41.3	50.1	29.6	189.0	725.1
2021	165.1	66.2	130.8	52.1	24.7	0.0	0.9	9.2	42.0	36.9	46.3	212.0	786.2
2022	192.3	119.8	93.1	26.8	0.0	5.4	0.0	2.8	7.0	0.0	4.4	29.4	481.0
2023	137.9	139.3	147.7	11.8	15.5	0.0	2.3	2.8	7.0	0.0	4.4	29.4	498.1
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	169.6	129.7	108.7	38.4	13.8	3.2	6.9	6.9	27.0	33.2	34.2	103.6	675.3
Desv. Est.	65.62	46.19	51.17	23.41	15.68	5.75	8.01	9.70	25.87	24.09	38.53	60.98	101.9
Coef. Var.	0.39	0.36	0.47	0.61	1.13	1.80	1.16	1.41	0.96	0.72	1.13	0.59	0.15
Max.	335.4	248.4	212.4	91.5	57.7	20.0	29.5	38.3	111.5	104.7	158.0	252.6	335.4
Min.	92.9	61.8	36.0	5.6	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.6	26.8	0.0

Fuente: SENAMHI (2023).



## ANEXO 8. Registro de temperatura máxima mensual (°C) Estación Ilave periodo 2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
2003	15.3	15.5	14.6	15.2	14.1	13.8	13.5	14.0	14.0	16.2	17.3	17.1	15.1
2004	13.9	14.7	15.9	15.7	14.5	12.9	12.8	13.6	14.8	16.6	17.3	17.3	15.0
2005	15.3	14.6	16.0	15.9	15.2	14.0	14.8	14.8	15.0	15.6	16.4	16.5	15.3
2006	14.0	15.2	15.5	15.4	14.4	14.1	15.0	15.8	16.6	17.7	17.6	17.9	15.8
2007	17.4	17.1	15.8	16.2	15.9	15.8	14.1	16.1	15.0	17.4	16.7	16.7	16.2
2008	14.5	15.1	14.7	15.5	14.8	15.2	14.6	15.6	17.0	17.1	18.8	15.7	15.7
2009	15.5	15.2	14.8	15.0	15.2	14.6	14.8	15.7	17.0	17.9	17.2	17.3	15.9
2010	16.4	16.3	16.1	16.8	15.7	16.1	16.0	17.2	17.5	18.0	18.9	17.1	16.8
2011	14.2	15.0	14.7	14.7	14.4	13.9	13.4	14.7	14.2	15.4	17.0	15.0	14.7
2012	14.0	13.3	13.3	13.8	14.1	13.8	14.1	14.6	15.3	16.6	16.8	14.5	14.5
2013	14.9	14.7	16.0	16.3	15.1	14.1	14.5	15.0	16.5	16.4	17.1	15.6	15.5
2014	15.3	15.6	16.4	16.3	15.9	16.3	15.1	15.2	15.0	15.8	17.6	17.3	16.0
2015	14.6	15.0	14.9	14.5	15.0	15.8	15.2	15.6	16.2	16.7	17.9	17.4	15.7
2016	17.4	16.0	16.6	16.4	16.2	15.4	15.7	15.9	16.9	16.7	17.8	17.5	16.5
2017	14.9	15.8	14.4	15.6	14.9	14.8	14.7	15.6	15.0	16.7	18.0	16.8	15.6
2018	15.1	14.6	15.1	15.7	15.3	13.7	14.5	14.7	16.4	16.2	18.0	17.4	15.6
2019	15.8	15.6	16.6	16.3	16.2	15.3	15.4	15.9	16.9	17.1	16.8	17.5	16.3
2020	16.4	16.3	16.3	16.3	16.3	16.6	16.4	17.2	16.4	16.5	18.9	16.9	16.7
2021	15.7	16.3	15.2	15.8	15.4	15.3	15.6	15.9	16.9	18.1	17.7	15.5	16.1
2022	15.2	15.1	15.1	15.7	14.9	13.8	15.3	15.5	16.2	17.2	17.9	16.5	15.7
2023	16.1	15.2	15.3	15.7	15.4	15.5	16.4	15.7	15.8	16.8	18.0	17.0	16.1
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	15.3	15.3	15.4	15.7	15.2	14.8	14.9	15.4	15.9	16.8	17.6	16.7	15.8
Desv. Est.	1.01	0.81	0.84	0.72	0.67	1.02	0.94	0.88	1.02	0.75	0.71	0.91	0.61
Coef. Var.	0.07	0.05	0.05	0.05	0.04	0.07	0.06	0.06	0.06	0.04	0.04	0.05	0.04
Max.	17.4	17.1	16.6	16.8	16.3	16.6	16.4	17.2	17.5	18.1	18.9	17.9	18.9
Min.	13.9	13.3	13.3	13.8	14.1	12.9	12.8	13.6	14.0	15.4	16.4	14.5	12.8

Fuente: SENAMHI (2023).

