

FACULTAD DE INGENIERÍA

Carrera de **Ingeniería Ambiental**

**“INFLUENCIA DE LA VARIABILIDAD CLIMÁTICA
EN LA DINÁMICA ESPACIO TEMPORAL DE LOS
BOFEDALES ALTOANDINOS EN LA
MICROCUCUENCA CHICLLARAZO, PERIODO 1988-
2022”**

Tesis para optar el título profesional de:

Ingeniero Ambiental

Autor:

Luis Gilmer Buitron Sulca

Asesor:

MSc. Haniel Josué Torres Joaquín

<https://orcid.org/0000-0001-9659-4250>

Lima - Perú

JURADO EVALUADOR

Jurado 1 Presidente(a)	ELIFIO GUSTAVO CASTILLO GOMERO	07594283
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 2	MARGEO JAVIER CHUMAN LOPEZ	45997406
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

Jurado 3	MARIETA ELENA CERVANTES PERALTA	29425048
	Nombre y Apellidos	Nº DNI

INFORME DE SIMILITUD

Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)

ORIGINALITY REPORT

15%
SIMILARITY INDEX

14%
INTERNET SOURCES

8%
PUBLICATIONS

5%
STUDENT PAPERS

PRIMARY SOURCES

1	hdl.handle.net Internet Source	2%
2	repositorio.upn.edu.pe Internet Source	1%
3	repositorio.ucv.edu.pe Internet Source	1%
4	repositorio.unap.edu.pe Internet Source	1%
5	www.thefreelibrary.com Internet Source	<1%
6	dspace.espoch.edu.ec Internet Source	<1%
7	repositorio.inia.gob.pe Internet Source	<1%
8	Submitted to Universidad Privada del Norte Student Paper	<1%

dx.doi.org

DEDICATORIA

Este trabajo de investigación fruto de mi esfuerzo y dedicación constante, lo dedico con mucho cariño en especial a mis queridos padres, a quienes me debo por su apoyo incondicional, la confianza y motivación en todo momento de vida académica.

A mis queridas hermanas, a mi padrino y madrina y a toda mi familia y amigos (as), por sus consejos, apoyos, motivaciones y sus buenos deseos.

AGRADECIMIENTO

Mi agradecimiento infinito a Dios, por guiarme y protegerme en todo momento de mi vida,
por las fortalezas y las sabidurías para sobresalir de las dificultades y obstáculos en el
camino.

Mi profundo agradecimiento a mis queridos padres, por su apoyo incondicional durante mi
formación profesional, a mis hermanas y a toda mi familia, a quienes estén con vida y a los
que ya descansan en paz.

A la Universidad Privada del Norte, a mis docentes y en especial a mi asesor MSc. Haniel
Josué Torres Joaquín, por impartir sus valiosos conocimientos, sus experiencias,
reflexiones y consejos, que hizo posible culminar con éxito la presente investigación.

Tabla de contenido

JURADO EVALUADOR.....	2
INFORME DE SIMILITUD.....	3
DEDICATORIA	4
AGRADECIMIENTO.....	5
ÍNDICE DE TABLAS	8
ÍNDICE DE FIGURAS	9
RESUMEN.....	10
CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN	11
1.1. Realidad problemática.....	11
1.2. Antecedentes.....	13
1.2.1. Antecedentes internacionales	13
1.2.2. Antecedentes nacionales	16
1.2.3. Antecedentes locales	20
1.3. Bases teóricas.....	20
1.3.1. Bofedales altoandinos	20
1.3.2. Composición florística de los bofedales.....	21
1.3.3. Fuentes de provisión del agua hacia los bofedales	22
1.3.4. Clasificación de los bofedales	22
1.3.5. Servicios ecosistémicos de los bofedales	23
1.3.6. Importancia de los bofedales.....	23
1.3.7. Principales amenazas de los bofedales	23
1.3.8. Indicadores de la variabilidad climática.....	24
1.3.9. Efectos de la variabilidad climática.....	24
1.3.10. Vulnerabilidad de los bofedales a la variabilidad climática	25
1.3.11. Monitoreo de los bofedales mediante teledetección.....	25
1.3.12. Componentes de la teledetección	26
1.3.13. Satélites para la teledetección.....	27
1.3.14. Resolución de los sensores remotos	28
1.3.15. El espectro electromagnético en la teledetección	29
1.3.16. Firma espectral para cobertura vegetal.....	31
1.3.17. Combinación de bandas espectrales	32
1.3.18. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI).....	32
1.3.19. Modelo digital de elevación (MDE).....	33
1.3.20. Modelos de representación espacial	33
1.3.21. Tratamiento de las imágenes satelitales	35

1.3.22.	Fuentes de adquisición de datos climáticos.....	37
1.3.23.	Microcuenca Chicllarazo.....	39
1.4.	Formulación del problema	40
1.4.1.	Problema general.....	40
1.4.2.	Problemas específicos	40
1.5.	Objetivos	41
1.5.1.	Objetivo general	41
1.5.2.	Objetivos específicos.....	41
1.6.	Hipótesis.....	42
1.6.1.	Hipótesis general	42
1.6.2.	Hipótesis específicas	42
1.7.	Justificación.....	43
CAPÍTULO II. METODOLOGÍA		44
2.1.	Tipo de investigación.....	44
2.2.	Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)	44
2.2.1.	Población	44
2.2.2.	Muestra	44
2.2.3.	Materiales	45
2.2.4.	Recursos tecnológicos	45
2.2.5.	Métodos	46
2.3.	Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.....	46
2.3.1.	Técnicas de recolección de datos.....	46
2.3.2.	Instrumentos de recolección de datos	46
2.3.3.	Procedimiento.....	47
2.3.4.	Validez y confiabilidad de información.....	53
2.3.5.	Análisis de datos.....	53
2.3.6.	Aspectos éticos de la investigación	54
CAPÍTULO III. RESULTADOS		55
CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....		67
4.1.	Discusión.....	67
4.2.	Limitaciones	71
4.3.	Implicancias	71
4.4.	Conclusiones.....	72
4.5.	Recomendaciones.....	73
REFERENCIAS		74
ANEXOS		82

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla N° 1. Servicios ecosistémicos de los bofedales.....	23
Tabla N° 2. Resolución de sensores TM, OLI/TIRS, OLI-2/TIRS-2 y MSI.....	29
Tabla N° 3. Combinación de bandas espectrales para distinguir cobertura vegetal.....	32
Tabla N° 4. Cantidad de imágenes satelitales empleadas para análisis espacial.....	55
Tabla N° 5. Tasa de cambio anual en porcentaje de la cobertura de los bofedales.	57
Tabla N° 6. Análisis ANOVA de precipitación acumulada	63
Tabla N° 7. Análisis ANOVA de precipitación máxima.....	63
Tabla N° 8. Análisis ANOVA de temperatura máxima	64
Tabla N° 9. Análisis ANOVA de temperatura mínima	64
Tabla N° 10. Eta cuadrada parcial de variables climáticas.....	64

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura N° 1. Bofedal compuesto por <i>Distichia muscoides</i>	21
Figura N° 2. Componentes de la teledetección.	27
Figura N° 3. Espectro electromagnético.....	30
Figura N° 4. Firmas espectrales para diferentes coberturas.	31
Figura N° 5. Modelo de representación ráster.....	34
Figura N° 6. Modelo de representación vectorial.....	34
Figura N° 7. Datos climáticos de la microcuenca Chicllarazo.....	39
Figura N° 8. Proceso metodológico para elaboración de la investigación	47
Figura N° 9. ModelBuilder para la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica Landsat 5 y 8.	49
Figura N° 10. Script para extraer datos climáticos de PISCO por cada estación virtual. ...	50
Figura N° 11. Interpolación Kriging de precipitación acumulada para el año 2022.....	51
Figura N° 12. ModelBuilder para la delimitación de la microcuenca Chicllarazo.	51
Figura N° 13. Microcuenca Chicllarazo y estaciones virtuales del producto PISCO	55
Figura N° 14. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de 1998, 2001, 2010 y 2022.	56
Figura N° 15. Área superficial de los bofedales en series de tiempo (1988-2022).....	57
Figura N° 16. Temperatura máxima (°C) 1988-2022.....	58
Figura N° 17. Prueba estadística de Mann Kendall de temperatura máxima.....	58
Figura N° 18. Temperatura mínima (°C) 1988-2022.	59
Figura N° 19. Prueba estadística de Mann Kendall de temperatura mínima.	59
Figura N° 20. Precipitación acumulada (mm) 1988-2022.	60
Figura N° 21. Prueba estadística de Mann Kendall de precipitación acumulada.....	60
Figura N° 22. Precipitación máxima (mm) 1988-2022.....	61
Figura N° 23. Prueba estadística de Mann Kendall de precipitación acumulada.....	61
Figura N° 24. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk de las variables de estudio	62
Figura N° 25. Regresión lineal de la precipitación acumulada y área de bofedal.....	65
Figura N° 26. Regresión lineal de la precipitación acumulada y área de bofedal.....	65
Figura N° 27. Regresión lineal de la temperatura máxima y área de bofedal.....	66
Figura N° 28. Regresión lineal de la temperatura mínima y área de bofedal.....	66

RESUMEN

Los bofedales altoandinos provisionan una diversidad de servicios ecológicos, económicos y culturales. Sin embargo, en la actualidad las actividades humanas y el cambio climático lo hacen muy vulnerables a degradarse. En ese sentido, esta investigación tiene la finalidad de determinar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022. Para ello, la metodología consistió en la adquisición de imágenes satelitales (Landsat 5TM, Landsat 8OLI y Sentinel 2) y datos climáticos de temperatura y precipitación. Además, se realizó la corrección digital de imágenes satelitales y la clasificación espectral mediante el índice de NDVI en un rango de 0.436 a 1. Y se obtuvo como resultado que, mediante la prueba estadística de ANOVA, la precipitación acumulada influye significativamente en la dinámica espacio temporal de los bofedales ($p < 0.05$; $\eta^2 = 0.44$; $R^2 = 0.4739$). Ya que este tipo de ecosistemas hidromórficos requieren presencia de agua en cantidades para desarrollarse. Por ende, uno de los factores influyentes en la reducción de 2656.28 ha en el 2022, fue la poca presencia de la precipitación. Concluyendo, que solo la precipitación acumulada influye significativamente en la variabilidad de la cobertura de los bofedales de la microcuenca Chicllarazo.

PALABRAS CLAVES: Bofedales altoandinos, teledetección, cambio climático, variabilidad climática y microcuenca Chicllarazo.

CAPÍTULO I. INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

En la actualidad los efectos del cambio climático son evidentes y claras como la variabilidad climática por el incremento insostenido de gases de efecto invernadero, ya que hasta setiembre del 2022 las concentraciones de CO₂ registran 419 ppm en la atmósfera y es el principal gas causante del efecto invernadero (NASA, 2022a). Tal como afirma el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPPC), que por el incremento de la emisión de gases GEI, la temperatura media mundial al 2022 ascendió a 1.09 °C desde el año 1850 (IPCC, 2022). Por ende, en los últimos 7 años se han registrado temperaturas más cálidas y sus principales efectos fueron periodos sequias, olas de calor, variación de patrones de precipitación, deshielo de los glaciares, incremento de los niveles del mar, entre otros (NASA, 2022b; OMM, 2021).

En ese contexto, los ecosistemas altoandinos, tales como los bofedales o turberas altoandinas, se enfrentan a nuevos desafíos por la variabilidad climática, ya que al ser ecosistemas frágiles resultan ser vulnerables a los cambios globales (MINAM, 2005; Zimmer et al., 2014). La cual, se pudo notar en los bofedales de la localidad de Caquena de Chile, ya que (Meza y Díaz, 2014) al realizar un estudio con las imágenes satelitales han demostrado la reducción de área en un 3%, por lo que se ha evidenciado el incremento de 0.6 °C de temperatura y la reducción de precipitación en 250 mm hacia el 2011.

Asimismo, en Perú los bofedales de la cuenca del río Coata desde el año 1984 al 2016 han experimentado la reducción de su cobertura superficial en un 79.83%. Por ello, al comparar con la variabilidad de los patrones climáticos, se evidenció que la temperatura promedio anual se incrementó en 1.4 °C, mientras que la precipitación se redujo en 383

mm. Dado que los bofedales son muy dependientes del recurso hídrico y el incremento de la temperatura supone ser una de las amenazas (Gutiérrez, 2018). Sin embargo, en algunas áreas geográficas tales como el bofedal altoandino de Chalhuanca y el bofedal de Perca ubicados en Arequipa se ha incrementado sus áreas hacia el año 2016 y 2019 respectivamente, por el incremento de precipitación (Pauca et al., 2020; Villasante, 2021). Asimismo, en la cabecera de la cuenca del río Santa el incremento del área de los bofedales se dio por el suministro del agua por parte de la desintegración de capas de hielo de la cordillera la viuda, a causa del incremento de la temperatura (J. García & Willems, 2015).

Finalmente, en la cuenca alta del río Cachi del departamento de Ayacucho, la pérdida de la cobertura de los bofedales fue a causa de la estacionalidad de los glaciares en los últimos tiempos. Ya que, solo en periodos cortos de junio a julio se logra apreciar la presencia de los glaciares y el resto del año se desintegran por completo. Por ende, la pérdida de bofedales estaría relacionado a la falta de provisión de agua de los glaciares y de la precipitación (R. Chávez, 2015).

En ese sentido, esta investigación se desarrolla con la finalidad de realizar un monitoreo espacio temporal de la cobertura de los bofedales y al mismo tiempo estimar si las variables climáticas tales como la temperatura y precipitación influyen en la dinámica espacial de su cobertura. La cual, contribuirá y/o permitirá en la toma de decisiones para la conservación y protección cuando las variables climáticas incidan en la degradación de su cobertura vegetal.

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes internacionales

En Bolivia, Casas (2015) realizó una investigación de tipo descriptivo sobre efectos de la variabilidad climática en dos bofedales (Laguna y Susuría) en un periodo de 25 años (1986-2011), para ello empleó 4 imágenes satelitales de Landsat 5 TM y datos meteorológicos de estación Sajama. Posteriormente las imágenes satelitales fueron corregidas radiométrica y atmosféricamente empleando el programa ArcGIS 9.3, a partir de ello se determinó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) para clasificar las coberturas en un rango de 0.2 a 0.8, en base a ello se estimó la variabilidad de la cobertura de los bofedales en 4 series de tiempo. Y mediante el modelo de regresión lineal se determinó la relación entre la cobertura superficial de los bofedales y la precipitación. Como resultado se obtuvo que los bofedales susuría y laguna tuvieron una pérdida de sus coberturas de 0.03 y 0.40 Km² respectivamente. Además, se evidenció el descenso de la precipitación de 360.5 mm e incremento de temperatura máxima y mínima en 1.84 °C y 0.36 °C respectivamente hacia el 2011. Y como parte del modelo de regresión lineal, el coeficiente de determinación entre las variables del área del bofedal y precipitación fueron de $R^2 = 0.6896$ y $R^2 = 0.1992$ en el bofedal Laguna y Susuría respectivamente. Por lo cual, la reducción del área del bofedal laguna estuvo moderadamente correlacionada al descenso de la precipitación. Mientras tanto, no se realizó la regresión lineal entre las variables del área de bofedal y temperatura.

Por otro lado, Meza y Díaz (2014) realizaron una investigación de tipo correlacional para conocer la relación entre las fluctuaciones de la superficie de los bofedales y la variabilidad climática. Para ello, utilizaron imágenes satelitales de Landsat 5 TM y datos climáticos de temperatura y precipitación de 1990 al 2011 de la estación Caquena. Cabe

precisar, que por cada año utilizaron dos imágenes satelitales debido a que los bofedales manifiestan dos estaciones anuales (otoño y primavera). Posteriormente, se realizó la clasificación de la cobertura de bofedal a partir del índice de NDVI en rango de 0.4 a 1. Por ende, los resultados obtenidos demuestran la reducción del área de los bofedales de 2.74% que equivale una pérdida de 53 hectáreas, además la temperatura tuvo un incremento de 0.5°C y reducción de precipitación de 250 mm de 1990 al 2011. Y mediante el modelo de regresión lineal, se estimó que la relación entre variables de precipitación y cobertura superficial de los bofedales es de $R^2 = 0.06$, y entre variables de temperatura y cobertura de los bofedales fue de $R^2 = 0.09$. En ese sentido, en este ámbito la variabilidad climática no tuvo relación en la dinámica de la cobertura de los bofedales. Sin embargo, la mayor reducción de dicho ecosistema se registró en el año 1992, correspondiente a un año Niño fuerte (sequía), mientras que la máxima se presentó en el año 2008 correspondiente a un año Niña fuerte. Por ende, el comportamiento de estas anomalías podría haber afectado en periodos cortos.

Además Valeria, (2017) en su investigación de tipo exploratoria-descriptiva realizó la predicción de bofedales en la reserva de producción de fauna Chimborazo mediante las imágenes satelitales Landsat de los sensores TM, ETM+ y OLI. Por ende, las imágenes digitales proporcionados por los sensores fueron descargadas para los años comprendidos desde 1991 al 2016 entre los meses de agosto a noviembre debido a la poca presencia de nubosidad. Se empleó el software ENVI 5.1 para la corrección atmosférica y radiométricamente mediante la metodología *FLAASH* y *correction Radiometric*. Posteriormente, para la clasificación de coberturas se realizó mediante clasificación supervisada del algoritmo de Random Forest. Obteniendo como resultado que la cobertura

de los bofedales se redujo en un 19.2% (10023.96 ha). Sin embargo, no empleó pruebas estadísticas para conocer la influencia de las variables climáticas sobre los bofedales.

A su vez, Díaz, (2015) realizó una investigación descriptiva sobre la caracterización ecológica de los bofedales mediante la aplicación de herramientas SIG y teledetección en la reserva de producción de fauna Chimborazo. Para ello, se utilizaron dos imágenes satelitales de Landsat 7 ETM+ para determinar la variabilidad espacial y temporal de estos ecosistemas, previamente se realizó la corrección radiométrica de las imágenes mediante la herramienta *Layer Stack* del programa Erdas. Además, se clasificó las coberturas de los bofedales mediante la metodología de clasificación supervisada. Por ello, los resultados obtenidos reflejan una pérdida de 42% (1082.56 ha) en 4 años (2001-2004) y el índice de NDVI fue de 0.54 a 0.73. Sin embargo, al ser un estudio de tipo descriptivo no utilizó pruebas estadísticas para conocer su influencia de la variabilidad climática. No obstante, se identificó que dichos ecosistemas se ubicaban en espacios en donde las aguas subterráneas y las precipitaciones fluviales eran estacionales, de modo que la pérdida de la cubierta vegetal sea posiblemente a la escasa provisión del agua.

Además, Funes y Laura, (2017) realizaron su investigación de tipo descriptivo para analizar el cambio multitemporal de los bofedales en la subcuenca peñas para los años 1994-2015, para lo cual, se utilizaron los sensores TM y OLI/TIRS de la misión Landsat, las cuales fueron reproyectadas y corregidas radiométricamente en el software ERDAS IMAGINE 9.1. Posteriormente, se calculó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) que varía de 0.3 a 0.4 y a partir de ello se realizó la clasificación supervisada de la cobertura bofedal. Posteriormente se obtuvo que el bofedal se redujo en un 32.71 % (519.87 ha) hacia 2015. Sin embargo, no realizó pruebas estadísticas con

variables climáticas para conocer la causa de la pérdida. Al respecto, el autor afirma que pueda deberse a los fenómenos climáticos.

