UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA

FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

TESIS

“Impacto de la variabilidad climática multitemporal en la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata - Chiara, 2015-2024”

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE:

INGENIERA AMBIENTAL

LINEA DE INVESTIGACIÓN:

ECOLOGÍA

AUTOR:
Rojas Landeo, Danayu Shiomara

ASESOR:
Dr. Santos Clemente Herrera Díaz

CO-ASESOR:
Ing. Huisa Taipe, Michael

HUANTA-PERÚ

2026

Reporte de similitud

NOMBRE DEL TRABAJO

Informe final teisis_ Danayu Shiomara Rojas Landeo.pdf

RECUENTO DE PALABRAS
22844 Words

RECUENTO DE CARACTERES
127867 Characters

RECUENTO DE PÁGINAS
105 Pages

TAMAÑO DEL ARCHIVO
3.8MB

FECHA DE ENTREGA
Sep 15, 2026 3:59 PM GMT-5

FECHA DEL INFORME
Sep 15, 2026 4:00 PM GMT-5

18% de similitud general

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

- 14% Base de datos de Internet
- 7% Base de datos de publicaciones
- Base de datos de Crossref
- Base de datos de contenido publicado de Crossref
- 15% Base de datos de trabajos entregados

Excluir del Reporte de Similitud

- Material bibliográfico
- Material citado
- Material citado
- Coincidencia baja (menos de 8 palabras)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
FIRMA DIGITAL

Firmado digitalmente por HERRERA DIAZ Santos Clemente FAU 20574653798 soft
Fecha: 2026.09.15 16:17:32 -05'00'

“Impacto de la variabilidad climática multitemporal en la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata - Chiara, 2015-2024”

AUTOR:
Bach. Rojas Landeo, Danayu Shiomara

ASESOR:
Dr. Santos Clemente Herrera Díaz

COASESOR:
Ing. Huisa Taipe, Michael

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Creada por Ley N° 29658
FACULTAD DE INGENIERÍA Y GESTIÓN
"Año de la Esperanza y el Fortalecimiento de la Democracia"

ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERA AMBIENTAL

En la ciudad de Huanta, en el Aula 01-EP- Ingeniería Ambiental JOSACO, a los 04 días del mes de setiembre de 2026, siendo las 16:00 horas, se dio inicio al acto académico de sustentación de tesis con la presencia de los miembros del jurado calificador:

Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz	**Miembro Titular 1 (Presidente)**
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez	**Miembro titular 2**
Dr. Santos Clemente Herrera Diaz	**Miembro titular 3**

Acto seguido se procedió a dar lectura a la Resolución de Vicepresidencia Académica N°102-2026-CO-UNAH, en la que señala fecha, hora y designación de jurado evaluador para la sustentación de tesis del **Bach. Danayu Shiomara Rojas Landeo,** con la tesis titulada: **"Impacto de la variabilidad climática multitemporal en la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata-Chiara, 2015-2024",** asesorado por el Dr. Santos Clemente Herrera Diaz, para optar el Título profesional de: Ingeniero Ambiental.

Observaciones:

.....
.....
.....

Terminada la sustentación se procedió a la formulación de preguntas por los miembros del jurado evaluador, los mismos que fueron defendidos y absueltos por la tesista. Acto seguido se procedió a calificar con el resultado siguiente:

Aprobado Regular	(X)
Aprobado Bueno	( )
Aprobado Muy Bueno	( )
Aprobado Excelente	( )

Con la calificación de ...Trece..... ( )
Siendo las ..... se da por finalizada el acto académico de sustentación de tesis pasando a firmar los miembros del jurado evaluador.

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dra. Karina M. Ordoñez Ruiz
DOCENTE ORDINARIO - ASOCIADO
Dra. Karina Milagros Ordoñez Ruiz
Miembro Titular 1 (Presidente)

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
DOCENTE ORDINARIO - ASOCIADO
Dr. Jorge Luis Lozano Rodriguez
Miembro Titular 2

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE HUANTA
Dr. Santos Clemente Herrera Diaz
DOCENTE ORDINARIO PRINCIPAL
Dr. Santos Clemente Herrera Diaz
Miembro Titular 3

DEDICATORIA:

A mis padres, Yony Rojas y Aydee Landeo, por su apoyo incondicional durante este proceso y por motivarme constantemente a alcanzar mis metas.

A mis hermanitas, para que encuentren en este logro un ejemplo de esfuerzo, perseverancia y dedicación, y comprendan que todo sueño puede hacerse realidad.

A mi ser interior, por mantenerme firme en los momentos de incertidumbre, recordarme que cada paso, por pequeño que sea, me acerca a mis sueños y demostrarme que la fuerza para continuar siempre está dentro de mí.

AGRADECIMIENTOS:

Primeramente, agradezco a Dios por darme la vida, la salud y la fortaleza necesarias para culminar esta etapa.

Expreso mi más sincero agradecimiento a mis asesores, Dr. Santos Clemente Herrera Díaz y Michael Huisa Taipe, por su orientación y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. Asimismo, agradezco a mis amigos, cuya colaboración facilitó la ejecución de mi tesis.

A la Oficina de Operación y Mantenimiento Hidráulico de Ayacucho (OPEMAN), por su amabilidad al abrirme las puertas y facilitarme la obtención de los datos meteorológicos necesarios para el desarrollo de esta investigación.

RESUMEN

La presente investigación tuvo como objetivo analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara durante el periodo 2015–2024. La investigación fue de tipo básica, de nivel correlacional, con diseño no experimental y longitudinal. Se empleó un muestreo no probabilístico intencional, seleccionándose el bofedal de Liriopata–Chiara como unidad de estudio y analizándose la totalidad de los registros climáticos e imágenes satelitales correspondientes al periodo evaluado. La información de temperatura y precipitación fue obtenida de los registros de la Oficina de Operaciones y Monitoreo Ambiental de Ayacucho, mientras que la dinámica espacio-temporal del bofedal fue evaluada mediante imágenes satelitales Sentinel-2, el cálculo de los índices NDVI, NDWI y SAVI y su procesamiento en ArcGIS. Asimismo, se aplicaron análisis descriptivos, regresión lineal, la prueba de Mann–Kendall, la pendiente de Sen, la prueba Tau-b de Kendall y el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados mostraron que la temperatura presentó baja variabilidad, con un coeficiente de variación de 5,65 %, mientras que la precipitación registró variabilidad moderada, con un coeficiente de variación de 17,73 %; en ambos casos no se identificaron tendencias estadísticamente significativas. En cuanto a la dinámica del bofedal, el NDVI presentó una tendencia decreciente con una pendiente de −0,010363 y un R^2 de 0,166; el NDWI mostró una tendencia decreciente con una pendiente de −0,007995 y un R^2 de 0,235; y el SAVI presentó una tendencia decreciente con una pendiente de −0,018912 y un R^2 de 0,265. Respecto a la relación entre las variables, la temperatura presentó correlaciones positivas bajas con el NDVI ($r = 0,285$; $p = 0,425$) y el SAVI ($r = 0,092$; $p = 0,802$), y una correlación positiva muy baja con el NDWI ($r = 0,051$; $p = 0,889$). La precipitación mostró correlaciones positivas moderadas con el NDVI ($r = 0,545$; $p = 0,103$), el NDWI ($r = 0,583$; $p = 0,077$) y el SAVI ($r = 0,604$; $p = 0,064$). Debido a que todos los valores de p fueron mayores que 0,05, no se rechazó la hipótesis nula. Se concluye que la temperatura y la precipitación no presentaron relaciones estadísticamente significativas con los índices espectrales utilizados para evaluar la dinámica del bofedal durante el periodo evaluado, aunque la precipitación mostró asociaciones de mayor magnitud que la temperatura. Las variaciones observadas en los índices espectrales pueden estar influenciadas por la estacionalidad, debido a que las imágenes seleccionadas correspondieron a diferentes meses entre los años evaluados.

Palabras clave: variabilidad climática, bofedal altoandino, dinámica espacio-temporal, teledetección, NDVI, NDWI, SAVI

ABSTRACT

The present study aimed to analyze the relationship between climate variability and the dynamics of the high-Andean wetland of Liriopata–Chiara during the 2015–2024 period. The research was basic in type, correlational in level, with a non-experimental and longitudinal design. Non-probabilistic purposive sampling was used, selecting the Liriopata–Chiara wetland as the study unit and analyzing the available climatic records and satellite images corresponding to the evaluated period. Temperature and precipitation data were obtained from the records of the Office of Operations and Environmental Monitoring of Ayacucho, while the spatiotemporal dynamics of the wetland were evaluated using Sentinel-2 satellite images, calculation of the NDVI, NDWI, and SAVI indices, and processing in ArcGIS. Descriptive analyses, linear regression, the Mann–Kendall test, Sen's slope, Kendall's Tau-b test, and Pearson's correlation coefficient were applied. The results showed that temperature presented low variability, with a coefficient of variation of 5.65%, while precipitation showed moderate variability, with a coefficient of variation of 17.73%; no statistically significant trends were identified in either variable. Regarding wetland dynamics, NDVI showed a decreasing trend, with a slope of −0.010363 and an R^2 of 0.166; NDWI showed a decreasing trend, with a slope of −0.007995 and an R^2 of 0.235; and SAVI showed a decreasing trend, with a slope of −0.018912 and an R^2 of 0.265. Regarding the relationships between the variables, temperature showed low positive correlations with NDVI ($r = 0.285$; $p = 0.425$) and SAVI ($r = 0.092$; $p = 0.802$), and a very weak positive correlation with NDWI ($r = 0.051$; $p = 0.889$). Precipitation showed moderate positive correlations with NDVI ($r = 0.545$; $p = 0.103$), NDWI ($r = 0.583$; $p = 0.077$), and SAVI ($r = 0.604$; $p = 0.064$). Since all p-values were greater than 0.05, the null hypothesis was not rejected. It was concluded that temperature and precipitation did not present statistically significant relationships with the spectral indices used to evaluate wetland dynamics during the study period, although precipitation showed associations of greater magnitude than temperature. The observed variations in the spectral indices may be influenced by seasonality, since the selected images corresponded to different months across the evaluated years.

Keywords: climate variability, high-Andean wetland, spatial-temporal dynamics, remote sensing, NDVI, NDWI, SAVI

.

ÍNDICE

DEDICATORIA: VII

AGRADECIMIENTOS: VIII

RESUMEN IX

ABSTRACT X

INTRODUCCIÓN 11

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA 13

1.1. Descripción del problema 13

1.1.1. Problema general: 14

1.1.2. Problemas Específicos: 14

1.2. Objetivos de la investigación 14

1.2.1. Objetivo general 14

1.2.2. Objetivos específicos 15

1.3. Justificación 15

1.3.1. Justificación teórica 15

1.3.2. Justificación práctica 15

1.3.3. Justificación social 16

1.3.4. Justificación ambiental 16

1.4. Hipótesis 16

1.4.1. Hipótesis general 16

1.4.2. Hipótesis específicas 16

1.5. Variables 17

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO 19

2.1. Antecedentes 19

2.1.1. Internacionales 19

2.1.2. Nacionales 20

2.1.3. Regionales 23

2.2. Bases teóricas 24

2.2.1. Variabilidad climática 24
2.2.2. Clima 25
2.2.3. Temperatura 26
2.2.4. Precipitación 26
2.2.5. Bofedales altoandinos 27
2.2.6. Servicios eco sistémicos de los bofedales 27
2.2.7. Teledetección 28
2.2.8. Inventario Nacional de Humedales del Perú (MINAM) 31
2.3. Definición de términos 33
CAPÍTULO III. METODOLOGIA 34
3.1. Tipo, nivel y diseño de investigación 34
3.1.1. Tipo de investigación 34
3.1.2. Nivel de investigación 34
3.1.3. Diseño de investigación 34
3.2. Ámbito temporal y espacial 34
3.2.1. Ámbito temporal 34
3.2.2. Ámbito espacial 35
3.3. Población, muestra y muestreo 37
3.3.1. Población 37
3.3.2. Muestra 37
3.3.3. Muestreo 37
3.4. Instrumentos 37
3.4.1. Instrumentos de recolección de datos 37
3.4.2. Instrumentos de procesamiento y análisis de datos 38
3.5. Procedimiento metodológico 41
3.5.1. Recopilación y organización de datos meteorológicos 41
3.5.2. Selección y caracterización de estaciones meteorológicas 41

3.5.3. Tratamiento y procesamiento de datos climáticos. 41

3.5.4. Regionalización climática altitudinal. 42

3.5.5. Adquisición de imágenes satelitales 50

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN 58

4.1. Resultados 58

4.1.1. Evaluación de la variabilidad climática (temperatura y precipitación) del bofedal altoandino en Liriopata- Chiara,2015-2024. 58

4.1.2. Evaluación de la variación temporal de los índices espectrales del bofedal del bofedal de Liriopata-Chiara, 2015-2024. 63

4.1.3. Análisis de la variabilidad climática multitemporal y la dinámica de bofedal andino 73

4.2. Discusión de resultados 81

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES 84

CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES 85

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS 87

ANEXO 92

INDICE DE TABLAS

Tabla 1 Operacionalización de variables 18
Tabla 2 Servicios eco sistémicos 28
Tabla 3 Instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos 38
Tabla 4 Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio 41
Tabla 5 Características de los datos faltantes identificados 42
Tabla 6 Altitud y precipitación media anual de las estaciones meteorológicas 43
Tabla 7 Precipitación media anual corregida por altitud en estaciones meteorológicas del área de estudio 44
Tabla 8 Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas y del bofedal de Liriopata 45
Tabla 9 Distancia geodésica entre las estaciones meteorológicas y el bofedal de Liriopata 45
Tabla 10 Distancias y coeficientes de ponderación para la estimación climática .. 46
Tabla 11 Altitud y temperatura media anual de las estaciones meteorológicas 47
Tabla 12 Temperatura media estimada mediante el modelo de regresión altitudinal 48
Tabla 13 Distancia entre estaciones base a estaciones del trabajo 49
Tabla 14 Coeficientes de ponderación empleados en la estimación de la temperatura 49
Tabla 15 Características temporales de las imágenes Sentinel-2 MSI utilizadas ... 52
Tabla 16 Control de nubosidad de las imágenes Sentinel-2 MSI utilizadas 53
Tabla 17 Variables climáticas e índices espectrales correspondientes al mes de adquisición de las imágenes 57
Tabla 18 Registro de precipitación mensual y precipitación acumulada anual en el bofedal de Liriopata –Chiara, 2015–2024 58
Tabla 19 Registro de temperatura media mensual y temperatura media anual en el bofedal de Liriopata –Chiara (2015–2024 60

Tabla 20 Valores medios de NDVI, NDWI y SAVI obtenidos en las imágenes seleccionadas, 2015–2024 63
Tabla 21 Análisis complementario de asociación mediante Tau-b de Kendall entre las variables climáticas y los índices espectrales 79
Tabla 22 Matriz descriptiva de correlaciones de Pearson entre las variables analizadas 80
Tabla 23 Prueba de relación de la variabilidad climática en la dinámica del bofedal 80
Tabla 24 Datos de precipitación de las estaciones meteorológicas. 92
Tabla 25 Datos de temperatura de las estaciones meteorológicas 93

INDICE DE FIGURAS

Figura 1 Diagrama del proceso de teledetección 29
Figura 2 Bandas espectrales del sensor MSI de Sentinel-2 30
Figura 3 Mapa de bofedales del departamento de Ayacucho 32
Figura 4 Mapa de ubicación del área de estudio 36
Figura 5 Diagrama de flujo del proceso de investigación. 40
Figura 6 Visualización del área de estudio mediante el control remoto del dron ... 51
Figura 7 Interfaz utilizada para la obtención de imágenes Sentinel-2 MSI 52
Figura 8 Serie temporal de la precipitación acumulada anual 59
Figura 9 Serie temporal de la temperatura media anual 61
Figura 10 Variación espacial del NDVI en las imágenes seleccionadas del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024 64
Figura 11 Variación temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada 65
Figura 12 Variación espacial del NDWI en las imágenes seleccionadas del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024 67
Figura 13 Variación temporal del valor medio de NDWI en las imágenes seleccionadas, 2015–2024 68
Figura 14 Variación espacial del SAVI en las imágenes seleccionadas del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024 70
Figura 15 Variación temporal del valor medio de SAVI en las imágenes seleccionadas, 2015–2024 71

Figura 16 Relación entre la temperatura media mensual y el NDVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024 73
Figura 17 Relación entre la temperatura mensual y el NDWI en las fechas seleccionadas, 2015–2024 74
Figura 18 Relación entre la temperatura media mensual y el SAVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024 75
Figura 19 Relación entre la precipitación mensual y el NDVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024 76
Figura 20 Relación entre la precipitación mensual y el NDWI en las fechas seleccionadas, 2015–2024 77
Figura 21 Relación entre la precipitación mensual y el SAVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024 78

INTRODUCCIÓN

Los bofedales altoandinos son humedales que cumplen funciones esenciales en la conservación de la biodiversidad, la regulación hídrica, el almacenamiento de carbono y la provisión de recursos para las comunidades ganaderas de los Andes. Debido a las características de sus suelos, almacenan agua durante la temporada húmeda y la liberan gradualmente en los periodos secos, contribuyendo al mantenimiento de los caudales y a la disponibilidad hídrica de las poblaciones ubicadas aguas abajo (Wunderlich et al., 2023).

La dinámica ecológica e hidrológica de estos ecosistemas se encuentra estrechamente relacionada con las variaciones de temperatura, precipitación, disponibilidad de agua subterránea y uso del territorio. Los cambios en estas condiciones pueden alterar el nivel freático, la composición de la vegetación y el funcionamiento del ecosistema. Asimismo, el uso ganadero intensivo puede modificar el régimen hidrológico y favorecer procesos de degradación (Oyague et al., 2022).

El uso de imágenes satelitales permite analizar la respuesta de los bofedales frente a las fluctuaciones hidroclimáticas. Anderson et al. (2021) determinaron que la productividad de los bofedales del Altiplano está relacionada con la precipitación acumulada, la persistencia de nieve y la temperatura. De manera similar, Chávez et al. (2023) identificaron cambios en la productividad vegetal asociados con sequías y extracción de agua, evidenciando la influencia conjunta de factores climáticos y antrópicos.

Los índices espectrales constituyen herramientas importantes para evaluar la vegetación y la humedad superficial. El NDVI permite estimar el vigor de la cobertura vegetal, el SAVI reduce la influencia del suelo y el NDWI permite reconocer variaciones relacionadas con la humedad. La integración de estos indicadores con información climática facilita el análisis multitemporal de los ecosistemas altoandinos (Carilla et al., 2023).

En Ayacucho, Moncada et al. (2025) evaluaron la humedad del subsuelo de un bofedal mediante mediciones directas y datos de georradar, demostrando la importancia de estudiar su comportamiento hídrico frente a procesos de degradación y cambio climático. Sin embargo, en el bofedal de Liriopata–Chiara existe información limitada sobre los cambios de la vegetación y la humedad, así como sobre su relación con la temperatura y la precipitación.

Por ello, la presente investigación tiene como objetivo analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara durante el periodo 2015–2024. Para ello, se emplean datos de temperatura y precipitación, así como los índices NDVI, NDWI y SAVI. Los resultados aportarán información útil para el monitoreo, la conservación y la gestión sostenible de este ecosistema.

CAPÍTULO I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Descripción del problema

Los bofedales altoandinos son ecosistemas de gran importancia para la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad, el almacenamiento de carbono y el mantenimiento de la vegetación adaptada a condiciones de elevada altitud. Su funcionamiento depende de la disponibilidad de agua proveniente de la precipitación, las aguas subterráneas y otros aportes hídricos, por lo que las fluctuaciones de temperatura y precipitación pueden modificar temporalmente su cobertura vegetal y sus condiciones de humedad (Vento et al., 2023).

En este estudio, la variabilidad climática se entiende como las fluctuaciones de la temperatura y la precipitación ocurridas durante el periodo analizado. Este concepto se diferencia del cambio climático, que corresponde a modificaciones persistentes del clima durante periodos prolongados. Por ello, la investigación no busca atribuir directamente los cambios observados en el bofedal al cambio climático, sino analizar la relación estadística entre las variables climáticas y su dinámica temporal.

En los Andes, las investigaciones realizadas mediante imágenes satelitales muestran que la productividad y la humedad de los bofedales pueden variar en respuesta a la precipitación, la temperatura, las sequías y la disponibilidad de agua. En el norte de Chile, Chávez et al. (2023) identificaron relaciones entre las anomalías del NDVI, la severidad de las sequías y la extracción de agua en 442 bofedales durante el periodo 1986–2018. Asimismo, estudios de largo plazo han demostrado que la extensión de los humedales altoandinos depende del equilibrio entre la precipitación, la evaporación y la recarga de aguas subterráneas.

En el Perú existen investigaciones sobre el funcionamiento hidrológico, la vegetación y la dinámica temporal de bofedales; sin embargo, estas se han desarrollado principalmente en otros ámbitos geográficos y con diferentes periodos, sensores e indicadores. En el caso específico del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, no se dispone de un análisis multitemporal para el periodo 2015–2024 que integre registros de temperatura y precipitación con los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI.

Esta ausencia de información impide conocer con precisión las tendencias temporales de la vegetación y la humedad del bofedal, así como determinar si las variaciones de temperatura y precipitación presentan una relación directa, inversa o no significativa con los índices espectrales. En consecuencia, la brecha de conocimiento no se limita a la existencia de pocos estudios regionales, sino a la ausencia de una evaluación específica, integrada y multitemporal del bofedal de Liriopata–Chiara.

Por ello, la presente investigación analiza la relación entre la variabilidad climática, representada por la temperatura y la precipitación, y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara durante el periodo 2015–2024. Para evaluar dicha dinámica se emplean los índices NDVI, NDWI y SAVI, sin atribuir previamente los resultados al cambio climático ni establecer relaciones que no hayan sido demostradas estadísticamente. A partir de ello, se formula el siguiente problema general:

1.1.1. Problema general:

¿Cuál es la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024?

1.1.2. Problemas Específicos:

¿Cuál fue el comportamiento de la temperatura y la precipitación en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024?

¿Cómo variaron temporalmente los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024?

¿Cuál es la relación entre la temperatura y la precipitación y los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024?

1.2. Objetivos de la investigación

1.2.1. Objetivo general

Analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

1.2.2. Objetivos específicos

Evaluar el comportamiento de la temperatura y la precipitación en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

Evaluar la variación temporal de los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

Determinar la relación entre la temperatura y la precipitación y los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

1.3. Justificación

1.3.1. Justificación teórica

La investigación se sustenta en los fundamentos de la climatología, la hidrología de humedales y la ecología de los ecosistemas altoandinos. Desde esta perspectiva, se analiza cómo las variaciones de temperatura y precipitación se relacionan con la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara.

Asimismo, el estudio aportará evidencia sobre la respuesta de la cobertura vegetal y las condiciones hídricas del bofedal frente a la variabilidad climática, mediante el análisis de los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI. Los resultados permitirán contrastar los planteamientos teóricos relacionados con la sensibilidad de los ecosistemas altoandinos ante los cambios de temperatura y precipitación.

1.3.2. Justificación práctica

En el ámbito práctico, la investigación proporcionará información sobre el comportamiento climático y la dinámica espacio-temporal del bofedal de Liriopata–Chiara durante el periodo 2015–2024. Esta información podrá servir como línea base para el monitoreo del ecosistema y para orientar futuras investigaciones relacionadas con su conservación.

Asimismo, los resultados podrán ser considerados por las autoridades locales y las instituciones vinculadas con la gestión ambiental y de los recursos hídricos, como información técnica para el seguimiento de las condiciones del bofedal. El estudio no

plantea directamente medidas de mitigación o adaptación, sino que genera evidencia que puede contribuir a posteriores procesos de planificación y toma de decisiones.

1.3.3. Justificación social

La investigación presenta relevancia social debido a que las comunidades altoandinas, como Liriopata–Chiara, mantienen una relación directa con los bofedales por el uso de sus recursos hídricos y pastos naturales para la crianza de animales. El conocimiento de la dinámica del bofedal y de su relación con las condiciones climáticas permitirá disponer de información sobre los posibles cambios que afectan estos recursos. Los resultados podrán orientar futuros estudios y acciones de sensibilización dirigidas a fortalecer el uso responsable y la conservación del ecosistema.

1.3.4. Justificación ambiental

Desde el ámbito ambiental, la investigación permitirá conocer la dinámica del bofedal de Liriopata–Chiara y su relación con las variaciones de temperatura y precipitación. Los bofedales cumplen funciones relacionadas con el almacenamiento y la regulación del agua, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de la cobertura vegetal altoandina.

El análisis temporal mediante los índices NDVI, NDWI y SAVI permitirá identificar cambios en la vegetación y en las condiciones hídricas del área de estudio. Esta información constituirá una base técnica para el monitoreo ambiental y para futuras investigaciones orientadas a la conservación del bofedal.

1.4. Hipótesis

1.4.1. Hipótesis general

La temperatura y la precipitación se relacionan significativamente con los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara,2015–2024.

1.4.2. Hipótesis específicas

H_1: La temperatura y la precipitación presentan tendencias temporales significativas en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

H_2: Los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI presentan tendencias temporales significativas en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

H_3: La temperatura y la precipitación se relacionan significativamente con los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.