## ANEXO 9. Registro de temperatura mínima mensual (°C) Estación Ilave periodo 2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
2003	5.8	5.7	5.4	2.8	0.9	-1.6	-2.2	-0.7	0.4	2.5	3.8	5.0	2.3
2004	5.4	5.0	5.0	3.6	-2.9	-2.4	-0.8	0.5	1.7	2.8	3.4	3.4	2.1
2005	4.1	4.3	4.6	3.3	-0.6	-3.4	-2.0	-2.3	-0.3	3.0	4.1	5.2	1.7
2006	4.9	4.9	5.3	2.6	-1.9	-1.8	-4.5	-0.5	0.1	3.4	4.6	5.6	1.9
2007	5.7	4.9	5.1	3.7	0.3	-2.1	-4.8	-3.4	1.1	1.3	1.0	2.8	1.3
2008	4.8	3.9	3.2	-0.9	-4.9	-5.8	-6.5	-5.1	-3.2	0.9	2.5	2.3	-0.7
2009	3.9	4.4	3.3	1.4	-3.8	-7.9	-5.4	-6.2	-2.3	0.6	3.8	3.5	-0.4
2010	3.9	5.6	3.9	1.4	-1.8	-3.0	-5.0	-3.7	-1.5	0.0	-0.6	4.0	0.3
2011	4.1	5.1	4.1	2.2	-0.5	-3.0	-3.1	-1.8	0.8	1.2	3.2	4.6	1.4
2012	4.4	4.6	4.2	3.0	-2.0	-4.3	-4.9	-4.5	-0.8	2.0	3.7	5.2	0.9
2013	4.8	5.5	4.1	0.2	0.3	-2.4	-1.7	-2.3	-1.1	2.3	3.5	4.7	1.5
2014	4.8	4.8	3.7	2.6	-1.1	-3.2	-3.4	-1.0	2.2	2.8	3.2	4.9	1.7
2015	4.4	5.0	4.8	4.3	-0.5	-2.4	-3.7	-1.9	0.7	2.1	3.3	4.7	1.7
2016	5.1	6.1	5.5	2.4	-2.1	-3.6	-2.5	-2.0	-0.6	2.4	1.4	4.6	1.4
2017	5.2	5.2	5.5	2.6	0.7	-2.6	-3.5	-3.2	1.6	0.9	2.9	4.8	1.7
2018	4.8	5.4	4.5	1.6	-1.8	-1.8	-1.7	-1.5	-0.5	4.3	4.2	4.2	1.8
2019	5.6	5.9	4.9	3.0	-0.8	-2.8	-3.1	-3.4	1.5	1.7	4.4	5.1	1.8
2020	5.4	6.1	5.7	3.1	0.4	-4.1	-4.9	-2.5	1.1	3.1	2.1	4.7	1.7
2021	4.8	4.8	4.3	1.7	-0.5	-2.9	-2.8	-1.9	1.4	2.4	3.8	5.1	1.7
2022	4.9	5.2	5.2	0.3	-2.9	-4.3	-2.9	-3.0	-1.7	-1.7	0.5	3.0	0.2
2023	4.2	4.6	4.9	1.1	-0.9	-5.3	-4.0	-3.0	-1.3	-1.7	0.5	3.0	0.2
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	4.8	5.1	4.6	2.2	-1.3	-3.4	-3.5	-2.5	-0.0	1.7	2.8	4.3	1.2
Desv. Est.	0.58	0.59	0.73	1.29	1.52	1.52	1.44	1.57	1.47	1.53	1.46	0.94	0.84
Coef. Var.	0.12	0.12	0.16	0.59	-1.21	-0.45	-0.41	-0.62	-44.04	0.89	0.52	0.22	0.68
Max.	5.8	6.1	5.7	4.3	0.9	-1.6	-0.8	0.5	2.2	4.3	4.6	5.6	6.1
Min.	3.9	3.9	3.2	-0.9	-4.9	-7.9	-6.5	-6.2	-3.2	-1.7	-0.6	2.3	-7.9

Fuente: SENAMHI (2023).



**ANEXO 10.** Registro de precipitación acumulada mensual (mm) Estación Laraqueri  
periodo 2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2003	228.3	123.4	123.7	28.2	12.6	0.0	0.0	5.6	19.1	6.1	24.3	128.4	699.7
2004	228.3	145.8	71.8	22.5	0.0	1.8	11.7	43.9	6.1	0.0	14.1	61.4	607.4
2005	115.1	280.3	79.3	42.5	0.0	0.0	0.0	0.0	19.1	39.0	37.5	127.8	740.6
2006	240.8	96.5	88.3	32.7	6.3	3.4	0.0	12.9	43.7	18.7	53.5	68.6	665.4
2007	109.3	96.8	168.9	48.0	4.9	0.0	0.0	0.0	45.8	22.5	71.4	110.6	678.2
2008	190.9	105.0	73.6	0.0	0.0	0.0	0.0	4.5	2.3	35.9	15.6	147.5	575.3
2009	71.4	173.4	107.9	67.2	0.0	0.0	5.1	0.0	11.1	15.0	86.7	102.1	639.9
2010	165.0	187.4	41.4	40.6	19.0	0.0	0.0	2.6	3.4	34.3	4.1	144.8	642.6
2011	155.0	239.9	120.9	48.3	3.4	0.0	5.3	0.2	9.6	35.7	47.3	202.3	867.9
2012	203.9	286.7	160.5	94.9	0.6	0.0	0.5	9.2	15.5	18.1	69.3	229.7	1089
2013	247.1	175.2	66.9	23.8	6.3	26.9	18.7	17.9	0.9	17.5	82.0	191.7	874.9
2014	181.1	91.3	54.1	29.8	0.5	0.0	2.8	23.5	62.9	60.4	84.1	158.3	748.8
2015	160.1	92.4	144.1	128.4	3.5	0.0	6.8	22.2	64.2	45.0	56.1	51.9	774.7
2016	96.0	187.7	23.1	87.9	0.0	0.0	9.0	5.5	0.0	53.5	19.0	44.7	526.4
2017	271.4	169.1	122.2	37.2	10.5	0.0	10.6	0.0	32.4	54.8	14.2	85.2	807.6
2018	141.5	213.2	73.5	36.9	6.7	28.9	30.3	0.0	3.2	66.7	48.6	108.0	757.5
2019	158.8	177.6	62.5	43.0	18.4	8.7	2.5	0.0	56.6	49.1	112.2	103.5	792.9
2020	134.7	200.2	77.2	21.2	1.1	0.0	0.0	0.0	66.1	53.3	0.0	190.4	744.2
2021	209.3	74.4	121.4	16.9	11.0	0.0	0.0	7.8	39.9	22.0	58.5	182.0	743.2
2022	203.5	157.3	103.4	23.5	0.0	0.0	3.5	0.0	3.4	3.3	1.7	68.9	568.5
2023	98.7	169.4	98.2	27.1	25.1	0.0	0.0	0.0	3.4	3.3	1.7	68.9	495.8
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	171.9	164.0	94.4	42.9	6.2	3.3	5.1	7.4	24.2	31.2	42.9	122.7	716.2
Desv. Est.	55.61	60.27	38.05	29.70	7.38	8.42	7.69	11.26	23.72	20.47	33.26	54.41	134.8
Coef. Var.	0.32	0.37	0.40	0.69	1.19	2.54	1.51	1.52	0.98	0.66	0.77	0.44	0.19
Max.	271.4	286.7	168.9	128.4	25.1	28.9	30.3	43.9	66.1	66.7	112.2	229.7	286.7
Min.	71.4	74.4	23.1	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	44.7	0.0

Fuente: SENAMHI (2023).