1.2.2. Antecedentes nacionales

Villasante, (2021) en su trabajo de investigación de tipo correlacional evaluó los efectos del cambio climático sobre la cobertura de los bofedales Perca y Ccallaccapcha ubicados en las alturas de Arequipa. Para ello, los datos meteorológicos de temperatura y precipitación fueron obtenidos del base de datos climáticos de la NASA. A partir de ello, mediante la prueba no paramétrica de Mann Kendall se pudo conocer el incremento de precipitación en Ccallaccapcha y Perca de 9.62 mm/año y 6.94 mm/año respectivamente. Mientras tanto, las temperaturas máximas tuvieron un comportamiento decreciente de 0.01 °C/año en Ccallaccapcha y comportamiento ascendiente de 0.002 °C/año en Perca. Sin embargo, la temperatura mínima fue creciente en ambos bofedales de 0.01 °C/año y 0.015 °C/año en bofedal Ccallaccapcha y Perca respectivamente. Por otra parte, la variabilidad espacial de los bofedales ha sido determinado mediante la metodología de clasificación supervisada durante los periodos de 1985 a 2019, previo a ello se utilizó el programa ENVI para la corrección radiométrica y atmosférica mediante la herramienta de correction radiometric y FLAASH respectivamente. Y como resultado se obtuvo el incremento del área de los bofedales en 19.43 ha/año y 23 ha/año en el bofedal Ccallaccapcha y Perca respectivamente y el índice de NDVI fue de 0.27 – 0.60. Y mediante la prueba estadística de Pearson se realizó la correlación de variables. Por ende, en el bofedal Ccallaccapcha la correlación entre precipitación y área de bofedal fue de $r = 0.297$, $P > 0.05$ (correlación débil) y entre temperatura y área del bofedal fue de $r = -0.031$, $P > 0.05$ (correlación muy débil, la cual indica que las variables climáticas no tuvieron relación sobre el bofedal. Mientras tanto, en el bofedal Perca hubo correlación moderada $r = 0,339$ $P < 0.05$ entre los

variables de precipitación y área de bofedal, y para los variables de temperatura promedio y área de bofedal fue de $r = 0.318$, $P > 0.05$ (Correlación baja). En ese sentido, solo en el bofedal Perca el incremento del bofedal estuvo relacionado al aumento de precipitación.

De la misma forma, Pauca *et al.* (2020) realizó una investigación de tipo correlacional para el análisis espacio temporal y climático del bofedal altoandino de Chalhuanca durante los años 1986 al 2016, empleando datos meteorológicos de la estación Imata e imágenes satelitales de los sensores TM, ETM+ y OLI de la misión Landsat. Las imágenes de dichos sensores han sido descargadas con una nubosidad menor al 5% y corregidas radiométrica y atmosféricamente en el programa ENVI con la herramienta FLAASH para luego realizar la clasificación supervisada de máxima verosimilitud. Posteriormente, se determinó la tendencia de datos climáticos mediante la prueba secuencial no paramétrica de Mann Kendall a un nivel de significancia de 95%. Por ello, como resultado se obtuvo un incremento de: precipitación (32 mm/dec), temperatura máxima (0.3 °C/dec) y temperatura mínima (0.6 °C/dec). Asimismo, la cobertura del bofedal tuvo un incremento de 29.73 % hacia el 2001. Sin embargo, después del 2001 al 2016 se evidenció reducción del área de bofedal en un 13.42% y el umbral del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) fue de 0.26 en promedio. Por ende, mediante la prueba estadística de Pearson se determinó la correlación entre el área del bofedal y precipitación, que resultó significativa ($r = 0.92$ y $R^2 = 0.85$) y la correlación entre área del bofedal y temperatura media fue de ($r = 0.68$ y $R^2 = 0.46$). Por ende, el incremento de la precipitación tuvo relación con el aumento del área del bofedal entre los años 1986 al 2001.

Además Gutiérrez, (2018) realizó su investigación de tipo correlacional para determinar la dinámica espacial de los bofedales de la cuenca del río Coata mediante imágenes satelitales Landsat 5 TM, Landsat 7 ETM+ y Landsat 8 OLI para el periodo de

1984 – 2016. Por ello, tuvo como objetivo determinar el grado de correlación entre los factores climáticos y la dinámica espacial de los bofedales. Por ende, las imágenes satelitales fueron corregidas radiométrica y atmosféricamente para determinar la extensión superficial de los bofedales en diferentes series de tiempos, mediante la clasificación supervisada se determinó que los bofedales tuvieron una pérdida de 9,484.29ha hacia el 2016, mientras tanto la temperatura máxima ascendió 1.4°C de 1984 al 2016 y la precipitación descendió un 383.02mm. Además, se determinó el índice de NDVI y se identificó rangos umbrales de 0.3 a 0.7 para el bofedal. A partir de dichos datos, se realizó correlación de variables mediante modelos de regresión lineal en RStudio. Por lo tanto, la correlación entre la temperatura máxima promedio y la dinámica espacial de los bofedales fue de $R^2 = 0,47$, p-valor = 0,0003 (correlación moderada) y la correlación entre la precipitación y dinámica espacial de los bofedales fue de $R^2 = 0,23$, p-valor = 0, 2186 (correlación muy baja). En ese sentido, solo la temperatura máxima tuvo relación con la dinámica espacial de los bofedales.

Asimismo, E. García & Otto, (2015) realizaron una investigación de tipo correlacional para la caracterización ecohidrológica de los humedales ubicados en la cabecera de la cuenca del río santa entre los periodos de 2000 a 2009, utilizando imágenes satelitales Landsat 7 ETM+, TRMM (Tropical Rainfall Measuring Mission) y MODIS (Moderate Resolution Imagin Spectroradiometer). La metodología consistió en identificar y delimitar los humedales altoandinos en base a las imágenes de Landsat ETM+, para ello se aplicó una clasificación digital de forma gradual y escalonada sobre las imágenes de la época seca y húmeda durante el periodo (2000-2009), este método es conocida como clasificador de árbol ya que tiene la ventaja de ser sencillo y a la vez muy eficiente. Mientras tanto, los datos de precipitación obtenidas de TRMM fueron validadas con la

información de SENAMHI y los datos de cobertura de nieve con MODIS. Por ende, los resultados obtenidos reflejan el incremento de 7% del área de los humedales hacia el 2009, la cual estaría relacionado al comportamiento altamente variable de la precipitación, ya que se identificó que la precipitación máxima y mínima oscilan entre 1700 mm y 1100 mm respectivamente. Además, aplicando modelos de regresión se determinó que existe una dependencia entre la extensión de los humedales y la acumulación de nieve durante la época seca, por lo que el coeficiente de determinación $R^2 = 0.71$ nos indica una alta correlación. Además, existe una relación entre área del humedal con la lluvia acumulada, indicando por el coeficiente de determinación de $R^2=0.68$. En ese sentido, la variabilidad del humedal estuvo relacionada con la variabilidad de la precipitación. Además, el índice de NDVI fue de 0.06 -0.7.

Por otra parte, J. García & Willems, (2015), implementaron una metodología para identificar y cuantificar la extensión de los bofedales en la cuenca alta del río Chillón mediante los sensores TM y OLI. Para ello, se realizaron trabajos de campo para identificar y monitorear un bofedal piloto. Posteriormente, se calcularon los índices espectrales y encontraron rangos específicos NDVI (0.43-0.899). Por ello, la clasificación de las coberturas se realizó a partir de los índices espectrales de NDVI para determinar la extensión multianual. Dando como resultado un incremento de 14.95% del área de dicho ecosistema. Y al no realizarse pruebas estadísticas para conocer su influencia de las variables climáticas, los autores sostienen que puede deberse al deshielo de la cordillera la viuda, por lo que se encuentra muy cerca al bofedal piloto.

1.2.3. Antecedentes locales

En Ayacucho R. Chávez, (2015), realizó una investigación de tipo descriptivo para realizar el inventario y variación multianual de los bofedales en la cuenca alta del río cachi para los años comprendidos entre 2003 al 2013, este estudio tuvo como finalidad identificar y cuantificar retrospectivamente la variabilidad multianual de los bofedales. Para ello, empleó un modelo digital de elevación global (GDEM) del sensor ASTER e imágenes satelitales de los sensores TM, ETM+ y LDCM de la misión Landsat. Las cuales, han sido corregidas geográfica y atmosféricamente en el software ENVI 5.1 para corregir los errores de ubicación e interferencias atmosféricas producidas por partículas de, CO₂, H₂O y otros aerosoles. Posteriormente, se determinó la variación multianual mediante la clasificación supervisada combinando las bandas 5-4-3. Por ende, los resultados obtenidos reflejan la pérdida del área de los bofedales de 3194,28 ha hacia el 2013 con una tasa de perdida promedio de -2.17%. Sin embargo, al ser un estudio descriptivo no realizó pruebas estadísticas para conocer la influencia de variables climáticas sobre el bofedal, pero señala que la desintegración de los nevados de la cuenca tendría influencia sobre el incremento de la cobertura del bofedal.

1.3. Bases teóricas

1.3.1. Bofedales altoandinos

Los bofedales altoandinos, también denominados turberas o oconales (deriva del idioma quechua, “*ocko*” que significa *zona húmeda*), este es un tipo de humedal que se caracteriza por presentar suelo orgánico con vegetación herbácea de tipo hidrófila, en especial de especie *Distichia muscoides* que le da la característica verdor durante todo el año. Estos ecosistemas se desarrollan en zonas planas o ligeramente inclinadas a una altitud que oscila entre 3200 a 5000 m.s.n.m. y que están compuestos por la flora, fauna, agua y

turba (suelo orgánico). Las cuales, proveen servicios ecosistémicos de provisión, regulación, soporte y cultural (Maldonado, 2014; MINAM, 2019; Squeo et al., 2006).

Asimismo, la convención (RAMSAR, 2013), reconoce a las turberas como humedales de régimen natural o artificial, permanentes o temporales, que se dan en zonas donde la capa freática se ubica en superficie terrestre o cerca de ella, o cuando la tierra se encuentre inundada a baja profundidad.



Figura N° 1. Bofedal compuesto por *Distichia muscoides*.

Fuente (MINAM, 2019)

1.3.2. Composición florística de los bofedales

Los bofedales presentan una vegetación hidrófila que crecen en forma de cojines duros y son muy característicos por estar compuestos en abundancia por la especie *Distichia muscoides*, *Distichia acicularies*, *Distichia filamentosa*, *Alchemilla pinnata*, *Hypochaeris taraxacoides*, *senecio macrorrhizus*, *Sphagnum*, entre otros. De las cuales, es importante resaltar la familia *Distichia* por su abundancia en áreas de bofedales. Dichas

especies, mantienen al bofedal de verdor durante todo el año (Aquino et al., 2018; Maldonado, 2014).

1.3.3. Fuentes de provisión del agua hacia los bofedales

La estabilidad de la cobertura de los bofedales depende mucho del suministro de agua de alguna fuente. Por ende, (Llambí et al., 2012; Maldonado, 2014), afirman que los derretimientos de los nevados, ríos, lagos, aguas subterráneas y precipitación proveen de recurso hídrico hacia estos ecosistemas en especial en la época húmeda. Por su parte, estos ecosistemas contribuyen en la regulación hídrica, ya que en la época húmeda se almacena grandes cantidades de agua para ser liberador en la época seca. Este se debe, a que están ubicados en las zonas planas, la que permite la retención e infiltración del agua al suelo por la baja escorrentía. En ese sentido, Cervantes *et al.* (2021), considera que los bofedales tienen un mejor desempeño en la regulación hídrica y garantiza la provisión del agua para el resto del año.

1.3.4. Clasificación de los bofedales

Según Alzerreca y Luna (2001), como se citó en Farfán R & Farfán E, (2012), los bofedales se pueden clasificar según su **origen**: Naturales (creados naturalmente) y Artificiales (creados por el hombre), por su **altitud**: Altiplánicos (ubicados por debajo de los 4100 msnm) y Altoandinos (ubicados por encima de los 4100 msnm), por su **régimen hídrico**: Hidromórficos o údicos (con riego permanente) y Mésicos o ústicos (con riego temporal), por su **tamaño**: Pequeños (de uso familiar) y Grandes (de uso comunal) y por su **fisiografía**: (a) Llanura, pampa y aluvial, (b) cordillera o altura. Además, MINAM (2019) clasifica en función a **hidroperiodo**: Bofedales estacionales (las que permanecen una parte del año) y Bofedales permanentes (las que permanecen durante todo el año) y por su **posición topográfica**: Bofedales de ladera (tienen mayor probabilidad de ser estacionales)

y Bofedales en área planas (tienen mayor probabilidad de ser permanentes). Y considera que los bofedales altoandinos se ubican por encima de los 3500 msnm.

1.3.5. Servicios ecosistémicos de los bofedales

(Flores et al., 2014; Page & Baird, 2016) afirman que los bofedales altoandinos provisionan servicios ecosistémicos, tales como se describe en la tabla N° 1.

Tabla N° 1. *Servicios ecosistémicos de los bofedales*

Servicios de provisión	Servicios de regulación	Servicios de soporte	Servicios culturales
-Forraje para el ganado	- Almacén de carbono	- Refugio de fauna silvestre y de biodiversidad	- Belleza escénica y paisajística
- Turba	- Control de erosión del suelo	- Formación de turba	- Áreas de recreación,
- Plantas medicinales	- Calidad y cantidad de agua	- Mantenimiento del ciclo de nutrientes	espiritual, de educación y turismo
- Agua dulce	- Almacén de agua	- Mantenimiento de los ciclos de vida	- Patrimonio cultural
	- Regulación hídrica		
	- Regulación de clima local		

Nota: Fuente (Flores et al., 2014; Page & Baird, 2016)

1.3.6. Importancia de los bofedales

Los bofedales en el Perú ocupan 548 174.41 ha, que corresponde el 0.42 % del total del territorio nacional. Estos ecosistemas son de gran importancia ambiental, social y económico por la provisión de los servicios ecosistémicos descritos en la (Tabla N°1). Las cuales, satisfacen las necesidades a la población al proveer bienes y servicios (MINAM, 2019).

1.3.7. Principales amenazas de los bofedales

Estos ecosistemas son considerados como ecosistemas frágiles ya que alberga una diversidad de especies y por la dependencia del agua y temperatura (MINAM, 2005; Villasante, 2021). Por ende, las principales amenazas que enfrenta son: retroceso glaciar por efectos del cambio climático, sequías prolongadas, sobrepastoreo, contaminación ambiental por actividades antrópicas, expansión de agricultura, actividades extractivas,

construcción de infraestructuras, desvío de agua por canalización, altas tasas de extracción de vegetal y turba (Flores et al., 2014; Loza Herrera et al., 2015).

1.3.8. Indicadores de la variabilidad climática

El incremento sustancial de gases de efecto invernadero tales como el CO₂, a causa de las emisiones por de las actividades humanas, es el principal contaminante que produce el efecto invernadero (NASA, 2022a). En consecuencia, viene afectando los ecosistemas por la alteración de los patrones de temperatura y precipitación a nivel local y regional. Por ello, como indicadores de la variabilidad climática son considerados la temperatura y precipitación. En ese sentido, según el Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático (IPCC), en su sexto informe de febrero de 2022, señalan que la temperatura actual a nivel global para el año 2022 ascendió a 1.09 °C desde 1850 y se prevé que la temperatura alcanzará 1.5 °C a un corto plazo. Por ende, en algunos territorios aumentará la intensidad y frecuencia de precipitación y en otros se presentará sequías prolongadas (IPCC, 2022).

1.3.9. Efectos de la variabilidad climática

En el sexto informe sobre cambio climático del IPCC, se describe que los efectos derivados de la variabilidad climática están relacionados con los fenómenos meteorológicos extremos, como las olas de calor, lluvias torrenciales, sequías, inundaciones costeras e incendios forestales, contribuyendo en la degradación de ecosistemas a escala global, pérdida de especies y recursos naturales, desintegración de las capas de hielo y riesgos para la salud humana. En mucho de los casos, son relativamente grandes e irreversibles que generan grandes pérdidas económicas (IPCC, 2022).

1.3.10. Vulnerabilidad de los bofedales a la variabilidad climática

Los bofedales al ser muy dependientes del recurso hídrico y por los riesgos asociados por la variabilidad climática son considerados ecosistemas frágiles. A pesar de cumplir funciones de almacenamiento de CO₂ atmosférico, están siendo afectados por efectos del cambio climático (MINAM, 2005, 2019). Autores como (Gutiérrez, 2018; Valeria, 2017) coinciden que el incremento de temperatura y la reducción de la precipitación han alterado en la reducción de la cobertura de los bofedales. Sin embargo, (J. García & Willems, 2015) sostiene que los bofedales ubicados cerca a los nevados incrementan sus áreas, ya que existe mayor provisión de agua por la desintegración de capas de hielo como parte del incremento de la temperatura.

1.3.11. Monitoreo de los bofedales mediante teledetección

Según, (Chuvieco, 2008; Veneros et al., 2020) la teledetección o detección remota es una técnica que permite obtener información a distancia de cualquier tipo de objeto que esté situado en la superficie terrestre. La cual, se lleva a cabo mediante un sensor, que normalmente está situado sobre un satélite artificial y tiene la capacidad de recoger la información espacial de manera rápida y viable de cualquier tipo de objeto, área o fenómeno, ya que la forma de obtención de información se da mediante el registro de energía electromagnética emita o reflejada por el objeto. Por ello, es importante contar con una fuente de energía para suministrar luz al área de estudio. Para lo cual, contamos con la energía del sol para sensores pasivos, mientras los sensores activos poseen su propia energía. En ese sentido, existe una interacción entre el sensor, objeto de estudio y una fuente de energía para la obtención de información sobre la tierra. Por ello, resultan ser una herramienta indispensable por su precisión y por demandar menor recurso económico, ya

que nos permite monitorear y realizar seguimiento en una serie de tiempo de los diversos ecosistemas.

1.3.12. Componentes de la teledetección

De acuerdo con (Chuvieco, 2008; Labrador et al., 2012) señalan que el sistema de teledetección está compuesto por:

- Fuente de energía: la que ilumina o proporciona de energía electromagnética hacia la superficie terrestre, la cual puede ser emitido por la luz del sol o por el sensor.
- Superficie terrestre: es la que recibe la señal energética y reflejan hacia el sensor según sus características físicas del entorno.
- Sistema sensor: es la que se encuentra al borde del satélite para recoger y grabar la energía reflejada por la superficie terrestre, para que posteriormente sea enviada directamente al sistema de recepción.
- Sistema de recepción – comercialización: Es donde se almacena la información enviada del sensor y los datos son convertidos en imágenes digitales y grabadas en formatos apropiados, para luego realizar las correcciones respetivas y proceder a la distribución a los interesados.
- Interprete: es el especialista en el tema que convierte las imágenes digitales en información temática acerca los objetos detectados por el sensor, con la finalidad de facilitar la comprensión o evaluación del problema de estudio.
- Usuario final: es el encargado de examinar la información temática extradida de las imágenes digitales, para revelar nuevas informaciones y así lograr un mejor conocimiento del área de estudio y que además ayudan a identificar los problemas ambientales que ocurren en el área de estudio (Figura N° 2).

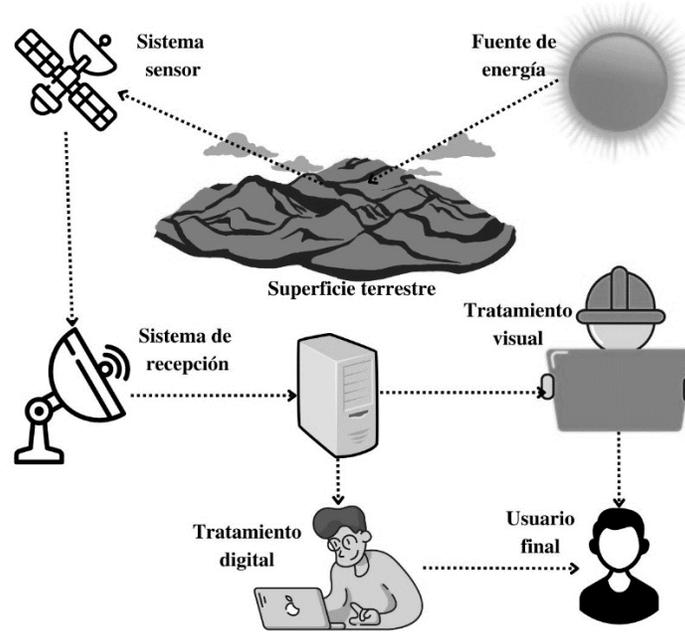


Figura N° 2. Componentes de la teledetección.

Fuente: Adaptado de Chuvieco, (2008)

1.3.13. Satélites para la teledetección

En la actualidad son muchos los satélites que orbitan la tierra para el monitoreo de los recursos naturales y el medio ambiente. Entre las cuales, destaca el programa Landsat desarrollado por la Administración de Aeronáutica y el espacio (NASA, por sus siglas en inglés) y el servicio geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Esta misión cuenta con una serie de satélites que fue puesta en funcionamiento desde el año 1972 y hasta la actualidad fueron lanzados 9 satélites, siendo los sensores TM, ETM+, OLI/TIRS y OLI-2/TIRS-2 los más destacados (USGS, 2018, 2022). Y las imágenes digitales de cada uno de los sensores, están disponibles en plataformas web, tales como USGS Earth Explorer (<https://earthexplorer.usgs.gov/>), Glovis (<https://glovis.usgs.gov/app>) y LandViewer (<https://eos.com/landviewer/>). Cabe precisar, que los sensores operativos en la actualidad son ETM+, OLI/TIRS y OLI-2/TIRS-2.