1.5. Variables

- **Variable independiente:**

  Variabilidad climática

- **Variable dependiente**

  Dinámica del bofedal

Tabla 1

Operacionalización de variables

VARIABLES	Definición Conceptual	Definición Operacional	Dimensiones	Indicadores	Escala de Medición	Fuente de Datos
VARIABLE INDEPENDIENTE: **Variabilidad climática**	Fluctuaciones temporales de las condiciones climáticas, representadas en la investigación por la temperatura y la precipitación del área de estudio. (IPCC, 2021).	Se evalúa mediante el análisis de los registros de temperatura y precipitación correspondientes a 2015–2024. Para ambas variables se calculan la media, mediana, mínimo, máximo, desviación estándar, coeficiente de variación y tendencia temporal.	Precipitación	Precipitación acumulada anual y tendencia	Razón (mm)	Registros meteorológicos de OPEMAN–Ayacucho
			Temperatura	Temperatura media anual y tendencia	Intervalo (°C)	
VARIABLE DEPENDIENTE: **Dinámica bofedal**	Variaciones temporales de la vegetación y de las condiciones de agua superficial del bofedal, evaluadas mediante índices espectrales derivados de imágenes satelitales.	Se evalúa mediante los valores medios anuales de los índices NDVI, NDWI y SAVI, obtenidos dentro del polígono delimitado del bofedal. Para cada índice se calculan la media, mediana, mínimo, máximo, desviación estándar, coeficiente de variación y tendencia temporal. Los resultados representan la respuesta espectral media del área evaluada y no necesariamente cambios en la extensión del bofedal.	Cobertura y vigor de la vegetación	NDVI medio anual y tendencia	Adimensional	Imágenes Sentinel-2 MSI, productos Level-2A
			Condición del agua superficial	NDWI medio anual y tendencia		
			Vegetación ajustada al suelo	SAVI medio anual y tendencia		

CAPÍTULO II. MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes

2.1.1. Internacionales

Llanos-Bustos et al. (2025) desarrollaron el estudio titulado Multitemporal Analysis of the Dynamics of High-Andean Wetlands in the Metropolitan Region of Chile Using Sentinel-2 Images and ERA5-Land Climate Data, cuyo objetivo fue analizar la dinámica de la vegetación y su relación con la variabilidad climática en ocho humedales altoandinos de la subcuenca Estero Ortiga, en la Región Metropolitana de Chile. La metodología comprendió el procesamiento de imágenes Sentinel-2 correspondientes a 2017 y 2024, así como el empleo de datos de temperatura y precipitación de ERA5-Land. Para evaluar la cobertura vegetal se calcularon los índices NDVI y NDCI, y posteriormente se aplicaron regresiones lineales y el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados mostraron una tendencia decreciente de la vegetación, con pendientes de $-2{,}62 \times 10^{-5}$ para el NDVI y $-1{,}09 \times 10^{-5}$ para el NDCI. Asimismo, se identificaron correlaciones positivas entre la precipitación acumulada y ambos índices, con coeficientes superiores a 0,80. Los autores concluyeron que la precipitación constituye un factor importante en el comportamiento temporal de la vegetación de los humedales. Este antecedente aporta una metodología basada en imágenes Sentinel-2, datos climáticos e índices espectrales aplicable al análisis multitemporal de bofedales.

Carilla et al. (2023) realizaron la investigación titulada Hydroclimate and Vegetation Variability of High Andean Ecosystems, con el objetivo de identificar las variables hidroclimáticas relacionadas con la dinámica de la vegetación y el balance hídrico de los ecosistemas altoandinos de las Cumbres Calchaquíes, en Argentina. El estudio se sustentó en una serie temporal correspondiente al periodo 1986–2019, conformada por imágenes Landsat 5, 7 y 8, registros climáticos e información sobre lagos y cobertura de nieve. Como indicadores se emplearon el SAVI, el área máxima anual de los lagos y la superficie cubierta por nieve y hielo. Los resultados evidenciaron que, a partir de 2012, el SAVI presentó un incremento, mientras que el área lacustre y la cobertura de nieve y hielo registraron una disminución. También se observó que los eventos de El Niño y La Niña produjeron respuestas diferentes sobre la vegetación, los lagos y la cobertura nival. Los autores concluyeron que la dinámica de los ecosistemas altoandinos responde de manera diferenciada a la variabilidad hidroclimática. Este estudio aporta evidencia sobre

la utilidad de integrar indicadores de vegetación, agua y nieve para analizar la respuesta temporal de ecosistemas de alta montaña.

Megía et al. (2024) desarrollaron el estudio titulado How Does Climatic Variability Affect the Highland Lagoons of the Venezuelan Andes?, cuyo objetivo fue evaluar la influencia de la variabilidad climática sobre la extensión superficial de cuatro lagunas altoandinas de la microcuenca Miguaguó, en los Andes venezolanos. La metodología se basó en una serie climática de 46 años, clasificada mediante el Índice Oceánico de El Niño, de la cual se seleccionaron 18 años con disponibilidad de imágenes Landsat. A partir de estas imágenes se calculó el NDWI y se analizaron sus relaciones con la temperatura, la precipitación y los eventos ENSO. Los resultados mostraron que las lagunas Mapire, La Burra y Masiegal presentaron desviaciones de entre 20 % y 70 % respecto de los años neutros, mientras que la laguna Miguaguó presentó variaciones menores, de 0 % a 10 %. Los autores concluyeron que la respuesta de las lagunas depende tanto de la variabilidad climática como de sus características biofísicas y de ubicación. Este antecedente aporta un procedimiento para relacionar series climáticas, NDWI e imágenes satelitales en el análisis de ecosistemas acuáticos altoandinos.

Mostacero Vargas (2023) realizó una investigación con el objetivo de determinar la variabilidad de la temperatura y la precipitación en el distrito de Cajabamba durante el periodo 1965–2019. El estudio utilizó registros meteorológicos históricos, los cuales fueron organizados y analizados mediante técnicas estadísticas para identificar tendencias y fluctuaciones interanuales. Los resultados mostraron incrementos promedio de 0,085 °C por año en la temperatura mínima y de 0,035 °C por año en la temperatura máxima. La precipitación presentó una variabilidad considerable, caracterizada por periodos de sequía y episodios de lluvias intensas relacionados con el fenómeno El Niño-Oscilación del Sur. Se concluyó que la temperatura y la precipitación experimentaron variaciones a lo largo del periodo analizado y que el ENSO estuvo relacionado con el comportamiento climático de la zona. Este antecedente aporta criterios para el análisis de tendencias climáticas mediante series históricas de temperatura y precipitación.

2.1.2. Nacionales

Machuca Peña y Uzquiano Céspedes (2021) desarrollaron la investigación titulada Evaluación del estado de salud de bofedales mediante teledetección en la microcuenca de

Acocancha-Lima 2021, cuyo objetivo fue determinar el estado de conservación de los bofedales mediante los índices NDVI y NDWI, así como evaluar las características del agua, suelo, biota y alteración del paisaje. La metodología comprendió el procesamiento de imágenes Landsat 8 correspondientes a 2013, 2017 y 2019, considerando las épocas seca y húmeda. También se efectuaron observaciones de campo y evaluaciones de los componentes ambientales del ecosistema. Los resultados mostraron variaciones en los valores de NDVI y NDWI entre los años y las estaciones analizadas, con mejores condiciones de vegetación y humedad durante la época húmeda. Asimismo, el estado general de conservación de los bofedales fue calificado como regular. Los autores concluyeron que estos ecosistemas requieren medidas de recuperación y conservación. Este antecedente aporta una metodología que integra teledetección y evaluación ambiental para determinar el estado de los bofedales.

Mamani Vargas (2021) desarrolló una investigación en la laguna Paucarani, Tacna, con el objetivo de determinar la relación entre las variables climáticas y el comportamiento de los índices espectrales durante el periodo 1972–2018. La metodología incluyó el procesamiento de imágenes Landsat, el cálculo de los índices NDVI y NDWI y el análisis de registros de temperatura y precipitación. Para determinar la relación entre las variables se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson. Los resultados mostraron que el NDVI alcanzó sus mayores valores entre diciembre y mayo, mientras que presentó descensos durante julio y agosto. También se identificó una relación estadísticamente significativa entre la precipitación, la temperatura mínima y los valores del NDVI, con valores de p inferiores a 0,05. La autora concluyó que las variaciones climáticas se encuentran relacionadas con el comportamiento temporal de la vegetación y del recurso hídrico. Este estudio aporta evidencia sobre la integración de datos climáticos e índices espectrales en el monitoreo de ecosistemas altoandinos.

Paucar Rojas y Soto Ccora (2023) evaluaron el estado de los bofedales y los determinantes climáticos relacionados con su distribución en las microcuencas Astobamba y Cachimayo, en Huancavelica. La metodología incluyó trabajo de campo, fichas de evaluación, imágenes satelitales y variables climáticas como temperatura, precipitación y evapotranspiración potencial. El análisis comprendió el periodo 1995–2022 y una proyección de la distribución potencial de los bofedales al año 2030. Los resultados evidenciaron una disminución de 5210,41 ha en época húmeda y de 5452,76 ha en época seca, además de un incremento de las áreas con problemas de manejo y

condiciones no saludables. La proyección al año 2030 estimó una distribución potencial de 3275,62 ha y una reducción considerable de las áreas favorables. Los autores concluyeron que los bofedales presentan una condición vulnerable frente a los cambios ambientales y climáticos. Este antecedente aporta información sobre el análisis multitemporal y la proyección espacial de áreas prioritarias para la conservación.

Mamani Callata (2025) desarrolló la investigación titulada Determinación de la cobertura vegetal de los bofedales altoandinos empleando imágenes satelitales Landsat en la cuenca del río Paratia en el periodo 1990–2024, con el objetivo de determinar la cobertura vegetal, analizar su relación con la temperatura y la precipitación y evaluar el estado de conservación de seis bofedales. La metodología se basó en imágenes Landsat y en el cálculo del NDVI para los años 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2024. Los resultados mostraron una extensión de 5,59 km² en 1990 y de 4,56 km² en 2024, aunque se presentaron aumentos y disminuciones en los años intermedios. La tasa general de decrecimiento fue de −3,68 %. Además, se identificaron relaciones entre la extensión de los bofedales, la temperatura y la precipitación. El autor interpretó que los cambios observados también podrían estar relacionados con procesos de erosión, actividad ganadera y otros factores antrópicos. Este antecedente aporta una metodología de análisis multitemporal de la cobertura vegetal mediante NDVI y variables climáticas.

Machuca Peña y Uzquiano Céspedes (2021), en la microcuenca de Acocancha, ubicada en el distrito de Huaros, provincia de Canta, región Lima, desarrollaron la investigación titulada *Evaluación del estado de salud de bofedales mediante teledetección en la microcuenca de Acocancha-Lima 2021*. El objetivo fue determinar el estado de salud de los bofedales mediante técnicas de teledetección, considerando los índices NDVI y NDWI, así como las características del agua, suelo, biota y alteración del paisaje. La investigación tuvo un enfoque cuantitativo, fue de tipo aplicada y presentó un diseño no experimental, transversal y descriptivo. Para el análisis emplearon imágenes Landsat 8 correspondientes a los años 2013, 2017 y 2019, tanto de épocas secas como húmedas, procesadas en el software ENVI. Además, realizaron evaluaciones de campo y análisis de las condiciones del agua, suelo y cobertura vegetal. Los resultados evidenciaron variaciones en los valores de NDVI y NDWI según la época evaluada, mientras que la aplicación de la guía de evaluación del ecosistema determinó que el estado de conservación del bofedal era regular. Los autores concluyeron que era necesario implementar acciones de recuperación y conservación, debido a la importancia

de estos ecosistemas como fuente de agua para la población de Huaros y para el río Chillón. Este antecedente aporta a la presente investigación porque demuestra la utilidad del NDVI y NDWI para analizar las condiciones de los bofedales y evidencia que la época de adquisición de las imágenes puede influir en los valores obtenidos.

Builtrón Sulca (2023) realizó una investigación orientada a analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica espacio-temporal de los bofedales altoandinos. La metodología incluyó imágenes Landsat y Sentinel-2, información climática y el cálculo del NDVI para evaluar cambios en la cobertura vegetal. Los resultados mostraron diferencias temporales en la extensión de los bofedales y una asociación entre la precipitación acumulada y los valores de NDVI. Asimismo, se reportó una reducción de 2656,28 ha de bofedales hacia el último año del periodo evaluado. Sin embargo, la aplicación de ANOVA permite determinar diferencias entre grupos, pero no demuestra por sí sola una relación causal entre la precipitación y la dinámica del ecosistema. Este antecedente aporta un procedimiento para integrar teledetección, precipitación e índices de vegetación en el análisis de bofedales.

2.1.3. Regionales

Marcatoma Tumbalobos (2023), realizó la investigación titulada Relación de la humedad del suelo con el índice de agua y vegetación de los bofedales altoandinos de la microcuenca Apacheta, Ayacucho, cuyo objetivo fue analizar la relación entre la humedad del suelo y los índices de vegetación y agua en bofedales altoandinos. El estudio tuvo un enfoque cuantitativo, con diseño no experimental. Para el análisis se emplearon imágenes satelitales Landsat 8, a partir de las cuales se calcularon los índices NDVI y NDWI. El área de estudio estuvo conformada por cinco bofedales, donde se realizaron mediciones de humedad del suelo mediante el método gravimétrico. Los resultados del análisis de correlación evidenciaron una relación lineal positiva, de moderada a alta, entre la humedad del suelo y el NDVI, con valores de $\rho = 0{,}655$ en época húmeda y $\rho = 0{,}764$ en época seca. Asimismo, se identificó una relación positiva moderada entre la humedad del suelo y el NDWI, con valores de $\rho = 0{,}693$ y $\rho = 0{,}699$. Estos resultados demuestran que la humedad del suelo influye directamente en la respuesta espectral de la vegetación y del agua en los bofedales evaluados. Este antecedente es relevante para la presente investigación, porque sustenta el uso de índices satelitales como el NDVI y el NDWI para analizar la condición hídrica y vegetal de los bofedales altoandinos en Ayacucho.

Silva et al. (2021) desarrollaron el estudio titulado Evaluación de la cobertura vegetal en bofedales altoandinos en función de la napa freática y precipitación utilizando imágenes de satélite, cuyo objetivo fue determinar la relación entre la cobertura vegetal, la precipitación y la profundidad de la napa freática en el bofedal Minas Corral, ubicado en Vinchos, Ayacucho. La metodología comprendió el procesamiento de imágenes Landsat 8 y Sentinel-2, el cálculo del NDVI, el empleo de registros mensuales de precipitación y el monitoreo de la napa freática mediante 31 piezómetros. Los resultados mostraron una relación inversa alta entre el área de vegetación y la profundidad de la napa freática, con un coeficiente aproximado de r = −0,97, así como una relación directa moderada entre la vegetación y la precipitación, con r = 0,49. Los autores concluyeron que la disponibilidad de agua condiciona la extensión y el tipo de formación vegetal del bofedal. Este antecedente aporta evidencia local sobre la relación entre precipitación, napa freática y cobertura vegetal obtenida mediante teledetección.

Lozano (2024) realizó un estudio con el objetivo de evaluar la variabilidad temporal de la cobertura vegetal en la provincia de Huanta durante el periodo 2017–2021. La metodología se basó en el procesamiento de 115 imágenes MODIS y en el cálculo del NDVI para identificar cambios en la cobertura vegetal. Debido a que se analizaron observaciones correspondientes a varios años, el diseño debe considerarse no experimental y longitudinal. Los resultados mostraron valores máximos de NDVI de 0,6375 en 2017; 0,6321 en 2018; 0,6688 en 2019; 0,6802 en 2020; y 0,6082 en 2021. El análisis de correlación de Pearson evidenció una relación positiva entre la cobertura vegetal y el NDVI, con r = 0,673; una relación negativa con el tipo de suelo, r = −0,452; una relación negativa baja con la temperatura, r = −0,283; y una relación positiva baja con las estaciones del año, r = 0,257. El estudio concluyó que la teledetección constituye una herramienta útil para analizar los cambios temporales de la cobertura vegetal. Este antecedente aporta evidencia regional sobre el uso del NDVI y de imágenes satelitales para evaluar la dinámica vegetal.

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Variabilidad climática

La variabilidad climática se refiere a las fluctuaciones de las condiciones climáticas respecto de sus valores medios, observadas en diferentes escalas temporales y espaciales. Estas variaciones pueden presentarse de manera natural, como resultado de procesos

internos del sistema climático, o estar asociadas con factores externos de origen natural o antropogénico. Se manifiestan principalmente mediante cambios en la temperatura, la precipitación, la humedad, el viento y otras variables meteorológicas (Calvin et al., 2023).

a. Indicadores de la variabilidad climática

La variabilidad climática puede evaluarse mediante el comportamiento temporal de diferentes variables meteorológicas. En la presente investigación se consideran como indicadores principales la temperatura y la precipitación, debido a su influencia en la disponibilidad de agua y en el desarrollo de la vegetación del bofedal.

La temperatura permite identificar periodos de calentamiento o enfriamiento, mientras que la precipitación permite reconocer fluctuaciones en la cantidad, frecuencia e intensidad de los aportes de agua. Según el IPCC, la temperatura media de la superficie global registrada entre 2011 y 2020 fue aproximadamente 1,1 °C superior al promedio del periodo 1850–1900, incremento relacionado principalmente con las emisiones antropogénicas de gases de efecto invernadero (Calvin et al., 2023).

b. Efectos de la variabilidad climática

Las alteraciones de las variables climáticas se manifiestan a escala global y regional mediante el aumento de la intensidad y frecuencia de eventos climáticos extremos, como sequías prolongadas, inundaciones, olas de calor e incendios forestales. Estos fenómenos pueden alterar el equilibrio natural de los ecosistemas y contribuir a procesos de degradación ambiental (IPCC, 2022).

Asimismo, pueden ocasionar pérdida de biodiversidad, desaparición de especies, deterioro del paisaje y alteración de las condiciones ambientales que sostienen la vida humana (IPCC, 2022).

Estos efectos también pueden generar pérdidas económicas considerables y afectar tanto a los sistemas naturales como a las actividades socioeconómicas (IPCC, 2022).

2.2.2. Clima

El clima se refiere al conjunto de condiciones atmosféricas que caracterizan una región durante periodos prolongados. Estas condiciones incluyen variables como la temperatura, la precipitación, la humedad, la presión atmosférica y el viento, las cuales permiten describir el comportamiento climático de un área específica (WMO, 2021).

Asimismo, el clima influye en el funcionamiento de los ecosistemas naturales, debido a que condiciona la disponibilidad de agua, la distribución de las especies y la productividad biológica (Oke et al., 2017).

2.2.3. Temperatura

La temperatura es una variable meteorológica que expresa el grado de calor o frío del aire. Se mide en grados Celsius (°C) mediante sensores meteorológicos instalados en estaciones automáticas o convencionales (Barry & Chorley, 2010).

Desde un enfoque geográfico, la temperatura presenta una relación estrecha con la altitud: generalmente disminuye conforme aumenta la altitud y aumenta en zonas de menor altitud (Ahrens & Henson, 2016). Esta relación inversa explica parte de la variabilidad térmica en regiones montañosas.

- **Temperatura máxima:** corresponde al valor más alto registrado durante un periodo de 24 horas y generalmente se presenta durante la tarde (WMO, 2021).
- **Temperatura mínima:** corresponde al valor más bajo registrado durante un periodo de 24 horas y generalmente ocurre durante la madrugada o las primeras horas de la mañana (WMO, 2021).

La temperatura también influye en la evapotranspiración, la fusión de nieve y glaciares y los procesos biológicos de los ecosistemas altoandinos (Vuille et al., 2018). El aumento térmico puede generar estrés hídrico en la vegetación y alterar la hidrología del bofedal.

2.2.4. Precipitación

La precipitación es el agua que cae desde la atmósfera hacia la superficie terrestre en forma líquida o sólida, como lluvia, llovizna, nieve o granizo. Constituye uno de los principales mecanismos de ingreso de agua a los ecosistemas y un componente fundamental del ciclo hidrológico, debido a que permite la recarga de los suelos y de los cuerpos de agua superficiales y subterráneos (Barry & Chorley, 2010).

La precipitación se mide mediante pluviómetros instalados en estaciones meteorológicas y se expresa en milímetros (mm). Los registros pueden corresponder a periodos diarios, mensuales o anuales (WMO, 2021). En los bofedales constituye una fuente importante de recarga hídrica; por ello, las variaciones en su cantidad, frecuencia e intensidad afectan la disponibilidad de agua y el balance hídrico (Buytaert et al., 2017).

Los cambios en los patrones de precipitación pueden provocar sequías o inundaciones y modificar la extensión y calidad del humedal.

2.2.5. Bofedales altoandinos

Los bofedales son humedales naturales de alta montaña que se localizan aproximadamente entre los 3200 y 5000 m s. n. m. Se forman por la acumulación de agua en suelos orgánicos y presentan vegetación adaptada a condiciones de elevada altitud. Estos ecosistemas cumplen funciones ecosistémicas de provisión, regulación, soporte y valor cultural. También son considerados turberas andinas, debido a su capacidad para almacenar grandes cantidades de agua y liberarla gradualmente, lo que les permite desempeñar un papel fundamental en la regulación hídrica de las cuencas altoandinas (Cooper et al., 2015).

La dinámica y permanencia de los bofedales están relacionadas con las variaciones climáticas, debido a que dependen del régimen de temperatura, precipitación y del aporte hídrico subterráneo. La alteración de estas variables puede generar cambios en la composición vegetal, deterioro de la cobertura y procesos de degradación del ecosistema (MINAM, 2018).

Además de su importancia hidrológica, los bofedales almacenan carbono y contribuyen al sostenimiento de actividades productivas tradicionales, como la ganadería y el pastoreo (Squeo et al., 2006).

2.2.6. Servicios eco sistémicos de los bofedales

Los servicios ecosistémicos de los bofedales comprenden un conjunto de beneficios sociales, ambientales y económicos, los cuales dependen del estado de conservación y del funcionamiento del ecosistema (MINAM, 2022).

Los servicios se clasifican de acuerdo con los procesos ecológicos que los originan.

Tabla 2

Servicios eco sistémicos

Tipo de servicios ecosistémicos	Descripción
Provisión	Suministro de recursos hídricos, ganado, turba, plantas medicinales
Regulación	Almacenamiento de carbono, purifica el agua, regula el clima
Cultural	Paisaje, recreación, turismo y valores culturales
Soporte	Procesos ecológicos, ciclo de nutrientes, hábitat de diversidad de especies

Nota. Adaptado de Guía de evaluación del estado del ecosistema de bofedal, por el Ministerio del Ambiente, 2019.

2.2.7. Teledetección

La teledetección es una técnica que permite obtener información de la superficie terrestre sin el contacto físico directo. Mediante el uso de sensores instalados en plataformas satelitales. El método consiste en la captación, interpretación y análisis de imágenes digitales que registran la radiación electromagnética reflejada por los objetos y la superficie terrestre. (Flores, 2017)

2.2.7.1. Extensión espacial

Se refiere a la superficie cubierta por el bofedal, que puede variar debido a procesos de degradación por sequías, sobrepastoreo o modificaciones hidrológicas (Talaverano et al., 2024).

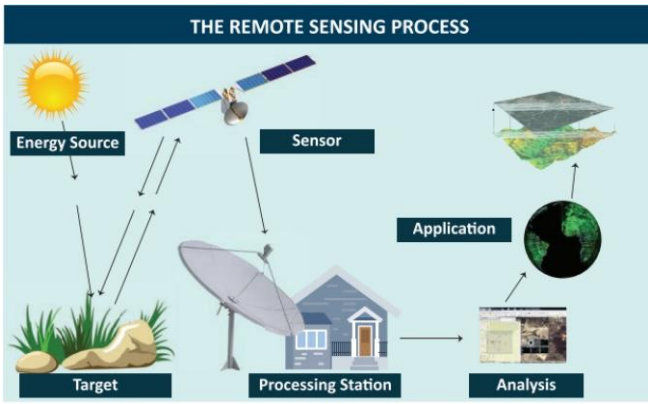
En el ámbito de las ciencias de la Tierra, la detección aporta una herramienta fundamental para el análisis territorial y ambiental, en donde posibilita la observación de amplias extensiones geográficas, como el estudio de erosión superficial, evaluación de impactos ambientales, cartografía geológica, caracterización ambiental, monitoreo de agua y humedales, así como la evaluación de la biodiversidad. (Imbaquingo, 2021).

Asimismo, es utilizado en la caracterización de la cobertura vegetal, identificación de áreas afectadas por incendios forestales, análisis de estrés hídrico y procesos de regeneración natural. De igual manera, permite elaborar inventarios de uso y cobertura

del suelo, monitoreo y rendimiento de vegetación mediante el análisis de firmas espectrales. (Imbaquingo, 2021)

Figura 1

Diagrama del proceso de teledetección



Nota. Adaptado de *Fundamentals of Remote Sensing*: Introduction, por Natural Resources Canada, 2025.

El sistema de teledetección conforma diversos componentes para la obtención y procesamiento de información ambiental. En primer lugar, es la fuente de energía que corresponde a la radiación electromagnética que permite la detección de objetos, como la radiación solar en la teledetección pasiva, activa o artificial.

Por otro lado, tenemos la cubierta terrestre que representa los elementos de la superficie, como agua, suelo, vegetación o estructuras, los cuales reflejan la radiación de acuerdo con sus propiedades físicas. El sistema sensor, registra la radiación electromagnética y la transmite hacia un sistema receptor.

Por último, el sistema receptor y de procesamiento se encarga de recibir, corregir y almacenar la información captada, mientras que el intérprete transforma los datos en información temática para la investigación, en donde el usuario analiza los productos obtenidos y extrae conclusiones orientada a la toma de decisiones. (Lozada & Bertin, 2022)

2.2.7.2. Satélites

Son dispositivos tecnológicos que están en la órbita alrededor de la Tierra, con sus sensores registran la radiación electromagnética reflejada por la superficie terrestre (Campbell, 2011).

Entre los satélites de observación terrestre, se encuentra Sentinel-2A, que se usa para estudios ambientales entre otros, el programa pertenece a Copernicus de la Unión Europea

2.2.7.3. Sentinel-2A

Es un satélite de observación de la Tierra, diseñado para proporcionar imágenes multiespectrales de alta resolución. Compuesta por los satélites Sentinel-2ª y Sentinel-2B, fueron lanzados en el año 2015 y 2017. Está equipado con sensor MSI (MultiSpectral Instrument), lo cual adquiere datos de 13 bandas espectrales (ESA,2023). Estas bandas analizan la cobertura vegetal, cuerpos de agua y características biofísicas de la superficie terrestre.