**ANEXO 11.** Registro de temperatura máxima mensual (°C) Estación Laraqueri periodo  
2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
2003	14.6	15.5	15.0	15.3	15.2	14.8	15.0	15.3	15.8	17.6	19.0	18.8	16.0
2004	14.6	15.2	16.9	16.5	16.8	14.8	14.2	14.9	16.6	19.0	19.6	19.0	16.5
2005	16.8	15.1	16.2	16.6	17.0	15.9	16.3	16.8	16.8	17.6	18.4	17.7	16.8
2006	14.5	16.0	16.1	15.9	15.7	15.6	15.5	16.7	17.5	18.1	17.8	18.5	16.5
2007	17.0	16.7	15.4	15.8	16.3	16.3	15.4	17.4	15.9	18.2	17.8	17.1	16.6
2008	15.2	15.8	15.4	16.9	16.3	16.0	15.8	16.9	18.1	18.0	19.5	17.2	16.8
2009	16.4	15.8	15.4	15.6	16.1	16.1	15.6	16.8	18.3	19.3	18.3	18.0	16.8
2010	16.4	16.7	16.9	17.6	16.9	17.2	16.9	17.8	18.9	18.7	20.2	16.4	17.6
2011	15.3	14.9	15.3	16.3	16.2	16.5	15.4	17.2	16.8	18.9	19.0	16.7	16.5
2012	15.1	14.5	14.1	15.3	15.8	15.4	16.1	16.5	17.5	18.9	19.1	15.9	16.18
2013	15.1	15.6	16.6	17.2	16.5	14.7	14.8	15.9	18.2	18.5	19.0	16.6	16.6
2014	15.7	16.6	17.3	17.2	17.2	17.7	16.1	16.3	16.1	17.0	19.1	18.7	17.1
2015	15.2	15.6	15.6	14.9	15.8	17.1	16.3	16.6	18.1	18.1	19.5	19.5	16.9
2016	19.4	17.1	19.1	17.5	17.8	16.6	16.5	17.5	18.8	18.5	19.5	19.4	18.1
2017	15.4	17.1	15.2	16.4	16.5	16.3	16.3	18.0	17.0	18.9	20.1	18.4	17.1
2018	16.5	15.8	16.0	17.2	16.6	14.6	14.8	15.9	18.1	17.7	20.0	18.6	16.8
2019	17.0	16.4	17.2	16.8	17.3	16.6	16.3	17.4	18.1	17.9	18.0	18.1	17.3
2020	17.3	16.7	16.8	16.8	17.4	17.2	17.4	18.9	17.3	17.1	20.5	18.5	17.7
2021	16.4	16.8	15.6	16.8	16.6	16.2	16.8	16.9	18.0	19.5	19.2	16.1	17.1
2022	15.7	15.5	16.3	17.7	17.3	16.1	16.9	17.4	19.4	19.5	20.4	18.2	17.5
2023	17.8	16.5	16.9	17.2	16.2	16.7	16.9	17.7	18.2	19.5	20.4	18.2	17.7
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	16.1	16.0	16.2	16.5	16.5	16.1	16.0	16.9	17.6	18.4	19.3	17.9	17.0
Desv. Est.	1.22	0.75	1.07	0.81	0.65	0.88	0.83	0.92	1.00	0.77	0.85	1.07	0.54
Coef. Var.	0.08	0.05	0.07	0.05	0.04	0.05	0.05	0.05	0.06	0.04	0.04	0.06	0.03
Max.	19.4	17.1	19.1	17.7	17.8	17.7	17.4	18.9	19.4	19.5	20.5	19.5	20.5
Min.	14.5	14.5	14.1	14.9	15.2	14.6	14.2	14.9	15.8	17.0	17.8	15.9	14.1

Fuente: SENAMHI (2023).