Por otro lado, tenemos a los satélites de la misión Sentinel del programa Copernicus de la Agencia Espacial Europea (ESA), liderada por la Comisión Europea (CE) y hasta la actualidad son 6 misiones de Sentinel que orbitan la tierra, cada una de ellas encaminadas a rubros específicos, de las cuales Sentinel 2 MSI está destinada al monitoreo de la superficie terrestre, como la cobertura vegetal, usos de tierra, aguas, cauces navegables, zonas costeras, así como tomar datos sobre emergencias. La cual está compuesto por 13 bandas espectrales y su resolución espacial varía de 10-20-60 metros. Asimismo, las plataformas web que almacenan sus imágenes digitales son USGS Earth Explorer, Glovis y Landviewer, de las cuales se puede descargar gratuitamente.

1.3.14. Resolución de los sensores remotos

Todo tipo de sensor instalado sobre una plataforma poseen características diferentes, las cuales determinan la calidad de la imagen satelital. Entre ellos, se tiene a la resolución espacial, temporal, radiométrica y espectral. Cabe mencionar, que la resolución espacial mide la distancia lineal de un píxel, la cual constituye la unidad mínima de una imagen digital y de este depende la posibilidad de detección de los objetos pequeños. Mientras tanto, la resolución temporal es un intervalo de tiempo necesario para volver a visitar la misma zona y adquirir la información, normalmente está expresado en días. Por otro lado, la resolución radiométrica comprende número de bits (dígitos binarios) que emplea el sensor para cuantificar la radiancia en diferentes tonalidades de gris (se expresa en niveles digitales), por ejemplo, una imagen con una resolución radiométrica de 8 bits contiene 256 tonalidades de gris o niveles digitales. Por ende, a mayor número del nivel digital, el sensor podrá captar la información con mayor precisión. Por último, la resolución espectral expresa la detección de algún objeto a una longitud de onda específica dentro del

espectro electromagnético (Calle & Salvador, 2012; Labrador et al., 2012). A continuación, en la tabla N° 2 se describe la resolución de algunos de los sensores.

Tabla N° 2. Resolución de sensores TM, OLI/TIRS, OLI-2/TIRS-2 y MSI

Tipo de sensor	Resolución espacial (metros)	Resolución temporal (días)	Resolución radiométrica (bits)	Resolución espectral
Landsat 5 TM	30 para VIS/NIR* 120 para thermal	16	8	Espectro visible a Infrarrojo térmico
Landsat 8 OLI/TIRS	30 para VIS/NIR* 100 para thermal 15 para PAN**	16	16	Espectro visible a Infrarrojo térmico
Sentinel 2 MSI	10 para VIS 20 para NIR/SWIR***	5	12	Espectro visible a Infrarrojo de onda corta

Nota: VIS/NIR* (espectro visible/ Infrarrojo), PAN** (Imagen pancromática) y NIR/SWIR*** (espectro infrarrojo/ onda corta infrarroja). Fuente (ESA, s.f.; USGS, 2018, 2022).

1.3.15. El espectro electromagnético en la teledetección

Según (NASA, 2013) afirma que el espectro electromagnético está conformado por regiones espectrales tales como rayos gamma, rayos X, rayos ultravioletas, luz visible, luz infrarroja, microondas y ondas de radio, como puede apreciarse en la Figura N° 3. En la cual, se expresan las radiaciones electromagnéticas en términos de energía, longitud de onda y frecuencia. En ese sentido, toda fuente de energía que transfiere una cantidad de energía hacia la superficie terrestre se da mediante radiación electromagnética, la cual es transportada por ondas electromagnéticas a diferentes longitudes de onda. Así como, la energía procedente del sol es irradiada a la superficie terrestre logrando abarcar todo el espectro electromagnético desde rayos cósmicos hasta ondas de radio, los mismos que viajan a una velocidad constante de luz $c = 299.792 \text{ Km/s}$ (Ferramola et al., 2006). Por consiguiente, las regiones espectrales o también denominados bandas espectrales más empleados en teledetección por la tecnología actual comprenden el espectro visible, infrarrojo y microondas, (Chuvienco, 2008).

- **Espectro visible:** este es la única radiación electromagnética que puede ser percibido por la visión humana, la cual está compuesto por 3 bandas RGB (rojo, verde y azul) y tienen una longitud de onda que va desde los 0.4 μm (micrómetros) a 0.7 μm , que equivale a 400 nm (nanómetros) y 700 nm respectivamente (Chuvienco, 2008; NASA, 2013).
- **Espectro infrarrojo:** Esta región del espectro electromagnético se ubica después de la región visible y se divide a su vez en 3 categorías: Infrarrojo próximo (NIR), de longitud de onda 0.7 μm a 1.3 μm ; Infrarrojo medio (SWIR) con una longitud que va desde los 1.3 μm a 3 μm e Infrarrojo térmico (TIR) cuya longitud de onda va de 3 μm a 100 μm . las cuales se caracterizar por presentar longitudes de onda corta y por consiguiente regiones de alta energía (Chuvienco, 2008; Labrador et al., 2012).
- **Microondas:** esta región se ubica después del espectro infrarrojo y se caracterizan por presentar longitudes de ondas más largas que oscilan entre 1mm a 1m, este tipo de espectros es empleados por sensores activos como el RADAR, ya que sus ondas largas ayudan a discriminar las cubiertas de nubosidad, siendo eficiente para áreas geográficas muy lluviosas (Chuvienco, 2008; Labrador et al. 2012).

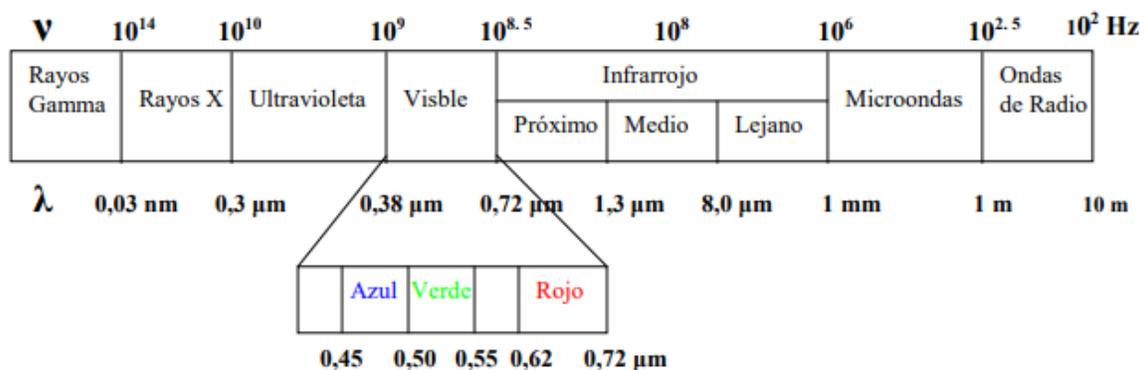


Figura N° 3. Espectro electromagnético.

Fuente (Graciani et al., 2011).

1.3.16. Firma espectral para cobertura vegetal

Es la curva que describe una cantidad de energía reflejada de un objeto a una longitud de onda hacia el espacio. Las cuales, son captadas por el sistema sensor y permiten tener una visión directa de las características de las diferentes coberturas de la superficie terrestre. Por ende, cada cobertura tiene una firma espectral diferente por su reflectividad. En ese sentido, la cobertura vegetal por la presencia de la clorofila en su componente absorbe la luz visible en especial la luz roja, mientras la luz infrarroja es reflejada de manera significativa, por ello es posible distinguir la vegetación de cualquier otra cobertura, como puede apreciarse en la Figura N° 4 (Corrales & Ochoa, 2014; ESA, 2022; Labrador et al., 2012).

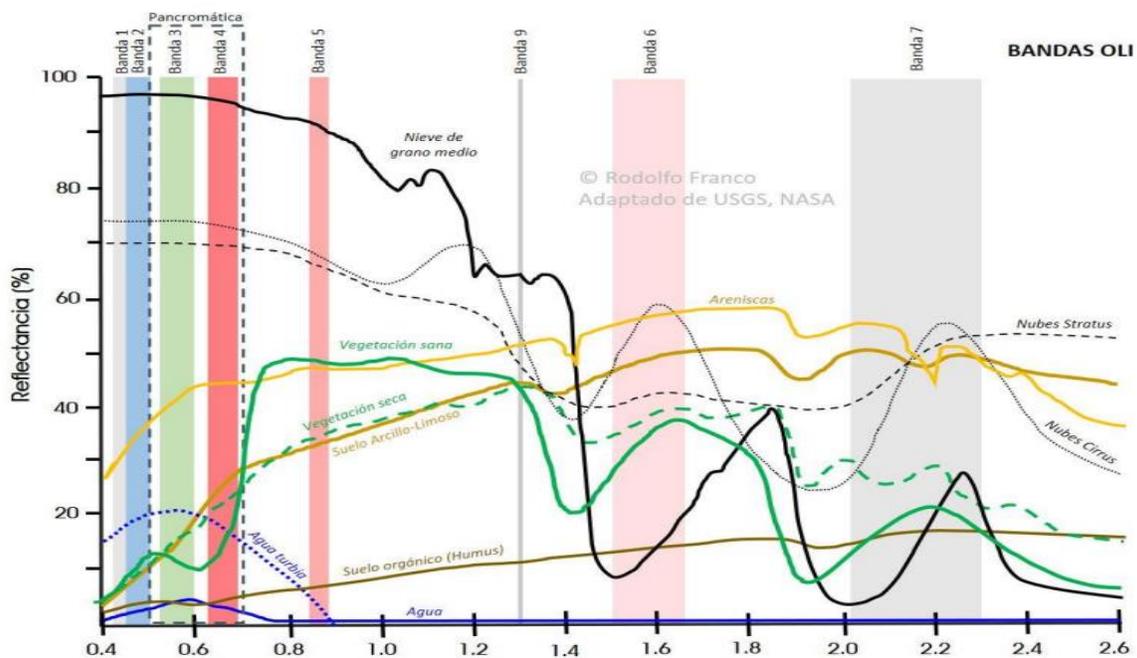


Figura N° 4. Firmas espectrales para diferentes coberturas.

Fuente (Rodolfo, 2017).

1.3.17. Combinación de bandas espectrales

Las bandas espectrales contenidas en las imágenes digitales de cualquier tipo de satélites suelen combinarse de diversas maneras, dependiendo a las características que debe distinguirse en la imagen. Las cuales, son ajustadas al espectro visible mediante algoritmos matemáticos para que pueda ser distinguido por el ojo humano. Ya que muchos de los sensores recogen información de espectros infrarrojos que no puede ser visible para visión humana. Para ello, se debe generar un solo imagen a partir de todas las bandas espectrales, con la excepción de las bandas térmicas del espectro infrarrojo (EOS, 2021; Ormeño, 2006; Santana & Salas, 2007). Por ello, en la Tabla N° 3 se describe la combinación de bandas espectrales de los sensores TM, ETM+, OLI/TIRS, OLI-2/TIRS-2 y MSI.

Tabla N° 3. *Combinación de bandas espectrales para distinguir cobertura vegetal*

Landsat 5TM	Landsat 8 OLI/TIRS y 9 OLI- 2/TIRS-2	Sentinel 2 MSI	Aplicación
3-2-1	4-3-2	4-3-2	Permite describir el color natural de los diferentes tipos de coberturas
4-3-2	5-4-3	8A-4-3	Esta combinación de bandas es muy popular y practica para hacer estudios de vegetación, estado de crecimiento de cultivos y análisis de diferentes tipos de suelos.
4-5-3	6-5-4	8A-11-4	Para estudios de análisis de vegetación
4-5-1	5-6-2	8A-11-2	Para estudios de vegetación saludable y estrés en las plantas

Nota: Fuente: (EOS, 2021)

1.3.18. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)

El NDVI es un índice muy utilizado para el análisis y monitoreo de la vegetación, cuyo valor oscila de -1 a 1. La cual fue formulada por Rouse et al. (1974) como se cita en (Ormeño, 2006), y está dada por la diferencia entre la máxima absorción de radiación en la banda roja a causa de los pigmentos de clorofila y la máxima reflexión en la banda

infrarroja cercano (NIRc) debido a la presencia del agua en la estructura celular de la hoja, siendo expresado en la siguiente fórmula:

$$NDVI = \frac{\rho NIRc - \rho RED}{\rho NIRc + \rho RED}$$

Donde:

ρNIR = representa la banda del infrarrojo cercano

ρRED = representa la banda roja

1.3.19. Modelo digital de elevación (MDE)

Es una forma de representar la elevación de un terreno, la cual está constituido por celdas o píxeles que proporciona información de altitud en la que se encuentra cualquier punto en el terreno. En ese sentido, en la actualidad se cuenta con múltiples satélites que proporcionan dicha información. Entre las cuales, destaca el Shuttle Radar Topography Misión (SRTM) de la NASA con una resolución espacial de 30 y 90 metros. Además, Light Detection And Ranging (LiDAR) es una de las técnicas más moderas y avanzadas en la actualidad que emplea luz láser de la región infrarroja. Por otra parte, ALOS PALSAR de la Exploración Aeroespacial de Japón (JAXA), proporciona dicha información con una resolución espacial de 12.5 m. Sin embargo, la información disponible comprende entre 2006 al 2011 (Lu, 2007; Olaya, 2014; Ormeño, 2006). Dichas imágenes del modelo digital de elevación sus muy necesarios a la hora de realizar la delimitación de cuencas, subcuencas o microcuencas hidrográficas.

1.3.20. Modelos de representación espacial

- **Ráster:** las imágenes satelitales y los modelos de elevación digital almacenan información en modelo ráster y formato GeoTIFF. Dicho modelo se basa en una matriz de celdas o píxeles de una determinada dimensión, a la cual le corresponde

un valor digital donde se almacena la información de una variable y de este depende la resolución espacial de la imagen satelital, como puede observarse en la Figura N° 5 (Chuvieco, 2008; Cofrep et al., 2017; Ormeño, 2006).

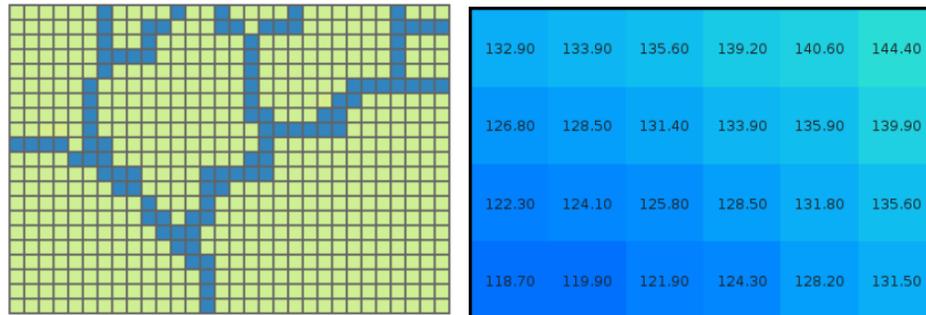


Figura N° 5. Modelo de representación ráster

Fuente: (ESRI, 2021; Olaya, 2014).

- **Vectorial:** son entidades geométricas conformados de puntos, líneas y polígonos que representan entidades espaciales y suelen ser muy útiles para la modelización del espacio geográfico. Además, pueden representar la información del modelo ráster, es decir la frontera de la entidad que la representa (Olaya, 2014; Ormeño, 2006), como se señala en la Figura N° 6.

Primitiva	Entidad espacial	Representación	Atributos																		
Puntos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>ID</th> <th>Altura</th> <th>Diámetro Normal</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>1</td> <td>17,5</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>2</td> <td>22</td> <td>45,6</td> </tr> <tr> <td>3</td> <td>15</td> <td>27,2</td> </tr> <tr> <td>4</td> <td>19,7</td> <td>36,1</td> </tr> <tr> <td>...</td> <td></td> <td></td> </tr> </tbody> </table>	ID	Altura	Diámetro Normal	1	17,5	35	2	22	45,6	3	15	27,2	4	19,7	36,1	...		
ID	Altura	Diámetro Normal																			
1	17,5	35																			
2	22	45,6																			
3	15	27,2																			
4	19,7	36,1																			
...																					
Líneas			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Ancho máx(m)</th> <th>Cajado máx(m)</th> <th>Longitud(km)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>15</td> <td>4,3</td> <td>35</td> </tr> <tr> <td>6,3</td> <td>3,9</td> <td>5,2</td> </tr> </tbody> </table>	Ancho máx(m)	Cajado máx(m)	Longitud(km)	15	4,3	35	6,3	3,9	5,2									
Ancho máx(m)	Cajado máx(m)	Longitud(km)																			
15	4,3	35																			
6,3	3,9	5,2																			
Polígonos			<table border="1"> <thead> <tr> <th>Superficie(km)²</th> <th>Profundidad máx(m)</th> </tr> </thead> <tbody> <tr> <td>31494</td> <td>1637</td> </tr> </tbody> </table>	Superficie(km) ²	Profundidad máx(m)	31494	1637														
Superficie(km) ²	Profundidad máx(m)																				
31494	1637																				

Figura N° 6. Modelo de representación vectorial.

Fuente: (Olaya, 2014)

1.3.21. Tratamiento de las imágenes satelitales

- **Corrección Geométrica:** muchas veces, las imágenes digitales requieren ser reproyectadas a un sistema de referencia de coordenadas. Por ende, este proceso conlleva la transformación de las coordenadas de la imagen de tal forma que coincida de manera precisa al área de estudio.
- **Corrección radiométrica:** Los sensores de los satélites capturan la información de la cobertura de la tierra a partir de la intensidad de la radiación electromagnética reflejada de la superficie de la tierra, dicha información de intensidad es transformada y almacenada en números digitales (ND) y dependiendo de las características del sensor varia, por ejemplo, una imagen de 8 bits posee 256 números digitales (Aguilar et al., 2014). En ese sentido, para la corrección radiométrica los valores de números digitales de cada banda se deben transformar a valores de radiancia que varía de 0 a 1. Para ello, se realiza mediante la metodología propuesta por (Chander et al., 2009) que está dada por las siguientes ecuaciones:

$$L_{\lambda} = \left(\frac{L_{máx\lambda} - L_{min\lambda}}{Q_{calmax} - Q_{calmin}} \right) (Q_{cal} - Q_{calmin}) + L_{min\lambda} \dots \text{Para Landsat 1 al 7}$$

$$L_{\lambda} = ML \times Q_{cal} + AL \dots \text{Para Landsat 8}$$

Donde:

L_{λ} = Radiancia espectral en el sensor

$L_{máx\lambda}$ = Es radiancia espectral máxima de la banda, obtenido del metadato (RADIANCE_MAXIMUM_BAND_X, donde x es el número de la banda).

$L_{mín\lambda}$ = Es radiancia espectral mínima de la banda, obtenido del metadato (RADIANCE_MINIMUM_BAND_X, donde x es el número de la banda).

Q_{cal} = Valor del píxel discretizado y calibrados del producto estándar (valor digital DN)

$Q_{calmáx}$ = Valor máximo del píxel que corresponde al valor ND

$Q_{calmín}$ = Valor mínimo del píxel que corresponde al valor ND

M_L = Factor multiplicativo de reescalamiento para cada banda (Proporcionado en base de datos RADIANCE_MULT_BANDA_X).

AL = Factor aditivo de reescalamiento para cada banda (Proporcionado en base de datos RADIANCE_ADD_BANDA_X).