Figura 2

Bandas espectrales del sensor MSI de Sentinel-2

Band Number	Band Description	Wavelength Range (nm)	Resolution (m)
B1	Coastal aerosol	433–453	60
B2	Blue	458–523	10
B3	Green	543–578	10
B4	Red	650–680	10
B5	Red-edge 1	698–713	20
B6	Red-edge 2	733–748	20
B7	Red-edge	773–793	20
B8	Near infrared (NIR)	785–900	10
B8A	Near infrared narrow (NIRn)	855–875	20
B9	Water vapour	935–955	60
B10	Shortwave infrared/Cirrus	1360–1390	60
B11	Shortwave infrared 1 (SWIR1)	1565–1655	20
B12	Shortwave infrared 2 (SWIR2)	2100–2280	20

Nota: Adaptado de Sentinel-2 *User Handbook* (ESA,2023)

2.2.7.4. Índices

- NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada): Mide la cantidad y vigor de la vegetación verde mediante la relación entre la radiación absorbida en rojo y la reflejada en infrarrojo cercano. Altos valores indican vegetación saludable y densa (Tucker, 1979).presenta valores entre -1 y +1, donde los valores negativos corresponden a cuerpos de agua o superficie no vegetal, en cambio los cercanos a cero representan suelos desnudos o vegetación escasa, por último, los valores elevados evidencian mayor vigor vegetal y biomasa (Jensen, 2015) .Es útil para detectar variaciones en la biomasa vegetal del bofedal.

$$NDVI = \frac{NIR - Red}{NIR + Red} \qquad (1)$$

- NDWI (Índice de Diferencia Normalizada de Agua): Es un índice espectral propuesto por McFeeters (1996) para identificar y resaltar cuerpos de agua superficial mediante el empleo de las bandas verde e infrarrojo cercano. Sus valores oscilan entre −1 y +1; los valores positivos indican una mayor presencia de agua superficial, mientras que los valores negativos suelen asociarse con vegetación, suelo desnudo u otras superficies no acuáticas. En esta investigación, el NDWI se utiliza para evaluar las variaciones temporales de la condición del agua superficial del bofedal.

$$NDWI = \frac{Green - NIR}{Green + NIR} \qquad (2)$$

- SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo): Similar al NDVI, pero corrige la influencia del suelo en zonas con baja cobertura vegetal o suelos desnudos, ajustando un factor de corrección (Huete, 1988). Muy útil para bofedales donde la vegetación puede ser dispersa o estacional.

$$SAVI = \frac{(NIR - Red)(1 + L)}{NIR + Red + L} \qquad (3)$$

Donde:

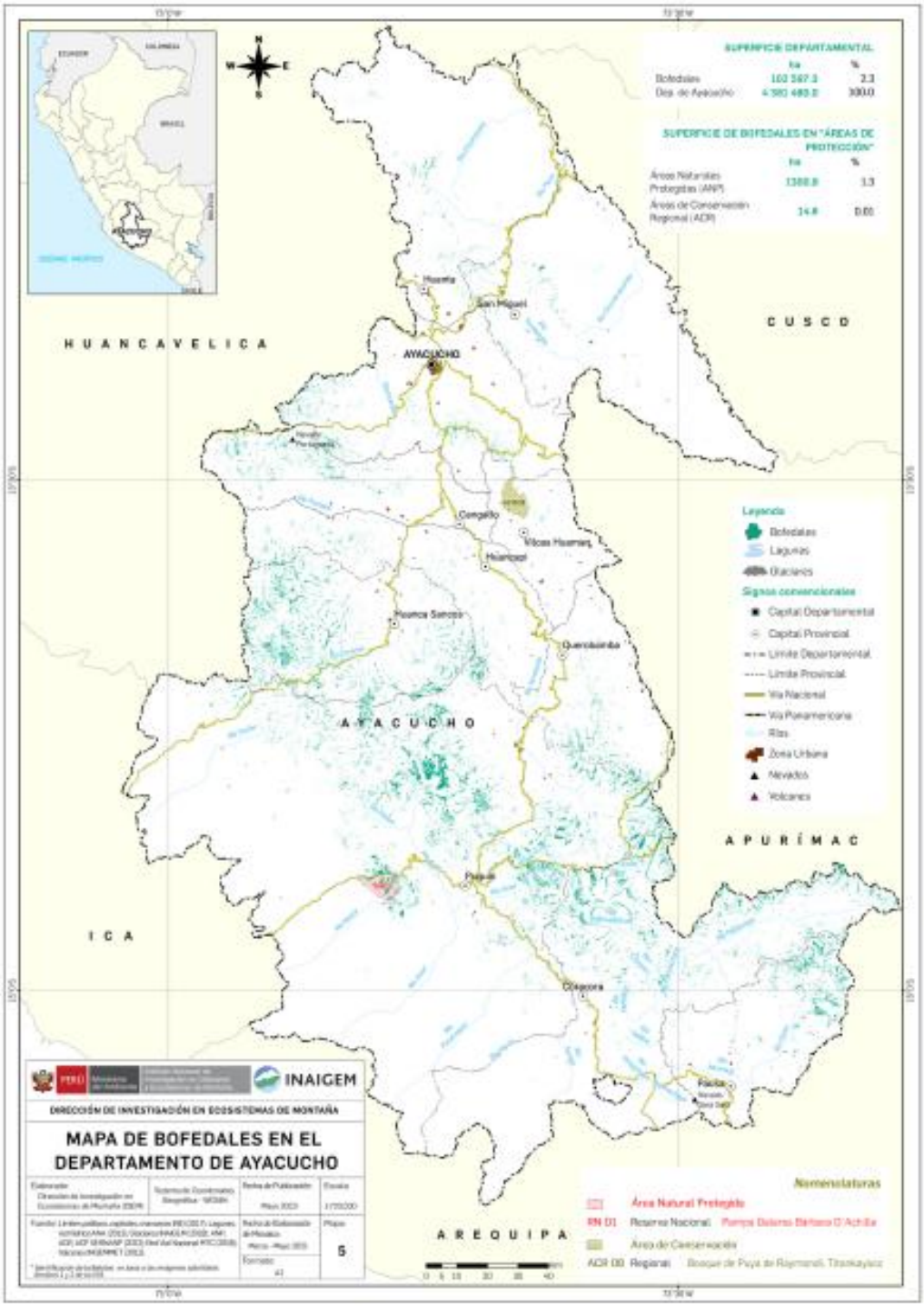
L = factor de corrección del suelo (0.5)

2.2.8. Inventario Nacional de Humedales del Perú (MINAM)

El Inventario Nacional de Bofedales del Perú es un instrumento técnico elaborado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), cuyo objetivo es proporcionar información sobre la ubicación y extensión de los bofedales en el territorio nacional. Su alcance comprende información a nivel departamental, provincial y distrital, obtenida mediante imágenes satelitales y procedimientos de delimitación y clasificación. La información cartográfica, disponible también en formato shapefile, constituye una línea base para el monitoreo, la comparación de superficies y la planificación de acciones de conservación y manejo. El inventario identificó bofedales ubicados aproximadamente entre los 3000 y 4750 m s. n. m. y determinó que Puno, Cusco y Arequipa concentran más del 50 % de su superficie nacional. Asimismo, señala que solo una pequeña proporción se encuentra bajo alguna figura de protección, lo que representa un desafío para su conservación (INAIGEM, 2023).

Figura 3

Mapa de bofedales del departamento de Ayacucho



Nota. *Adaptado de Inventario Nacional de Bofedales del Perú 2023,* por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña [INAIGEM], 2023.

2.3. Definición de términos

- **Bofedal altoandino:** Ecosistema de humedal ubicado en zonas altoandinas, caracterizado por la presencia de suelos saturados de agua, vegetación hidrófila y alta capacidad de almacenamiento hídrico (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2015).
- **Variabilidad climática:** Conjunto de fluctuaciones en los elementos del clima, como temperatura y precipitación, que ocurren en diferentes escalas temporales y espaciales (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2021).
- **Pendiente de la tendencia temporal:** Medida que representa la dirección y magnitud del cambio de una variable a lo largo del tiempo. Una pendiente positiva indica una tendencia creciente, mientras que una pendiente negativa indica una tendencia decreciente (Ahrens & Henson, 2019).
- **NDVI (Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada):** Índice espectral que permite evaluar el vigor y la densidad de la vegetación mediante el análisis de la reflectancia en el espectro visible e infrarrojo cercano (Rouse et al., 1974).
- **NDWI (Índice de Agua de Diferencia Normalizada):** Índice espectral propuesto por McFeeters (1996) para identificar y resaltar la presencia de agua superficial mediante las bandas verde e infrarrojo cercano. Los valores positivos se asocian principalmente con superficies de agua, mientras que los valores negativos corresponden generalmente a vegetación, suelo desnudo u otras superficies no acuáticas.
- **SAVI (Índice de Vegetación Ajustado al Suelo):** Índice espectral que corrige la influencia del suelo en la medición de la vegetación, especialmente en áreas con cobertura vegetal dispersa (Huete, 1988).
- **Fluctuaciones hídricas:** Se refiere a las variaciones en la cantidad de agua disponible en un ecosistema, ya sea por cambios en la precipitación o en el nivel de cuerpos de agua. En el contexto de los bofedales, las fluctuaciones hídricas pueden influir en la vegetación y en los procesos ecológicos de los humedales. (Chuvieco, 2016).
- **Dinámica espaciotemporal:** Conjunto de cambios que ocurren en un ecosistema en función del tiempo y el espacio, reflejando su evolución y comportamiento (Turner et al., 2001).
- **Índices espectrales:** Indicadores derivados de imágenes satelitales que permiten analizar características biofísicas de la superficie terrestre, como vegetación y humedad (Jensen, 2015).

CAPÍTULO III. METODOLOGIA

3.1. Tipo, nivel y diseño de investigación

3.1.1. Tipo de investigación

La presente investigación es de tipo básico, porque busca generar conocimiento sobre la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, sin aplicar directamente medidas de intervención o manejo sobre el ecosistema. Asimismo, presenta un enfoque cuantitativo, debido a que emplea datos numéricos provenientes de registros climáticos e índices espectrales obtenidos de imágenes satelitales para el análisis estadístico de las variables (Hernández et al., 2014).

3.1.2. Nivel de investigación

La investigación corresponde al nivel **correlacional**. Debido a que busca determinar la dirección, magnitud y significancia estadística de la relación entre la variabilidad climática, representada por la temperatura y la precipitación, y la dinámica del bofedal, evaluada mediante los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI durante el periodo 2015–2024. El estudio no pretende establecer relaciones de causa y efecto, sino identificar el grado de asociación existente entre las variables analizadas.(Hernández et al., 2014).

3.1.3. Diseño de investigación

Además, se adopta un **diseño no experimental**, ya que no se manipulan variables, sino que se observan y analizan datos históricos y de series temporales existentes.

El estudio es **longitudinal,** porque evalúa la evolución de las variables a lo largo de un periodo, en este caso, diez años (2015–2024).

3.2. Ámbito temporal y espacial

3.2.1. Ámbito temporal

El estudio abarcó un periodo de diez años, comprendido entre 2015 y 2024, lo que permitió analizar la variabilidad interanual de las variables climáticas y de los índices espectrales del bofedal. Asimismo, permitió identificar patrones y tendencias dentro del periodo evaluado; sin embargo, debido a la extensión temporal de la serie, los resultados no se interpretaron como tendencias climáticas de largo plazo.

3.2.2. Ámbito espacial

La investigación se desarrolló en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, mostrado en la Figura 4, ubicado en las cabeceras del distrito de Chiara, región Ayacucho, Perú. Esta área constituyó un ecosistema estratégico de alta montaña, con características particulares de clima, vegetación y uso del suelo, que justificaron un análisis detallado y localizado.

Ubicación del estudio

Departamento : Ayacucho

Provincia : Huamanga

Distrito : Chiara

Lugar : Liriopata

Datos geográficos:

Sistema de coordenadas: UTM (WGS 84)

Zona UTM: 18 Sur

Latitud (Norte): 8 500 000 m N

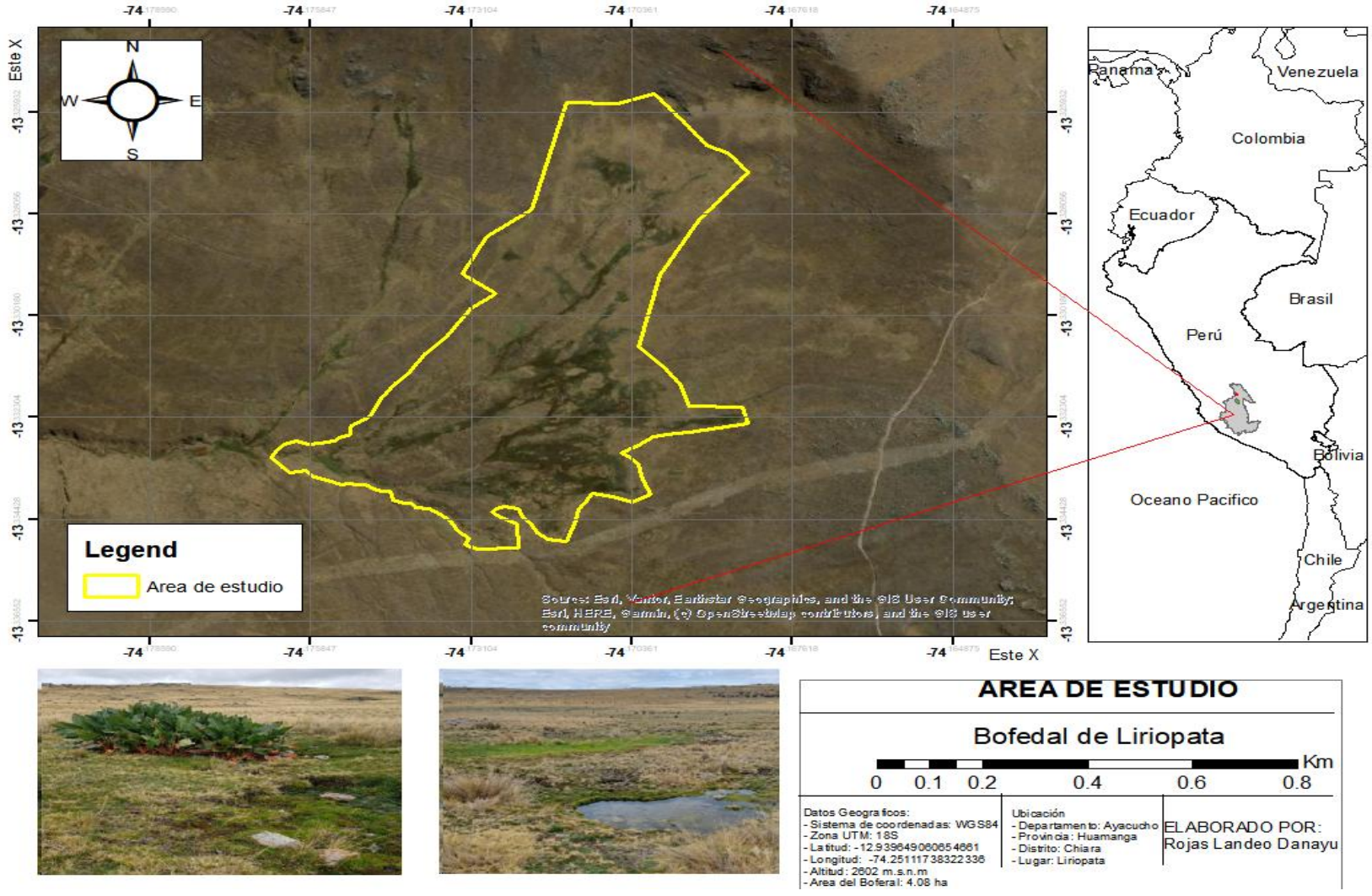
Longitud (Este): 600 000 m E

Altitud: 4 120 m s.n.m.

Área del bofedal: 40,820 m^2 (4.08 ha)

Figura 4

Mapa de ubicación del área de estudio



3.3. Población, muestra y muestreo

3.3.1. Población

Se define como el conjunto total de elementos, casos o unidades que poseen las características que van a ser estudiados dentro de una investigación (Mujica et al., 2020), la población estuvo conformada por los bofedales ubicados dentro de los límites del distrito de Chiara.

3.3.2. Muestra

Se define como un subconjunto de la población que representa de manera adecuada a la población total. Saunders, Lewis & Thornhill (2015). La muestra estuvo constituida por el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, con una extensión de 4,08 ha. Su selección respondió a criterios de extensión, importancia local y disponibilidad del polígono registrado en el Inventario Nacional de Bofedales, cuya delimitación fue verificada mediante dron.

3.3.3. Muestreo

El muestreo es el proceso de selección de una muestra a partir de la población. Kothari (2004). Se empleó un muestreo no probabilístico intencional, debido a que el bofedal de Liriopata–Chiara fue seleccionado de manera deliberada según los criterios establecidos para la investigación. Posteriormente, se realizó el análisis completo del polígono seleccionado.

3.4. Instrumentos

Los instrumentos son herramientas o procedimientos estructurados que permiten medir variables o recolectar información que van permitir responder a los objetivos planteados en un estudio científico. (Kuma, 2019)

3.4.1. Instrumentos de recolección de datos

a) Técnica: análisis documental

Instrumento: Guía de análisis documental: En este caso, se emplearon registros mensuales de precipitación y temperatura procedentes de la Oficina de Operación y Mantenimiento Hidráulico-Ayacucho, la guía permitió organizar, sistematizar y clasificar los datos.

Asimismo, se descargó el Inventario Nacional de Humedales del Perú (MINAM), como referencia para la delimitación del bofedal, empleando el polígono correspondiente del área de estudio.

b) **Técnica: Análisis de teledetección**

Instrumento: imágenes satelitales Sentinel-2 MSI, producto Level-2A, y software ArcGIS. Se emplearon imágenes satelitales Sentinel-2 MSI, producto Level-2A, obtenidas mediante el Copernicus Data Space Ecosystem. Las imágenes fueron procesadas en ArcGIS para calcular los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI. El producto Level-2A proporciona reflectancia de superficie corregida atmosféricamente.

c) **Técnica: verificación del campo**

Instrumentos: ficha de verificación, dron DJI Mini 3 y cámara fotográfica. La verificación de campo se realizó el 28 de noviembre de 2025 mediante observación directa, registro fotográfico y sobrevuelos con el dron DJI Mini 3 en el bofedal de Liriopata–Chiara. El equipo se utilizó para obtener fotografías y vistas generales del área de estudio.

La delimitación obtenida del Inventario Nacional de Bofedales fue comparada visualmente con los límites y características observadas en campo. Debido a que no se calculó un porcentaje de coincidencia, error espacial o superposición cartográfica, el procedimiento se consideró una verificación visual y no una validación geométrica del polígono. No se registraron datos de altura ni duración del vuelo.

3.4.2. Instrumentos de procesamiento y análisis de datos

Se realizó con herramientas de sistemas de información geográfica y software estadístico.

Tabla 3

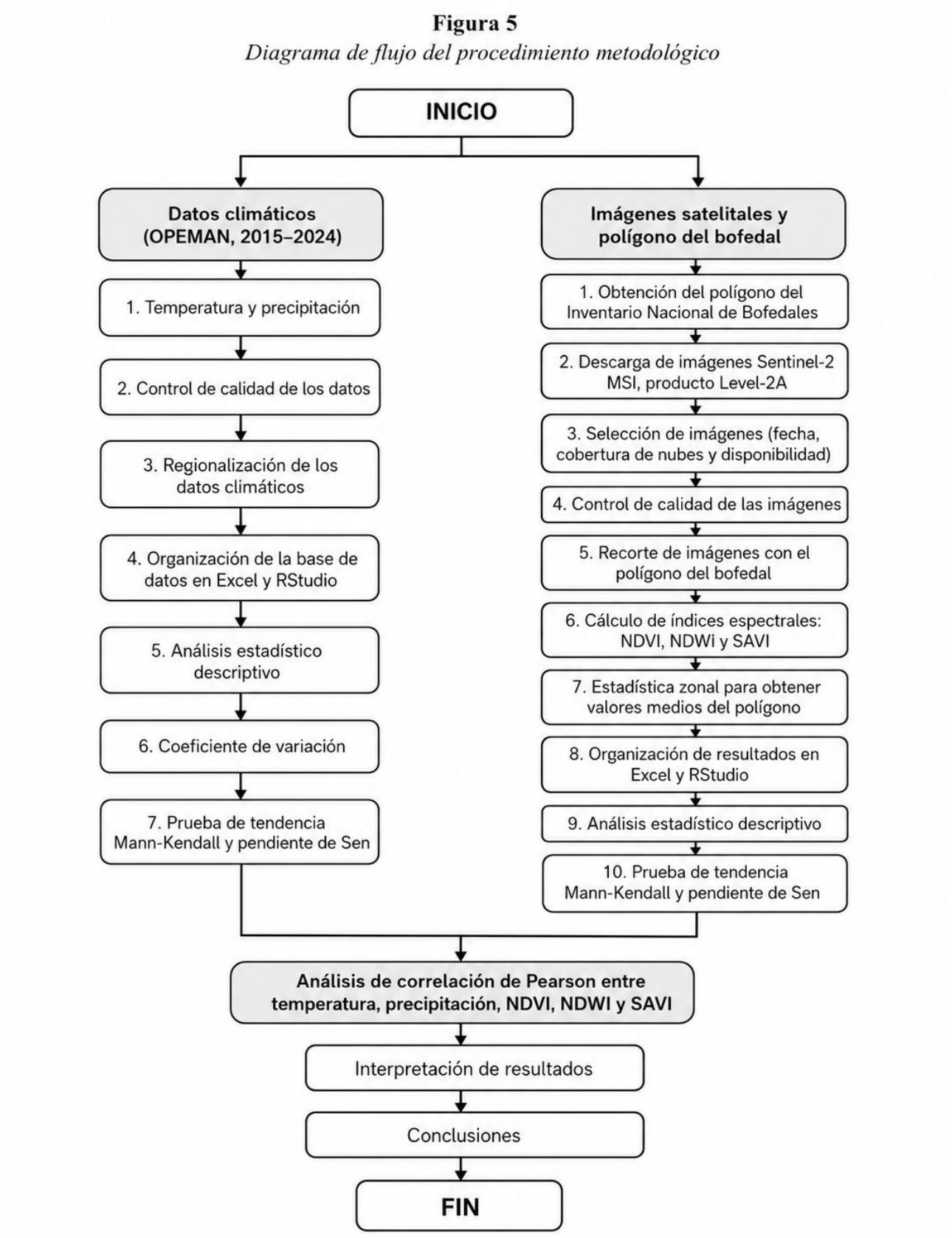
Instrumentos y procedimientos para el procesamiento y análisis de datos

Técnica	Instrumento o software	Procedimiento de análisis
Análisis geoespacial	ArcGIS	Procesamiento de imágenes satelitales y cálculo de los índices NDVI, NDWI y SAVI
Análisis estadístico descriptivo	Microsoft Excel y RStudio	Media, mediana, mínimo, máximo y desviación estándar
Análisis de variabilidad	Microsoft Excel y RStudio	Coeficiente de variación

Análisis de tendencia temporal	RStudio	Prueba de Mann-Kendall y pendiente de Sen
Análisis de correlación	RStudio	Coeficiente de correlación de Pearson

Figura 5

Diagrama de flujo del proceso de investigación.



3.5. Procedimiento metodológico

3.5.1. Recopilación y organización de datos meteorológicos

Los datos de temperatura y precipitación fueron obtenidos de los registros oficiales de OPEMAN–Ayacucho, disponibles en formato físico. Posteriormente, fueron transcritos y organizados en Microsoft Excel, verificando la continuidad de las fechas, la presencia de datos faltantes y posibles errores de transcripción antes de realizar el análisis estadístico. La información utilizada se presenta en el Anexo 1.

3.5.2. Selección y caracterización de estaciones meteorológicas

Debido a que no existe una estación meteorológica dentro del bofedal Liriopata, ubicado a 4120 m s. n. m., se seleccionaron las estaciones Allpachaca, Choccorro, Apacheta y Sunilla. La selección consideró la proximidad geográfica al área de estudio, la diferencia altitudinal, la disponibilidad de registros de temperatura y precipitación y la continuidad de la información correspondiente al periodo 2015–2024.

La información de las estaciones seleccionadas fue empleada en el proceso de regionalización de las variables climáticas para estimar las condiciones de temperatura y precipitación del área de estudio.

Tabla 4

Ubicación de las estaciones meteorológicas utilizadas en el estudio

Código	Variable	Estación	Latitud	Latitud decimal	Longitud	Longitud decimal	Altitud (m s. n. m.)
H105	E_1	Allpachaca	13° 23′ 19″ S	−13,39	74° 16′ 00″ O	−74,27	3550
H111	E_2	Choccorro	13° 25′ 38″ S	−13,43	74° 38′ 40″ O	−74,64	4025
H116	E_3	Apacheta	13° 21′ 01″ S	−13,35	74° 28′ 23″ O	−74,47	4150
H123	E_4	Sunilla	13° 25′ 50″ S	−13,43	74° 20′ 33″ O	−74,34	3740

3.5.3. Tratamiento y procesamiento de datos climáticos.

Los registros diarios de temperatura y precipitación de las estaciones Allpachaca, Choccorro, Apacheta y Sunilla fueron revisados y organizados en Microsoft Excel. Durante la revisión se identificaron vacíos puntuales correspondientes a algunos días y, en determinados casos, a periodos cortos dentro de un mes. No se identificaron meses completos sin información.

Estos vacíos se asociaron con interrupciones temporales en el funcionamiento o registro de las estaciones meteorológicas. Los valores faltantes fueron completados mediante el promedio de los datos disponibles de las estaciones seleccionadas para el mismo periodo. Posteriormente, los registros diarios completos fueron utilizados para obtener los valores mensuales y continuar con el proceso de regionalización climática.