## ANEXO 12. Registro de temperatura mínima mensual (°C) Estación Laraqueri periodo

2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
2003	5.2	3.1	1.9	-1.3	-9.2	-9.2	-9.3	-7.4	-5.0	-4.2	-5.1	-2.6	-3.6
2004	5.2	3.1	1.9	-1.3	-9.2	-10.3	-7.7	-4.5	-3.8	-1.1	0.6	1.8	-2.1
2005	3.6	3.4	2.4	-0.4	-6.0	-11.2	-8.7	-9.5	-4.5	-0.3	1.2	2.4	-2.3
2006	3.7	3.0	3.4	-0.1	-7.4	-8.5	-10.5	-6.4	-4.4	0.2	1.9	2.6	-1.9
2007	2.8	3.6	3.6	0.5	-3.7	-6.7	-7.3	-6.3	-0.8	-0.5	0.0	2.0	-1.1
2008	4.0	2.6	1.6	-2.9	-8.3	-7.8	-9.2	-9.0	-5.8	-0.6	0.9	2.7	-2.7
2009	3.5	3.5	2.4	-0.6	-5.9	-11.1	-7.8	-9.4	-4.6	-1.3	2.5	3.0	-2.2
2010	4.3	5.1	2.4	-1.2	-4.4	-6.1	-10.6	-7.2	-5.0	-1.2	-1.7	3.1	-1.9
2011	3.5	4.3	3.2	-0.6	-4.4	-7.9	-7.6	-5.3	-3.1	-1.8	0.7	2.5	-1.4
2012	3.1	3.7	1.9	1.0	-5.5	-7.6	-9.9	-7.4	-3.9	-0.2	1.4	3.9	-1.63
2013	3.2	3.9	2.3	-3.8	-4.4	-7.1	-6.4	-7.0	-5.1	-0.1	0.6	3.4	-1.7
2014	3.3	2.6	0.5	-2.0	-5.9	-8.6	-8.7	-5.2	-0.2	-0.3	0.7	2.2	-1.8
2015	2.5	2.4	2.3	1.8	-4.0	-7.8	-9.9	-7.0	-3.6	-1.6	0.2	0.8	-2.0
2016	1.9	4.3	-0.5	-1.4	-7.7	-9.5	-8.3	-8.3	-5.9	-0.1	-0.2	2.3	-2.8
2017	3.6	3.3	3.5	-0.4	-2.8	-7.5	-8.3	-7.8	-1.8	-2.2	0.1	1.9	-1.5
2018	3.2	3.7	2.7	-2.8	-6.7	-6.2	-5.8	-6.2	-6.0	0.8	1.8	1.8	-1.6
2019	3.8	3.8	1.6	0.0	-5.0	-8.1	-8.8	-8.8	-2.8	-2.1	2.2	2.8	-1.8
2020	3.2	3.9	3.0	-1.4	-5.0	-8.4	-11.3	-6.8	-2.5	-0.5	-1.3	1.9	-2.1
2021	2.7	2.3	2.1	-1.4	-4.8	-7.4	-7.9	-6.7	-2.4	-0.5	1.7	3.5	-1.6
2022	3.0	3.1	2.5	-2.6	-7.0	-9.4	-7.8	-7.8	-5.7	-5.2	-1.9	1.3	-3.1
2023	2.2	2.8	2.5	-2.0	-4.5	-11.1	-7.8	-7.9	-5.8	-5.2	-1.9	1.3	-3.1
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	3.4	3.4	2.2	-1.1	-5.8	-8.5	-8.6	-7.2	-3.9	-1.3	0.2	2.1	-2.1
Desv. Est.	0.83	0.70	0.96	1.35	1.79	1.53	1.38	1.35	1.70	1.67	1.78	1.33	0.64
Coef. Var.	0.24	0.20	0.43	-1.24	-0.31	-0.18	-0.16	-0.19	-0.43	-1.25	8.52	0.63	-0.31
Max.	5.2	5.1	3.6	1.8	-2.8	-6.1	-5.8	-4.5	-0.2	0.8	2.5	3.9	5.2
Min.	1.9	2.3	-0.5	-3.8	-9.2	-11.2	-11.3	-9.5	-6.0	-5.2	-5.1	-2.6	-11.3

Fuente: SENAMHI (2023).



### ANEXO 13. Registro de precipitación acumulada mensual (mm) Estación Puno periodo

2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	TOTAL
2003	174.5	114.4	114.4	46.1	36.7	4.8	0.2	9.6	42.9	25.4	8.6	131.8	709.4
2004	208.9	125.2	115.5	29.2	6.2	0.0	10.2	43.0	34.3	49.6	79.2	205.1	906.4
2005	315.6	157.9	134.6	45.7	0.4	0.0	0.0	0.0	11.8	39.5	80.5	187.2	973.2
2006	291.1	191.1	159.6	44.6	0.9	0.0	0.0	0.6	33.9	37.4	53.8	101.5	914.5
2007	84.8	171.0	236.7	49.7	10.6	0.0	3.3	1.6	61.3	77.0	44.2	74.1	814.3
2008	209.7	85.8	95.4	8.4	6.8	1.4	0.2	0.8	2.4	79.4	27.2	144.2	661.7
2009	154.0	136.1	148.3	83.0	0.4	0.0	2.5	0.0	16.4	56.4	88.9	62.5	748.5
2010	99.3	192.8	56.3	12.3	16.1	0.0	0.0	7.1	2.9	33.4	15.0	146.7	581.9
2011	122.7	202.9	116.5	46.8	4.8	0.0	6.4	0.2	45.8	25.7	48.5	151.3	771.6
2012	135.4	294.8	209.9	60.1	0.0	0.2	0.0	5.6	9.8	7.6	69.5	148.8	941.7
2013	153.0	175.8	100.0	14.3	22.4	12.5	1.5	4.5	11.6	32.9	61.4	117.1	707.0
2014	145.0	107.7	60.5	40.9	0.1	0.0	0.2	28.9	66.9	45.2	29.8	90.6	615.8
2015	96.4	121.0	187.0	114.1	0.2	0.0	1.8	4.0	54.5	41.5	23.2	59.4	703.1
2016	79.7	202.6	9.8	57.5	3.1	2.0	3.4	0.0	0.3	76.0	43.0	49.7	520.9
2017	314.3	119.2	145.7	45.5	21.7	1.0	1.6	0.0	62.3	65.2	23.9	68.5	868.9
2018	171.1	152.1	114.1	33.2	7.8	12.9	32.1	0.0	3.6	45.5	22.7	89.8	684.9
2019	137.8	78.7	43.7	58.6	19.0	2.2	7.6	0.0	12.6	39.9	92.5	81.5	574.1
2020	122.0	170.3	88.5	37.0	8.4	0.0	0.0	0.2	-4.2	42.5	38.8	114.3	617.8
2021	128.0	183.4	139.7	39.2	23.0	0.0	0.1	5.1	29.5	36.1	21.2	129.2	734.5
2022	211.0	95.1	32.1	77.6	33.7	0.0	0.0	6.4	46.3	39.9	127.3	118.0	787.4
2023	211.0	95.1	139.7	39.2	23.0	0.0	0.0	6.4	29.5	36.1	21.2	129.2	730.4
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	169.8	151.1	116.6	46.8	11.4	1.8	3.4	5.9	27.4	44.4	48.6	114.3	741.3
Desv. Est.	70.25	51.78	57.16	24.18	11.78	3.82	7.17	10.66	22.76	17.99	31.18	41.73	126.9
Coef. Var.	0.41	0.34	0.49	0.52	1.03	2.17	2.12	1.81	0.83	0.41	0.64	0.37	0.17
Max.	315.6	294.8	236.7	114.1	36.7	12.9	32.1	43.0	66.9	79.4	127.3	205.1	315.6
Min.	79.7	78.7	9.8	8.4	-3.1	0.0	0.0	0.0	-4.2	7.6	8.6	49.7	-4.2

Fuente: SENAMHI (2023).