- **Corrección atmosférica:** Es un proceso que se le aplica a las imágenes digitales con la finalidad de eliminar el efecto de los aerosoles, ya que las partículas presentes en la atmosfera dispersan la radiación evitando al sensor captar la energía intrínseca. A causa de ello, algunos píxeles de la imagen están completamente en sombra o en color negro absoluto. (Aguilar et al., 2014; Congedo, 2017). Por ello, mediante la metodología Dark Object Subtraction (DOS1) es posible realizar las correcciones atmosféricas de la imagen digital mediante las siguientes ecuaciones propuestas por (P. Chávez, 1996; Sobrino et al., 2004).

$$p_s = \frac{\pi \times (L_\lambda - L_p) \times d^2}{ESUN_\lambda \times SEN_{\theta SE}}$$

$$ESUN_\lambda = \frac{\pi \times d^2 \times RADIANCE_MAXIMUM}{REFLECTANCE_MAXIMUM}$$

$$L_p = L_{min} + L_{DOS1\%}$$

$$L_{min} = M_L \times DN_{min} + A_L$$

$$L_{DOS1\%} = 0.01 \times \frac{ESUN_{\lambda} \times SEN_{\theta SE}}{\pi \times d^2}$$

Donde:

p_s = Reflectancia de la superficie

L_{λ} = Radiancia espectral en el sensor

L_p = Efecto bruma

$ESUN_{\lambda}$ = Irradiancia media solar exo-atmosférica

θSE = Angulo de elevación del sol (es proporcionada en el metadato de la imagen satelital)

d = Distancia de sol a la tierra (es proporcionada en el metadato de la imagen satelital)

L_{min} = Radiancia que corresponde a un valor digital, para el cual la suma de todos los píxeles con valores digitales menores o iguales a 0.01%

$L_{DOS1\%}$ = Radiancia del objeto oscuro, con un valor asumido de reflectividad de 0.01.

1.3.22. Fuentes de adquisición de datos climáticos

- SENAMHI: Es el servicio Nacional de meteorología e hidrología del Perú que genera y promueve información y conocimiento acerca de la meteorología, hidrología y climatología. Por ello, registra las variables meteorológicas en todas las estaciones meteorológicas instaladas a nivel nacional y proporciona de manera oportuna y accesible a la sociedad. Y se encuentra disponible y de libre acceso en la plataforma web del SENAMHI (<https://www.senamhi.gob.pe/?&p=estaciones>).

- Datos PISCO (Peruvian interpolated data of the SENAMHI climatological and hidrological observations): El SENAMHI a través de la dirección de hidrología (DHI) desde el año 2013 ha realizado investigaciones para evaluar la calidad de diversos productos satelitales a nivel global mediante la validación con los datos obtenidos en las estaciones meteorológicas. Por ende, hoy en día Perú cuenta con información de las variables de precipitación, temperatura máxima y mínima, evapotranspiración potencial en su versión diaria y mensual a nivel nacional con una resolución espacial de grilla de 5km x 5km para el periodo de 1981 al 2016 (Aybar et al., 2017). Esta información es muy importante en zonas donde no existe estaciones meteorológicas.
- Mediante interpolación de datos – metodología Kriging: Debido a la falta de cobertura de estaciones meteorológicas en algunas áreas geográficas, se viene empleando los métodos de interpolación de datos como es el Kriging, la cual es una herramienta de interpolación geoestadístico avanzado que incluye la autocorrelación, análisis estadístico exploratorio y modelo de variogramas. Para ello se basa en la siguiente ecuación (Schloeder et al., 2001):

$$\hat{z}(s_0) = \sum_{i=1}^n \lambda_i z(s_i)$$

Donde: \hat{Z} = es el valor de pronóstico en el punto S_0 ; $Z_{(S_i)}$ = Valor medido en el punto S_i ; λ = es el peso dado por el valor observado en $Z_{(S_i)}$ y n = es el número de valores medidos.

1.3.23. Microcuenca Chicllarazo

La microcuenca Chicllarazo geográficamente está ubicado en la zona sur – central de los andes peruanos, políticamente en el departamento de Ayacucho entre las provincias de Cangallo y Huamanga, entre las coordenadas UTM WGS84 (X = 566867.70; Y = 8516320.52) de la Zona 18S con una extensión de 612.84 Km² (Anexo N° 8). Esta microcuenca tiene dos temporadas bien definidas, la temporada húmeda que comprende los meses de noviembre a marzo y la temporada seca de abril a octubre. En la temporada seca, la temperatura mínima y la precipitación descienden a sus valores mínimos y en la temporada húmeda se presentan las máxima precipitaciones (Figura N° 7) que favorecen en la recarga hídrica de los bofedales. En ese sentido, la microcuenca en la época húmeda y seca dotan de recurso hídrico a la represa Cuchoquesera para su almacenamiento y a su posterior distribución para el consumo humanos y actividades agrícolas para las provincias de Huamanga y Cangallo (CORFA, 1983). Por ende, dicha microcuenca es una pieza clave de dotación del agua, esto gracias a la capacidad reguladora de los bofedales que permiten el suministro del agua durante todo el año.

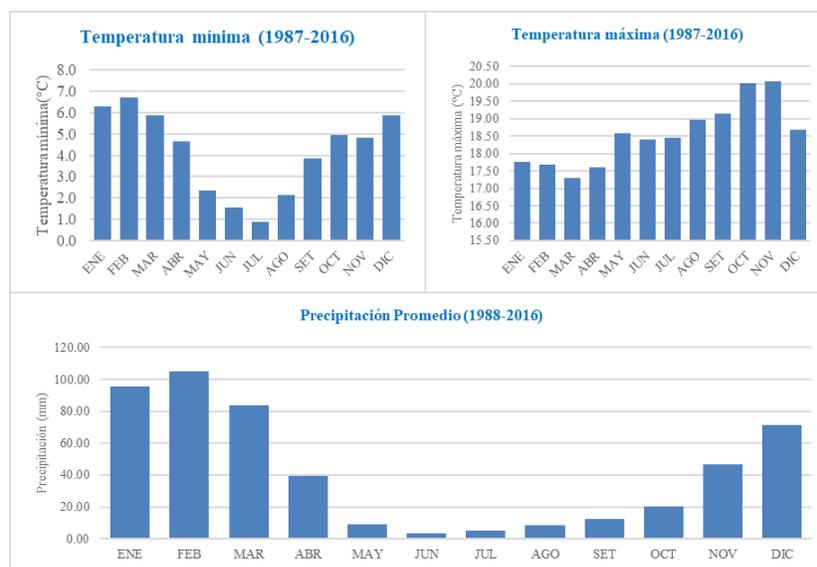


Figura N° 7. Datos climáticos de la microcuenca Chicllarazo.

1.4. Formulación del problema

1.4.1. Problema general

¿Cómo influye la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo de los distritos Chuschi y Vinchos durante el periodo de 1988-2022?

1.4.2. Problemas específicos

- ¿Cuál es la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022?
- ¿Cuál es la variabilidad de la temperatura en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?
- ¿Cuál es la variabilidad de la precipitación en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?
- ¿Cómo influye la variabilidad de la temperatura en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?
- ¿Cómo influye la variabilidad de la precipitación en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022.

1.5.2. Objetivos específicos

- Estimar la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022.
- Determinar la variabilidad de la temperatura en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- Determinar la variabilidad de la precipitación en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- Analizar la influencia de la variabilidad de la temperatura en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- Analizar la influencia de la variabilidad de la precipitación en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.

1.6.Hipótesis

1.6.1. Hipótesis general

La variabilidad climática influye de manera significativa en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.

1.6.2. Hipótesis específicas

- Existe variabilidad espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- Existe variabilidad de la temperatura en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- Existe variabilidad de la precipitación en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- La variabilidad de temperatura influye significativamente en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.
- La variabilidad de precipitación influye significativamente en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.

1.7. Justificación

Actualmente los bofedales altoandinos se enfrentan a nuevos desafíos por efectos de la variabilidad climática. Ya que, a pesar de prestar servicios esenciales de regulación de agua, almacenamiento de CO₂, regulación del microclima, provisión de agua y forraje, se ven vulnerables a efectos de la variabilidad climática y corren el riesgo a degradarse con el pasar de los tiempos (MINAM, 2019). En ese sentido, los bofedales de la microcuenca Chicllarazo al ubicarse en una zona altoandina están sometidas a alteraciones por la variabilidad climática. Con respecto a ello, son pocos los estudios que demuestran y exploran el grado de incidencia de las variables climáticas sobre la cobertura de bofedales, mucho menos en la microcuenca Chicllarazo. Por ello, el presente estudio de investigación tiene como finalidad determinar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022, la cual permitirá conocer si las variables climáticas influyen sobre la cobertura de los bofedales. Para ello, se realizará mediante los imágenes satelitales y datos de las variables climáticas de temperatura y precipitación, por ende, la influencia se determinará mediante el análisis estadístico ANOVA. Y este trabajo contribuirá en la toma de decisiones para implementar medidas de conservación de los bofedales para garantizar la disponibilidad del recurso hídrico.

CAPÍTULO II. METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

La presente investigación tiene un enfoque cuantitativo, ya que se trabajó en base a datos numéricos y análisis estadísticos. Además, es de diseño no experimental – longitudinal, ya que se realizó sin la manipulación deliberada de variables y los datos fueron recolectados en diferentes momentos o periodos en una misma muestra. Por último, es de tipo explicativo ya que permite explicar el por qué ocurre un fenómeno y en qué condiciones se manifiesta o por que se relacionan dos o más variables (Hernández et al., 2014), la cual nos permitirá determinar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de la cobertura de los bofedales.

2.2. Población y muestra (Materiales, instrumentos y métodos)

2.2.1. Población

La población de estudio comprende la cabecera de cuenca del rio cachi, conformado por las microcuencas: Chicllarazo, Apacheta, Vinchos y Paccha (Anexo N° 7). En las cuales, se evidencia la existencia de la cobertura de los bofedales a una altitud superior de 3500 m.s.n.m, y al abarcar un área geográficamente muy pequeña, las condiciones climáticas de temperatura y precipitación, así como las condiciones geográficas y topográficas son muy similares.

2.2.2. Muestra

La muestra es no probabilística de tipo intencional, ya que el investigador decidió estudiar una unidad de análisis de acuerdo a su percepción (López, 2004). En ese sentido, la muestra está conformada por la microcuenca Chicllarazo de una extensión de 612.84 Km²,

debido a que se evidencia mayor presencia de bofedales altoandinos a nivel de la cuenca del río cachi y al ser una de las microcuencas de mayor extensión superficial, ya que para un análisis espacio temporal mediante las técnicas de teledetección es más adecuado trabajar con áreas de mayor extensión por la resolución espacial de las imágenes satelitales. Por último, otra de las razones para la elección de la muestra, es debido a que conforma una de las fuentes principales de provisión de agua a la represa Cuchoquesera.

2.2.3. Materiales

- Laptop con procesador Intel SSD 1TB Core™ i5 (3.1 GHz).
- Fichas de registro de recolección de datos
- Memoria de almacenamiento de 1TB.
- Materiales de escritorio.

2.2.4. Recursos tecnológicos

- Imágenes satelitales de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2.
- Modelo digital de elevación (DEM) Alos Palsar de 12.5m.
- Datos de las variables climáticas de temperatura y precipitación.
- Plataforma USGS Earth Explorer para la descarga de imágenes satelitales
- Plataforma de SENAMHI y SENAMHI HSR PISCO para la descarga de datos climáticos.
- ArcGIS Pro versión 2.8.4
- SNAP versión 9.0
- Google Earth versión 7.3
- RStudio versión 1.4.1103
- Hojas de cálculo Excel y editor de documentos Word de Microsoft

2.2.5. Métodos

El método utilizado fue Inductivo – Deductivo, ya que permite obtener conocimiento de lo general a lo particular y viceversa, a partir de principios, leyes o definiciones universales (Rodríguez & Pérez, 2017). Ya que, desde el punto de vista del método deductivo se basó en modelos matemáticos para la corrección de imágenes satelitales y la clasificación espectral mediante índice de NDVI de la cobertura bofedal. Mientras tanto, mediante el método inductivo se establecieron una relación numérica entre los valores obtenidas del sensor (variabilidad espacial del bofedal) y datos climáticos para conocer la influencia entre dichas variables (Chuvieco, 2008).

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos

2.3.1. Técnicas de recolección de datos

Se basó en la observación directa no experimental de imágenes satelitales y datos climáticos, para ello se adquirieron de plataformas digitales, tales como USGS Earth Explorer (imágenes satelitales de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2), SENAMHI HSR PISCO (datos climáticos para los años de 1988 -2016), SENAMHI (datos climáticos para los años de 2017-2022) y ASF ALASKA (el modelo digital de elevación). Cabe precisar, que las imágenes satelitales fueron adquiridas para la temporada seca (de abril a agosto) debido a la poca presencia de la nubosidad. Por ende, también los datos climáticos fueron procesados para la temporada seca, para trabajar ambas variables en la misma temporada.

2.3.2. Instrumentos de recolección de datos

Como parte de la técnica de observación directa no experimental de imágenes satelitales y datos climáticos, se empleó como instrumento fichas de registro, tales como:

- Ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales (Anexo N° 2)

- Ficha de registro de adquisición de datos climáticos (Anexo N° 3)
- Ficha de registro de la variabilidad de la cobertura de los bofedales (Anexo N° 4).

2.3.3. Procedimiento

El proceso metodológico empleado en la presente investigación es tal y como se detalla en la Figura N° 8.

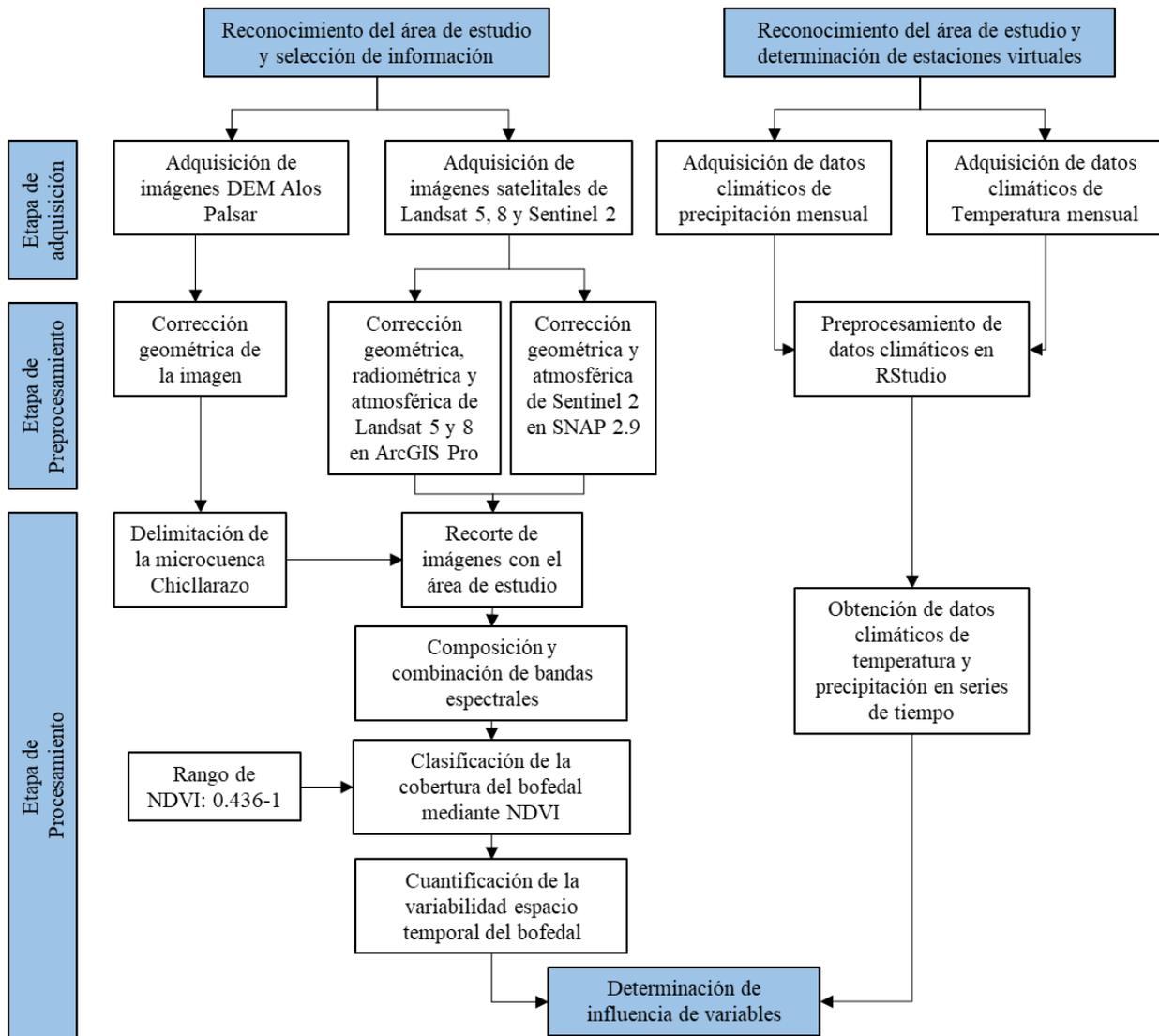


Figura N° 8. Proceso metodológico para elaboración de la investigación

i. Etapa de reconocimiento del área de estudio y selección de información:

consistió en el reconocimiento de la microcuenca Chicllarazo mediante los

sistemas de información geográfica y mapas cartográficos secundarios, siendo las bases principales para la selección de información espacial de imágenes satelitales y datos de las variables climáticas. Cabe precisar, que en esta etapa se determinó las estaciones virtuales para la adquisición de datos climáticos del producto grillado PISCO (1988-2016). Además, debido a la poca disponibilidad de estaciones meteorológicas en el área de estudio, se trabajaron con estaciones meteorológicas cercanas al ámbito de estudio para realizar la interpolación y adquirir la data climática para el periodo del 2017 al 2022.

- ii. Adquisición de la información:** Una vez reconocida el área de estudio se procedió a la adquisición de imágenes del modelo digital de elevación (DEM) de Alos Palsar de la página AFS ALASKA (<https://search.asf.alaska.edu/>). Mientras tanto, las imágenes satelitales de la misión Landsat (sensores TM y OLI) y Sentinel 2 (MSI) fueron adquiridas de la página USGS EARTH EXPLORER (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Cabe mencionar, que las imágenes descargadas de la misión Landsat fueron de un nivel de procesamiento L1TP de tipo T1 y las de misión Sentinel a nivel 1C. Por último, los datos climáticos de temperatura máxima, temperatura mínima y precipitación en su versión mensual para el periodo de 1988 al 2016 fueron adquiridas del producto grillado PISCO de SENAMHI. Mientras tanto, para los años de 2017 al 2022 se emplearon data climática interpolada de 8 estaciones meteorológicas tales como: Lircay, La quinua, Pampa Cangallo, Pampas, San Pedro de Cachi, Santa cruz de Hospico, Vilcashuamán y Huayllapampa.
- iii. Etapa de preprocesamiento:** Consistió en la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica de las imágenes satelitales de la misión Landsat y

Sentinel. Por ende, para la corrección geométrica se realizó la reproyección al sistema de referencia WGS84 Zona 18S, y para la corrección radiométrica de la misión Landsat se empleó la metodología propuesta por (Chander et al., 2009) y la corrección atmosférica mediante la metodología DOS1 propuesta por (Chávez, 1996 y Sobrino et al., 2004). Y en base a las ecuaciones propuestas por dichos autores, se procedió a automatizar los procesos de corrección mediante el Model Builder en ArcGIS Pro, como se muestra en la Figura N° 9. Además, se realizó un Mosaico por cada año, ya que el área de estudio comprende dos imágenes de Path/Row de 005/069 y 006/069. Mientras tanto, las imágenes de la misión Sentinel fueron corregidas atmosféricamente en el programa SNAP 2.9 mediante la herramienta *Sen2cor*.

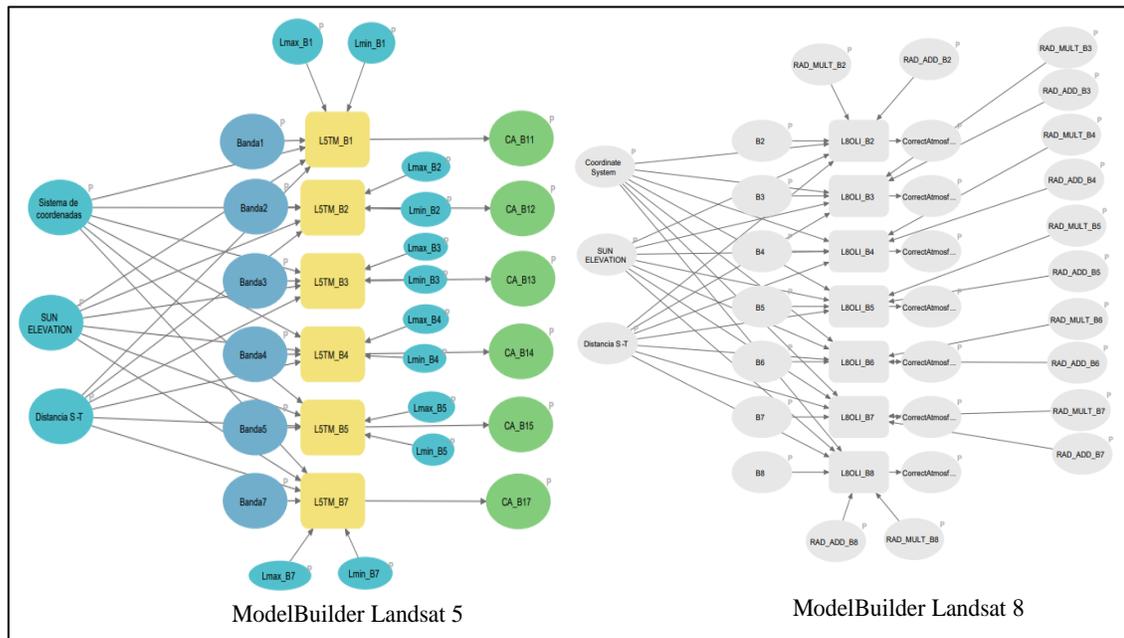


Figura N° 9. ModelBuilder para la corrección geométrica, radiométrica y atmosférica Landsat 5 y 8.