Tabla 5

Características de los datos faltantes identificados

Aspecto	Descripción
Tipo de ausencia	Registros diarios aislados
Duración observada	Desde un día hasta periodos cortos dentro de algunos meses
Meses completamente ausentes	No se identificaron
Posible causa	Interrupciones temporales en el funcionamiento o registro de las estaciones
Método aplicado	Promedio de los datos disponibles de las estaciones para el mismo periodo
Uso posterior	Cálculo de valores mensuales y regionalización climática

3.5.4. Regionalización climática altitudinal.

3.5.4.1. *Regionalización climática altitudinal- Precipitación*

La regionalización de la precipitación se realizó con la información de las estaciones Allpachaca, Choccorro, Apacheta y Sunilla. A partir de los registros mensuales se calculó la precipitación acumulada anual de cada estación mediante la suma de los doce valores mensuales. Posteriormente, se evaluó la relación entre la precipitación media anual y la altitud de las estaciones.

Tabla 6

Altitud y precipitación media anual de las estaciones meteorológicas

Estación	Altitud H_i (msnm)	Precipitación media anual P_i (mm)
Allpachaca	3550	809.95
Choccoro	4025	1109.53
Apacheta	4150	1000.86
sunilla	3740	813.00

N° de estaciones:

n = 4

Altitud del bofedal de Liriopata:

H_b= 4120 msnm

a. Análisis de regresión lineal

$$\sum P_i = 3\,733{,}34$$
$$\sum H_i^2 = 60\,013\,225$$
$$\sum P_i^2 = 3\,549\,765{,}56$$
$$\sum H_i P_i = 14\,535\,369{,}75$$

b. Cálculo de la pendiente B_1

$$B_1 = \frac{n\sum(Hi\,Pi) - \sum Hi \sum Pi}{n\sum H_i^2 - (\sum Hi)^2}$$

B_1=0.4572

c. Cálculo del coeficiente independiente B_0

$$B_0 = \frac{\sum P_I - B_1 \sum Hi}{n}$$

B_0= -834,26

d. Modelo de regresión lineal

$$P = -834{,}26 + 0{,}4572H$$

Para el bofedal de Liriopata, ubicado a 4120 m s. n. m.:

$$P = -834{,}26 + 0{,}4572(4120)$$
$$P = 1049{,}35\ mm$$

e. Evaluación estadística del modelo

$$r = \frac{n\sum(H_i P_i) - \sum H_i \sum P_i}{\sqrt{\left[n\sum H_i^2 - (\sum H_i)^2\right]\left[n\sum P_i^2 - (\sum P_i)^2\right]}}$$

$$r = 0.842$$

Relación positiva fuerte, adecuada para regionalización.

f. Cálculo de la precipitación media anual corregida por estación

Tabla 7

Precipitación media anual corregida por altitud en estaciones meteorológicas del área de estudio

Estación o área	Altitud (m s. n. m.)	Precipitación estimada (mm)
Allpachaca	3550	788,75
Choccorro	4025	1005,91
Apacheta	4150	1063,06
Sunilla	3740	875,62
Bofedal de Liriopata	4120	1049,35

g. Cálculo de la distancia entre estaciones

Para el cálculo de las distancias, primero se realizó la transformación de las coordenadas originales en grados, minutos y segundo (GMS) se transformaron a grados decimales:

Grados decimales = $G + \frac{M}{60} + \frac{S}{3600}$

Se aplicó para latitud y longitud en cada estación

Tabla 8

Coordenadas geográficas de las estaciones meteorológicas y del bofedal de Liriopata

Estación	Latitud	Longitud	Latitud decimal	Longitud decimal
Allpachaca	13° 23′ 19″ S	74° 16′ 00″ O	−13,3886	−74,2667
Choccorro	13° 25′ 38″ S	74° 38′ 40″ O	−13,4272	−74,6444
Apacheta	13° 21′ 01″ S	74° 28′ 23″ O	−13,3503	−74,4731
Sunilla	13° 25′ 50″ S	74° 20′ 33″ O	−13,4306	−74,3425
Bofedal de Liriopata	13° 33′ 18″ S	74° 17′ 21″ O	−13,5550	−74,2892

Para calcular las distancias se emplearon las coordenadas geográficas y la fórmula de Haversine, la cual permite estimar la distancia geodésica entre dos puntos sobre la superficie terrestre:

$$d_i = \sqrt{(Lat_b - Lat_i)^2 + (Lon_b - Lon_i)^2}$$

Donde:

d_i = distancia entre la estación *i* y el bofedal, en kilómetros

Lat_b = latitud del bofedal

Lon_b = longitud del bofedal

Lat_i = latitud de la estación *i*

Lon_i =longitud de la estación i

Tabla 9

Distancia geodésica entre las estaciones meteorológicas y el bofedal de Liriopata

Estación	Distancia al bofedal (km)
Allpachaca	18,66
Choccoro	40,96
Apacheta	30,23
Sunilla	14,99

h. Cálculo de los coeficientes de ponderación

Los coeficientes de influencia geográfica se calcularon mediante ponderación por distancia inversa:

$$\boldsymbol{bi} = \frac{1/di}{\Sigma(\frac{1}{di})}$$

Tabla 10

Distancias y coeficientes de ponderación para la estimación climática

Estación	Distancia (km)	(1/di)	Coeficiente (bi)
Allpachaca	18,66	0,05359	0,301
Choccorro	40,96	0,02442	0,137
Apacheta	30,23	0,03308	0,186
Sunilla	14,99	0,06671	0,375
Total		**0,17779**	**1,000**

i. influencia final del bofedal Liriopata

La ecuación de estimación mensual queda:

PLiriopata,m =0,301PAllpachaca,m +0,137PChoccorro,m +0,186PApacheta,m +0, 375PSunilla,m

donde $P_{\text{Liriopata},m}$ representa la precipitación mensual estimada para el bofedal y $P_{i,m}$ corresponde a la precipitación mensual registrada en cada estación.E_1 = Estación Allpachaca

A partir de la serie mensual estimada se calcularon los estadísticos descriptivos y el coeficiente de variación. Asimismo, se aplicó la prueba no paramétrica de Mann-Kendall para identificar la presencia y dirección de tendencias monotónicas en la serie temporal de precipitación.

3.5.4.2. Regionalización climática altitudinal- Temperatura media

La regionalización de la temperatura se realizó con los valores medios anuales de las estaciones Allpachaca, Choccorro, Apacheta y Sunilla. Posteriormente, se evaluó la relación entre la temperatura media anual y la altitud mediante regresión lineal simple.

Tabla 11

Altitud y temperatura media anual de las estaciones meteorológicas

Estación	Altitud H_i (msnm)	Temperatura media anual T_i(C°)
Allpachaca	3550	11.37
Choccoro	4025	7.15
Apacheta	4150	6.49
Sunilla	3740	9.82

a. Cálculo de sumatorias

- Sumatorias de altitudes

$$\sum T_i = 34{,}83$$
$$\sum H_i^2 = 60\ 013\ 225$$
$$\sum T_i^2 = 318{,}9519$$
$$\sum H_i T_i = 132\ 802{,}55$$

b. Cálculo de la pendiente *B*

$$B_1 = \frac{n\sum(Hi\,Ti) - \sum Hi \sum Ti}{n\sum H_i^2 - (\sum Hi)^2}$$

B_1=-0,008386

c. Cálculo del intercepto

$$B_0 = \frac{\sum T_I - B_1 \sum Hi}{n}$$

B_0= 41,1303

d. Modelo de regresión lineal

$$T_b = 41{,}1303 - 0{,}008386H$$

donde:

T = temperatura media anual estimada, en grados Celsius.

H = altitud, en metros sobre el nivel del mar. Coeficiente de correlación r

Para el bofedal de Liriopata, ubicado a 4120 m s. n. m.:

$$T_{Liriopata} = 41{,}1303 - 0{,}008386(4120)$$

$$T_{\text{Liriopata}} = 6{,}58\ ^\circ\text{C}$$

Por tanto, la temperatura media anual estimada para el bofedal de Liriopata fue de **6,58 °C**.

e. Evaluación estadística del modelo

La ecuación de regresión es:

$$= B_O + B_1 * H$$

Tabla 12

Temperatura media estimada mediante el modelo de regresión altitudinal

Estación o área	Altitud, (H) (m s. n. m.)	Fórmula aplicada	Temperatura estimada (°C)
Allpachaca	3550	(T=41,1303-0,008386(3550))	11,36
Choccorro	4025	(T=41,1303-0,008386(4025))	7,38
Apacheta	4150	(T=41,1303-0,008386(4150))	6,33
Sunilla	3740	(T=41,1303-0,008386(3740))	9,77
Bofedal de Liriopata	**4120**	**(T=41,1303-0,008386(4120))**	**6,58**

f. Cálculo de la distancia entre estaciones

Para la estimación de la temperatura media se utilizaron las mismas distancias geodésicas calculadas entre las estaciones meteorológicas y el bofedal de Liriopata en el procedimiento de regionalización de la precipitación. Por ello, no fue necesario repetir la conversión de coordenadas ni el cálculo de distancias.

Tabla 13

Distancia entre estaciones base a estaciones del trabajo

Estación	Distancia al bofedal (km)
Allpachaca	18,66
Choccorro	40,96
Apacheta	30,23
Sunilla	14,99

g. **Cálculo de factores de coeficientes de ponderación geográfica**

Se utilizó las mismas expresiones matemáticas previamente descritas en el análisis de precipitación. Manteniendo su misma formulación matemática.

Para estimar la temperatura mensual del bofedal de Liriopata se utilizaron coeficientes de ponderación basados en la distancia inversa. Las distancias fueron las mismas empleadas en la regionalización de la precipitación, debido a que corresponden a la ubicación fija de las estaciones meteorológicas respecto del bofedal.

Los coeficientes se calcularon mediante:

$$\mathbf{b_i} = \frac{1/di}{\Sigma(\frac{1}{di})}$$

donde:

b_i= coeficiente de ponderación de la estación i;

d_i= distancia entre la estación iy el bofedal, en kilómetros;

Tabla 14

Coeficientes de ponderación empleados en la estimación de la temperatura

Estación	Distancia al bofedal, (di) (km)	(1/di)	Coeficiente (bi)

Allpachaca	18,66	0,05359	0,3014
Choccorro	40,96	0,02441	0,1373
Apacheta	30,23	0,03308	0,1861
Sunilla	14,99	0,06671	0,3752
Total		**0,17779**	**1,0000**

h. Cálculo de la temperatura mensual del bofedal de Liriopata

Para cada mes m, la temperatura media del bofedal se estimó mediante la ponderación de los registros de las cuatro estaciones:

TLiriopata,m =0,3014TAllpachaca,m +0,1373TChoccorro,m +0,1861T Apacheta,m +0,3752TSunilla,m

donde:

$T_{\text{Liriopata},m}$ = temperatura media mensual estimada para el bofedal de Liriopata, en grados Celsius;

$T_{i,m}$= temperatura media mensual registrada en la estación i, durante el mes m;

b_i= coeficiente de ponderación geográfica de la estación i.

A partir de la serie mensual estimada se calcularon la media anual, la desviación estándar y el coeficiente de variación. Asimismo, se aplicó la prueba de Mann-Kendall para evaluar la presencia y dirección de una tendencia monotónica durante el periodo analizado.

3.5.5. Adquisición de imágenes satelitales

Para evaluar la variación temporal de los valores medios de los índices espectrales del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024, se utilizaron imágenes de la misión **Sentinel-2**, obtenidas mediante el sensor **MSI** y distribuidas como productos Level-2A.

3.5.5.1. *Delimitación del bofedal Liriopata*

La delimitación del área de estudio se realizó a partir del polígono disponible en el Inventario Nacional de Bofedales del Perú. Este polígono fue empleado como referencia cartográfica para identificar y delimitar el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, así como para recortar las imágenes satelitales y extraer los valores de los índices espectrales correspondientes al área evaluada.

3.5.5.2. *Verificación y delimitación de campo del bofedal*

La verificación de campo se realizó mediante observación directa, registro fotográfico y vuelos de dron sobre el bofedal de Liriopata–Chiara. Estas actividades permitieron comprobar visualmente las características generales del ecosistema dentro del polígono obtenido del Inventario Nacional de Bofedales.

La verificación fue visual y descriptiva; por ello, no se calculó un porcentaje de superposición, error espacial ni precisión planimétrica. El polígono original se mantuvo como unidad espacial para el procesamiento de las imágenes Sentinel-2 MSI y el cálculo de los índices NDVI, NDWI y SAVI. La ficha de verificación y el registro fotográfico se presentan en los anexos.

Figura 6

Visualización del área de estudio mediante el control remoto del dron



La información obtenida mediante el dron permitió validar la delimitación del área de estudio, sin modificar el polígono original, asegurando que este represente adecuadamente la extensión real del bofedal. El polígono verificado fue utilizado como base para el procesamiento de las imágenes satelitales, el cálculo de los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI, la extracción de los valores correspondientes al área de estudio y el análisis de la dinámica espacial y temporal del bofedal durante el periodo 2015–2024.

3.5.5.3. *Selección y descarga de imágenes Sentinel-2 MSI*

Para cada año del periodo 2015–2024 se seleccionaron aproximadamente tres imágenes Sentinel-2 MSI, producto Level-2A, considerando la menor cobertura de nubes y la visibilidad adecuada del polígono del bofedal. Las imágenes seleccionadas fueron

procesadas individualmente para calcular los índices NDVI, NDWI y SAVI. Posteriormente, se calculó la media de los valores obtenidos en las escenas disponibles de cada año, generándose un valor medio anual para cada índice espectral.

La cantidad y las fechas de las imágenes estuvieron condicionadas por su disponibilidad y por la cobertura de nubes. Por ello, se priorizaron escenas correspondientes a periodos estacionales similares; sin embargo, cuando no existieron imágenes adecuadas dentro de una misma ventana temporal, se utilizaron las escenas disponibles con menor nubosidad. Esta condición se consideró durante la interpretación de los resultados.

Figura 7

Interfaz utilizada para la obtención de imágenes Sentinel-2 MSI

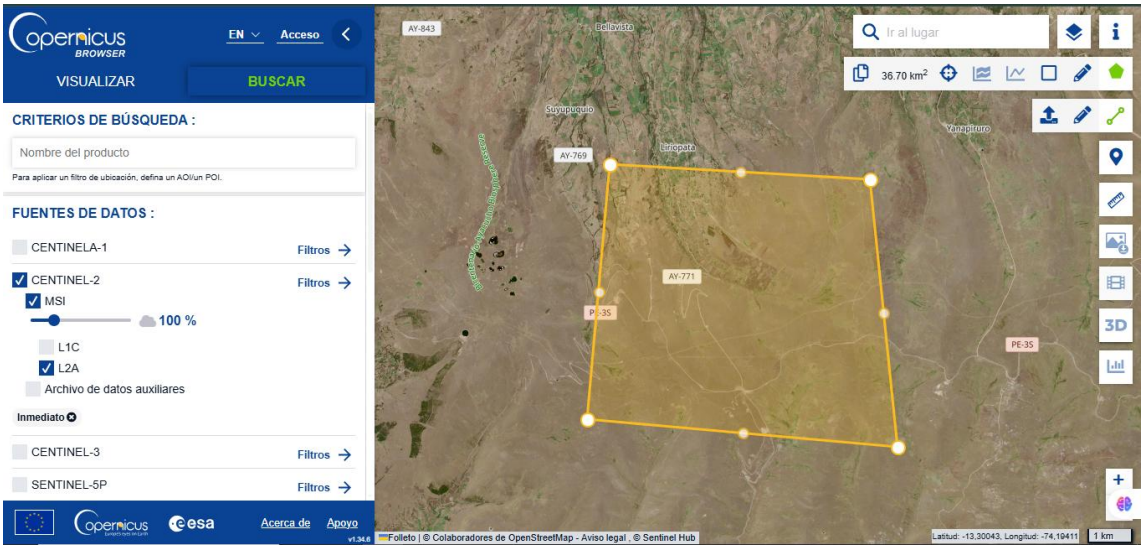


Tabla 15

Características temporales de las imágenes Sentinel-2 MSI utilizadas

Plataforma y producto	Fecha de adquisición	Mes	Año	Fecha de generación o reprocesamiento	Línea base	Fuente
Sentinel-2A MSI Level-2A, producto histórico	14/08/2015	Agosto	2015	14/10/2023	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem

Sentinel-2A MSI Level-2A, producto histórico	03/05/2016	Mayo	2016	03/10/2023	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2A MSI Level-2A	18/05/2017	Mayo	2017	07/09/2023	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2B MSI Level-2A	18/05/2018	Mayo	2018	28/08/2023	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2A MSI Level-2A	18/05/2019	Mayo	2019	06/12/2022	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2A MSI Level-2A	19/10/2020	Octubre	2020	11/03/2023	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2A MSI Level-2A	05/08/2021	Agosto	2021	15/01/2023	N0500	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2A MSI Level-2A	21/07/2022	Julio	2022	11/07/2024	N0510	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2B MSI Level-2A	22/04/2023	Abril	2023	05/09/2024	N0510	Copernicus Data Space Ecosystem
Sentinel-2B MSI Level-2A	05/07/2024	Julio	2024	05/07/2024	N0510	Copernicus Data Space Ecosystem

Nota. La fecha de adquisición corresponde al momento en que el sensor captó la imagen. La segunda fecha incluida en el identificador corresponde a la generación o reprocesamiento del producto Level-2A y no al momento de adquisición. Las imágenes de 2015 y 2016 fueron obtenidas del archivo histórico reprocesado de Copernicus Data Space Ecosystem.

Tabla 16

Control de nubosidad de las imágenes Sentinel-2 MSI utilizadas

Año	Fecha de adquisición	Mes	Criterio de nubosidad
2015	14/08/2015	Agosto	Menor de 30 %
2016	03/05/2016	Mayo	Menor de 30 %
2017	18/05/2017	Mayo	Menor de 30 %

2018	18/05/2018	Mayo	Menor de 30 %
2019	18/05/2019	Mayo	Menor de 30 %
2020	19/10/2020	Octubre	Menor de 30 %
2021	05/08/2021	Agosto	Menor de 30 %
2022	21/07/2022	Julio	Menor de 30 %
2023	22/04/2023	Abril	Menor de 30 %
2024	05/07/2024	Julio	Menor de 30 %

Nota. Se priorizaron escenas con nubosidad inferior al 30 % y con visibilidad adecuada del polígono del bofedal. El control de calidad se complementó mediante inspección visual de cada imagen.

3.5.5.4. *Control de calidad de las imágenes satelitales*

La selección de las imágenes Sentinel-2 MSI se realizó considerando el porcentaje de nubosidad informado en los metadatos de cada producto. Entre las escenas disponibles para cada año, se eligieron aquellas con menor presencia de nubes y con visibilidad adecuada del polígono del bofedal.

Posteriormente, se efectuó una revisión visual de cada escena para verificar que el área de estudio no estuviera cubierta por nubes densas, sombras de nubes, nieve o píxeles sin información. No se aplicó una máscara automática mediante las capas SCL o QA60; por ello, el control de calidad se limitó a la selección por nubosidad del producto y a la inspección visual del área de estudio. Esta condición se consideró una limitación del procesamiento.

3.5.5.5. *Cálculo de índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI*)

El NDVI se calculó dentro del polígono del bofedal mediante la herramienta Raster Calculator, ubicada en ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Map Algebra. Para el cálculo se utilizaron las bandas B8 y B4 de Sentinel-2 MSI:

$$NDVI = \frac{B8 - B4}{B8 + B4}$$

Donde:

B4: rojo (RED), con resolución de 10 m

B8: infrarrojo cercano (NIR), con resolución de 10 m

3.5.5.6. *Cálculo de índice de diferencia normalizada de agua (NDWI)*

$$NDWI = \frac{B3-B8}{B3+B8}$$

Donde:

B3: verde (GREEN), con resolución de 10 m

B8: infrarrojo cercano (NIR), con resolución de 10 m

3.5.5.7. Cálculo del índice de vegetación ajustado al suelo (SAVI)

$$SAVI = \frac{(B8-B4)}{(B8+B4+L)}\ (1+L) \qquad \text{con L = 0.5}$$

Donde:

B4: rojo (RED), con resolución de 10 m

B8: infrarrojo cercano (NIR), con resolución de 10 m

L: factor de corrección del suelo

3.5.5.8. Procedimiento para generar los mapas NDVI, NDWI Y SAVI

Los índices NDVI, NDWI y SAVI se calcularon mediante la herramienta Raster Calculator de ArcGIS, utilizando las bandas B3, B4 y B8 de las imágenes Sentinel-2 MSI, producto Level-2A. Posteriormente, los rásteres obtenidos fueron recortados mediante el polígono del bofedal de Liriopata y representados en mapas temáticos.

Para cada índice se mantuvieron criterios uniformes de representación cartográfica entre los años analizados, con la finalidad de facilitar la comparación visual de la respuesta espectral del bofedal. Los mapas permitieron observar la distribución de los valores de NDVI, NDWI y SAVI dentro del área evaluada; sin embargo, no se realizó una clasificación de la superficie por clases espectrales ni un análisis detallado píxel a píxel.

3.5.5.9. Proceso de obtención de estadísticas zonales de NDVI, NDWI y SAVI

Una vez generados los mapas de NDVI, NDWI y SAVI, se aplicó la herramienta Zonal Statistics as Table de ArcGIS, utilizando como zona de análisis el polígono del bofedal de Liriopata. Para cada índice se obtuvieron los valores mínimo, máximo, rango, media, desviación estándar y suma. Posteriormente, los resultados fueron exportados a Microsoft Excel para su organización y análisis.

Las escenas fueron seleccionadas considerando su menor porcentaje de nubosidad y la visibilidad adecuada del área de estudio. Asimismo, se efectuó una revisión visual para comprobar que el polígono del bofedal presentara información espectral utilizable en cada imagen.

Las tablas finales conservaron los valores estadísticos resumidos de cada índice, pero no el conteo individual de píxeles válidos por escena. Por ello, no fue posible determinar posteriormente el porcentaje exacto de píxeles válidos para cada año, lo cual se consideró una limitación del procesamiento.

Los valores medios obtenidos permitieron evaluar la variación temporal de la respuesta espectral del bofedal entre las fechas seleccionadas. Debido a que no se efectuó una clasificación por clases espectrales ni un análisis píxel a píxel, los resultados no representan cambios detallados en la extensión interna del bofedal, sino variaciones de los valores medios de NDVI, NDWI y SAVI dentro del polígono evaluado.

3.5.5.10. Análisis temporal descriptivo de NDVI, NDWI y SAVI

Mediante un modelo de regresión lineal simple se describió el comportamiento temporal de los valores medios de NDVI, NDWI y SAVI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. Para cada índice se calcularon la pendiente y el coeficiente de determinación (R^2) con fines descriptivos. Asimismo, se elaboraron gráficos con los valores observados y sus respectivas líneas de tendencia.

El análisis tuvo carácter descriptivo y exploratorio, debido a que las imágenes fueron adquiridas en meses diferentes, según la disponibilidad de escenas con menor nubosidad. En consecuencia, las variaciones identificadas pueden estar influenciadas por las condiciones estacionales de las fechas seleccionadas y no representan necesariamente tendencias fenológicas homogéneas.

3.6. Procedimiento para analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024

Para analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, se integraron los valores de temperatura y precipitación correspondientes al mes de adquisición de cada imagen con los valores medios de NDVI, NDWI y SAVI obtenidos para la misma escena.

En una primera etapa se elaboraron gráficos combinados de barras y líneas con doble eje para visualizar el comportamiento conjunto de las variables climáticas y los índices

espectrales. Posteriormente, se aplicó el coeficiente de correlación de Pearson para determinar la dirección, magnitud y significancia estadística de las relaciones entre la temperatura, la precipitación y los índices NDVI, NDWI y SAVI.

Las imágenes fueron seleccionadas de acuerdo con su disponibilidad, menor cobertura de nubes y adecuada visibilidad del área de estudio. Debido a que correspondieron a meses diferentes entre los años evaluados, las relaciones estadísticas se interpretaron con carácter exploratorio y considerando la posible influencia de la estacionalidad.

Para este análisis se utilizaron los valores de precipitación y temperatura correspondientes al mismo mes de adquisición de cada imagen. No se evaluaron precipitaciones acumuladas de uno, dos o tres meses anteriores ni posibles respuestas climáticas rezagadas, lo cual se consideró una limitación del análisis.

Tabla 17

Variables climáticas e índices espectrales correspondientes al mes de adquisición de las imágenes

Año	Mes	Precipitación mensual (mm)	Temperatura media mensual (°C)	NDVI	NDWI	SAVI
2015	Agosto	62,71	6,80	0,388	−0,390	0,583
2016	Mayo	35,68	7,02	0,388	−0,414	0,630
2017	Mayo	50,85	6,96	0,422	−0,422	0,633

2018	Mayo	49,37	5,98	0,404	−0,410	0,606
2019	Mayo	40,30	6,12	0,245	−0,401	0,590
2020	Octubre	23,96	6,55	0,245	−0,295	0,367
2021	Agosto	38,03	6,41	0,267	−0,318	0,401
2022	Julio	16,44	6,39	0,276	−0,327	0,414
2023	Abril	31,35	6,40	0,431	−0,426	0,647
2024	Julio	27,20	6,77	0,291	−0,329	0,438

Nota. Los valores de temperatura y precipitación corresponden al mismo mes de adquisición de cada imagen Sentinel-2 MSI. Debido a que las escenas pertenecieron a meses diferentes entre los años analizados, las relaciones estadísticas se interpretaron considerando la posible influencia de la estacionalidad.

CAPÍTULO IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Resultados

4.1.1. Evaluación de la variabilidad climática (temperatura y precipitación) del bofedal altoandino en Liriopata- Chiara,2015-2024.