## ANEXO 14. Registro de temperatura máxima mensual (°C) Estación Puno periodo

2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
2003	16.4	16.3	15.4	15.8	14.6	13.8	14.5	14.9	15.2	16.6	18.0	17.6	15.8
2004	14.9	15.7	16.5	16.0	15.7	14.0	14.1	14.0	15.7	17.4	17.2	17.7	15.7
2005	16.6	15.6	16.4	16.4	15.9	14.8	15.7	16.0	17.1	17.1	17.4	17.3	16.4
2006	15.1	16.3	16.1	15.4	15.0	14.4	14.6	15.5	16.7	17.5	17.6	17.5	16.0
2007	17.0	16.5	15.2	15.8	16.0	15.6	14.6	16.4	15.4	17.4	17.1	17.3	16.2
2008	15.7	16.0	15.5	16.3	15.5	15.7	15.1	16.2	17.2	17.2	18.2	16.7	16.3
2009	16.4	16.0	15.9	15.3	16.0	15.1	15.5	16.4	17.5	18.5	18.1	17.9	16.6
2010	16.9	17.1	17.1	17.4	16.2	16.3	17.0	17.4	18.6	18.7	19.5	17.4	17.5
2011	17.1	15.1	14.9	15.5	15.2	15.2	14.7	16.4	16.2	17.8	18.9	16.3	16.1
2012	15.8	14.6	15.0	15.1	15.1	14.9	15.2	15.9	15.7	17.5	18.7	14.9	15.7
2013	16.2	15.0	15.9	15.6	15.3	14.2	13.8	14.6	16.8	16.9	17.4	16.0	15.6
2014	15.4	15.9	16.3	15.9	16.2	16.6	15.4	15.0	15.0	16.0	17.5	17.4	16.1
2015	15.2	15.7	15.3	14.6	15.4	15.8	15.1	15.6	17.0	17.3	18.3	17.9	16.1
2016	17.9	16.4	17.8	16.2	16.9	15.9	15.1	16.2	17.0	17.2	18.2	18.2	16.9
2017	15.8	16.9	14.8	15.3	15.6	15.5	15.1	17.0	15.9	17.4	18.5	17.8	16.3
2018	16.0	15.3	15.1	15.7	15.5	14.1	14.8	15.0	16.8	16.6	19.1	17.8	16.0
2019	16.8	16.0	16.6	16.4	16.6	15.7	15.0	16.1	17.4	17.5	17.0	17.6	16.6
2020	16.7	16.3	15.7	15.9	15.8	14.2	15.1	16.8	17.3	16.7	18.7	17.5	16.4
2021	15.9	16.3	15.1	15.6	15.4	15.7	15.7	16.6	17.4	18.7	18.4	16.3	16.4
2022	15.8	15.6	15.8	16.6	17.1	17.4	16.2	16.6	18.1	18.8	15.6	17.4	16.8
2023	15.8	15.6	15.8	15.6	15.4	15.7	16.2	17.0	18.7	18.7	18.4	16.3	16.6
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	16.2	15.9	15.8	15.8	15.7	15.3	15.2	16.0	16.8	17.5	18.0	17.2	16.3
Desv. Est.	0.75	0.62	0.77	0.60	0.62	0.94	0.73	0.88	1.04	0.79	0.88	0.81	0.444
Coef. Var.	0.05	0.04	0.05	0.04	0.04	0.06	0.05	0.06	0.06	0.04	0.05	0.05	0.03
Max.	17.9	17.1	17.8	17.4	17.1	17.4	17.0	17.4	18.7	18.8	19.5	18.2	19.5
Min.	14.9	14.6	14.8	14.6	14.6	13.8	13.8	14.0	15.0	16.0	15.6	14.9	13.8

Fuente: SENAMHI (2023).