Por otro lado, los datos climáticos adquiridos en formato netCDF del producto grillado PISCO para los años de 1988 a 2016 fueron procesados en

RStudio para extraer los datos por cada estación virtual y convertir de formato para la visualización y edición en hojas de cálculo de Excel, para ello se emplearon librerías tales como: *sp*, *raster* y *ncdf4*. En la Figura N° 10 se describe el script para realizar el proceso.

```
# instalar paquetes
install.packages("sp")
install.packages("raster")
install.packages("ncdf4")

# activar libreria
library(sp)
library(raster)
library(ncdf4)

# Agregar los datos Nc
# PISCO diario tiene datos desde 01/01/1981 hasta 01/01/2016 - Peru
raster_pp <- brick("D:/SIG/TESIS/Estaciones virtuales/PP.nc") # Datos mensuales
raster_Tmax <- brick("D:/SIG/TESIS/Estaciones virtuales/Tmax.nc") # Datos diarios
raster_Tmin <- brick("D:/SIG/TESIS/Estaciones virtuales/Tmin.nc") # Datos diarios

# Visualizacion de datos
plot(raster_Tmin[[1]],xlab = "Longitud", ylab = "Latitud",
      main = "Precipitación del PERU 01/01/1981 - PISCO") #

# Agregar estacion shapefile
Estacion <- shapefile("D:/SIG/TESIS/Estaciones virtuales/salida/estaciones virtuales.shp")
plot(Estacion, add=T, col= "red", pch = 20, cex = 0.1)

# extraer los valores Precipitacion
puntos_Estacion_pp <- extract(raster_pp[[1]],Estacion,cellnumbers = T)[,1]
datos_estacion_pp <- t(raster_pp[puntos_Estacion_pp])
colnames(datos_estacion_pp) <- as.character(Estacion$Name)
datos_estacion_pp
```

Figura N° 10. Script para extraer datos climáticos de PISCO por cada estación virtual.

Además, para la obtención de datos climáticos para los años de 2017 al 2022, se realizó la interpolación de datos con las 8 estaciones mencionadas en la etapa de adquisición, para ello se empleó la metodología Kriging universal debido a su efectividad al emplear procedimientos geoestadísticos avanzados. La cual, se desarrolló en ArcGIS Pro ya que el software cuenta con la herramienta Kriging para realizar el proceso, el resultado de la interpolación se puede observar en la Figura N° 11.

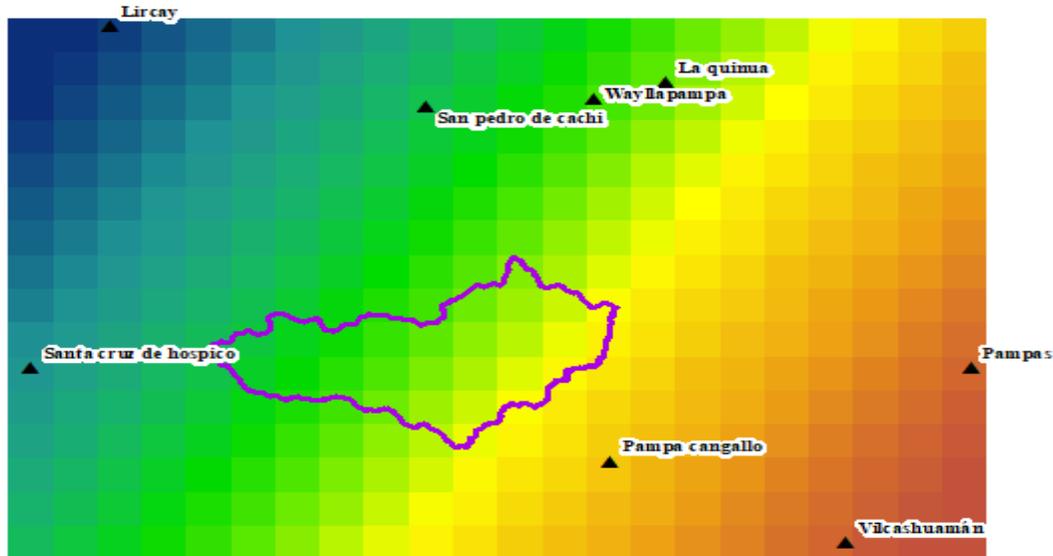


Figura N° 11. Interpolación Kriging de precipitación acumulada para el año 2022.

- iv. **Etapas de procesamiento:** Consistió en la delimitación de la microcuenca Chicllarazo a partir del modelo digital de elevación Alos Palsar mediante la metodología Pfasterter recomendada por la Autoridad Nacional del Agua (ANA). Para lo cual, se generó un ModelBuilder para automatizar el proceso empleando herramientas Toolboxes tales como: *Fill*, *Flow Direction*, *Flow Accumulation*, *Snap pour point*, *watershed* y *Raster to polygon* (Figura N° 12).

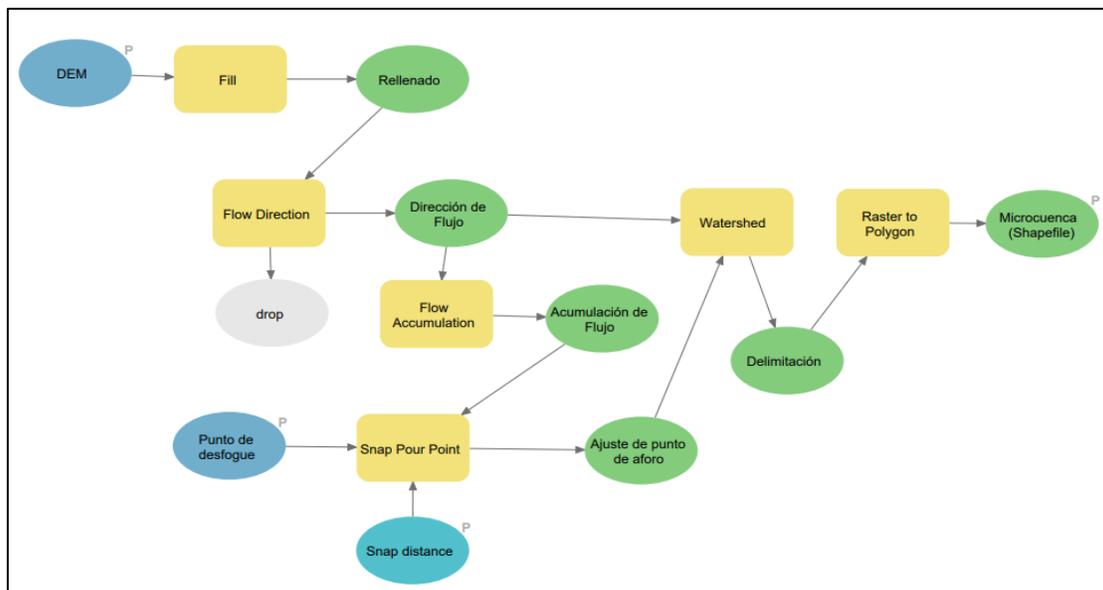


Figura N° 12. ModelBuilder para la delimitación de la microcuenca Chicllarazo.

Por otro lado, se realizó la composición, combinación y clasificación de la cobertura del bofedal a partir del índice de NDVI a un rango de 0.436-1, ya que a este rango los bofedales se encuentran en un estado sano y además permite diferencias de otras coberturas. Para ello se emplearon las bandas infrarrojas y rojas de los sensores TM, OLI y MSI previamente corregidas, en base a dicho rango se procedió a calcular el área de la cobertura de los bofedales para los años de 1988, 1990, 1992, 1994, 1995, 1998, 2001, 2003, 2006, 2008, 2010, 2014, 2017, 2019 y 2022 de la temporada seca (mayo a agosto) y además se determinó la tasa de cambio anual porcentual usando la ecuación propuesta por (FAO, 1996).

$$TCA = \left[\left(\frac{S2}{S1} \right)^{1/n} - 1 \right] \times 100$$

Donde: TCA: Tasa de cambio anual; S2 = superficie de la fecha 2, S1=Superficie de la fecha 1, n= es el número de años entre las dos fechas.

Por último, a partir de los datos PISCO y de interpolación Kriging se realizó los cálculos para obtener la precipitación acumulada y máxima, temperatura mínima y máxima para la temporada seca para los años mencionados en el párrafo anterior.

- v. **Determinación de influencia de variables:** Luego de haber obtenido los datos de la variabilidad de la cobertura de los bofedales y los datos climáticos de temperatura y precipitación se realizó el análisis estadístico ANOVA de una vía para conocer la influencia de las variables climáticas sobre la dinámica espacio temporal de la cobertura de los bofedales.

2.3.4. Validez y confiabilidad de información

Para este aspecto se basó en el juicio de expertos con conocimientos en temas de sistemas de información geográfica. Por ende, los instrumentos a ser utilizados, tales como la ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales, ficha de registros de adquisición de datos climáticos y ficha de registro de la variabilidad de la cobertura de los bofedales, fueron validados por los siguientes expertos:

- Mg. José Luis Zuloaga Obregón
- Ing. Fredy Rojas Ávila

2.3.5. Análisis de datos

Para determinar la tendencia de las variables climáticas se realizó mediante la prueba de Mann Kendall. Y para determinar la distribución normal de los datos se realizó mediante la prueba de Shapiro Wilk debido a que los datos analizados fueron menores a 50, y para determinar la influencia de las variables climáticas sobre la cobertura de los bofedales se realizó mediante la prueba paramétrica ANOVA de una vía, en función a las siguientes variables:

- Área de la cobertura de los bofedales y precipitación acumulada
- Área de la cobertura de los bofedales y precipitación máxima
- Área de la cobertura de los bofedales y temperatura máxima
- Área de la cobertura de los bofedales y temperatura mínima.

Cabe mencionar, que todos los análisis estadísticos se realizaron mediante el software de lenguaje de programación RStudio.

2.3.6. Aspectos éticos de la investigación

En la presente investigación se respeta los derechos de autor. Por ello, cada información extraída de artículos, libros, tesis, reglamentos, páginas web, entre otros, contiene las citas y las referencias correspondientes bajo los lineamientos de la 6^{ta} edición del estilo de redacción APA. Además, la información obtenida procedió de fuentes confiables, por ende, la información extraída se utilizó tal y como lo señala cada autor. En ese sentido, los resultados obtenidos en esta investigación son reales y confiables y puede servir como una guía orientativa por tomadores de decisiones acerca de la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos.

CAPÍTULO III. RESULTADOS

En este trabajo de investigación se empleó en total 28 imágenes satelitales, de las cuales, 27 de ellos fueron de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2 para el análisis de la variabilidad de cobertura de bofedales y uno de Alos Palsar para la delimitación de la microcuenca Chicllarazo (Tabla N° 4).

Tabla N° 4. *Cantidad de imágenes satelitales empleadas para análisis espacial*

Tipo de satélite	Sensor	Cantidad de imágenes utilizadas
Alos Palsar	Palsar	1
Landsat 5	TM	22
Landsat 8	OLI/TIRS	2
Sentinel 2	MSI	3
Total		28

Fuente: Elaboración propia

En ese sentido, una vez delimitado la microcuenca se obtuvo un área superficial de 612.84 Km², con una altitud mínima y máxima de 3313 y 4949 msnm respectivamente. Siendo el 61% del total del área ubicado por debajo de los 4100 msnm y el 39% por encima de dicha altitud. Además, en función al grillado del producto PISCO se determinó 6 estaciones virtuales con 5 km de alcance para extraer los datos climáticos (Figura N° 13).

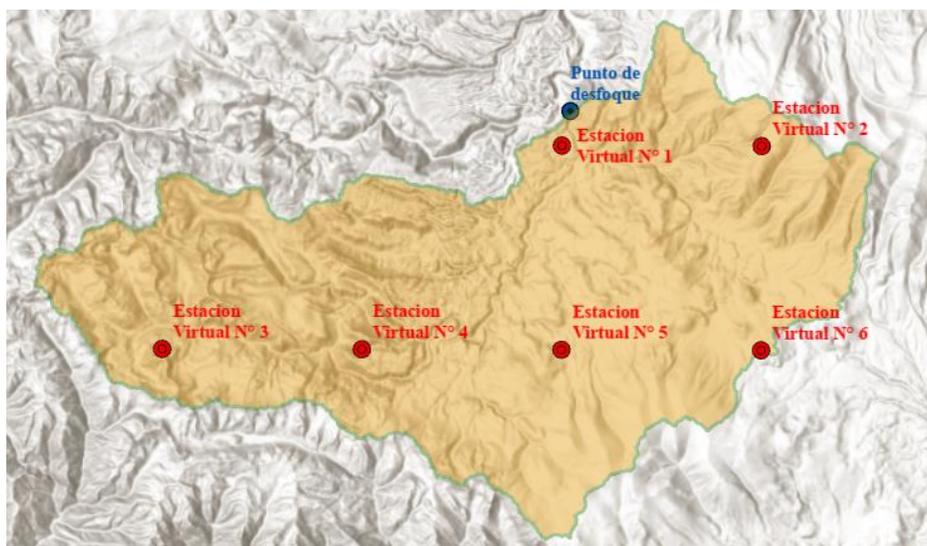


Figura N° 13. Microcuenca Chicllarazo y estaciones virtuales del producto PISCO

Por otro lado, mediante las imágenes satelitales de Landsat 5, Landsat 8 y Sentinel 2, se determinó el índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de la microcuenca para los años 1988, 1990, 1992, 1994, 1995, 1998, 2001, 2003, 2006, 2008, 2010, 2014, 2017, 2019 y 2022, por ende, en la Figura N° 14 se presenta algunos de los índices de NDVI del periodo de estudio.

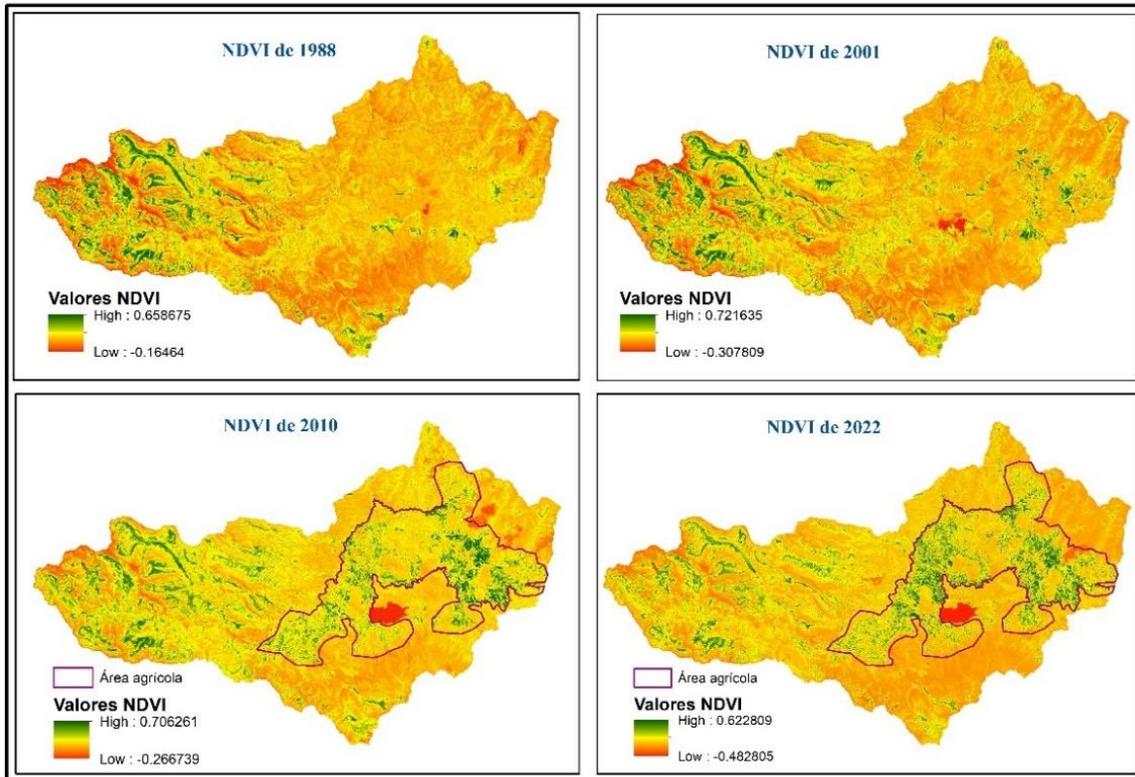


Figura N° 14. Índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI) de 1988, 2001, 2010 y 2022.

Dichos índices de NDVI calculados para diferentes series de tiempo fueron clasificadas en un rango de 0.436 a 1 empleador por (J. García et al, 2016; Meza y Díaz, 2014) para determinar la variabilidad de los bofedales, dado que a este rango cuentan con una cobertura vegetal más sana y además permite diferencias de otras coberturas vegetales. Por otra parte, es importante señalar, que no se tomaron en cuenta los índices de NDVI de áreas agrícolas de la microcuenca, ya que previamente se identificaron con imágenes de alta resolución e información bibliográfica (GESAAM, 2015).

Es así que la Figura N° 15 describe el comportamiento de la variabilidad de la cobertura de los bofedales, siendo los años de 1990, 2014, 2017 y 2020 con mayor extensión y los años de 1992, 1995, 2010 y 2022 con menor extensión superficial.

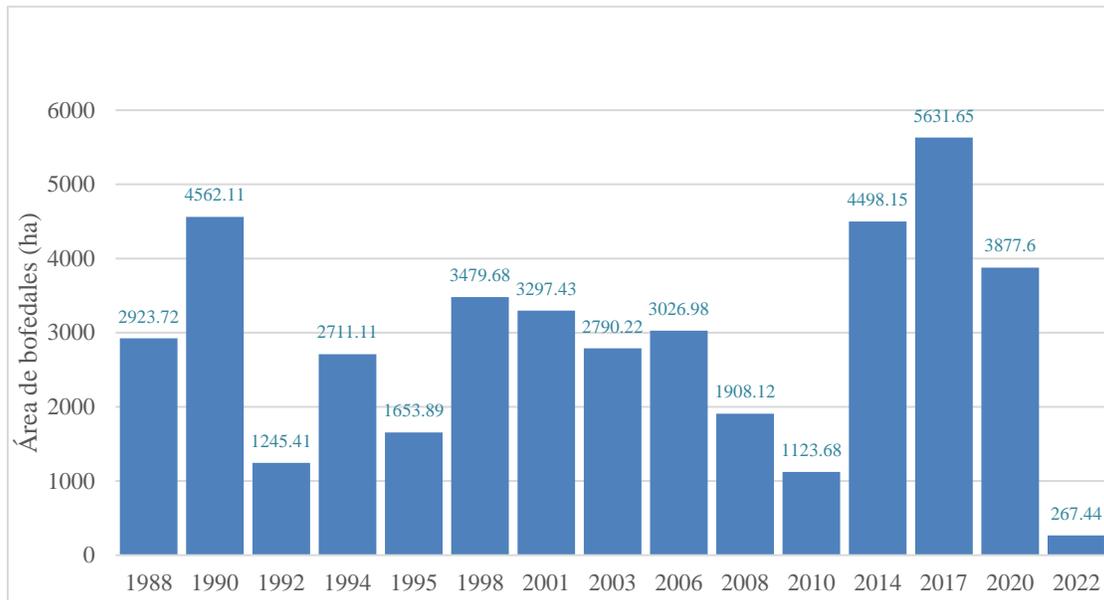


Figura N° 15. Área superficial de los bofedales en series de tiempo (1988-2022).