4.1.1.1. *Precipitación mensual y acumulada anual*

Tabla 18

Registro de precipitación mensual y precipitación acumulada anual en el bofedal de Liriopata – Chiara, 2015–2024)

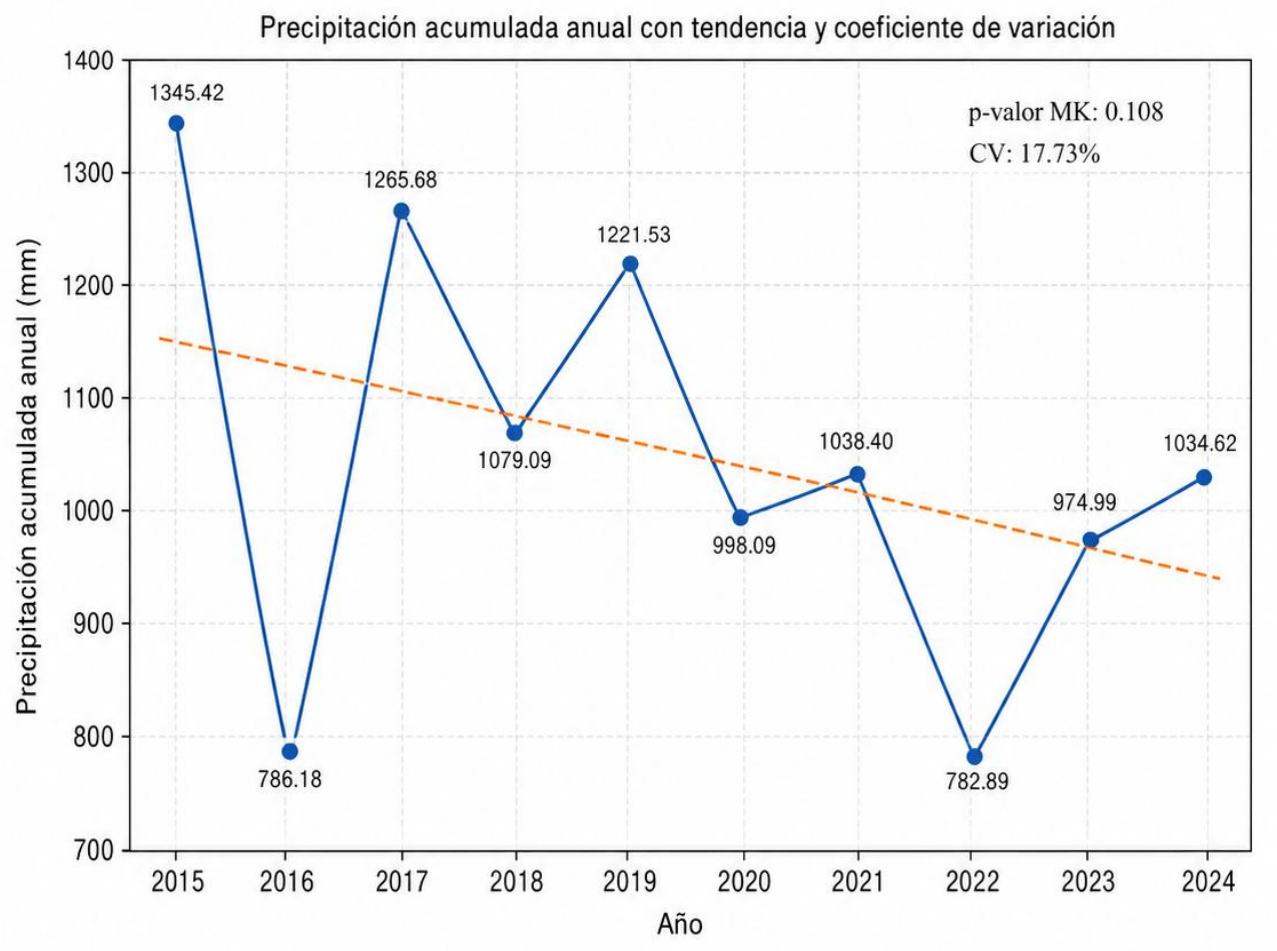
Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Acumulada anual (mm)
2015	239,84	186,95	249,77	145,40	49,54	48,34	28,70	51,83	71,91	43,23	91,50	138,41	**1345,42**
2016	84,79	174,26	103,26	80,35	24,22	18,26	30,58	33,17	21,66	41,54	33,82	140,27	**786,18**
2017	295,98	280,81	195,27	106,71	68,00	5,56	10,93	8,59	40,77	115,41	59,01	78,64	**1265,68**
2018	180,33	175,35	239,73	83,95	30,45	41,76	27,40	76,46	20,68	64,91	55,52	82,55	**1079,09**

2019	205,32	203,79	174,16	68,05	70,00	7,72	32,04	10,76	27,69	85,82	117,37	218,81	**1221,53**
2020	137,26	288,48	204,29	44,85	58,10	4,18	0,04	12,15	28,48	19,91	21,92	178,43	**998,09**
2021	218,11	123,80	170,95	97,80	48,30	16,37	5,67	6,79	25,75	67,53	141,87	115,46	**1038,40**
2022	161,11	186,82	182,50	42,76	21,07	12,80	0,78	12,53	14,55	10,63	15,12	122,22	**782,89**
2023	166,17	211,27	161,78	29,76	66,39	0,00	4,61	3,53	56,00	59,18	87,09	129,21	**974,99**
2024	189,10	207,49	169,98	63,96	24,61	7,86	0,28	2,93	15,15	75,61	114,96	162,69	**1034,62**

En la Tabla 18 se observa que la precipitación acumulada anual presentó variaciones durante el periodo 2015–2024. El mayor acumulado se registró en 2015, con 1345,42 mm, seguido de 2017, con 1265,68 mm, y 2019, con 1221,53 mm. Por el contrario, los menores valores se presentaron en 2022, con 782,89 mm, y en 2016, con 786,18 mm. Estos resultados muestran un comportamiento variable de la precipitación entre los años analizados en el bofedal de Liriopata–Chiara.

Figura 8

Serie temporal de la precipitación acumulada anual



En la Figura 8 se presenta la serie temporal de la precipitación acumulada anual durante el periodo 2015–2024. El mayor valor se registró en 2015, con 1345,42 mm, mientras que el menor correspondió a 2022, con 782,89 mm. El coeficiente de variación fue de 17,73 %, lo que evidencia una variabilidad moderada de la precipitación entre los años analizados. La prueba de Mann-Kendall presentó un valor de $\tau = -0{,}422$ y un valor de $p = 0{,}108$, por lo que la tendencia decreciente observada no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no se cuenta con evidencia suficiente para afirmar que la precipitación acumulada anual haya disminuido significativamente durante el periodo evaluado.

4.1.1.2. Temperatura mensual y media anual

Tabla 19

Registro de temperatura media mensual y temperatura media anual en el bofedal de Liriopata – Chiara (2015–2024)

N.°	Año	Ene.	Feb.	Mar.	Abr.	May.	Jun.	Jul.	Ago.	Set.	Oct.	Nov.	Dic.	Temperatura media anual (°C)
1	2015	6,83	6,96	6,84	6,39	6,10	5,71	5,11	6,07	6,95	7,75	7,94	8,41	**6,76**
2	2016	8,36	7,99	7,95	7,75	6,58	5,88	5,28	6,02	6,52	7,47	7,52	7,51	**7,07**
3	2017	7,13	7,07	7,16	6,95	6,21	6,40	5,80	6,20	6,69	6,88	7,53	7,86	**6,82**
4	2018	6,72	6,86	6,67	6,33	5,42	4,70	4,69	5,01	6,01	6,60	7,09	6,40	**6,04**
5	2019	7,04	6,64	6,34	5,81	6,11	5,08	5,27	5,16	6,10	6,12	6,37	6,47	**6,04**
6	2020	6,43	6,48	6,33	6,16	5,32	5,03	5,95	6,38	6,61	7,00	6,63	6,52	**6,24**
7	2021	6,57	5,76	5,66	5,75	5,33	5,12	5,54	5,73	6,73	7,37	6,89	6,59	**6,09**
8	2022	6,64	6,78	6,01	6,29	5,61	5,25	5,14	5,54	6,60	7,03	7,24	6,76	**6,24**
9	2023	6,90	6,53	6,76	6,00	6,00	4,97	5,55	5,85	5,82	7,29	7,48	7,00	**6,35**
10	2024	7,05	6,96	6,45	6,80	6,62	6,22	5,15	5,92	6,48	6,68	6,94	7,43	**6,56**

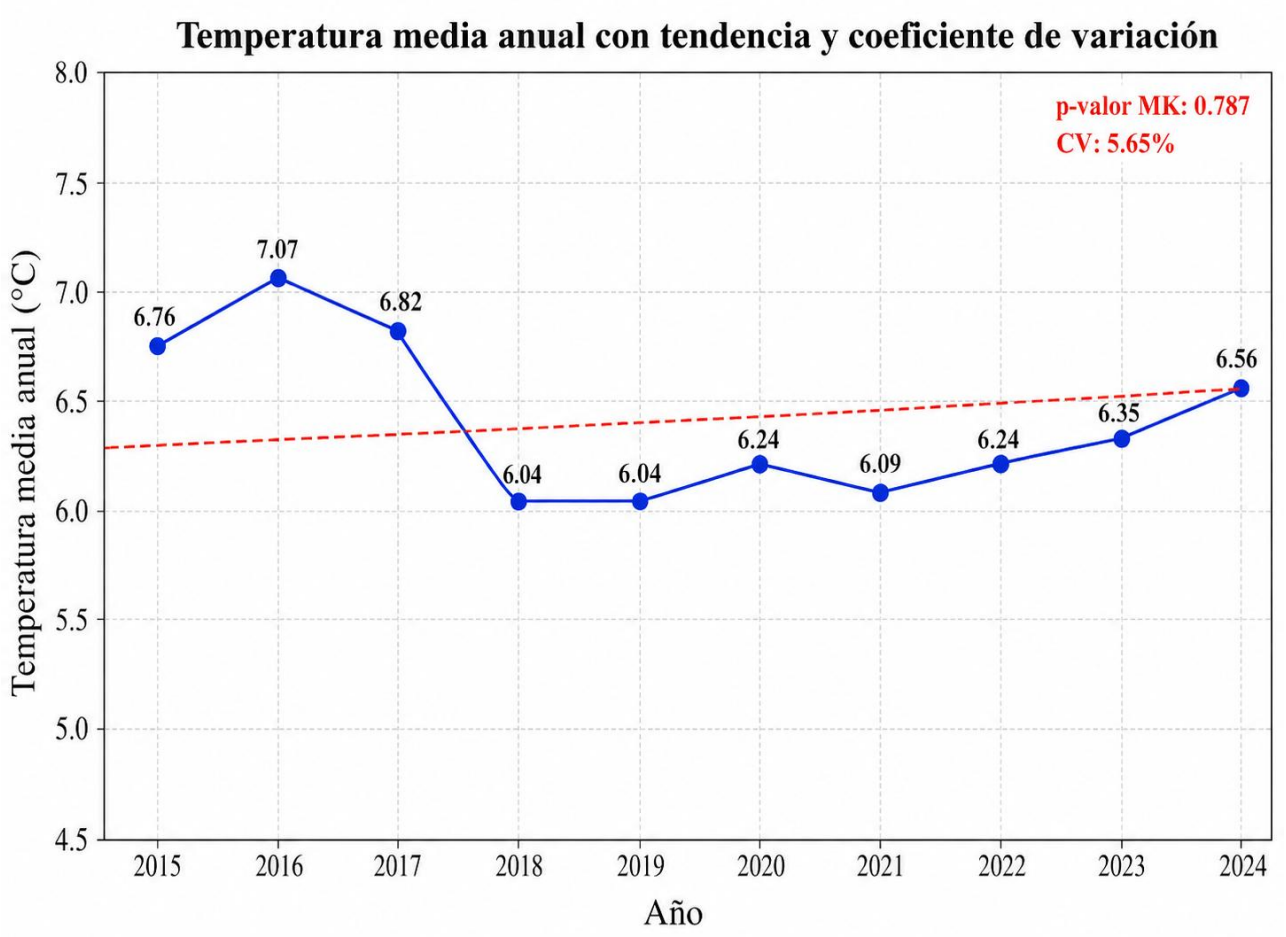
En la Tabla 19 se observa que la temperatura media anual presentó variaciones leves durante el periodo 2015–2024. El mayor valor se registró en 2016, con 7,07 °C, seguido de 2017, con

6,82 °C. Los menores valores se presentaron en 2018 y 2019, con 6,04 °C. En general, los resultados evidencian una baja variabilidad interanual de la temperatura en el bofedal de Liriopata–Chiara.

Figura 9

Serie temporal de la temperatura media

anual



En la Figura 9 se presenta la serie temporal de la temperatura media anual durante el periodo 2015–2024. El mayor valor se registró en 2016, con 7,07 °C, mientras que los menores valores correspondieron a 2018 y 2019, con 6,04 °C. El coeficiente de variación fue de 5,65 %, lo que evidencia una baja variabilidad de la temperatura entre los años analizados. La prueba de Mann-Kendall presentó un valor de $\tau = -0{,}068$ y un valor de $p = 0{,}787$, por lo que la tendencia observada no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar que la temperatura media anual haya presentado una tendencia significativa durante el periodo evaluado.

4.1.2. Evaluación de la variación temporal de los índices espectrales del bofedal del bofedal de Liriopata-Chiara, 2015-2024.

Tabla 20

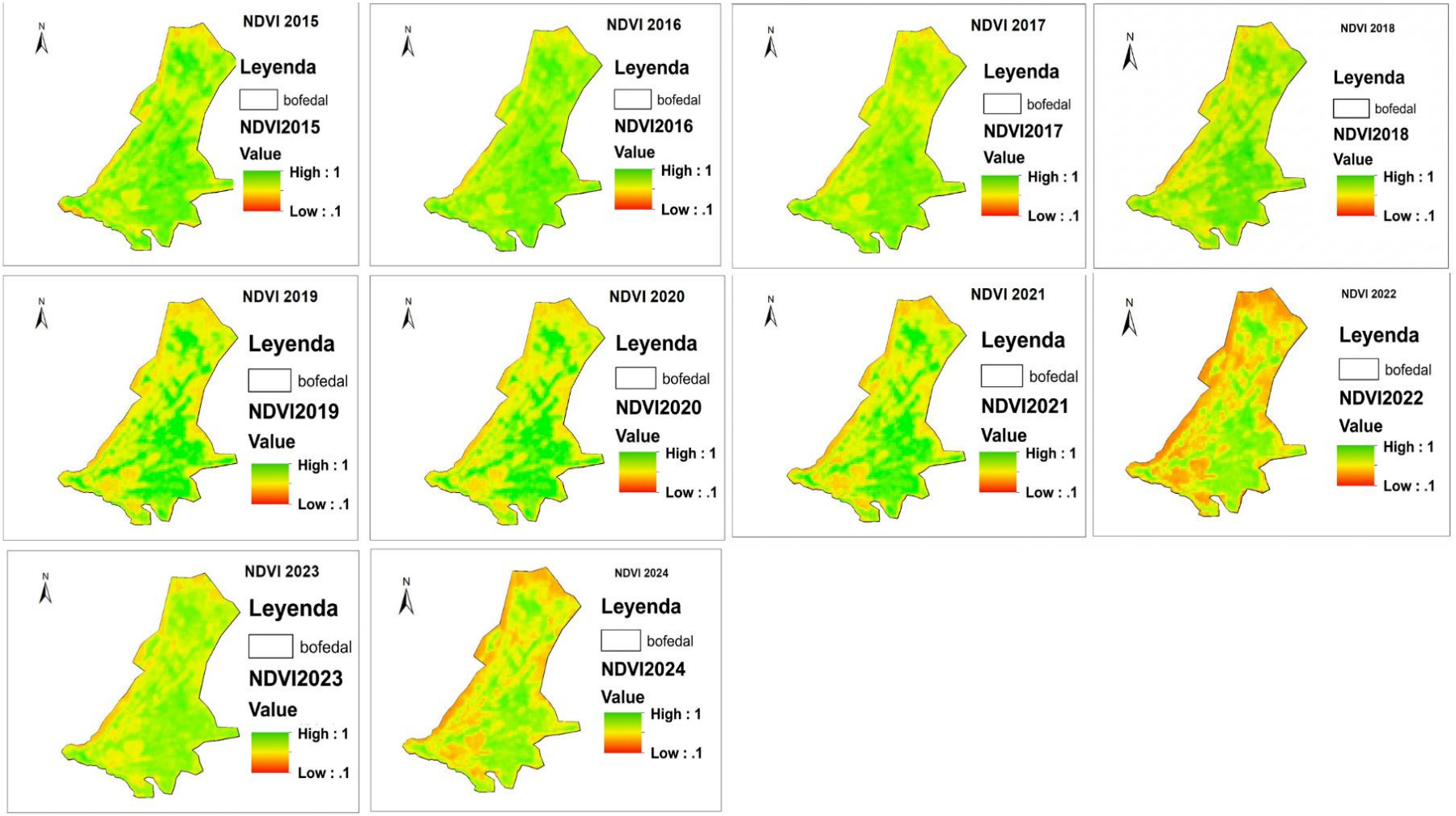
Valores medios de NDVI, NDWI y SAVI obtenidos en las imágenes seleccionadas, 2015–2024

Año	NDVI	NDWI	SAVI
2015	0,388	0,390	0,583
2016	0,388	0,414	0,630
2017	0,422	0,422	0,633
2018	0,404	0,410	0,606
2019	0,245	0,401	0,590
2020	0,245	0,295	0,367
2021	0,267	0,318	0,401
2022	0,276	0,327	0,414
2023	0,431	0,426	0,647
2024	0,291	0,329	0,438

En la Tabla 20 se observa una variación temporal de los valores medios de NDVI, NDWI y SAVI en las imágenes seleccionadas durante el periodo 2015–2024. El NDVI presentó su valor más alto en 2023, con 0,431, y sus valores más bajos en 2019 y 2020, con 0,245. El SAVI también alcanzó su mayor valor en 2023, con 0,647, mientras que el menor se registró en 2020, con 0,367. Por su parte, el NDWI presentó valores negativos durante todo el periodo, con el valor más cercano a cero en 2020, de −0,295, y el más negativo en 2023, de −0,426. Estos resultados evidencian variaciones en la respuesta espectral media del bofedal entre las fechas analizadas; sin embargo, no permiten afirmar cambios en la cobertura, deterioro o recuperación del ecosistema sin información complementaria de campo y sin controlar la estacionalidad.

Figura 10

Variación espacial del NDVI en las imágenes seleccionadas del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024



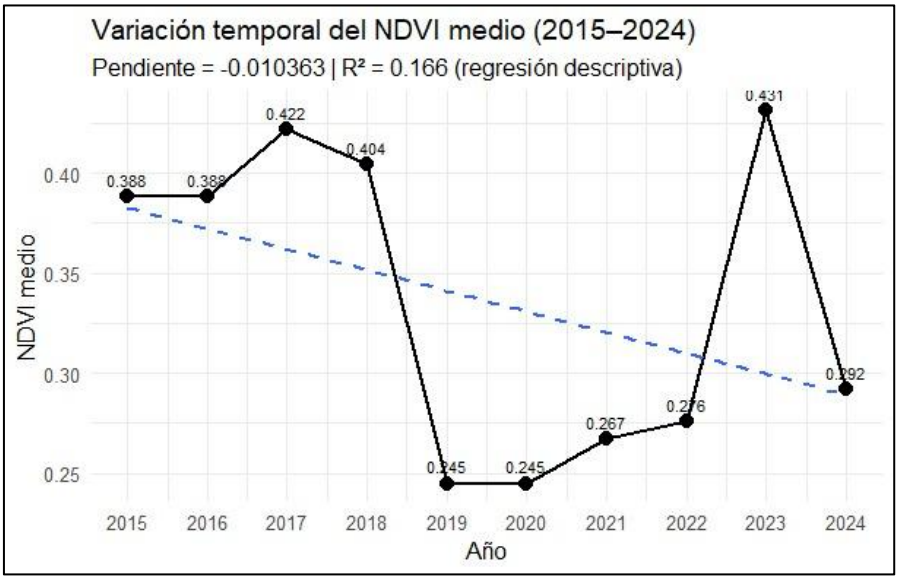
En la Figura 10 se observa la distribución espacial de los valores de NDVI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. Durante el periodo analizado se identificaron diferencias en la respuesta espectral media y en la distribución de los valores dentro del polígono del bofedal.

En las imágenes correspondientes a 2015, 2016, 2017 y 2018 se observa una mayor presencia de valores medios y altos de NDVI. En 2019, 2020, 2021, 2022 y 2024 se aprecia una mayor presencia de valores bajos y medios, mientras que en 2023 se observan nuevamente valores relativamente altos en varias zonas del polígono.

Sin embargo, estas diferencias no permiten afirmar una reducción del vigor vegetal, deterioro, recuperación o pérdida de cobertura, debido a que las imágenes fueron adquiridas en meses diferentes y pueden estar influenciadas por la estacionalidad. Por ello, los mapas representan únicamente variaciones espaciales de los valores de NDVI en las fechas seleccionadas.

Figura 11

Variación temporal del Índice de Vegetación de Diferencia Normalizada

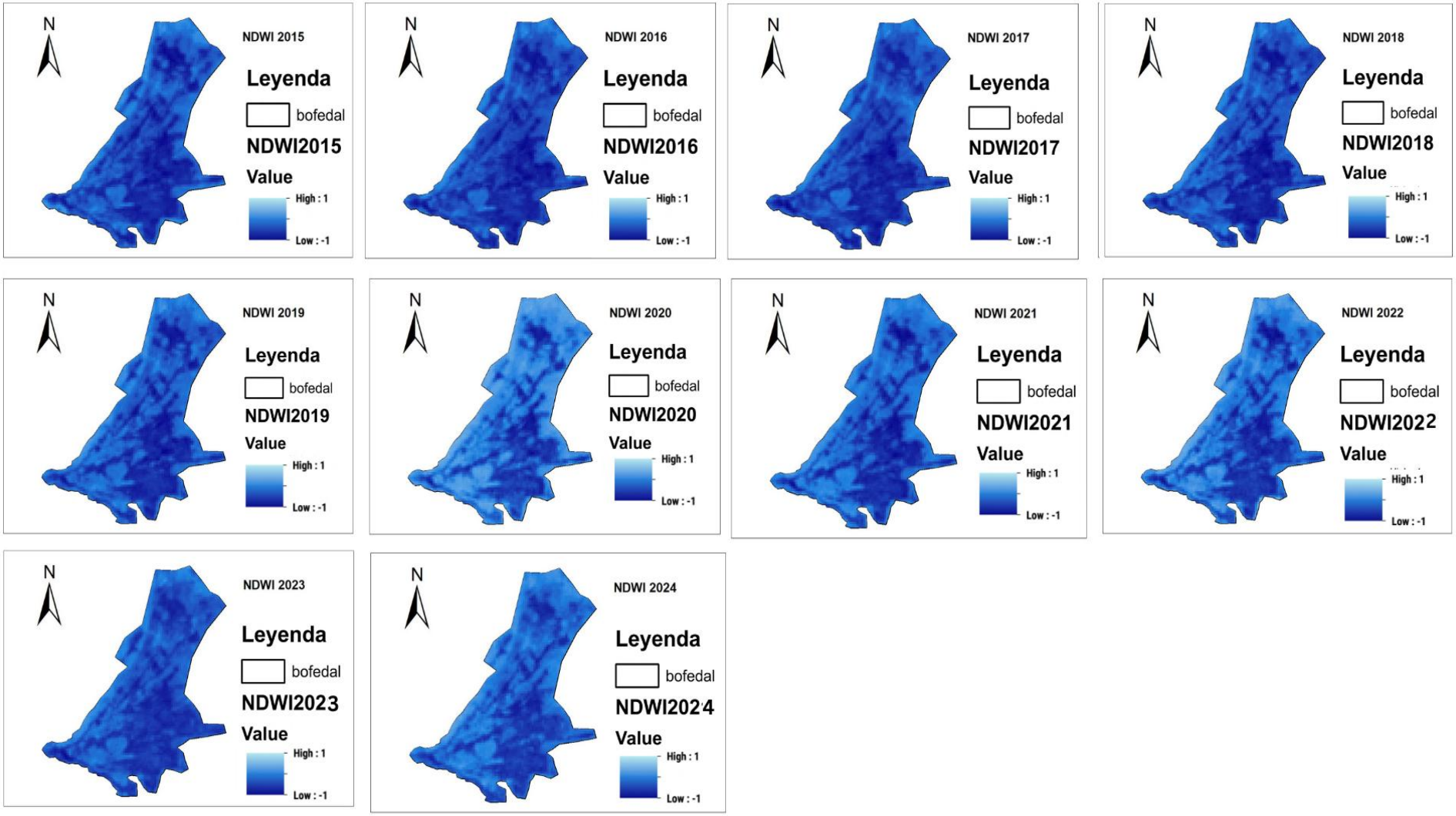


En la Figura 11 se presenta la variación temporal de los valores medios de NDVI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. El valor más alto se registró en 2023, con 0,431, mientras que los valores más bajos se presentaron en 2019 y 2020, con 0,245. La regresión lineal descriptiva presentó una pendiente de −0,010363 y un coeficiente de determinación de R^2=0,166, lo que indica que el tiempo explica únicamente el 16,6 % de la variación observada. Por tanto, el ajuste lineal es bajo y no

permite afirmar una disminución progresiva ni deterioro de la cobertura vegetal. Asimismo, debido a que las imágenes corresponden a meses diferentes, las variaciones pueden estar influenciadas por la estacionalidad.

Figura 12

Variación espacial del NDWI en las imágenes seleccionadas del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024

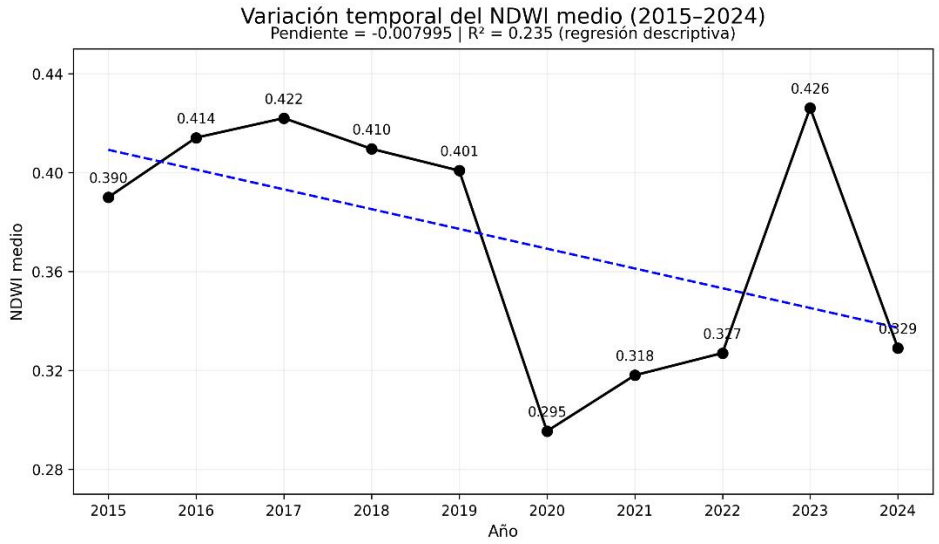


En la Figura 12 se observa la distribución espacial de los valores de NDWI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. Durante el periodo analizado se identificaron diferencias en la distribución de los valores dentro del polígono del bofedal. En las imágenes de 2015 a 2019 predominan valores negativos relativamente bajos, mientras que en 2020, 2021, 2022 y 2024 se observan valores más cercanos a cero en algunas zonas. En 2023 se registran nuevamente valores más negativos.