## ANEXO 15. Registro de temperatura mínima mensual (°C) Estación Puno periodo

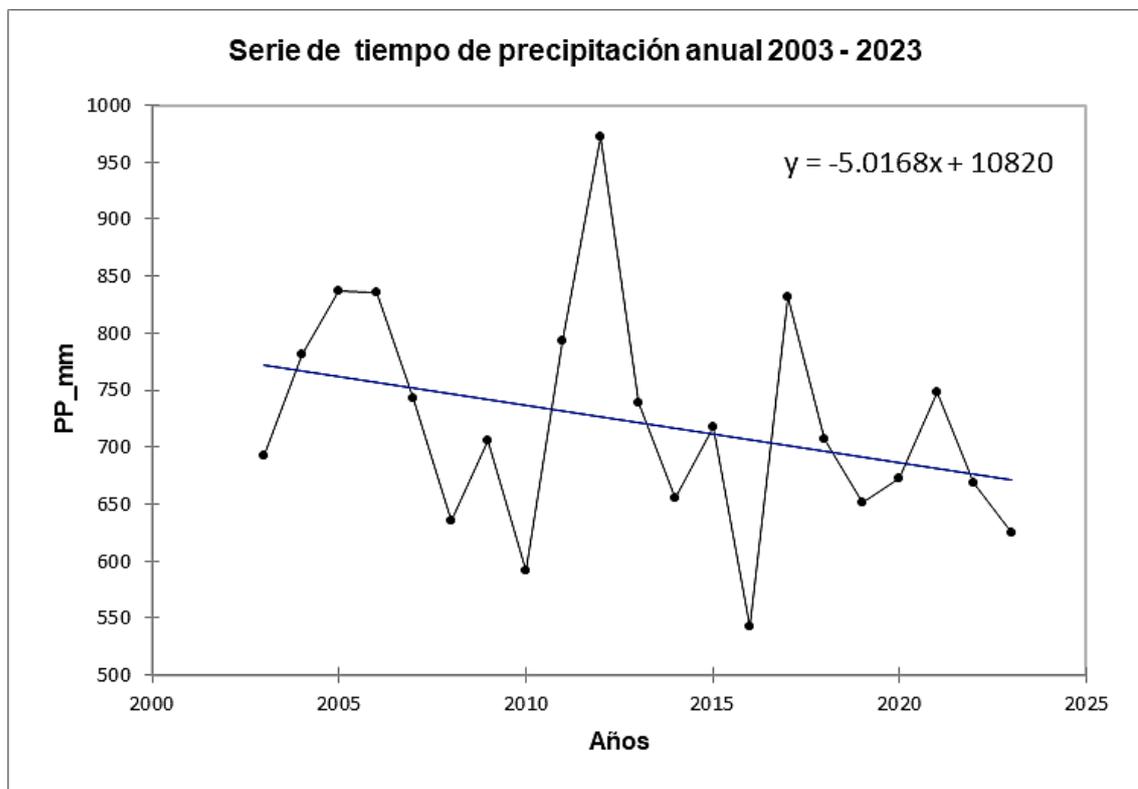
2003-2023

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SET	OCT	NOV	DIC	MEDIA
2003	6.3	6.4	5.9	3.5	1.4	-1.3	-1.1	-0.1	1.1	3.4	4.4	5.7	3.0
2004	6.4	6.1	5.9	4.1	0.0	-1.1	-0.6	0.7	2.4	3.9	2.9	6.3	3.1
2005	6.4	5.9	5.7	4.2	0.8	-2.0	-0.5	-0.7	2.2	3.8	4.6	6.3	3.1
2006	5.6	6.0	6.2	4.3	-0.3	-0.5	-1.9	0.9	1.7	4.0	5.7	5.8	3.1
2007	6.2	6.2	5.6	4.6	2.1	0.4	-0.4	0.7	3.2	3.7	3.5	5.1	3.4
2008	6.1	5.3	5.1	2.4	-0.5	-0.8	-1.5	-0.5	0.8	3.9	5.1	5.3	2.6
2009	5.5	6.2	5.0	3.6	0.8	-2.1	-0.5	-1.1	2.2	3.8	6.3	6.1	3.0
2010	6.8	6.6	6.8	4.7	1.6	1.4	-1.2	0.8	2.1	3.9	4.0	5.9	3.6
2011	6.1	6.3	6.0	4.2	1.5	-0.3	0.0	1.2	2.8	3.4	4.9	5.6	3.5
2012	5.5	5.5	5.2	4.7	1.1	-0.1	-0.5	0.0	2.9	5.0	5.0	6.5	3.4
2013	5.6	6.8	5.7	3.1	3.0	0.9	1.1	0.9	2.4	4.5	5.4	6.4	3.8
2014	6.4	6.3	5.8	5.0	2.2	1.4	0.8	1.9	3.8	5.0	5.5	6.4	4.2
2015	5.6	6.4	6.0	5.3	2.7	0.7	0.0	1.2	3.3	4.0	5.9	5.9	3.9
2016	6.7	7.0	6.7	4.9	2.1	0.6	0.8	1.1	2.9	4.4	4.4	6.0	4.0
2017	6.0	6.4	6.4	4.8	3.4	0.5	0.1	0.8	3.7	4.1	5.8	6.3	4.0
2018	5.8	6.2	6.0	4.3	1.6	1.0	1.2	1.4	2.4	5.5	6.6	6.1	4.0
2019	7.0	7.0	6.7	5.6	2.6	0.7	0.5	1.2	4.6	4.7	5.8	6.8	4.4
2020	7.0	7.2	7.1	4.5	1.6	1.0	0.4	1.2	5.6	5.5	6.4	6.7	4.5
2021	5.7	7.2	5.9	4.1	2.1	0.6	0.8	1.4	4.4	4.9	6.0	6.2	4.1
2022	6.0	6.1	6.3	6.4	3.9	0.2	1.1	1.4	2.2	3.7	5.1	6.7	4.1
2023	6.0	6.1	6.3	4.1	2.1	0.6	1.1	0.3	1.7	4.9	6.0	6.2	3.8
N° Datos	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21	21
Media	6.1	6.3	6.0	4.4	1.7	0.1	-0.0	0.7	2.8	4.3	5.2	6.1	3.6
Desv. Est.	0.48	0.50	0.55	0.86	1.14	1.03	0.93	0.78	1.17	0.65	0.97	0.44	0.54
Coef. Var.	0.08	0.08	0.09	0.20	0.67	12.06	-64.89	1.11	0.42	0.15	0.19	0.07	0.15
Max.	7.0	7.2	7.1	6.4	3.9	1.4	1.2	1.9	5.6	5.5	6.6	6.8	7.2
Min.	5.5	5.3	5.0	2.4	-0.5	-2.1	-1.9	-1.1	0.8	3.4	2.9	5.1	-2.1