Además, la Tabla N° 5 describe la tasa de cambio anual (TCA) de la cobertura de bofedales en diferentes series de tiempo, comprendidos desde 1988 al 2022.

Tabla N° 5. Tasa de cambio anual en porcentaje de la cobertura de los bofedales.

	1988	1990	1992	1994	1995	1998	2001	2003	2006	2008	2010	2014	2017	2020	2022
1988	0.0	24.9	-19.2	-1.3	-7.8	1.8	0.9	-0.3	0.2	-2.1	-4.3	1.7	2.3	0.9	-6.8
1990		0.0	-22.9	-12.2	-18.4	-3.3	-2.9	-3.7	-2.5	-4.7	-6.8	-0.1	0.8	-0.5	-8.5
1992			0.0	47.5	9.9	18.7	11.4	7.6	6.5	2.7	-0.6	6.0	6.2	4.1	-5.0
1994				0.0	-39.0	6.4	2.8	0.3	0.9	-2.5	-5.4	2.6	3.2	1.4	-7.9
1995					0.0	28.1	12.2	6.8	5.6	1.1	-2.5	5.4	5.7	3.5	-6.5
1998						0.0	-1.8	-4.3	-1.7	-5.8	-9.0	1.6	2.6	0.5	-10.1
2001							0.0	-8.0	-1.7	-7.5	-11.3	2.4	3.4	0.9	-11.3
2003								0.0	2.8	-7.3	-12.2	4.4	5.1	2.0	-11.6
2006									0.0	-20.6	-21.9	5.1	5.8	1.8	-14.1
2008										0.0	-23.3	15.4	12.8	6.1	-13.1
2010											0.0	41.4	25.9	13.2	-11.3
2014												0.0	7.8	-2.4	-29.7
2017													0.0	-11.7	-45.6
2020														0.0	-73.7
2022															0.0

Nota: La TCA para el periodo de 1988 al 2022 es de -6.8%

Por otro lado, la temperatura máxima mostró un comportamiento ascendente, y se identificó un incremento de 1.37 °C desde 1988 al 2022 (Figura N° 16). Además, la prueba estadística de Mann Kendall (Figura N° 17) describe una tendencia positiva moderada de dicha variable ($p < 0.05$, $\tau = 0.565$).

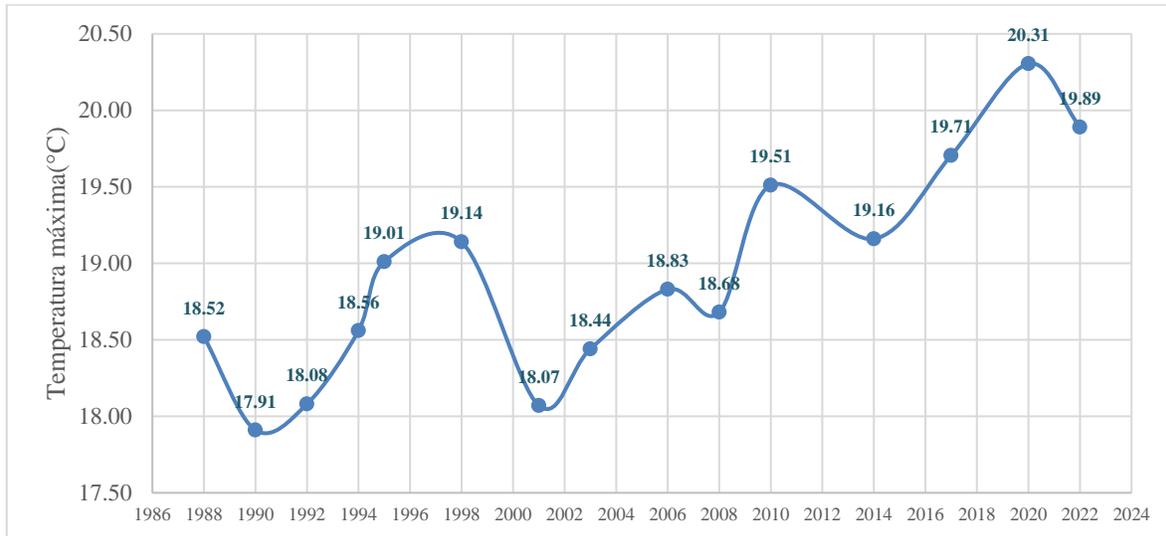


Figura N° 16. Temperatura máxima (°C) 1988-2022.

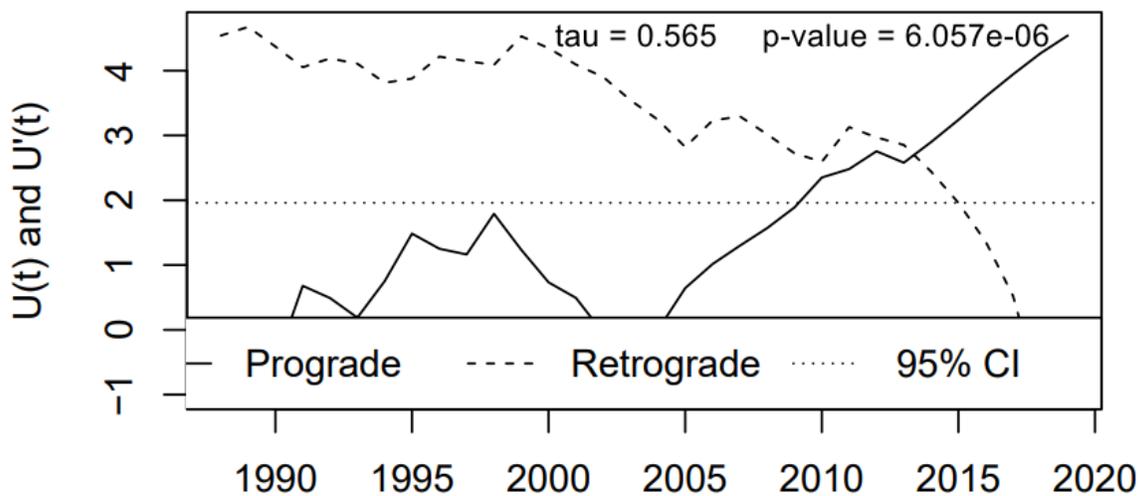


Figura N° 17. Prueba estadística de Mann Kendall de temperatura máxima.

Sin embargo, la temperatura mínima no mostró una tendencia ($p > 0.05$ y $\tau = 0.157$) (Figura N° 19). No obstante, la variación es de 1.07 °C de 1988 al 2022 (Figura N° 18).



Figura N° 18. Temperatura mínima (°C) 1988-2022.

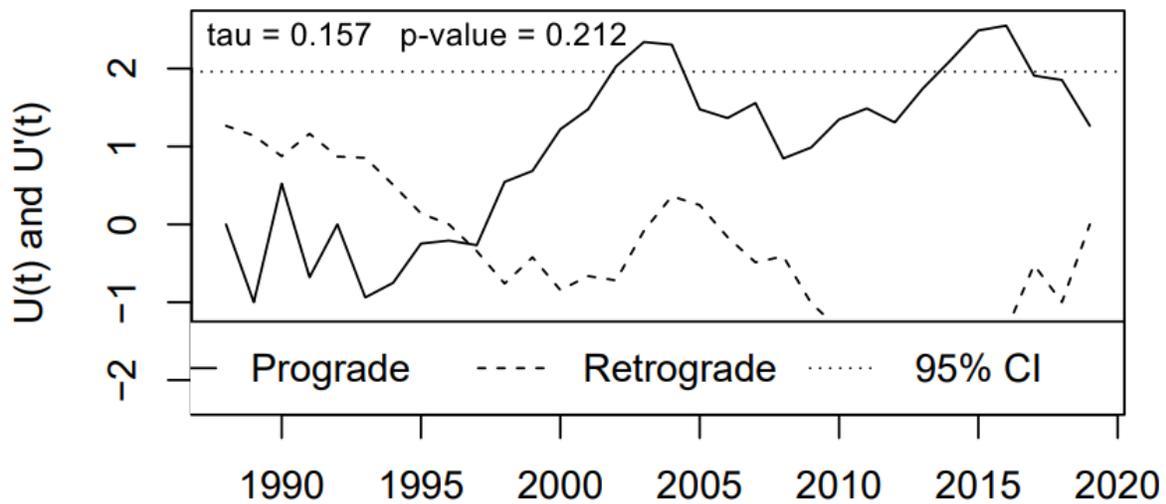


Figura N° 19. Prueba estadística de Mann Kendall de temperatura mínima.

Para el caso de la precipitación acumulada, según la prueba estadística de Mann Kendall se comprueba que a $p > 0.05$ no hubo tendencia (Figura N°21). Y la diferencia de precipitación de 1988 al 2022 fue de solo 0.75 mm (Figura N° 20).

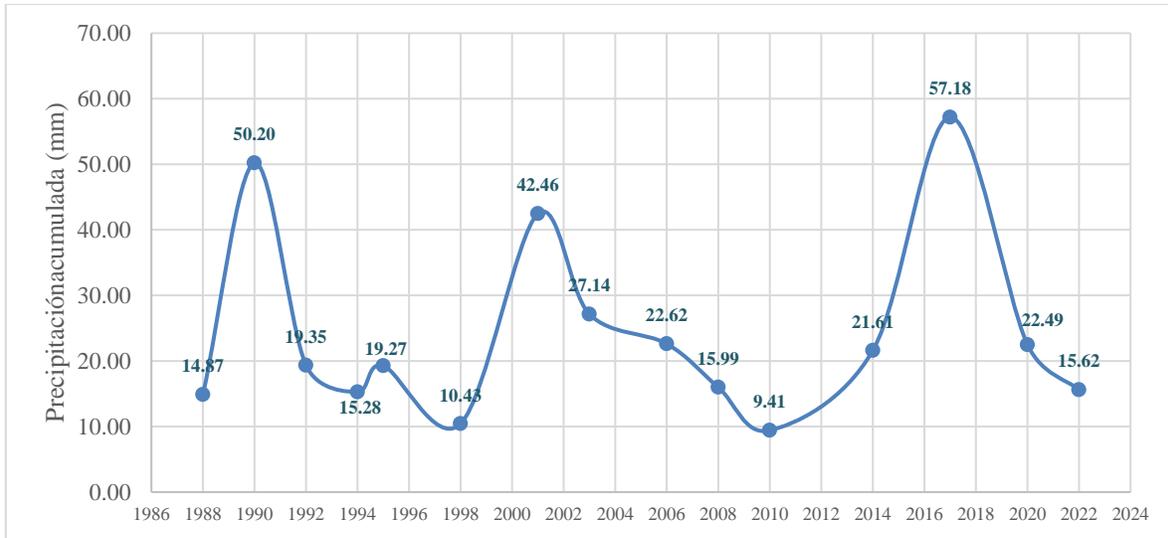


Figura N° 20. Precipitación acumulada (mm) 1988-2022.

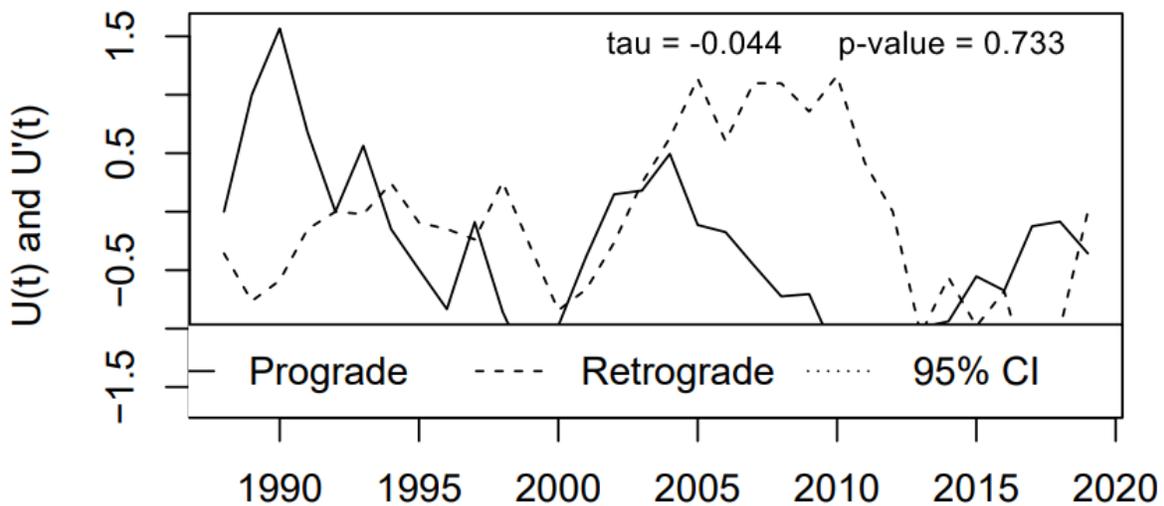


Figura N° 21. Prueba estadística de Mann Kendall de precipitación acumulada.

En cambio, para la precipitación máxima, la prueba estadística de Mann Kendall describe una tendencia negativa baja a $p < 0.05$, $\tau = -0.270$ (Figura N° 23), ya que la precipitación máxima descendió a 5,92 mm en el 2022 (Figura N° 22).

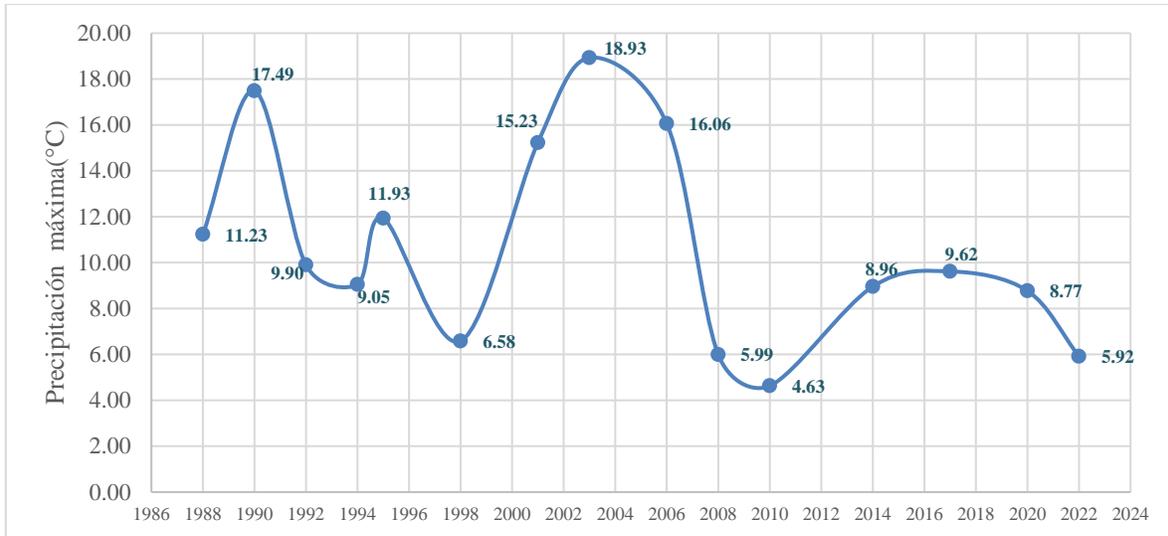


Figura N° 22. Precipitación máxima (mm) 1988-2022.

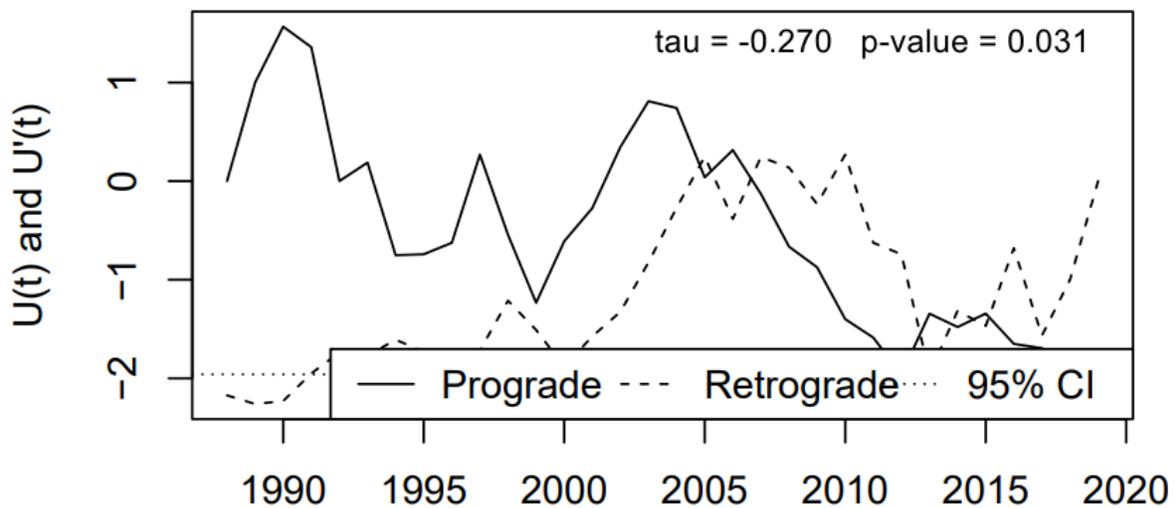


Figura N° 23. Prueba estadística de Mann Kendall de precipitación acumulada.

En función a los datos presentados anteriormente de las variables climáticas y de la variabilidad de la cobertura de bofedales, se realizó la prueba de normalidad de Shapiro-Wilk, debido a que el número de datos analizados fueron menores a 50, para ello, se establecieron las siguientes hipótesis:

H0: Los datos analizados siguen una distribución normal

HA: Los datos analizados no siguen una distribución normal

Por consiguiente, todas las variables evaluadas mostraron un nivel de significancia de $p\text{-valor} > 0.005$ (Figura N° 24), por lo tanto, se acepta la hipótesis nula (H_0), es decir que los datos tienen una distribución normal.

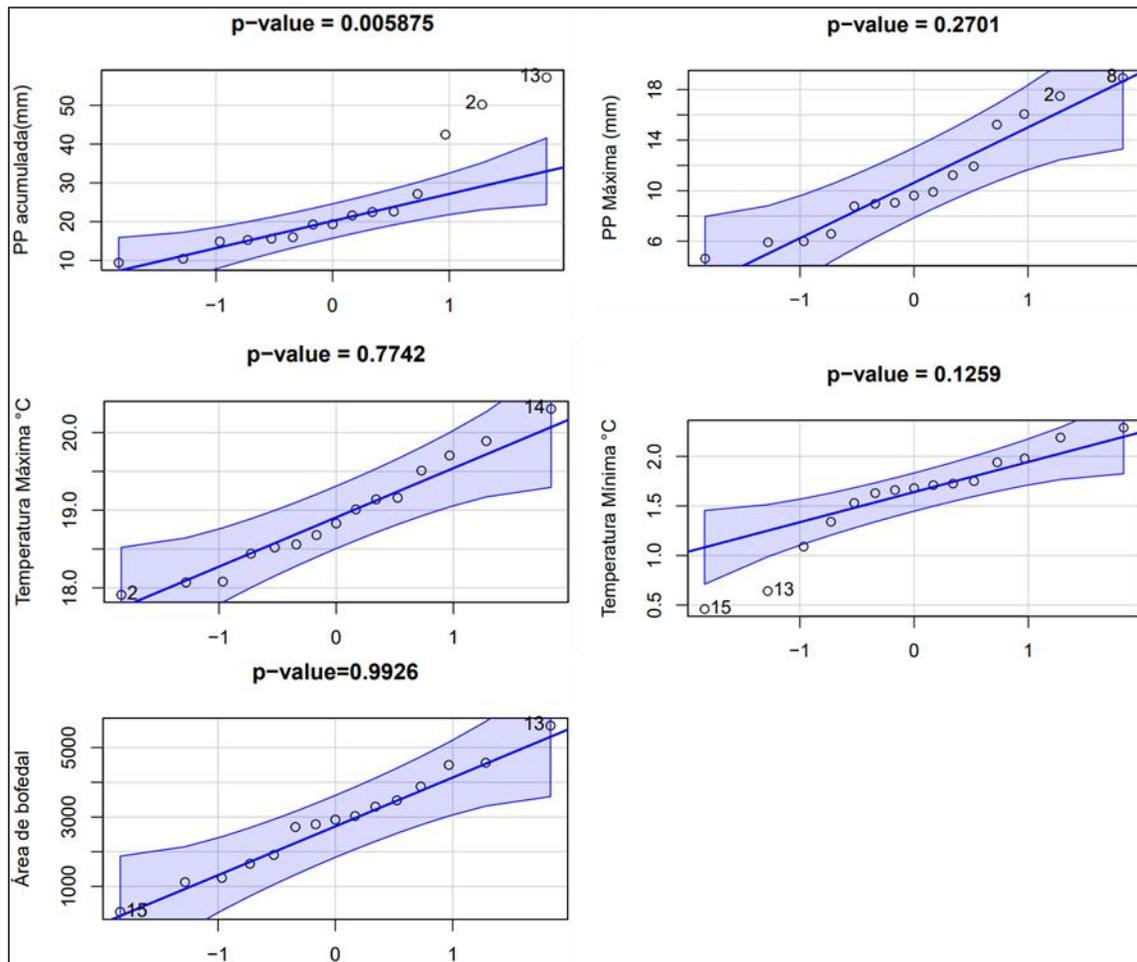


Figura N° 24. Prueba de normalidad Shapiro-Wilk de las variables de estudio

Una vez comprobado la prueba de normalidad, se procedió con el análisis de ANOVA de una vía, para ello, se establecieron una hipótesis nula (H_0) y una hipótesis alterna (H_A), donde:

H_0 : indica que las medias poblacionales son iguales, es decir que las variables climáticas no influyen en la variabilidad de la cobertura de los bofedales.