Sin embargo, estas diferencias no permiten afirmar recuperación hídrica, aumento de humedad del suelo, presencia de agua superficial ni estrés hídrico, debido a que las imágenes corresponden a meses diferentes y no se controló la estacionalidad. Por ello, los mapas representan únicamente variaciones espaciales del NDWI en las fechas seleccionadas.

Figura 13

Variación temporal del valor medio de NDWI en las imágenes seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 13 se presenta la variación temporal de los valores medios de NDWI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. El valor más alto de NDWI se registró en 2023, con 0,426, mientras que el valor más bajo correspondió a 2020, con 0,295.

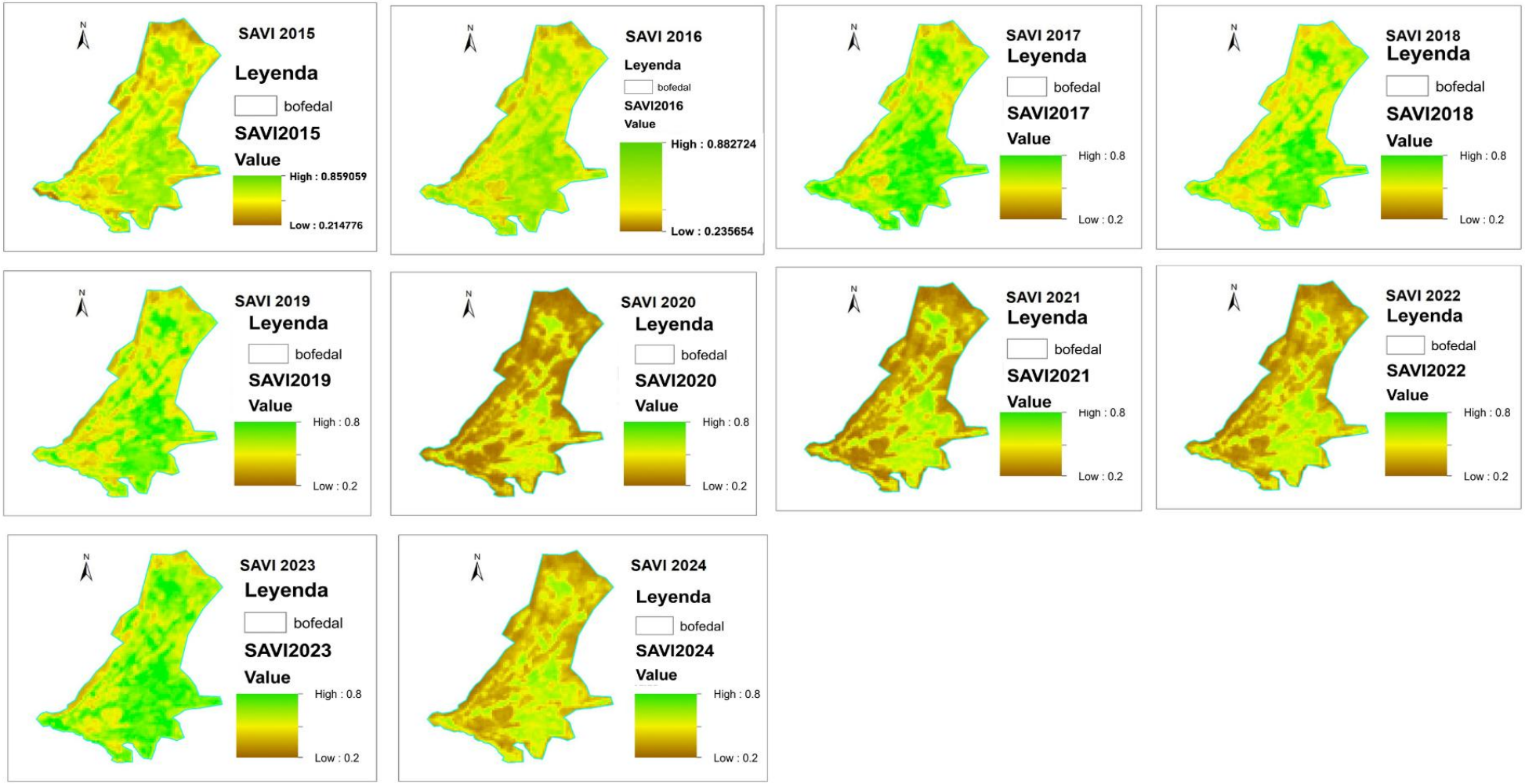
La regresión lineal descriptiva presentó una pendiente de −0,007995 y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,235$. Este resultado indica que el tiempo explica el 23,5 % de la variación observada en los valores de NDWI, evidenciando un bajo ajuste lineal. La pendiente negativa indica una tendencia temporal descendente del NDWI durante

el periodo analizado; sin embargo, este comportamiento no permite afirmar por sí solo una disminución significativa del contenido de agua del bofedal.

Asimismo, debido a que las imágenes fueron adquiridas en meses diferentes, las variaciones observadas pueden estar influenciadas por la estacionalidad. Por ello, el análisis se limita a describir la variación espectral media del NDWI en las fechas seleccionadas, sin atribuir dichos cambios directamente a la temperatura o la precipitación.

Figura 14

Variación espacial del SAVI en las imágenes seleccionadas del bofedal de Liriopata–Chiara, 2015–2024



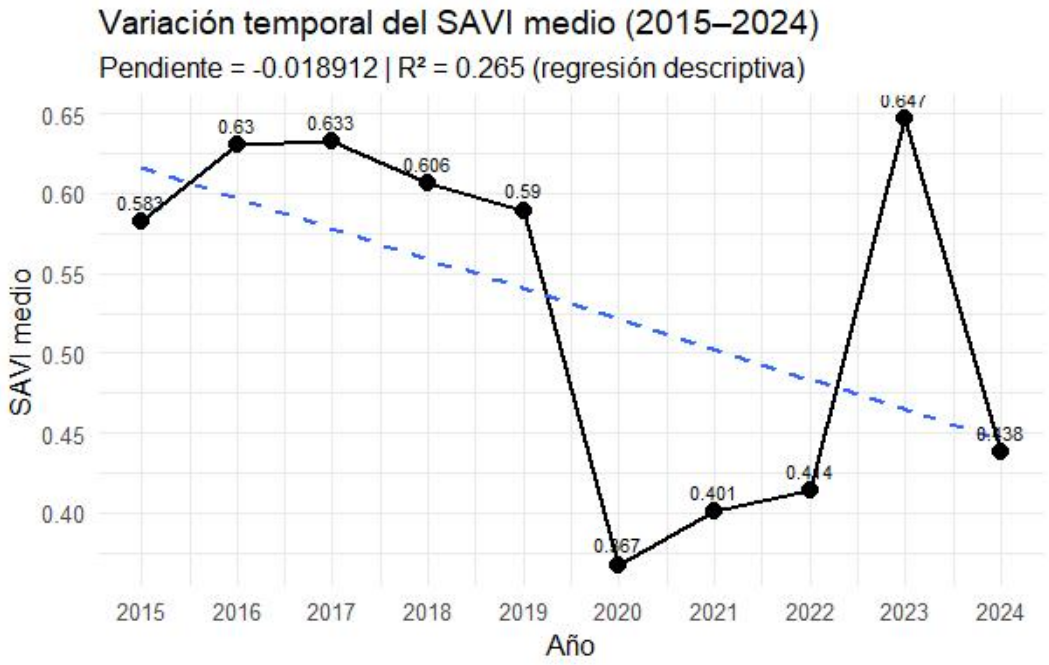
En la Figura 14 se observa la distribución espacial de los valores de SAVI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. Durante el periodo analizado se identificaron diferencias en la respuesta espectral y en la distribución de los valores dentro del polígono del bofedal.

En las imágenes correspondientes a 2015, 2016, 2017 y 2018 predominan valores medios y relativamente altos de SAVI en gran parte del bofedal. En 2019 se observa una disminución de los valores medios, mientras que en 2020, 2021 y 2022 se aprecia una mayor presencia de valores bajos y medios. En 2023 se registran nuevamente valores relativamente altos en varias zonas, mientras que en 2024 se observan valores intermedios.

Sin embargo, estas diferencias no permiten afirmar degradación, pérdida significativa de cobertura vegetal ni recuperación del ecosistema, debido a que las imágenes fueron adquiridas en meses diferentes y pueden estar influenciadas por la estacionalidad. Por ello, los mapas representan únicamente variaciones espaciales de los valores de SAVI en las fechas seleccionadas.

Figura 15

Variación temporal del valor medio de SAVI en las imágenes seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 15 se presenta la variación temporal de los valores medios de SAVI obtenidos para las imágenes seleccionadas entre 2015 y 2024. El valor más alto se

registró en 2023, con 0,647, seguido de 2017, con 0,633 y 2016, con 0,630. El valor más bajo se registró en 2020, con 0,367.

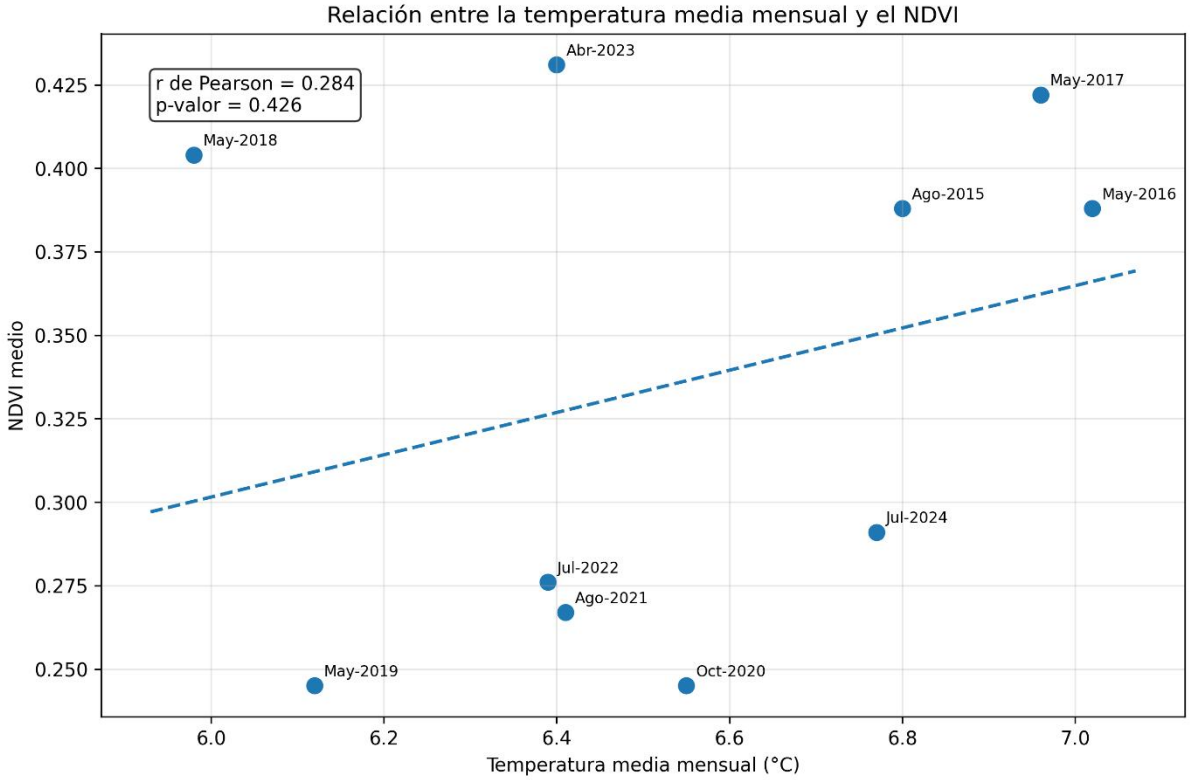
La regresión lineal descriptiva presentó una pendiente de −0,018912 y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0{,}265$. Este resultado indica que el tiempo explica únicamente el 26,5 % de la variación observada en los valores medios de SAVI, por lo que el ajuste lineal es bajo. En consecuencia, no se puede afirmar una pérdida significativa de cobertura vegetal, degradación del bofedal ni una relación causal directa con la variabilidad climática a partir de este resultado.

Asimismo, debido a que las imágenes fueron adquiridas en meses diferentes, las variaciones observadas pueden estar influenciadas por la estacionalidad. Por ello, el análisis se limita a describir la variación espectral media del SAVI en las fechas seleccionadas.

4.1.3. Análisis de la variabilidad climática multitemporal y la dinámica de bofedal andino

Figura 16

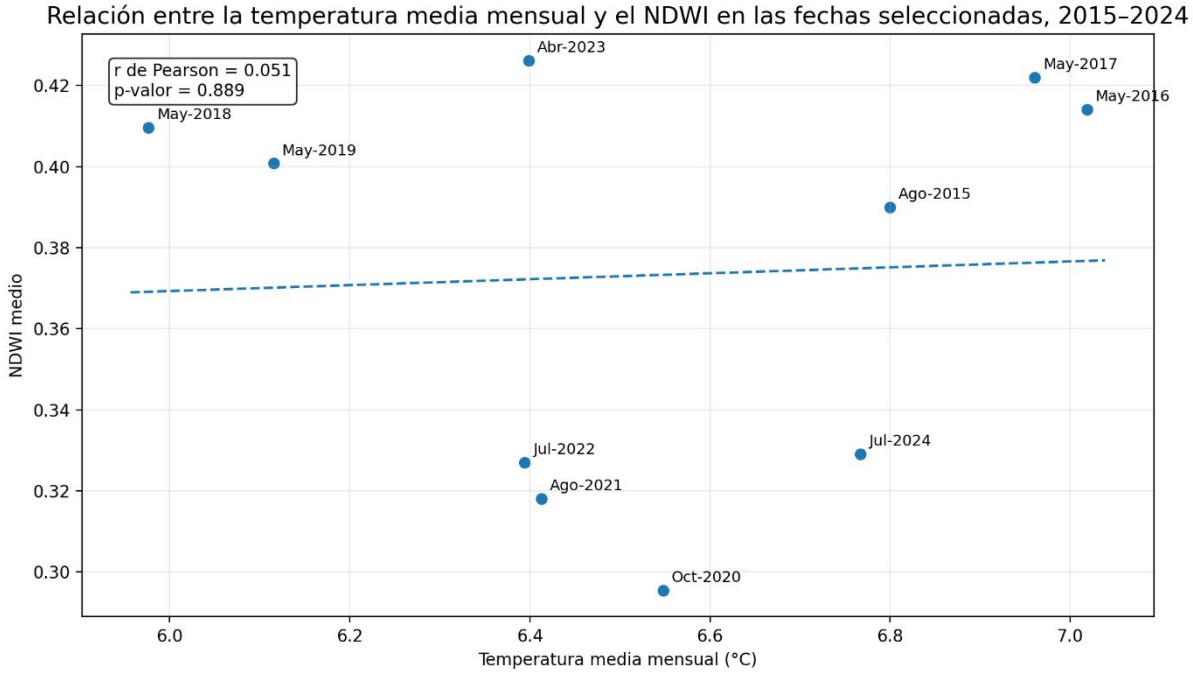
Relación entre la temperatura media mensual y el NDVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 16 se presenta la relación entre la temperatura media mensual y los valores medios de NDVI correspondientes a las fechas de adquisición de las imágenes. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0,284, lo que indica una relación positiva débil. Asimismo, se obtuvo un p-valor = 0,426, superior al nivel de significancia de 0,05; por tanto, la relación no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar que la temperatura media mensual se relacione significativamente con el NDVI en las fechas evaluadas.

Figura 17

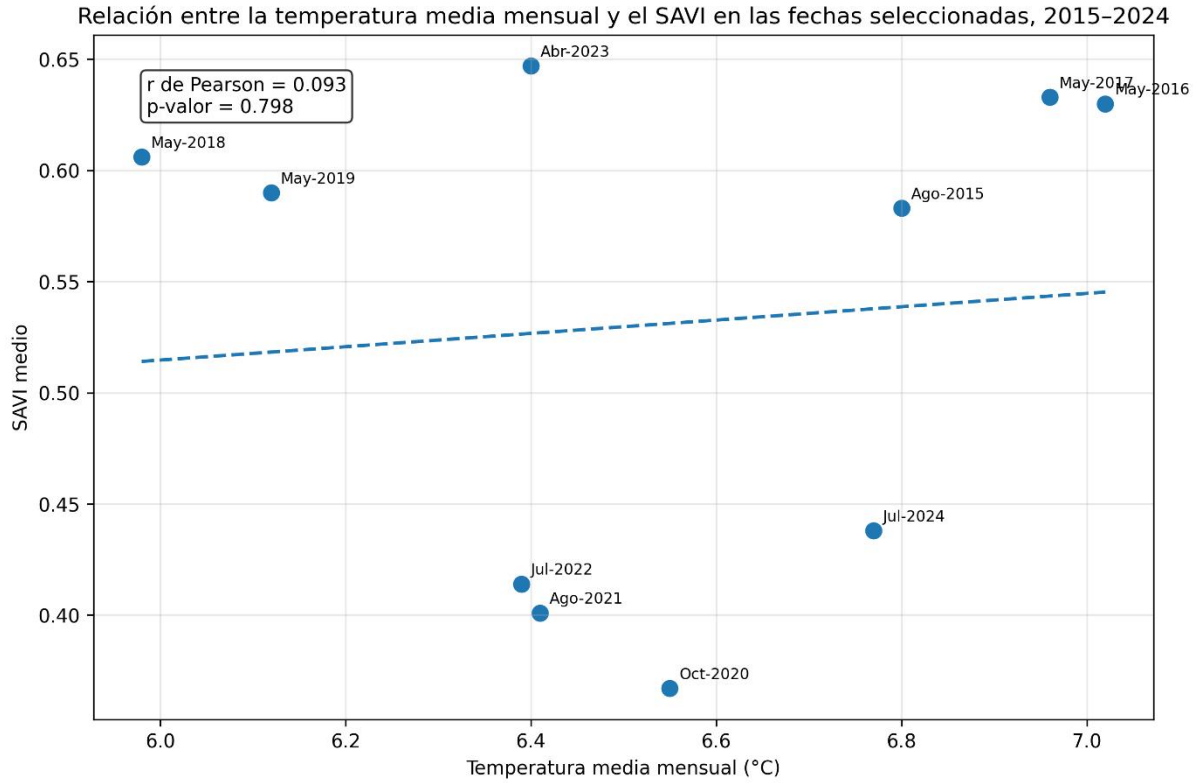
Relación entre la temperatura mensual y el NDWI en las fechas seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 17 se presenta la relación entre la temperatura media mensual y los valores medios de NDWI. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0,051, lo que indica una relación positiva muy débil. Asimismo, el p-valor = 0,889 fue superior a 0,05, por lo que la relación no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar una relación significativa entre la temperatura media mensual y el NDWI en las fechas evaluadas.

Figura 18

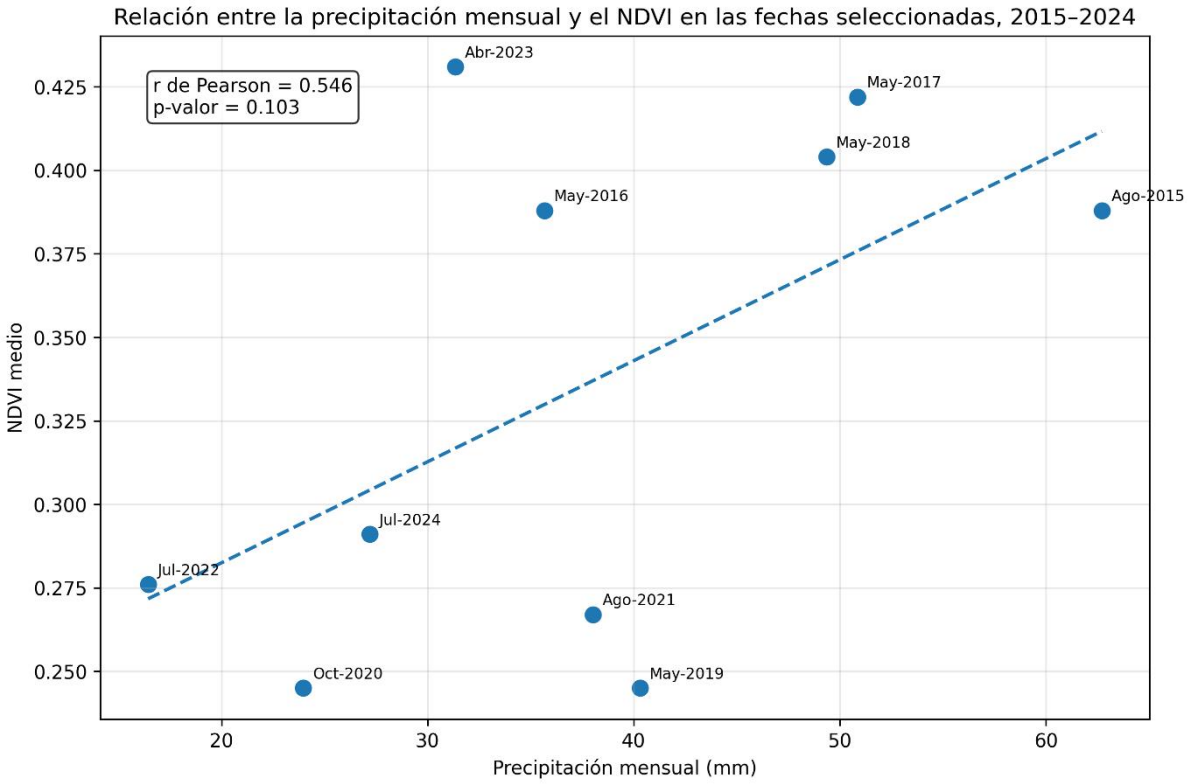
Relación entre la temperatura media mensual y el SAVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 18 se presenta la relación entre la temperatura media mensual y los valores medios de SAVI. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0,093, lo que indica una relación positiva muy débil. Asimismo, el p-valor = 0,798 fue superior a 0,05, por lo que la relación no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar una relación significativa entre la temperatura media mensual y el SAVI en las fechas evaluadas.

Figura 19

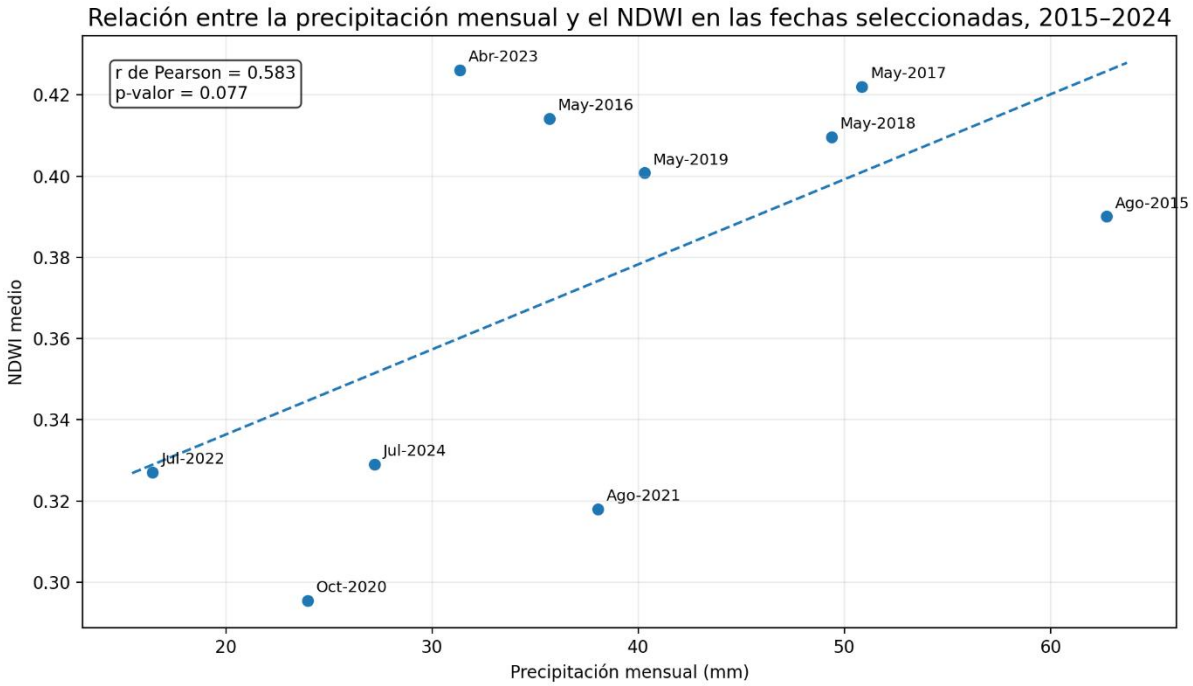
Relación entre la precipitación mensual y el NDVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 19 se muestra la relación entre la precipitación mensual y los valores medios de NDVI correspondientes a las fechas evaluadas. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0,546, lo que indica una relación positiva moderada. Sin embargo, el p-valor = 0,103 fue mayor a 0,05, por lo que la relación no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar que la precipitación mensual se relacione significativamente con el NDVI en las fechas analizadas.