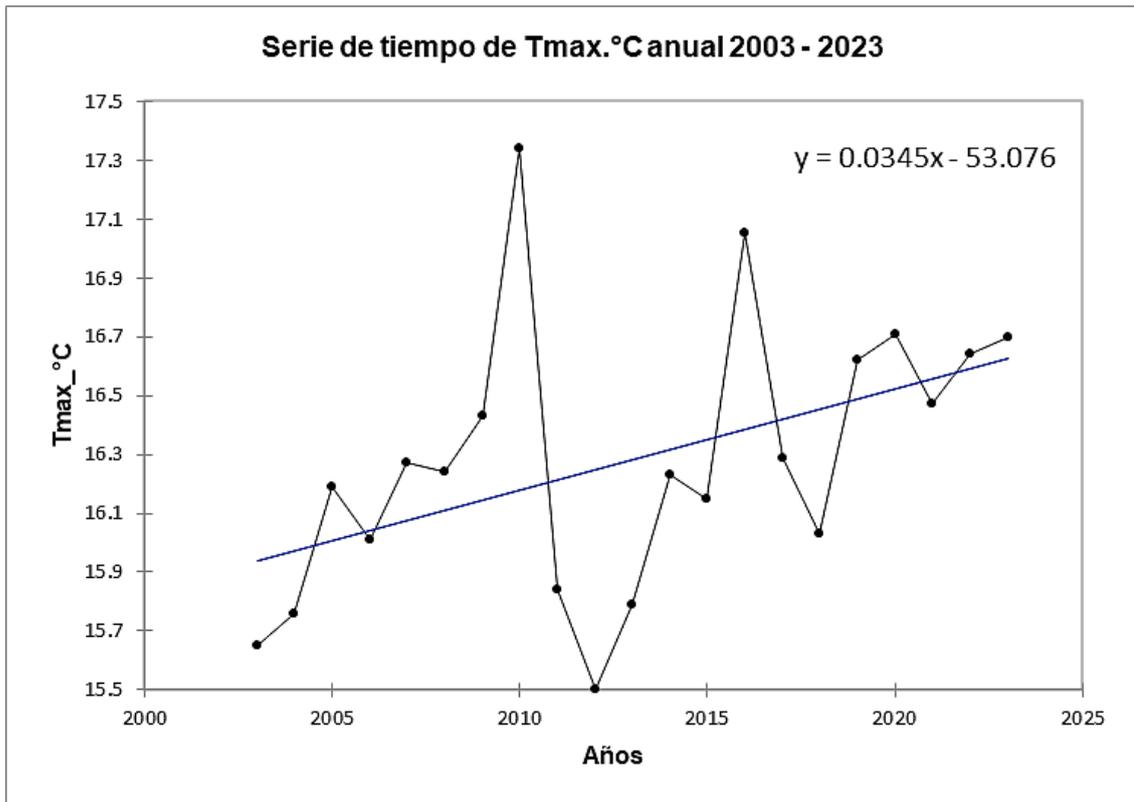
Fuente: SENAMHI (2023).

**ANEXO 16.** Resumen de test de tendencia Man-Kendall para los valores de estudio

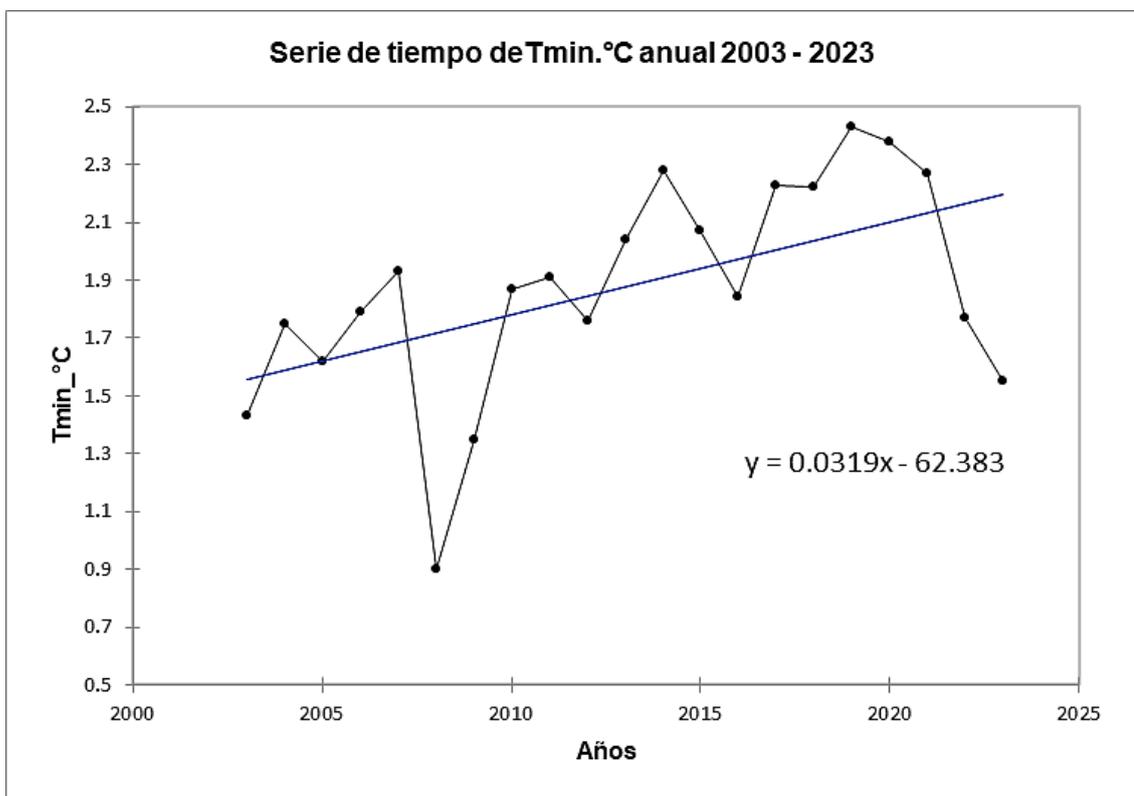
Valores	Coefficiente de Mann – Kendall (z)	Significancia (z)
Área de cobertura vegetal del bofedal	-2.576	> - 1.96
Precipitación pluvial (mm)	-1.600	> - 1.96
Temperatura máxima (°C)	2.627	> + 1.96
Temperatura mínima (°C)	2.627	> + 1.96



Nota: (z) = -1.6, lo que indica la serie obedece a tendencia no significativa decreciente.