HA: indica que al menos dos medias poblacionales son distintas, es decir las variables climáticas influyen sobre la variabilidad de la cobertura de los bofedales.

Por ende, los resultados obtenidos para la precipitación acumulada descritos en la Tabla N° 6 tiene un nivel de significancia de p-valor < 0.05 , por lo tanto, se acepta la hipótesis alterna, es decir que la precipitación acumulada si influye en la variabilidad de la cobertura de los bofedales.

Tabla N° 6. *Análisis ANOVA de precipitación acumulada*

	gl	Suma cuadrática	Media cuadrática	F valor	Significancia
Precipitación acumulada	1	12639967	12639967	10.49	0.00646 **
Residual	13	15658365	1204490		

Nota: Salida de software RStudio, 2022.

Sin embargo, para la precipitación máxima la significancia es de p-valor > 0.05 , por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, en donde dicha variable no influye sobre la variabilidad de la cobertura de los bofedales (Tabla N° 7).

Tabla N° 7. *Análisis ANOVA de precipitación máxima*

	gl	Suma cuadrática	Media cuadrática	F valor	Significancia
Precipitación máxima	1	3158546	3158546	1.633	0.224
Residual	13	25139786	1933830		

Nota: Salida de software RStudio, 2022.

Por otra parte, las variables de temperatura máxima y mínima descritos en la Tabla N° 8 y Tabla N° 9 respectivamente, también tienen un nivel de significancia de p-valor > 0.05 , por lo tanto, se acepta la hipótesis nula, es decir la que temperatura máxima y mínima no influyen sobre la variabilidad de la cobertura de los bofedales.

Tabla N° 8. Análisis ANOVA de temperatura máxima

	gl	Suma cuadrática	Media cuadrática	F valor	Significancia
Temperatura máxima	1	96216	96216	0.044	0.836
Residual	13	28202115	2169393		

Nota: Salida de software RStudio, 2022.

Tabla N° 9. Análisis ANOVA de temperatura mínima

	gl	Suma cuadrática	Media cuadrática	F valor	Significancia
Temperatura mínima	1	354154	354154	0.165	0.691
Residual	13	27944178	2149552		

Nota: Salida de software RStudio, 2022.

Dado que la precipitación acumulada influye en la dinámica de los bofedales, la eta cuadrada parcial indica que a 0.44 el tamaño del efecto es grande, mientras tanto para las otras variables climáticas se evidencia muy bajo grado de efecto (Tabla N° 10).

Tabla N° 10. Eta cuadrada parcial de variables climáticas

Parámetro	η^2 parcial	IC al 95%
Precipitación acumulada	0.44	0.11-1.00
Precipitación máxima	0.11	0.00-1.00
Temperatura máxima	0.0034	0.00-1.00
Temperatura mínima	0.01	0.00-1.00

Nota: La eta cuadrada parcial (η^2 parcial), permite evaluar el tamaño el efecto, y para una ANOVA de un factor a valores mayores a 0.14 el efecto es grande (Cárdenas & Arancibia, 2014).

Asimismo, el modelo de regresión lineal simple de la precipitación acumulada en función a la variabilidad de la cobertura de los bofedales, indica que está relacionada en un 47.39% (relación moderada) y la precipitación máxima en un 11.34% (relación muy baja), tal y como se muestra en la Figura N° 25 y Figura N° 26 respectivamente.

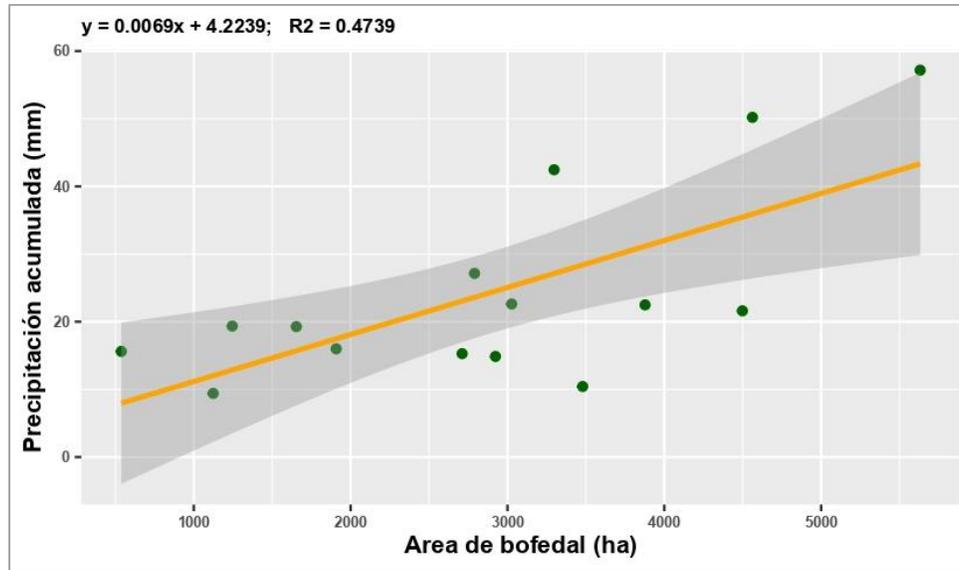


Figura N° 25. Regresión lineal de la precipitación acumulada y área de bofedal.

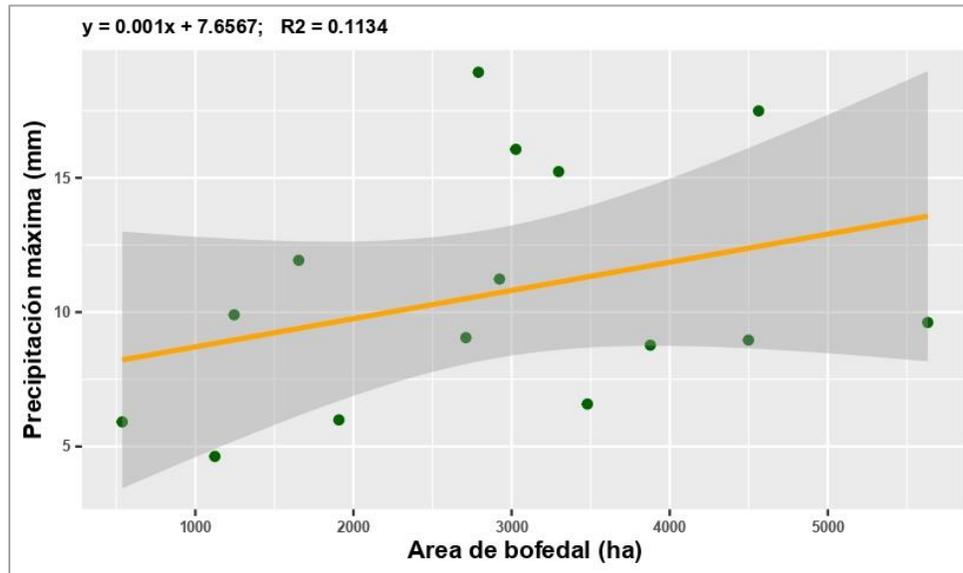


Figura N° 26. Regresión lineal de la precipitación acumulada y área de bofedal

Por ultimo, la relación lineal de la temperatura máxima y mínima es función a la variabilidad del bofedal es de 0.4% y 3.55% respectivamente, la cual es considerada como una relación nula, debido a que los valores no se ajustan a una ecuación de recta (Figura N° 27 y Figura N° 28).

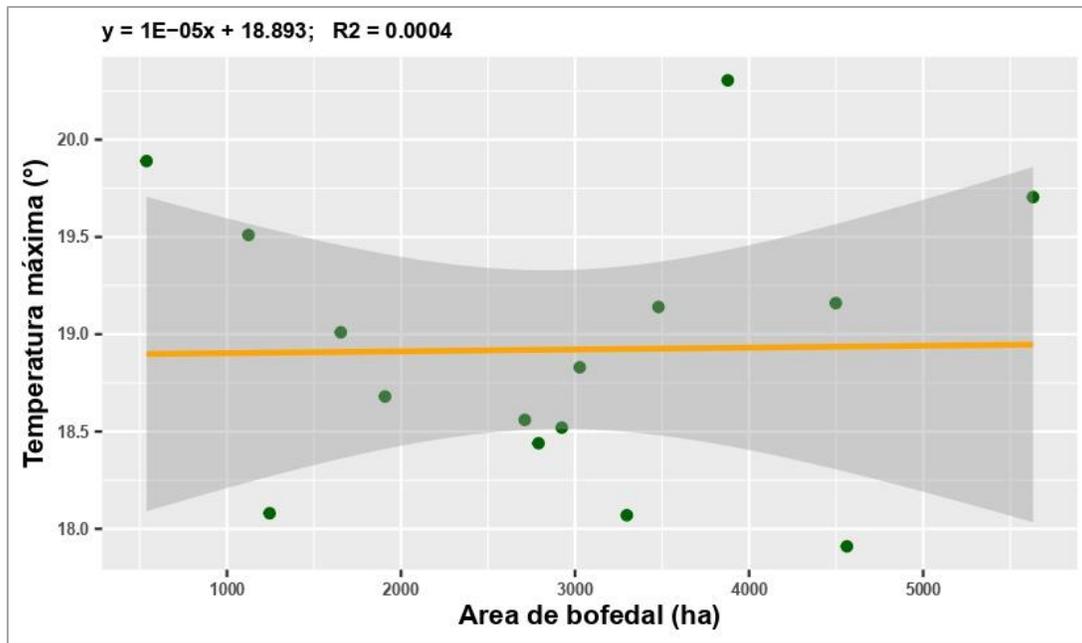


Figura N° 27. Regresión lineal de la temperatura máxima y área de bofedal

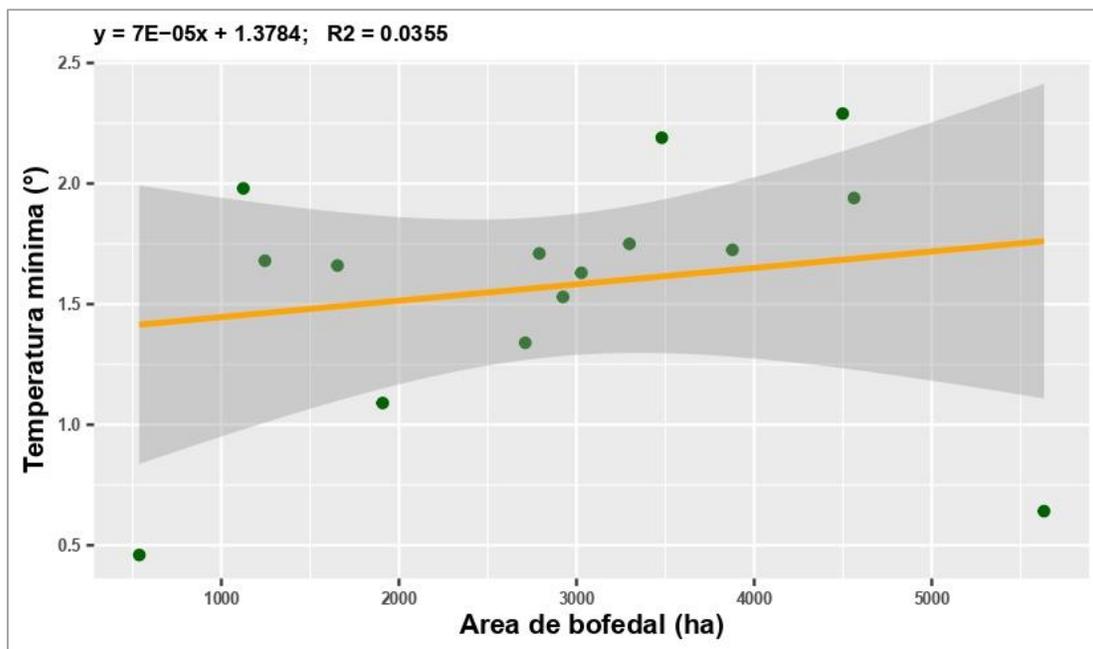


Figura N° 28. Regresión lineal de la temperatura mínima y área de bofedal

CAPÍTULO IV. DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusión

El objetivo general de esta investigación fue determinar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022, pues de acuerdo a los datos obtenidos de la prueba estadística ANOVA, se obtuvo como resultado que no todas las variables climáticas influyen en la variabilidad de la cobertura de los bofedales, de allí es importante resaltar que solo la precipitación acumulada influye de manera significativa en la variabilidad de la cobertura de los bofedales a ($p < 0.05$, $\eta^2 = 0.44$), y es el único variable que tiene una relación lineal moderada en un 47,39% ($R^2 = 0.4739$), mientras tanto, las otras variables climáticas no influyen y no guardan ninguna relación con la dinámica espacial de los bofedales. En ese sentido, investigadores tales como (Casas, 2015; E. García & Otto, 2015; Pauca et al., 2020) también indican que solo la variable precipitación guarda relación con la dinámica espacial de los bofedales, según el coeficiente de determinación de $R^2 = 0.69$, $R^2 = 0.68$ y $R^2 = 0.85$ respectivamente, debido a que son altamente dependientes de la precipitación. Y la razón por la que los valores del coeficiente de determinación no son tan similares, probablemente obedece a las condiciones geográficas y climáticas distintas. Y de acuerdo con (Paredes, 2022) un factor muy importante son las actividades de siembra y cosecha del agua que se desarrollan en la parte alta de la microcuenca, las cuales permiten el almacenamiento, infiltración y recarga de acuíferos y bofedales, puesto que dicha actividad incide en la dotación de agua hacia los bofedales, y posiblemente este factor haya variado el valor de coeficiente de determinación R^2 .

Por consiguiente, la cobertura de los bofedales altoandinos de la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de estudio presentó una reducción de 2656.28 ha con una tasa de cambio anual de reducción del 6.8%. Además, autores como (Adauto & Willems, 2007; R. Chávez, 2015; Valeria, 2017) estimaron resultados similares de reducción de la cobertura de los bofedales con una tasa de cambio anual de reducción 8.16% (cabecera de las cuencas pampa y pisco), 2.54% (cuenca Cachi) y 5.4% (Reserva de fauna Chimborazo) respectivamente. A pesar de ello, durante los años de 1990, 1998, 2014 y 2017 (Figura N° 15) se registraron mayores extensiones de los bofedales y teniendo en cuenta los picos máximos de precipitación acumulada de la Figura la N° 20, coincide con los años de mayor precipitación acumulada durante los años de 1990 y 2017. Sin embargo, en el 2014 y 2018 no se registraron la mayor precipitación acumulada, pero si la mayor extensión de los bofedales, en este caso, posiblemente el incremento de la temperatura máxima haya incidido indirectamente debido a la recarga hídrica al bofedal a causa de la desintegración de los nevados. En cambio, durante los años de 1992, 2010 y 2022 se evidencia la menor extensión de los bofedales (Figura N° 15), la cual coincide a las menores precipitaciones registradas.

Con respecto a las variables climáticas, según la prueba de Mann Kendall se explica que la temperatura máxima tuvo una tendencia positiva con una significancia moderada ($p < 0.05$, $\tau = 0.565$), en ese sentido, la afirmación del (IPCC, 2022) sobre el incremento de temperatura superficial es verídico, ya que en la microcuenca de estudio el aumento de temperatura es de 1.37 °C desde 1988 hasta la actualidad, y como afirma (NASA, 2022a) la causa principal es el incremento progresivo de gases de efecto invernadero, tales como el CO₂. Mientras tanto, las variables tales como la temperatura mínima ($p > 0.05$, $\tau = 0.212$) así como la precipitación acumulada ($p > 0.05$, $\tau = 0.733$) no tuvieron una tendencia, pero si

hubo variaciones dentro del periodo de estudio. Y en cuanto a la precipitación máxima se evidencia una tendencia negativa pero baja a $p < 0.05$, $\tau = -0.270$.

En ese sentido, a pesar de que la temperatura máxima tuvo una tendencia moderada se estima que no tuvo influencia sobre cobertura de los bofedales, en este caso es posible que la influencia sea indirecta, ya que como menciona (R. Chávez, 2015) existe cobertura glaciar en la microcuenca Chicllarazo y de acuerdo con (Dangles & Meneses, 2014; Pauca et al., 2020), manifiestan que los bofedales son dependientes de los glaciares en la época seca, por la dotación del recurso hídrico por parte de la desintegración de los glaciares y hace que el bofedal mantenga o aumente su cobertura vegetal. Al respecto a ello (E. García & Otto, 2015) señalan que existe una relación exponencial alta ($R^2 = 0.71$) entre la acumulación de nieve y la cobertura de los bofedales. En este contexto, tomando en cuenta la Figura N° 15 y 16 se evidencia que durante los años de 1998 y 2014 hubo un incremento de la cobertura de los bofedales y de temperatura máxima, pero no de la precipitación acumulada, conforme a ello se puede afirmar que la temperatura máxima si tiene influencia. En ese sentido, tras agotarse la cobertura glaciar los bofedales tenderán a degradarse por el incremento de temperatura y más aún cuando no se evidencia la presencia de la precipitación.

Por otra parte, si bien la precipitación acumulada no tuvo una tendencia de incremento o descenso durante el periodo de estudio (Figura N° 20), la influencia de este variable obedece a las variaciones de precipitación y no a la tendencias, en ese sentido, a mayor precipitación los bofedales tenderán a incrementarse, ya que según (Dangles & Meneses, 2014; Maldonado, 2014), afirman que estos ecosistemas son muy dependientes de la precipitación o de alguna fuente de recurso hídrico, puesto que la ausencia de éste hace que el ecosistema sea muy sensible y llegue a degradarse fácilmente, puesto que la

composición vegetal que lo conforma es de tipo hidrófila que requiere presencia de agua en cantidades necesarias para desarrollarse y brindar los servicios sociales, culturales, económicos y ecológicos.

Por consiguiente, es importante resaltar la variabilidad brusca de los bofedales en el último año, puesto que los comportamientos de todas las variables climáticas en el 2022 no fueron las más favorables, ya que la temperatura máxima y mínima alcanzaron sus valores máximos, la precipitación máxima fue menor, por ende, su intensidad de precipitación fue baja y como consecuencia también la precipitación acumulada fue menor. Si bien estadísticamente la temperatura máxima, mínima y precipitación máxima no influyen en la variabilidad de la cobertura de los bofedales, probablemente la inestabilidad de dichas variables en el 2022 haya influido en la reducción drástica de los bofedales. Evidentemente la provisión del agua por parte de la precipitación fue baja y supuestamente también de los glaciares, ya que como señala (R. Chávez, 2015) últimamente se aprecia a menudo la presencia de los glaciares y es de suponerse que en el 2022 se hayan desintegrado totalmente, de allí que la dotación de agua ha sido alterada y como consecuencia los bofedales se hayan reducido muy drásticamente, más aún las altas temperaturas posiblemente hayan evaporado las aguas disponibles y las temperaturas mínimas hayan degradado a la cubierta vegetal por congelamiento. A ello sumamos la acción antrópica, tal y como señala (Maldonado, 2014), en el área de estudio se practican actividades de pastoreo de llamas, alpacas, ovinos y vacunos, las cuales se alimentan de forraje del bofedal y pudo ser uno de los factores que hayan incidido de manera violenta en el 2022.