Figura 20

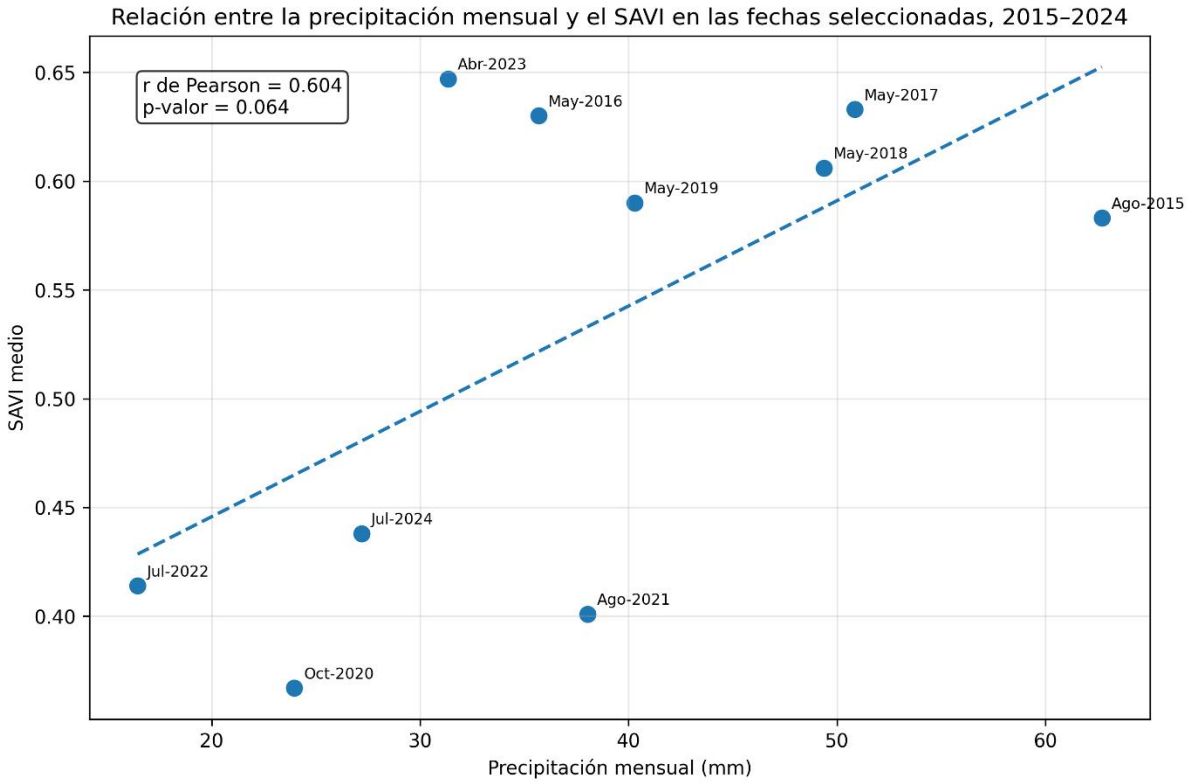
Relación entre la precipitación mensual y el NDWI en las fechas seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 20 se presenta la relación entre la precipitación mensual y los valores medios de NDWI. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0,583, lo que indica una relación positiva moderada. Sin embargo, el p-valor = 0,077 fue mayor a 0,05, por lo que la relación no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar una relación significativa entre la precipitación mensual y el NDWI en las fechas evaluadas.

Figura 21

Relación entre la precipitación mensual y el SAVI en las fechas seleccionadas, 2015–2024



En la Figura 21 se presenta la relación entre la precipitación mensual y los valores medios de SAVI. El coeficiente de correlación de Pearson fue r = 0,604, lo que indica una relación positiva moderada. Sin embargo, el p-valor = 0,064 fue mayor a 0,05, por lo que la relación no fue estadísticamente significativa. En consecuencia, no existe evidencia suficiente para afirmar una relación significativa entre la precipitación mensual y el SAVI en las fechas evaluadas.

Prueba de Hipótesis

Contrastación de Hipótesis general

H_0: La temperatura y la precipitación no se relacionan significativamente con los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, durante el periodo 2015–2024.

H_1: La temperatura y la precipitación se relacionan significativamente con los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, durante el periodo 2015–2024.

Nivel de significancia

$\alpha=0.05$

Regla de decisión

Si p< α = se rechaza la H_0

Si p> α = no se rechaza la H_0

Estadística de prueba

Tabla 21

Análisis complementario de asociación mediante Tau-b de Kendall entre las variables climáticas y los índices espectrales

Relación	Tau-b	p-valor	decisión
Temp-NDVI	0.2046	0.4171	No se rechaza H0
Temp-NDWI	0.0667	0.8618	No se rechaza H0
Temp-SAVI	0.0667	0.8618	No se rechaza H0
Prec-NDVI	0.2501	0.3213	No se rechaza H0
Prec-NDWI	0.2889	0.2912	No se rechaza H0
Prec-SAVI	0.2889	0.2912	No se rechaza H0

Interpretación

En la Tabla 21 se presentan los resultados del análisis complementario mediante Tau-b de Kendall. Todas las asociaciones mostraron valores de p superiores a 0,05; por

tanto, no se rechazó la hipótesis nula en ninguna de las relaciones evaluadas. Estos resultados indican que no se encontró evidencia estadística suficiente para afirmar una asociación significativa entre la temperatura, la precipitación y los índices NDVI, NDWI y SAVI en las fechas seleccionadas.

Tabla 22

Matriz descriptiva de correlaciones de Pearson entre las variables analizadas

Variable	NDVI	NDWI	SAVI	TEMP	PREC
NDVI	1.000000	0.803441	0.808721	0.285353	0.545338
NDWI	0.803441	1.000000	0.996574	0.050294	0.583920
SAVI	0.808721	0.996574	1.000000	0.091944	0.604112
TEMP	0.285353	0.050294	0.091944	1.000000	0.115996
PREC	0.545338	0.583920	0.604112	0.115996	1.000000

Tabla 23

Prueba de relación de la variabilidad climática en la dinámica del bofedal

Relación	r de Pearson	p-valor	Decisión
Temp – NDVI	0.283	0.428	No se rechaza H_0
Temp – NDWI	0.048	0.895	No se rechaza H_0
Temp – SAVI	0.090	0.805	No se rechaza H_0
Prec – NDVI	0.546	0.103	No se rechaza H_0
Prec – NDWI	0.584	0.076	No se rechaza H_0
Prec – SAVI	0.604	0.064	No se rechaza H_0

En la Tabla 22 se observa que la temperatura presentó relaciones débiles o muy débiles con los índices espectrales, mientras que la precipitación mostró relaciones moderadas con NDVI, NDWI y SAVI. Asimismo, la alta correlación entre NDVI y SAVI (r=0,809) era esperable porque ambos comparten bandas espectrales, por lo que presentan información parcialmente redundante. La correlación entre NDWI y SAVI (r=0,997) también debe interpretarse con cautela. Por ello, la matriz se utilizó únicamente con fines descriptivos.

4.2. Discusión de resultados

El objetivo general de la investigación fue analizar la relación entre la variabilidad climática, representada por la temperatura y la precipitación, y los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara durante el periodo 2015–2024. Para evaluar estas asociaciones se utilizó el coeficiente de correlación de Pearson, mientras que la prueba de Mann-Kendall se aplicó exclusivamente al análisis de las tendencias temporales de la temperatura media anual y de la precipitación acumulada anual.

Los resultados mostraron que ninguna de las seis correlaciones entre las variables climáticas y los índices espectrales alcanzó significancia estadística, debido a que todos los valores de p fueron superiores a 0,05. Sin embargo, la precipitación presentó asociaciones moderadas con el NDVI ($r = 0,546$), el NDWI ($r = 0,583$) y el SAVI ($r = 0,604$). Por ello, no debe afirmarse que no existe ninguna relación, sino que no se encontró evidencia estadística suficiente de una relación significativa durante las fechas evaluadas. En particular, la relación positiva moderada entre la precipitación y el NDWI indica que, descriptivamente, cuando aumenta la precipitación, el NDWI tiende a aumentar; sin embargo, esta asociación no fue estadísticamente significativa.

Estos resultados pueden compararse con Silva et al. (2021), quienes analizaron el bofedal Minas Corral, en Ayacucho, mediante imágenes Landsat 8 y Sentinel-2, registros de precipitación y mediciones de la napa freática. Los autores reportaron una relación directa moderada entre la vegetación y la precipitación ($r = 0,49$), así como una relación inversa alta entre el área de vegetación y la profundidad de la napa freática ($r = −0,97$). La asociación moderada entre precipitación y vegetación coincide parcialmente con los resultados de Liriopata–Chiara; sin embargo, Silva et al. incorporaron mediciones de campo y analizaron la disponibilidad hídrica mediante piezómetros, mientras que la presente investigación empleó únicamente precipitación, temperatura e índices espectrales.

La asociación moderada entre precipitación e índices de vegetación observada en el presente estudio también es consistente con investigaciones desarrolladas en humedales andinos de Huanta, donde la integración de análisis geoquímicos, hidroquímicos y de teledetección evidenció que la respuesta espectral de estos ecosistemas no depende únicamente de la precipitación, sino también de procesos hidrológicos subterráneos, las características litológicas y la capacidad de almacenamiento hídrico del sistema (Cárdenas Morales et al., 2025a). Estos factores podrían contribuir a explicar la ausencia de

relaciones estadísticamente significativas entre las variables climáticas y los índices espectrales observada en Liriopata–Chiara.

Asimismo, Lozano (2024) evaluó la variabilidad temporal de la cobertura vegetal en la provincia de Huanta durante 2017–2021, utilizando 115 imágenes MODIS y el NDVI. El autor encontró una relación positiva entre la cobertura vegetal y el NDVI (r = 0,673), una relación negativa baja con la temperatura (r = −0,283) y una relación positiva baja con las estaciones del año (r = 0,257). En comparación, en Liriopata–Chiara la relación entre temperatura y NDVI también fue débil, aunque positiva (r = 0,283) y no significativa. Las diferencias pueden deberse al periodo de análisis, la escala espacial y el sensor empleado. MODIS presenta mayor frecuencia temporal, mientras que Sentinel-2 posee mejor resolución espacial, más adecuada para un bofedal de aproximadamente 4,08 ha.

Mamani Vargas (2021) encontró relaciones estadísticamente significativas entre la precipitación, la temperatura mínima y el NDVI en ecosistemas altoandinos del sur del Perú. También identificó mayores valores de NDVI entre diciembre y mayo y descensos durante julio y agosto. Esta diferencia respecto de Liriopata–Chiara puede relacionarse con la extensión de la serie temporal, el uso de imágenes pertenecientes a diferentes periodos estacionales y las características hidrológicas de cada zona. El antecedente también confirma que la época del año influye en los valores de los índices espectrales.

Aunque durante el periodo 2015–2024 no se identificaron tendencias climáticas estadísticamente significativas, el monitoreo continuo de los ecosistemas altoandinos sigue siendo indispensable para detectar cambios graduales en la disponibilidad hídrica y en la dinámica territorial. En este contexto, investigaciones desarrolladas en la microcuenca Razuhuillca demuestran que la integración de información hidromorfológica, teledetección y análisis territorial permite comprender con mayor profundidad la evolución de los sistemas hídricos andinos y proporciona información relevante para su planificación y conservación (Cárdenas Morales et al., 2025b).

En cuanto al comportamiento climático, la precipitación acumulada anual presentó un coeficiente de variación de 17,73 %, lo que corresponde a una variabilidad moderada, mientras que la temperatura media anual registró un coeficiente de variación de 5,65 %, correspondiente a una variabilidad baja. La prueba de Mann-Kendall no identificó tendencias estadísticamente significativas en la precipitación (p = 0,108) ni en la temperatura (p = 0,787). Estos resultados muestran fluctuaciones interanuales, pero no

permiten afirmar la existencia de una tendencia climática monotónica durante los diez años evaluados.

Los resultados difieren de Mostacero Vargas (2023), quien analizó registros climáticos de 1965 a 2019 y encontró incrementos de 0,085 °C por año en la temperatura mínima y de 0,035 °C por año en la temperatura máxima, además de una variabilidad considerable de la precipitación. La diferencia puede explicarse principalmente por la duración de las series, ya que una serie de 55 años tiene mayor capacidad para detectar tendencias persistentes que el periodo de diez años evaluado en Liriopata–Chiara.

Respecto al segundo objetivo específico, el NDVI presentó una pendiente de −0,010363 y un coeficiente de determinación de $R^2 = 0,166$; el NDWI mostró una pendiente de −0,007995 y un $R^2 = 0,235$; y el SAVI registró una pendiente de −0,018912 y un $R^2 = 0,265$. Estos coeficientes evidencian ajustes lineales bajos, debido a que el tiempo explica únicamente entre 16,6 % y 26,5 % de la variación observada. En el caso del NDWI, la pendiente negativa indica una tendencia temporal descendente en términos de la convención de valores utilizada; sin embargo, debido al bajo ajuste lineal y a las fluctuaciones entre años, este resultado no permite afirmar por sí solo una disminución significativa del contenido de agua, pérdida de cobertura, degradación o recuperación del bofedal.

Machuca Peña y Uzquiano Céspedes (2021) evaluaron imágenes Landsat correspondientes a épocas secas y húmedas y observaron diferencias en los valores de NDVI y NDWI entre estaciones. Esto evidencia que la respuesta espectral de los bofedales cambia según la temporada. En Liriopata–Chiara, las imágenes seleccionadas correspondieron a meses diferentes entre los años, por lo que una parte de las fluctuaciones registradas puede estar influenciada por la estacionalidad y no necesariamente por una tendencia temporal continua.

Asimismo, la utilización de imágenes satelitales como herramienta de monitoreo ambiental adquiere especial relevancia en ecosistemas altoandinos sometidos a múltiples presiones naturales y antrópicas. Investigaciones recientes desarrolladas en la cuenca Razuhuillca evidencian que la combinación de teledetección con información territorial y procesos de gobernanza fortalece la comprensión de la resiliencia hidrosocial y de la seguridad hídrica, proporcionando información útil para la gestión sostenible de estos ecosistemas (Cárdenas Morales et al., 2026c).

La elevada correlación entre NDVI y SAVI ($r = 0,809$) era esperable porque ambos índices utilizan las bandas roja e infrarroja cercana, por lo que contienen

información parcialmente redundante. Asimismo, la correlación positiva muy alta entre NDWI y SAVI (r = 0,997) debe interpretarse con cautela, debido a la dependencia matemática entre las bandas utilizadas. Estas correlaciones no demuestran una fuerte interacción ecológica independiente entre los componentes del bofedal.

Una limitación central de la investigación fue el uso de una imagen seleccionada por año, correspondiente a meses diferentes. Esta condición reduce la comparabilidad directa entre los índices y puede incorporar variaciones estacionales. Además, se trabajó con diez observaciones y no se analizaron rezagos de precipitación, humedad del suelo, nivel de la napa freática ni cambios detallados píxel a píxel. Por ello, los resultados deben interpretarse como descriptivos y exploratorios. Futuras investigaciones podrían integrar series temporales de mayor resolución, variables hidrológicas complementarias y enfoques multifuente de teledetección que permitan comprender con mayor precisión la respuesta de los bofedales altoandinos frente a la variabilidad climática y otras presiones ambientales, tal como ha sido planteado en investigaciones recientes desarrolladas en los Andes peruanos (Cárdenas Morales et al., 2026c)).

CAPÍTULO V. CONCLUSIONES

La precipitación acumulada anual presentó una variabilidad moderada, con un coeficiente de variación de 17,73 %, mientras que la temperatura media anual mostró una variabilidad baja, con un coeficiente de variación de 5,65 %. La prueba de Mann-Kendall no evidenció tendencias temporales estadísticamente significativas en la precipitación (p = 0,108) ni en la temperatura (p = 0,787) durante el periodo 2015–2024.

Los valores medios de NDVI, NDWI y SAVI presentaron variaciones temporales entre las imágenes seleccionadas. Sin embargo, los ajustes lineales fueron bajos: R^2 = 0,166 para NDVI, R^2 = 0,235 para NDWI y R^2 = 0,265 para SAVI. Por ello, los resultados describen variaciones espectrales, pero no permiten confirmar degradación, recuperación, pérdida de cobertura ni estabilidad ecológica del bofedal.

No se encontró evidencia estadística suficiente de una relación significativa entre la temperatura, la precipitación y los índices NDVI, NDWI y SAVI, debido a que todas las correlaciones presentaron valores de p > 0,05. No obstante, la precipitación mostró asociaciones moderadas con el NDVI (r = 0,546), el NDWI (r = 0,583) y el SAVI (r = 0,604), aunque estas relaciones no fueron estadísticamente significativas.

La alta correlación entre NDVI y SAVI (r = 0,809), así como la correlación positiva prácticamente perfecta entre NDWI y SAVI (r = 0,997), debe interpretarse considerando la dependencia matemática y la redundancia parcial entre los índices, debido a que comparten bandas espectrales.

La utilización de imágenes correspondientes a meses diferentes y el reducido número de observaciones limitaron la comparabilidad temporal y la capacidad estadística del estudio. Por ello, los resultados deben interpretarse como descriptivos y exploratorios.

CAPÍTULO VI. RECOMENDACIONES

Se recomienda que las autoridades competentes, como la Oficina de Operación y Mantenimiento Hidráulico de Ayacucho (OPEMAN-Ayacucho), fortalezcan el monitoreo climático e hidrológico y amplíen la disponibilidad de estaciones meteorológicas locales, con la finalidad de mejorar la precisión y representatividad de los datos empleados en el seguimiento del bofedal.

Asimismo, se recomienda que la Municipalidad Distrital de Chiara y las autoridades del centro poblado de Liriopata promuevan acciones orientadas al manejo sostenible de los recursos hídricos, la conservación del bofedal y la prevención de posibles procesos de deterioro, evitando afirmar condiciones de degradación que no fueron comprobadas directamente en esta investigación.

Para futuras investigaciones, se recomienda utilizar imágenes satelitales correspondientes al mismo mes o periodo estacional de cada año, seleccionar escenas con menor cobertura de nubes y ampliar el número de imágenes analizadas. También se sugiere incorporar mediciones de humedad del suelo, nivel de la napa freática, presencia de agua superficial y cobertura vegetal.

Se recomienda validar en campo los resultados obtenidos mediante los índices NDVI, NDWI y SAVI, debido a que estos indicadores permiten describir variaciones espectrales, pero no confirman por sí solos procesos de degradación, recuperación o pérdida de cobertura vegetal.

También se recomienda considerar posibles efectos rezagados de la precipitación y la temperatura, mediante el análisis de acumulaciones climáticas de uno, dos o tres meses anteriores a la fecha de adquisición de las imágenes.

Se recomienda fomentar la participación de la población local y la incorporación de conocimientos tradicionales relacionados con el manejo del agua y la vegetación, complementándolos con información técnica y científica para la gestión del bofedal.

Finalmente, se recomienda promover actividades de educación ambiental en las instituciones educativas y comunidades, con el propósito de fortalecer el conocimiento sobre la importancia ecológica e hídrica de los bofedales y favorecer su conservación.

CAPÍTULO VII. REFERENCIAS

Anderson, T. G., Christie, D. A., Chávez, R. O., Olea, M., & Anchukaitis, K. J. (2021). Spatiotemporal peatland productivity and climate relationships across the western South American Altiplano. Journal of Geophysical Research: Biogeosciences, 126(6), e2020JG005994. https://doi.org/10.1029/2020JG005994

Barry, R. G., & Chorley, R. J. (2010). *Atmosphere, weather and climate* (9th ed). Routledge. https://doi.org/10.4324/9780203871027

Buitrón Sulca, L. G. (2023). Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, periodo 1988–2022 [Tesis de licenciatura, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional de la Universidad Privada del Norte. https://hdl.handle.net/11537/35702.

Buytaert, W., Celleri, R., Willems, P., Bièvre, B. D., & Wyseure, G. (2006). Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes. *Journal of Hydrology*, *329*(3-4), 413-421. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2006.02.031

Calvin, K., Dasgupta, D., Krinner, G., Mukherji, A., Thorne, P. W., Trisos, C., Romero, J., Aldunce, P., Barrett, K., Blanco, G., Cheung, W. W. L., Connors, S., Denton, F., Diongue-Niang, A., Dodman, D., Garschagen, M., Geden, O., Hayward, B., Jones, C., … Péan, C. (with Lee, H.). (2023). *Intergovernmental Panel on Climate Change. (2023). Climate change 2023: Synthesis report. Contribution of Working Groups I, II and III to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change (H. Lee & J. Romero, Eds.). IPCC. https://doi.org/10.59327/IPCC/AR6-9789291691647*

Campbell, J. B., & Wynne, R. H. (2011). *Introduction to remote sensing* (5th ed.). Guilford Press. www.guilford.com/p/campbell2

Carilla, J., Aráoz, E., Foguet, J., Casagranda, E., Halloy, S., & Grau, A. (2023). Hydroclimate and vegetation variability of high Andean ecosystems. *Frontiers in Plant Science, 13*, 1067096. https://doi.org/10.3389/fpls.2022.1067096

Cárdenas Morales, B. K., Forrest, J., Castro Aponte, W. V., Sánchez Cornejo, H. E., La Torre, B., Jhoncon Koyipe, J., Byrne, P., Nguyen, T. T., Barnes, C. H. W., & De Los Santos Valladares, L. (2025a). Geochemical, hydrochemical and remote sensing study of an

Andean calcareous wetland in Huanta, Peru. Journal of Hydrology: Regional Studies, 62, 102767. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2025.102767

Cárdenas Morales, B. K., Mendoza Colos, M., Herrera Díaz, S. C., Carhuallanqui Ibarra, S. D., Castro Aponte, W. V., Gómez Ccochachi, Y. Y., Huari Salazar, Y. C., Oré Gálvez, S. F., Lozano Rodríguez, J. L., & Huayhua Lévano, F. G. (2025b). The Razuhuillca micro-watershed in dispute: Hydromorphological dynamics and territorial resistance to mining concessions in the Peruvian Andes. Frontiers in Water, 7, 1614847. https://doi.org/10.3389/frwa.2025.1614847

Cárdenas Morales, B. K., Gómez Ccochachi, Y. Y., Quispe Godoy, N. L., Oré Gálvez, S. F., Castro Aponte, W. V., Chuquillanqui Gómez, J., Rivera Garamendi, F. G., Carhuallanqui Ibarra, S. D., Herrera Díaz, S. C., Barnes, C. H. W., Hernández-Nieves, A. D., & De Los Santos Valladares, L. (2026c). Water security and hydrosocial resilience in the Peruvian Andes: Remote sensing and cultural governance in the Razuhuillca watershed. Remote Sensing Applications: Society and Environment, 41, 101920. https://doi.org/10.1016/j.rsase.2026.101920

Chávez, R. O., Meseguer-Ruiz, O., Olea, M., Calderón-Seguel, M., Yager, K., Meneses, R. I., Lastra, J. A., Núñez-Hidalgo, I., Sarricolea, P., Serrano-Notivoli, R., & Prieto, M. (2023). Andean peatlands at risk? Spatiotemporal patterns of extreme NDVI anomalies, water extraction and drought severity in a large-scale mining area of Atacama, northern Chile. *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation, 116*, 103138. https://doi.org/10.1016/j.jag.2022.103138

Cooper, D. J., Wolf, E. C., Colson, C., Vering, W., Granda, A., & Meyer, M. (2015). *High-Andean peatlands of the Andes*. High Altitude Wetlands Committee. https://www.researchgate.net/publication/40881271

European Space Agency. (2023). *Sentinel-2 user handbook*. European Space Agency

Flores, J. (2017). *Fundamentos de la teledetección*. (3.ª ed.). Ediciones Rialp. https://catalogobiblioteca.ingemmet.gob.pe/bib/13747

Hernandez, R., Zapata Salazar, N., & Mendoza Torres, C. (2013). *Metodologia Investigacion*. https://www.esup.edu.pe/descargas/valotario_coem/2017/1%20Hernandez-Zapata%20y%20Mendoza-Metodologia%20Investigacion.pdf

Huete, A. R. (1988). A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote Sensing of Environment*, *25*(3), 295-309. https://doi.org/10.1016/0034-4257(88)90106-X

Imbaquingo, L. (2021). *Teledetección y análisis ambiental: Enfoques y aplicaciones (3.ªed.)* . https://www.sciencedirect.com/

Llanos-Bustos, F., Durán-Garate, L., Pérez-Martínez, W., Garrido-Leiva, J., & Castro-Cancino, B. (2025). Multitemporal analysis of the dynamics of high-Andean wetlands in the Metropolitan Region of Chile using Sentinel-2 images and ERA5-Land climate data (2017–2024). Engineering Proceedings, 94, 22. https://doi.org/10.3390/engproc2025094022

Lozada, J., & Bertin, C. (2022). *Sistemas de teledetección espacial*. https://www.rtx.com/

Machuca Peña, E. H., & Uzquiano Céspedes, F. J. (2021). Evaluación del estado de salud de bofedales mediante teledetección en la microcuenca de Acocancha-Lima 2021 [Tesis de licenciatura, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional de la Universidad César Vallejo. https://hdl.handle.net/20.500.12692/74862

Mamani Vargas, A. J. (2021). *Relación entre índices de vegetación y variables climáticas en áreas altoandinas del sur del Perú* [Tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio UPT. https://repositorio.uancv.edu.pe/home

McFeeters, S. K. (1996). The use of the normalized difference water index (NDWI) in the delineation of open water features. *International Journal of Remote Sensing, 17*(7), 1425–1432. https://doi.org/10.1080/01431169608948714

MINAM. (2023). *Inventario Nacional de Bofedales del Perú 2023*. Sistema Nacional de Información Ambiental (SINIA). https://sinia.minam.gob.pe/

Ministerio del Ambiente – MINAM (2018). Guía para la evaluación del estado de los ecosistemas de bofedales. https://hdl.handle.net/20.500.12543/4391

Moncada, W., Pereda, A., Masías, M., Lagos, M., Portal-Quicaña, E., Aldana, C., Saavedra, Y., & Saavedra, E. (2025). Estimation of soil moisture of a high Andean wetland ecosystem (Bofedal) with geo-radar data and in-situ measurements, Ayacucho–Peru. *International Soil and Water Conservation Research, 13*(1), 122–133. https://doi.org/10.1016/j.iswcr.2024.06.003

Mostacero Vargas, H. O. (2023). *Determinación de la variabilidad climática mediante el análisis de temperatura y precipitación en el distrito de Cajabamba, periodo 1965- 2019.*
Universidad César Vallejo. https://hdl.handle.net/20.500.12692/145879

Oke, T. R., Mills, G., Christen, A., & Voogt, J. A. (2017). *Urban climates*. Cambridge University Press. https://pubmed.ncbi.nlm.nih.gov/

Oyague, E., Cooper, D. J., & Ingol, E. (2022). Effects of land use on the hydrologic regime, vegetation, and hydraulic conductivity of peatlands in the central Peruvian Andes. *Journal of Hydrology, 609*, 127687. https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2022.127687

Paucar Rojas, J. A. (2023). *Estado del ecosistema bofedal y determinantes del clima que influyen en su distribución en las microcuencas Astobamba y Cachimayo, Huancavelica* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de Huancavelica. Repositorio institucional. https://hdl.handle.net/20.500.14597/5927

Ramos Benavides, D. R. (2022). *Regionalización climática y tendencias de temperatura y precipitación en la región Arequipa, periodo 1970–2020* [Tesis de licenciatura]. Universidad Nacional de San Agustín. https://hdl.handle.net/20.500.12394/12304

Rouse, J. W., Jr., Haas, R. H., Schell, J. A., & Deering, D. W. (1974). *Monitoring vegetation systems in the Great Plains with ERTS*. In *Third Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium* (Vol. 1, pp. 309–317). NASA.

Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales andinos. En F. A. Squeo, B. G. Warner, R. Aravena, & D. Espinoza (Eds.), Biodiversidad de los humedales altoandinos de Chile (pp. 151–169). Ediciones Universidad de La Serena. https://www.ciren.cl/

Silva, L. A., Portal Quicaña, E., & Alcántara Boza, F. A. (2021). *Evaluación de la cobertura vegetal en el bofedal Minas Corral, Ayacucho*. Revista de Investigaciones de la Facultad de Minas, Metalurgia y Ciencias Geográficas, 24(48), 45–56. https://doi.org/10.15381/iigeo.v24i48.19521

Talaverano, N. S. Z., Lora, J. W. G., Escriba, B. P. G., Arboleda, Y. Y. N., Ramos, V. H. G., Zorogastúa, K. D. C. C., & León, R. G. (2024). Variación temporal de bofedales andinos utilizando tecnología de información geográfica en el distrito de Uranmarca, Apurímac—Perú. *Brazilian Journal of Animal and Environmental Research*, *7*(3), e71557. https://doi.org/10.34188/bjaerv7n3-031

Tucker, C. J. (1979). Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. *Remote Sensing of Environment*, *8*(2), 127-150. https://doi.org/10.1016/0034-4257(79)90013-0

Vento, B., Cuesta, F., & Cavieres, L. (2023). Editorial: Carbon sequestration and climate change in crops, natural vegetation, and wetland dynamics in the high Andes. *Frontiers in Plant Science*, *14*, 1338577. https://doi.org/10.3389/fpls.2023.1338577

Vuille, M., Carey, M., Huggel, C., Buytaert, W., Rabatel, A., Jacobsen, D., Soruco, A., Villacis, M., Yarleque, C., Elison Timm, O., Condom, T., Salzmann, N., & Sicart, J.-E. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes – Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth-Science Reviews*, *176*, 195-213. https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2017.09.019

Wunderlich, W., Lang, M., Keating, K., Perez, W. B., & Oshun, J. (2023). The role of peat-forming bofedales in sustaining baseflow in the humid puna. *Journal of Hydrology: Regional Studies*, *47*, 101394. https://doi.org/10.1016/j.ejrh.2023.101394

ANEXO

Anexo 1

Tabla 24

Datos de precipitación de las estaciones meteorológicas.

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	165.1	102.2	135.6	62.0	26.8	18.0	13.0	10.5	57.1	37.3	32.5	94.9
2016	130.6	105.8	130.9	65.8	36.5	13.0	46.0	48.4	0.0	45.8	53.4	113.0
2017	212.5	239.1	157.8	108.5	65.2	9.3	16.5	9.0	47.0	105.6	44.0	50.3
2018	61.3	120.2	157.9	68.4	15.5	27.5	20.0	48.3	9.0	51.0	42.6	53.1
2019	100.4	141.9	144.5	51.2	114.8	6.2	32.0	0.0	20.1	70.9	107.3	208.2
2020	89.4	131.8	143.4	17.4	25.5	0.0	0.0	3.2	31.8	21.8	7.0	130.3
2021	184.0	85.8	144.8	118.9	30.4	4.0	0.0	0.0	17.5	46.6	75.7	89.9
2022	145.5	144.4	156.7	47.0	32.3	16.1	0.0	5.6	15.7	10.8	17.7	103.4
2023	157.8	189.5	118.5	18.8	40.2	0.0	0.0	0.0	71.0	35.6	84.4	127.2
2024	145.7	158.2	155.0	54.4	25.0	6.1	0.0	0.0	6.2	93.8	103.6	132.8
MEDIA	**139.23**	**141.89**	**144.51**	**61.24**	**41.22**	**10.02**	**12.75**	**12.50**	**27.54**	**51.92**	**56.82**	**110.31**

Nota: datos de la estación meteorológica Allpachaca, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	253.1	167.2	142.2	106.8	47.0	18.8	15.3	28.4	66.4	61.5	49.0	181.4
2016	73.9	236.4	88.3	91.4	23.3	14.2	14.5	25.3	18.5	62.2	45.4	93.5
2017	330.8	258.5	195.3	96.2	38.2	7.4	11.6	7.4	42.7	77.7	65.4	101.5
2018	245.1	182.5	238.7	101.6	32.6	34.7	33.3	67.9	13.1	77.4	35.2	93.1
2019	206.0	256.6	193.3	82.9	30.9	15.6	37.5	0.0	39.1	54.9	172.9	214.1
2020	156.3	274.8	181.0	73.8	59.7	7.7	0.0	3.4	37.5	42.5	32.7	235.3
2021	204.2	121.1	175.8	88.1	49.7	25.7	22.6	23.2	45.4	80.1	87.0	112.2
2022	225.7	257.1	185.3	83.9	18.2	2.8	4.5	18.0	4.3	20.4	4.9	183.8
2023	202.8	215.4	198.7	70.5	61.3	0.0	11.6	13.6	54.6	83.6	145.0	132.5
2024	222.5	243.3	189.1	65.7	49.4	5.0	2.2	8.0	39.4	54.5	87.5	174.7
MEDIA	**212.04**	**221.29**	**178.77**	**86.09**	**41.03**	**13.19**	**15.31**	**19.52**	**36.10**	**61.48**	**72.50**	**152.21**

Nota: datos de la estación meteorológica Choccoro, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	265.1	227.9	182.1	103.7	55.9	3.5	8.7	6.5	8.5	31.6	55.5	53.9
2016	7.1	26.7	29.5	63.2	9.6	19.0	8.1	22.5	15.7	29.8	15.0	113.6
2017	280.3	254.4	205.4	84.9	43.6	4.9	8.2	3.6	20.3	95.4	54.4	66.1
2018	242.7	185.0	211.5	65.0	16.8	49.3	30.3	85.8	13.4	75.7	42.4	74.1
2019	220.7	168.7	190.1	45.2	20.3	16.9	51.7	0.0	9.9	66.9	127.3	197.6
2020	158.2	230.0	285.4	43.4	53.4	3.2	0.2	40.8	41.7	16.1	17.3	204.2
2021	243.0	124.6	189.5	62.1	61.9	41.2	5.8	12.2	26.9	72.3	97.8	96.5
2022	212.0	228.0	204.3	61.9	23.5	20.4	0.8	6.0	12.7	8.9	24.7	164.5
2023	180.6	278.9	185.0	41.4	56.5	0.0	16.1	4.7	40.9	75.6	74.0	126.9
2024	179.3	200.9	164.6	84.4	43.5	10.8	0.0	8.3	13.2	51.9	123.0	261.1
MEDIA	**198.90**	**192.51**	**184.74**	**65.52**	**38.50**	**16.92**	**12.99**	**19.04**	**20.32**	**52.42**	**63.14**	**135.85**

Nota: datos de la estación meteorológica Apacheta, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	187.1	166.7	293.7	179.3	45.5	78.5	41.0	88.0	80.8	29.9	126.8	138.6
2016	46.4	199.9	71.4	62.7	10.3	15.7	18.6	13.4	33.4	20.1	8.4	127.0
2017	237.5	214.3	140.4	72.4	59.6	0.0	2.8	7.0	26.4	93.3	46.8	67.9
2018	159.8	141.4	217.9	64.6	34.8	34.8	19.3	66.0	26.4	41.6	53.5	72.7
2019	198.6	169.4	114.4	58.6	34.8	0.0	9.5	22.1	26.4	36.8	58.2	146.2
2020	105.6	322.4	142.4	41.4	61.8	5.3	0.0	5.2	6.3	5.7	23.9	118.0
2021	148.8	103.5	112.4	56.9	32.8	7.2	3.4	3.0	16.1	51.2	168.5	96.6
2022	69.5	108.6	118.1	3.1	3.0	4.4	0.1	14.1	11.0	4.2	5.6	53.6
2023	88.5	113.0	110.6	10.9	65.3	0.0	0.0	1.8	27.0	40.7	43.1	77.2
2024	140.8	154.4	108.6	36.5	0.0	5.6	0.0	0.6	10.5	44.5	80.4	76.8
MEDIA	**138.26**	**169.36**	**142.99**	**58.64**	**34.79**	**15.15**	**9.47**	**22.12**	**26.44**	**36.80**	**61.52**	**97.46**

Nota: datos de la estación meteorológica Sunilla, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho.

Tabla 25

Datos de temperatura de las estaciones meteorológicas

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	12.6	12.4	12.4	11.3	10.7	9.2	10.9	10.2	12.8	14.1	13.7	15.1
2016	13.4	12.8	11.8	12.1	10.3	9.6	8.9	11.0	12.1	12.5	13.4	13.0
2017	11.6	11.6	11.3	12.0	10.8	10.1	9.2	10.4	11.7	12.1	13.7	13.7
2018	12.2	11.9	11.3	10.3	8.8	9.2	9.3	11.2	10.8	11.9	13.3	13.0
2019	12.6	12.0	11.5	10.7	11.4	8.1	9.6	9.7	11.6	10.7	11.4	11.6
2020	12.2	12.1	11.2	10.6	9.8	8.8	13.1	12.0	13.1	12.3	12.6	11.9
2021	12.0	12.2	11.1	12.0	9.7	8.3	9.4	10.0	11.8	13.2	12.1	12.2
2022	12.1	11.2	11.0	10.6	9.0	8.6	7.9	9.0	11.2	11.7	12.4	13.3
2023	12.0	11.8	11.7	10.5	10.2	8.3	9.8	10.9	12.1	13.8	14.7	11.8
2024	11.5	11.6	11.7	11.9	10.4	12.6	8.6	10.5	12.7	11.6	12.1	11.6
MEDIA	**12.22**	**11.97**	**11.48**	**11.19**	**10.10**	**9.28**	**9.67**	**10.48**	**11.99**	**12.39**	**12.94**	**12.72**

Nota: datos de la estación meteorológica Allpachaca, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	6.0	7.1	6.4	7.1	5.0	5.4	1.6	7.8	8.3	9.1	7.4	9.5
2016	8.8	8.4	9.0	8.9	6.0	6.5	5.1	6.3	7.1	8.0	8.2	8.3
2017	8.0	7.7	8.0	6.5	4.4	7.1	6.5	6.3	7.1	8.1	9.2	9.1
2018	7.4	8.4	7.7	7.9	6.0	4.1	5.0	5.7	6.8	7.1	8.7	6.8
2019	8.3	8.0	7.2	5.7	6.5	4.9	5.4	5.2	6.5	6.4	7.0	8.2
2020	7.9	8.0	7.7	7.3	6.0	6.1	5.0	7.0	7.9	8.4	8.8	9.7
2021	9.1	7.1	6.4	7.5	6.2	6.8	6.8	6.2	7.4	9.0	8.0	6.7
2022	7.8	7.5	7.4	7.2	6.1	5.5	5.2	6.8	7.4	8.8	9.5	8.4
2023	7.9	7.6	8.6	7.2	6.7	5.7	6.4	6.2	6.0	7.8	6.9	8.7
2024	8.2	8.7	7.8	6.6	8.1	6.3	4.4	5.8	6.8	7.7	8.5	8.0
MEDIA	**7.94**	**7.86**	**7.62**	**7.19**	**6.10**	**5.84**	**5.14**	**6.33**	**7.14**	**8.04**	**8.22**	**8.34**

Nota: datos de la estación meteorológica Choccoro, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	6.4	6.0	5.6	4.6	4.7	4.3	3.2	3.7	5.2	5.9	8.5	8.5
2016	9.0	8.6	8.7	8.2	6.0	5.2	4.5	5.3	5.3	7.6	6.7	6.8
2017	7.0	7.4	7.7	6.9	6.1	6.5	4.7	5.1	7.0	7.0	8.2	9.0
2018	6.8	6.9	6.7	6.1	4.0	4.1	3.7	3.5	4.5	6.8	6.8	5.3
2019	7.2	5.9	6.2	4.3	5.0	3.0	3.9	3.0	4.5	4.7	5.7	5.8
2020	5.9	6.1	5.5	5.3	4.9	4.5	5.1	5.3	5.7	7.6	7.6	6.9
2021	6.7	3.8	6.7	6.6	4.7	4.7	4.4	4.9	6.0	7.1	7.0	6.7
2022	7.2	8.4	5.5	6.1	5.8	4.5	4.8	5.7	7.0	8.0	7.8	6.1
2023	7.8	7.1	7.1	4.2	6.5	3.9	5.2	6.0	5.0	7.0	7.2	7.8
2024	8.6	8.2	6.6	8.1	6.8	5.1	4.5	6.0	5.2	6.3	7.1	9.3
MEDIA	**7.26**	**6.84**	**6.63**	**6.04**	**5.45**	**4.58**	**4.40**	**4.85**	**5.54**	**6.80**	**7.26**	**7.22**

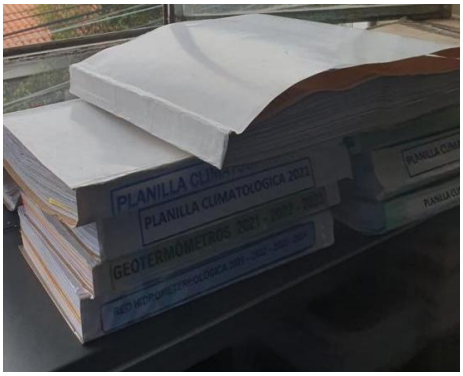
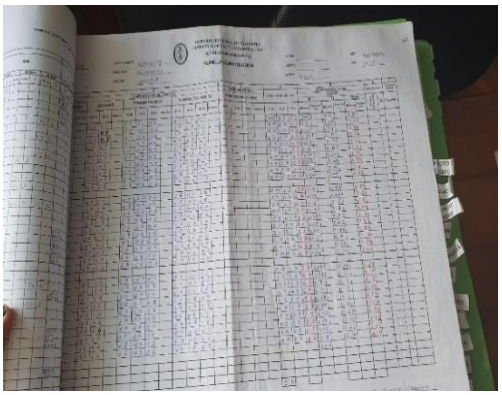
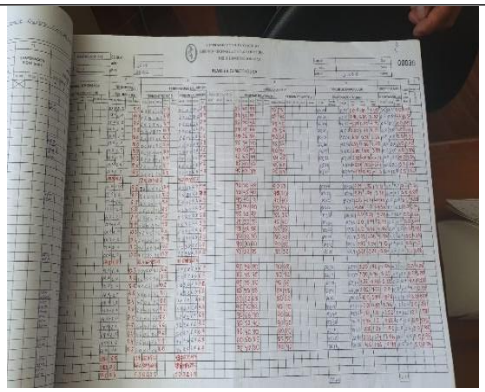
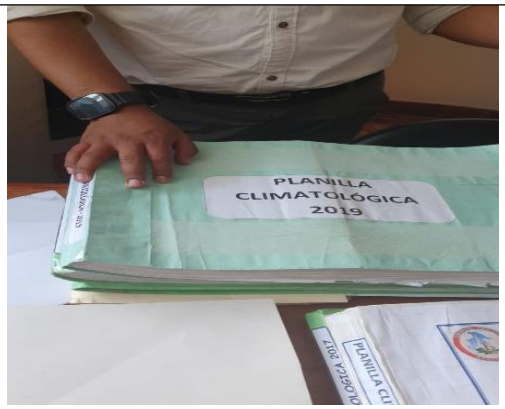
Nota: datos de la estación meteorológica Apacheta, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

AÑO	ENE	FEB	MAR	ABR	MAY	JUN	JUL	AGO	SEP	OCT	NOV	DIC
2015	11.0	11.3	11.5	11.0	11.2	10.7	9.8	10.8	11.1	12.5	12.3	12.2
2016	13.2	12.6	12.7	12.2	11.8	9.8	9.2	9.4	10.3	11.6	11.9	12.0
2017	11.4	10.9	11.2	11.2	10.7	10.3	10.2	10.7	9.9	10.0	10.0	10.8
2018	9.8	10.0	10.1	9.8	9.7	7.4	7.2	7.0	9.9	9.6	9.9	9.4
2019	10.0	10.0	9.3	10.0	9.7	10.2	9.0	9.2	9.9	10.5	9.9	9.5
2020	9.0	9.0	9.8	9.8	7.9	7.7	8.6	9.9	9.3	9.7	7.8	8.0
2021	8.5	8.4	6.8	6.1	8.1	8.0	9.1	9.4	10.7	10.7	10.1	9.6
2022	9.0	9.4	8.7	9.7	8.9	9.0	9.0	8.4	9.8	9.8	9.9	9.2
2023	9.6	8.9	9.4	10.2	8.8	8.5	8.5	8.4	8.3	10.5	11.1	9.8
2024	9.7	9.4	9.0	9.7	10.3	9.4	9.2	9.2	10.0	10.2	9.9	10.8
MEDIA	**10.12**	**9.99**	**9.86**	**9.96**	**9.72**	**9.10**	**8.96**	**9.23**	**9.94**	**10.52**	**10.28**	**10.13**

Nota: datos de la estación meteorológica Sunilla, obtenidos de OPEMAN-Ayacucho

Anexo 2

Panel fotográfico

<table>
<tr><th colspan="2">REGISTRO DE DATOS CLIMATOLÓGICAS</th></tr>
<tr><th>Dato</th><th>Descripción</th></tr>
<tr><td>Lugar</td><td>Oficina de OPEMAN–Ayacucho</td></tr>
<tr><td>Fecha</td><td>14/10-2025</td></tr>
<tr><td>Responsable</td><td>Danayu Shiomara Rojas Landeo</td></tr>
<tr><td>Actividad</td><td>Recopilación de datos</td></tr>
<tr><td>Coordenadas geográficas</td><td>13°09′10.33″ S, 74°13′28.40″ O</td></tr>
<tr><td colspan="2">Registro de las planillas climatológicas de la oficina climatológica OPEMAN-Ayacucho</td></tr>
<tr><td>
</td><td></td></tr>
<tr><td></td><td>
</td></tr>
</table>

IDENTIFICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	
Dato	**Descripción**
Lugar	Bofedal de Liriopata–Chiara
Fecha	28/11/2025
Responsable	Danayu Shiomara Rojas Landeo
Actividad	Verificación visual del área de estudio
Coordenadas geográficas	13°33′18″ S, 74°17′21 ″ O
Instrumentos	Dron, control remoto, cámara fotográfica y ficha de observación
Salida al campo, identificación del área de estudio	
	
	
	

FICHA DE VERIFICACIÓN DE CAMPO

Dato	Descripción
Lugar	Bofedal de Liriopata–Chiara
Fecha	28/11/2025
Responsable	Danayu Shiomara Rojas Landeo
Actividad	Verificación visual del área de estudio
Coordenadas geográficas	13°33'18" S, 74°17'21 " O
Instrumentos	**Instrumentos:** Dron DJI Mini 3, cámara fotográfica y ficha de observación

Salida al campo, identificación del área de estudio

Punto	Latitud	Longitud	Elevación
P_1	13°19'32.46" S	74°10'17.35" O	4155 m
P_2	13°19'38.20" S	74°10'06.23" O	4148 m
P_3	13°19'51.25" S	74°10'12.83" O	4103 m
P_4	13°19'55.55" S	74°10'06.52" O	4119 m
P_5	13°19'59.03" S	74°10'13.97" O	4095 m
P_6	13°20'05.66" S	74° 10'17.24" O	4089 m
P_7	13°20'04.38" S	74° 10'20.37" O	4076 m
P_8	13°19'59.21" S	74° 10'35.42" O	4025 m

Escaneado con CamScanner

Anexo 3

Código en R utilizado para la prueba de hipótesis mediante correlación de Pearson entre las variables climáticas y los índices espectrales del bofedal, con análisis complementario Tau-b de Kendall:

```
# ============================================================
# PRUEBA DE HIPÓTESIS: CLIMA VS. ÍNDICES ESPECTRALES
# Periodo 2015-2024
# Pearson: prueba principal | Kendall: complementaria
# ============================================================

# PASO 1: Nivel de significancia
alpha <- 0.05

# PASO 2: Datos del mes de adquisición de cada imagen
datos <- data.frame(
  anio = 2015:2024,
  temp = c(6.80, 7.02, 6.96, 5.98, 6.12,
           6.55, 6.41, 6.39, 6.40, 6.77),
  prec = c(62.71, 35.68, 50.85, 49.37, 40.30,
           23.96, 38.03, 16.44, 31.35, 27.20),
  ndvi = c(0.388, 0.388, 0.422, 0.404, 0.245,
           0.245, 0.267, 0.276, 0.431, 0.291),
  ndwi = c(0.390, 0.414, 0.422, 0.410, 0.401,
           0.295, 0.318, 0.327, 0.426, 0.329),
  savi = c(0.583, 0.630, 0.633, 0.606, 0.590,
           0.367, 0.401, 0.414, 0.647, 0.438)
)

# PASO 3: Función para correlación de Pearson
pearson <- function(x, y){
  p <- cor.test(x, y, method = "pearson")
  c(r = unname(p$estimate), p_valor = p$p.value)
}
```

```
res_pearson <- rbind(
  "Temp-NDVI" = pearson(datos$temp, datos$ndvi),
  "Temp-NDWI" = pearson(datos$temp, datos$ndwi),
  "Temp-SAVI" = pearson(datos$temp, datos$savi),
  "Prec-NDVI" = pearson(datos$prec, datos$ndvi),
  "Prec-NDWI" = pearson(datos$prec, datos$ndwi),
  "Prec-SAVI" = pearson(datos$prec, datos$savi)
)
res_pearson <- as.data.frame(res_pearson)
res_pearson$Decision <- ifelse(res_pearson$p_valor <= alpha,
                               "Se rechaza H0", "No se rechaza H0")
print(round(res_pearson[,1:2], 3))
print(res_pearson$Decision)

# PASO 4: Tau-b de Kendall (análisis complementario)
kendall <- function(x, y){
  p <- cor.test(x, y, method = "kendall", exact = FALSE)
  c(Tau_b = unname(p$estimate), p_valor = p$p.value)
}
res_kendall <- rbind(
  "Temp-NDVI" = kendall(datos$temp, datos$ndvi),
  "Temp-NDWI" = kendall(datos$temp, datos$ndwi),
  "Temp-SAVI" = kendall(datos$temp, datos$savi),
  "Prec-NDVI" = kendall(datos$prec, datos$ndvi),
  "Prec-NDWI" = kendall(datos$prec, datos$ndwi),
  "Prec-SAVI" = kendall(datos$prec, datos$savi)
)
print(round(res_kendall, 4))
# PASO 5: Decisión de la hipótesis general (Pearson)
if(all(res_pearson$p_valor > alpha)){
  cat("No se rechaza H0: no existe evidencia estadística\n")
  cat("de relación significativa entre clima e índices.\n")
} else { cat("Se rechaza H0 en al menos una relación evaluada.\n") }
```

Anexo 4

Matriz de consistencia

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPÓTESIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
Problema general ¿Cuál es la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara,2015–2024? **Problemas Específicos:** ¿Cuál fue el comportamiento de la temperatura y la precipitación en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024? ¿Cómo variaron temporalmente los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024? ¿Cuál es la relación entre la temperatura y la precipitación y los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024?	Analizar la relación entre la variabilidad climática y la dinámica del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara,2015–2024. **Objetivos específicos:** Evaluar el comportamiento de la temperatura y la precipitación en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024. Evaluar la variación temporal de los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024 Determinar la relación entre la temperatura y la precipitación y los índices espectrales NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.	La temperatura y la precipitación se relacionan significativamente con los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024. **Hipótesis específicas** La temperatura y la precipitación presentan tendencias temporales significativas en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024. Los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI presentan tendencias temporales significativas en el bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024. La temperatura y la precipitación se relacionan significativamente con los valores medios de los índices NDVI, NDWI y SAVI del bofedal altoandino de Liriopata–Chiara, 2015–2024.	**Variable independiente:** Variabilidad climática **Variable dependiente:** Dinámica del bofedal	**Investigación Tipo:** Básico **Nivel:** correlacional. **Diseño:** No experimental, longitudinal y retrospectivo. **Población:** Bofedales altoandinos del distrito de Chiara, Ayacucho. **Muestra:** bofedal altoandino de Liriopata-Chiara. **Muestreo:** No probabilístico, intensional **Técnicas:** Análisis documental, teledetección y verificación de campo **Instrumentos:** Registros meteorológicos, imágenes Sentinel-2 MSI Level-2A, ficha de verificación, dron DJI Mini 3 y cámara fotográfica.