Nota: (z) = 2.627, lo que indica la serie obedecen a tendencia significativa creciente



Nota: (z) = 2.627, lo que indica la serie obedecen a tendencia significativa creciente



## ANEXO 17. Lista de mapas temáticos

1. Mapa de ubicación política. Escala: 1:32.000
2. Mapa de análisis multitemporal. Escala: 1:20.000
3. Mapa de ubicación de estaciones meteorológicas. Escala: 1:270.000
4. Mapa de isoyetas del área de estudio. Escala: 1:280.000
5. Mapa de isotermas Temp. min. °C del área de estudio. Escala: 1:280.000
6. Mapa de isotermas Temp. máx. °C del área de estudio. Escala: 1:280.000
7. Mapa de cuadrícula Landsat Path & Row 02/71. Escala: 1:3.000.000
8. Mapa hidrográfico de la microcuenca Potojani Grande. Escala: 1:25000



Escanee el QR para acceder a la versión digital



## ANEXO 18. Declaración jurada de autenticidad de tesis



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### DECLARACIÓN JURADA DE AUTENTICIDAD DE TESIS

Por el presente documento, Yo YONI CRISTIAN MAMANI CAHUI  
identificado con DNI 75364642 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado  
INGENIERÍA AGRONÓMICA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:  
“ ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE BOFEDALES Y SU RELACIÓN  
CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE  
POTOJANI GRANDE, PERÍODO 2003 - 2023 PUNO, PERÚ ”

Es un tema original.

Declaro que el presente trabajo de tesis es elaborado por mi persona y **no existe plagio/copia** de ninguna naturaleza, en especial de otro documento de investigación (tesis, revista, texto, congreso, o similar) presentado por persona natural o jurídica alguna ante instituciones académicas, profesionales, de investigación o similares, en el país o en el extranjero.

Dejo constancia que las citas de otros autores han sido debidamente identificadas en el trabajo de investigación, por lo que no asumiré como tuyas las opiniones vertidas por terceros, ya sea de fuentes encontradas en medios escritos, digitales o Internet.

Asimismo, ratifico que soy plenamente consciente de todo el contenido de la tesis y asumo la responsabilidad de cualquier error u omisión en el documento, así como de las connotaciones éticas y legales involucradas.

En caso de incumplimiento de esta declaración, me someto a las disposiciones legales vigentes y a las sanciones correspondientes de igual forma me someto a las sanciones establecidas en las Directivas y otras normas internas, así como las que me alcancen del Código Civil y Normas Legales conexas por el incumplimiento del presente compromiso

Puno 19 de junio del 20 24

  
FIRMA (obligatoria)



Huella



## ANEXO 19. Autorización para el depósito de tesis en el Repositorio Institucional



Universidad Nacional  
del Altiplano Puno



Vicerrectorado  
de Investigación



Repositorio  
Institucional

### AUTORIZACIÓN PARA EL DEPÓSITO DE TESIS O TRABAJO DE INVESTIGACIÓN EN EL REPOSITORIO INSTITUCIONAL

Por el presente documento, Yo YONI CRISTIAN MAMANI CAHUI,  
identificado con DNI 75364642 en mi condición de egresado de:

Escuela Profesional,  Programa de Segunda Especialidad,  Programa de Maestría o Doctorado

INGENIERÍA AGRONÓMICA

informo que he elaborado el/la  Tesis o  Trabajo de Investigación denominada:

“ ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE BOFEDALES Y SU RELACIÓN  
CON LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA EN LA MICROCUENCA DE  
POTOJANI GRANDE, PERÍODO 2003 - 2023 PUNO, PERÚ ”

para la obtención de  Grado,  Título Profesional o Segunda Especialidad.

Por medio del presente documento, afirmo y garantizo ser el legítimo, único y exclusivo titular de todos los derechos de propiedad intelectual sobre los documentos arriba mencionados, las obras, los contenidos, los productos y/o las creaciones en general (en adelante, los “Contenidos”) que serán incluidos en el repositorio institucional de la Universidad Nacional del Altiplano de Puno.

También, doy seguridad de que los contenidos entregados se encuentran libres de toda contraseña, restricción o medida tecnológica de protección, con la finalidad de permitir que se puedan leer, descargar, reproducir, distribuir, imprimir, buscar y enlazar los textos completos, sin limitación alguna.

Autorizo a la Universidad Nacional del Altiplano de Puno a publicar los Contenidos en el Repositorio Institucional y, en consecuencia, en el Repositorio Nacional Digital de Ciencia, Tecnología e Innovación de Acceso Abierto, sobre la base de lo establecido en la Ley N° 30035, sus normas reglamentarias, modificatorias, sustitutorias y conexas, y de acuerdo con las políticas de acceso abierto que la Universidad aplique en relación con sus Repositorios Institucionales. Autorizo expresamente toda consulta y uso de los Contenidos, por parte de cualquier persona, por el tiempo de duración de los derechos patrimoniales de autor y derechos conexos, a título gratuito y a nivel mundial.

En consecuencia, la Universidad tendrá la posibilidad de divulgar y difundir los Contenidos, de manera total o parcial, sin limitación alguna y sin derecho a pago de contraprestación, remuneración ni regalía alguna a favor mío; en los medios, canales y plataformas que la Universidad y/o el Estado de la República del Perú determinen, a nivel mundial, sin restricción geográfica alguna y de manera indefinida, pudiendo crear y/o extraer los metadatos sobre los Contenidos, e incluir los Contenidos en los índices y buscadores que estimen necesarios para promover su difusión.

Autorizo que los Contenidos sean puestos a disposición del público a través de la siguiente licencia:

Creative Commons Reconocimiento-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional. Para ver una copia de esta licencia, visita: <https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

En señal de conformidad, suscribo el presente documento.

Puno 19 de junio del 20 24

  
FIRMA