En ese sentido, estas condiciones afectan directamente en los valores del índice de NDVI, dado que para un bofedal degradado sus valores de NDVI serán muy bajos y cercanos a -1 y no serán posibles ser detectados adecuadamente por técnicas de

teledetección, por lo que el valor del NDVI también depende del recurso hídrico, tal como lo reporta (Pauca et al., 2020) hay una relación alta entre la precipitación y bofedal de ($R^2 = 0.80$), por ende, a mayor precipitación el valor de NDVI del bofedal será alta.

4.2. Limitaciones

En esta investigación no fue posible evaluar la variabilidad de la cobertura de los bofedales en la época húmeda, ya que las condiciones climáticas por la mayor presencia de nubosidad en dicho periodo no permitieron adquirir imágenes satelitales con menor porcentaje de nubosidad, más aún por la mínima cantidad de imágenes que se dispone en cada periodo y en cada año. Asimismo, la disponibilidad de la información sobre la data climática para el periodo de estudio fue un limitante, por lo que no se cuenta con estaciones meteorológicas desde 1988 en el área de estudio, por ende, se decidió utilizar datos PISCO de 1988 al 2016 y posteriormente para el 2017 al 2022 se interpoló los datos con las estaciones meteorológicas cercanas al área de estudio, y este proceso de adquisición pudo haber incidido en los resultados tal vez de manera no favorable. Por otro lado, la resolución espacial de 30 metros de las imágenes de la misión Landsat fue una de las desventajas respecto a la resolución espacial de 10 metros de la misión Sentinel, la cual no permitió evaluar la cobertura de los bofedales con mayor precisión.

4.3. Implicancias

Esta investigación surge por la escasa información sobre la influencia de la variabilidad climática en la cobertura de bofedales. En ese sentido, de acuerdo con los resultados obtenidos, esta investigación contribuye para fortalecer los conocimientos en la comunidad científica, así como para tomadores de decisiones, tales como autoridades locales, regionales, nacionales, entidades del sector público como privado y/o cualquier

parte interesada en conocer la influencia de la variabilidad climática sobre el ecosistema para implementar actividades de mejora. En particular, las partes interesadas del ámbito de estudio, tales como el gobierno regional de Ayacucho y autoridades locales deben priorizar proyectos en la parte alta de la microcuenca para preservar la cobertura de bofedales, ya que en el 2022 la fragmentación fue muy drástica. Por ende, sus servicios esenciales se ven afectadas por la poca disponibilidad del recurso hídrico en el 2022, al mismo tiempo, pone en riesgo el acceso de agua para el consumo humano, actividades agrícolas y ganaderas.

4.4. Conclusiones

- En la investigación realizada se determinó que no todas las variables climáticas influyen en la dinámica espacial de los bofedales. Es así que solo la precipitación acumulada influye de manera significativa en la variabilidad de la cobertura de los bofedales de la microcuenca Chicllarazo.
- Se estimó una pérdida de 2656.28 ha de la cobertura bofedal hacia el 2022 con una reducción en la tasa de cambio anual de 6.8%, siendo los años 1992, 2010 y 2022 con menores extensiones superficiales.
- Se identificó un incremento de 1.37 °C de temperatura máxima con una tendencia positiva moderada ($p < 0.05$, $\tau = 0.565$), siendo el año 2020 más caloroso alcanzando los 20.31°C. Sin embargo, la temperatura mínima no mostró una tendencia ($p > 0.05$, $\tau = 0.157$) pero la variación fue de 1.07 °C de 1988 al 2022, siendo el 2022 como el año más frío alcanzando el 0.46 °C.
- La precipitación acumulada no mostró una tendencia ($p > 0.05$, $\tau = -0.044$), pero los picos máximos registrados se dieron durante los años 1990, 2001 y 2017 alcanzando los 50.20, 42.46 y 57.18 mm respectivamente. Y durante los años de 1998 y 2010 se

registró los picos mínimos de precipitación acumulada de tan solo 10.43 y 9.41 mm respectivamente. Mientras tanto, la precipitación máxima mostró una tendencia negativa baja ($p < 0.05$, $\tau = -0.270$), ya que a partir de 2008 la precipitación se presentó con menor intensidad.

- Mediante la prueba paramétrica de ANOVA se estimó que la temperatura máxima y mínima no influyen y no tienen ninguna relación lineal con la variabilidad de la cobertura superficial de los bofedales. Por ende, la variabilidad espacio temporal de dicho ecosistema no depende de estas variables climáticas.
- Además, la precipitación máxima no influye y no tiene ninguna relación lineal con la dinámica espacial de los bofedales. Sin embargo, la precipitación acumulada influye significativamente y tiene una relación lineal de 47.39% ($p < 0.05$; $\eta^2 = 0.44$; $R^2 = 0.4739$). Por ende, su dinámica espacial depende de manera significativa de la precipitación acumulada, por lo que requieren del agua en cantidades para desarrollarse adecuadamente.

4.5. Recomendaciones

- En esta investigación a causa de la presencia de nubosidad en imágenes satelitales no fue posible evaluar en la estación húmeda. Por ende, se recomienda realizar estudios en otros ámbitos geográficos para la estación húmeda, utilizando los índices de NDVI en un rango de 0.436 a 1. Y de esta manera conocer si las otras variables climáticas influyen en la dinámica espacial de los bofedales.
- Y debido a que muchos autores sustentan que la cobertura glaciar influye en la dinámica espacial de los bofedales por la desglaciación. Se recomienda realizar estudios considerando la variable la cobertura glaciar y temperatura máxima.

REFERENCIAS

- Adauto, M., & Willems, B. (2007). *Estudio de la evolución del ecosistema de bofedales de la cabecera de las cuencas pisco y pampas (Huancavelica) empleando imágenes TM y OLI*. Recuperado de: <https://repositoriodigital.minam.gob.pe/handle/123456789/505>
- Aguilar, H., Mora, R., & Vargas, C. (2014). Metodología para la corrección atmosférica de imágenes Aster, RapidEye, Spot 2 y Landsat 8 con el módulo FLAASH del software ENVI. *Revista Geográfica de América Centra*, 1(43), pp. 39-59. Recuperado de: <http://dx.doi.org/10.15359/rgac.2-53.2>
- Aquino, W., Condo, F., Romero, J., & Illaconza, R. (2018). Composición florística del distrito de Huarochirí, provincia de Huarochirí (Lima, Perú). *Arnaldoa*, 25(3), pp. 877-922. Recuperado de: <http://doi.org/10.22497/arnaldoa.253.25305>
- Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe, O. (2017). Uso del Producto Grillado PISCO de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12542/260>
- Calle, A., & Salvador, P. (2012). Revisando el concepto de resolución en teledetección. *Revista de Teledetección*, 37, pp. 74-79. Recuperado de: http://www.aet.org.es/revistas/revista37/Revista_37_Todo.pdf#page=78
- Cárdenas, J., & Arancibia, H. (2014). Potencia estadística y cálculo del tamaño del efecto en G*Power: complementos a las pruebas de significación estadística y su aplicación en psicología. *Salud & Sociedad*, 5(2), pp. 210-244. Recuperado de: <https://doi.org/10.22199/S07187475.2014.0002.00006>
- Casas, V. (2015). *Efecto de la variabilidad climática como indicador del cambio climático en el sistema productivo dependiente de los bofedales de altura* [Tesis de grado]. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. Recuperado de: <http://repositorio.umsa.bo/xmlui/handle/123456789/6875>
- Cervantes, R., Sánchez, J., Alegre, J., Rendón, E., Baiker, J., Locatelli, B., & Bonnesoeur, J. (2021). Contribución de los ecosistemas altoandinos en la provisión del servicio ecosistémico de regulación hídrica. *Ecología Aplicada*, 20(2), pp. 137-146. Recuperado de: <https://doi.org/10.21704/rea.v20i2.1804>

- Chander, G., Markham, B. L., & Helder, D. L. (2009). Summary of current radiometric calibration coefficients for Landsat MSS, TM, ETM+, and EO-1 ALI sensors. *Remote Sensing of Environment*, 113(5), pp. 893-903. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/J.RSE.2009.01.007>
- Chávez, P. (1996). Image Based Atmospheric Corrections - Revisited and Improved. *Photogrammetric Engineering & Remote Sensing*, 62(9), 1025-1036. Recuperado de: http://static1.1.sqspcdn.com/static/f/891472/15133582/1321370214637/Chavez_P.S._1996.pdf?token=z0vrMkYqCcjZKksJLZYfRnYFSRc%3D
- Chávez, R. (2015). *Inventario y variación multianual de bofedales en la cuenca alta del río Cachi, 2003 al 2013* [Tesis de grado]. Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, Ayacucho, Perú. Recuperado de: <http://repositorio.unsch.edu.pe/handle/UNSCH/2249>
- Chuvieco, E. (2008). *Fundamentos de la teledetección espacial* (3.^a ed.). Ariel. Recuperado de: https://www.u-cursos.cl/forestal/2011/1/EF016/1/material_docente/bajar?id_material=487457
- Cofrep, F., Fries, A., Cánovas, F., Oñate, F., González, V., & Cofrep, D. (2017). *Fundamentos de SIG: Aplicaciones con ArcGIS*. Recuperado de: http://siar.minam.gob.pe/puno/sites/default/files/archivos/public/docs/libro_sig.pdf
- Congedo, L. (2017). *Semi-Automatic Classification Plugin Documentation* (Versión 5.3.6.1). QGIS. Recuperado de: https://semiautomaticclassificationmanual-v5.readthedocs.io/_/downloads/es/latest/pdf/
- CORFA. (1983). *Proyecto Integral del río Cachi: estudio de factibilidad*. Recuperado de: <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1606>
- Corrales, R., & Ochoa, V. (2014). Firmas espectrales de la cobertura de la Tierra, aplicando radiometría de campo. Fase 1: Región 03 occidente de Honduras. *Revista Ciencias Espaciales*, 7(1), pp. 76-96. Recuperado de: <https://doi.org/10.5377/ce.v7i1.2527>
- Dangles, O., & Meneses, R. I. (2014). BIOTHAW: un proyecto multidisciplinario que propone un marco metodológico para el estudio de los bofedales altoandinos en un contexto de cambio climático. *Ecología En Bolivia*, 49(3), pp. 6-13. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n3/v49n3_a02.pdf

- Díaz, P. (2015). *Caracterización ecológica de los Bofedales, como hábitat vital de las Vicuñas en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo con la aplicación de herramientas de SIG y teledetección* [Tesis de Maestría]. Universidad San Francisco de Quito, Quito, Ecuador. Recuperado de: <https://repositorio.usfq.edu.ec/bitstream/23000/4102/1/112640.pdf>
- EOS. (2021, junio 18). *Bandas Del Landsat 8: Funcionamiento Y Combinaciones*. Earth Observing System. Recuperado de: <https://eos.com/es/blog/bandas-landsat-8/>
- ESA. (s. f.). *MultiSpectral Instrument (MSI) Overview*. Recuperado de: <https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/technical-guides/sentinel-2-msi/msi-instrument>
- ESA. (2022). *Firmas espectrales*. European Space Agency. Recuperado de: https://www.esa.int/SPECIALS/Eduspace_ES/SEM6DYD3GXF_0.html
- ESRI. (2021). *Cómo se representan las entidades en un ráster*. ArcGIS Desktop. Recuperado de: <https://desktop.arcgis.com/es/arcmap/latest/manage-data/raster-and-images/how-features-are-represented-in-a-raster.htm>
- FAO. (1996). Survey of tropical forest cover and study of change processes. En *Forestry Paper*.
- Farfán R, & Farfán E. (2012). *Producción de pasturas cultivadas y manejo de pastos naturales altoandinos* [Instituto Nacional de Innovación Agraria - INIA]. Recuperado de: <http://repositorio.inia.gob.pe/handle/20.500.12955/417>
- Ferramola, A. M., Sancovich, D. E., & Sancovich, H. A. (2006). Interacciones de las radiaciones electromagnéticas y especies reactivas del oxígeno sobre la piel. *Argent Dermatol*, 87, pp. 113-120. Recuperado de: <http://www.scielo.org.ar/pdf/rad/v87n2/v87n2a05.pdf>
- Flores, E., Tácuna, R., & Calvo, V. (2014). *Marco conceptual y metodológico para estimar el estado de salud de los bofedales*. Recuperado de: <http://siar.regionancash.gob.pe/documentos/marco-conceptual-metodologico-estimar-estado-salud-bofedales>
- Funes, M., & Laura, F. (2017). *Análisis del cambio multitemporal en los bofedales de la subcuenca peñas, con técnicas de percepción remota* [Tesis de grado]. Universidad

Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia. Recuperado de:
<https://repositorio.umsa.bo/handle/123456789/21133>

García, E., & Otto, M. (2015). Caracterización ecohidrológica de humedales alto andinos usando imágenes de satélite multitemporales en la cabecera de cuenca del río santa, Áncash, Perú. *Ecología Aplicada*, 14(4), pp. 115-125. Recuperado de:
<https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=34143179004>

García, J., & Willems, B. (2015). Metodología para el Estudio de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Usando Datos Imágenes de los Sensores TM, OLI a bordo de los Satélites Landsat - Caso Estudio: Bofedal Chunal, Cuenca Alta del río Chillón: Avances. *SBSR*, 1, pp. 5562-5569. Recuperado de:
<http://marte2.sid.inpe.br/col/sid.inpe.br/marte2/2015/06.15.15.59.35/doc/p1122.pdf>

García, J., Willems, B., & Espinoza, R. (2016). Mapeo de Bofedales en Cabeceras de Cuenca Mediante Imágenes de los Satélites Landsat. *INAIGEM*, 1(1), pp. 81-97. Recuperado de: <https://doi.org/10.36580/rgem.i1.81-97>

GESAAM. (2015). Diagnóstico sobre gestión del agua y del ambiente en la microcuenca del río Cachi. En *Repositorio Institucional - ANA*. Proyecto GESSAM. Recuperado de: <https://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/4609>

Graciani, S., Barco, P., & Stangaferro, J. (2011). *Principios físicos de la teledetección*. Recuperado de:
<http://www.bibliotecacpa.org.ar/greenstone/collect/facagr/index/assoc/HASHc93e.dir/doc.pdf>

Gutiérrez, Y. (2018). *Determinación de la dinámica espacial de bofedales mediante imágenes satelitales Landsat frente a escenarios del cambio climático en la cuenca del río Coata durante el período de 1984 - 2016* [Tesis de grado]. Universidad Nacional del Altiplano, Puno, Perú. Recuperado de:
<http://repositorio.unap.edu.pe/handle/UNAP/9641>

Hernández, R., Fernández, C., & Baptista, P. (2014). *Metodología de la investigación* (6.^a ed.). McGRAW-HILL / Interamericana Editores, S.A. Recuperado de:
<https://www.uca.ac.cr/wp-content/uploads/2017/10/Investigacion.pdf>

- IPCC. (2022). *Climate Change. Impacts, adaptation and vulnerability. Summary for Policymakers*. Recuperado de: https://report.ipcc.ch/ar6/wg2/IPCC_AR6_WGII_FullReport.pdf
- Labrador, M., Évora, J., & Pérez, M. (2012). *Satélites de teledetección para la gestión del territorio*. Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Aguas del Gobierno de Canarias. Recuperado de: https://www.researchgate.net/publication/259230060_Satelites_de_teledeteccion_para_la_gestion_del_territorio
- Llambí, L., Soto, A., Célleri, R., Bievre, B., Ochoa, B., & Borja. (2012). *Ecología, hidrología y suelos de páramos*. Proyecto páramo andino. Recuperado de: <https://biblio.flacsoandes.edu.ec/libros/digital/56475.pdf>
- López, P. (2004). Población muestra y muestreo. *Punto Cero*, 9(8), pp. 69-74. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1815-02762004000100012
- Loza Herrera, S., Meneses, R. I., & Anthelme, F. (2015). Comunidades vegetales de los bofedales de la Cordillera Real (Bolivia) bajo el calentamiento global. *Ecología En Bolivia*, 50(1), pp. 39-56. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v50n1/v50n1_a04.pdf
- Lu, Z. (2007). Alaska Satellite Facility ALOS PALSAR Interferometric Synthetic Aperture Radar (InSAR). *Alaska Satellite Facility*, 4(4), pp. 1-4. Recuperado de: https://asf.alaska.edu/wp-content/uploads/2019/03/asfnn_4-4.pdf
- Maldonado, M. (2014). Introducción a los bofedales de la región Altoandina Peruana. *Grupo Internacional de Conservación de Turbales*, 15(5), pp. 1-13. Recuperado de: http://mires-and-peat.net/media/map15/map_15_05_Spanish.pdf
- Meza, M., & Díaz, Y. (2014). Efecto de la variabilidad climática sobre las fluctuaciones del nivel de las aguas y actividad ganadera en humedales altoandinos. *Interciencia*, 39(9), pp. 651-658. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/339/33932147007.pdf>
- MINAM. (2005). *Ley general del ambiente 28611*. Recuperado de: <https://www.minam.gob.pe/wp-content/uploads/2017/04/Ley-N%C2%B0-28611.pdf>

- MINAM. (2019). *Guía de evaluación del estado del ecosistema bofedal*. Recuperado de: <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2020/01/GUIA-DE-EVALUACION-ESTADO-DE-ECOSISTEMA-BOFEDA.pdf>
- NASA. (2013, marzo). *Espectro Electromagnético*. Administración Nacional de Aeronáutica y Espacio. Recuperado de: <https://imagine.gsfc.nasa.gov/science/toolbox/emspectrum1.html>
- NASA. (2022a, abril). *Dióxido de carbono. Signos Vitales – Cambio Climático: Signos Vitales del Planeta*. Global Climate Change. Recuperado de: <https://climate.nasa.gov/vital-signs/carbon-dioxide/>
- NASA. (2022b, mayo 16). *Los efectos del cambio climático – Cambio Climático: Signos Vitales del Planeta*. Global Climate Change. Recuperado de: <https://climate.nasa.gov/efectos/>
- Olaya, V. (2014). *Sistemas de información geográfica*. Recuperado de: https://www.icog.es/TyT/files/Libro_SIG.pdf
- OMM. (2021, octubre 31). *Estado del clima en 2021: los fenómenos extremos y sus principales repercusiones | Organización Meteorológica Mundial*. Organización Meteorológica Mundial. Recuperado de: <https://public.wmo.int/es/media/comunicados-de-prensa/estado-del-clima-en-2021-los-fen%C3%B3menos-extremos-y-sus-principales>
- Ormeño, S. (2006). *Teledetección Fundamental* (3.^a ed.). Recuperado de: <http://pdi.topografia.upm.es/santi/download/FunTeled.PDF>
- Page, S., & Baird, A. (2016). Peatlands and Global Change: Response and Resilience. *Environment and Resources*, 41(1), pp. 35-57. <https://www.annualreviews.org/doi/pdf/10.1146/annurev-environ-110615-085520>
- Paredes, F. (2022). *Sistematización de la crianza de lagunas de agua de lluvia y prácticas agropecuarias para la disponibilidad de alimentos en la comunidad de Quispillaccta, Ayacucho en el periodo 1996-2018* [Tesis de Maestría]. Universidad Peruana Cayetano Heredia, Lima, Perú. Recuperado de: <https://repositorio.upch.edu.pe/handle/20.500.12866/11998#.Y2aFtuJa76U.mendeley>

- Pauca, A., Ramos, C., Luque, C., Talavera, C., Villasante, J., Quispe, J., & Villegas, L. (2020). Análisis espacial temporal y climático del humedal altoandino de Chalhuanca (Perú) durante el período 1986-2016. *Asociación Española de Teledetección*, 55, pp. 105-118. Recuperado de: <https://doi.org/10.4995/raet.2020.13325>
- RAMSAR. (2013). *Manual de la Convención de Ramsar* (Equipo de expertos de Ramsar, Ed.; 6.^a ed.). Recuperado de: [https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/63CDE791FF2EB4CD05257C630051708F/\\$FILE/1_pdfsam_Manual_convenci%C3%B3n_de_Ramsar_2013.pdf](https://www2.congreso.gob.pe/sicr/cendocbib/con4_uibd.nsf/63CDE791FF2EB4CD05257C630051708F/$FILE/1_pdfsam_Manual_convenci%C3%B3n_de_Ramsar_2013.pdf)
- Rodolfo, F. (2017). *Composición de Landsat en ARCGIS*. Recuperado de: https://mixdyr.files.wordpress.com/2017/06/composiciones_landsat_en-arctgis.pdf
- Rodríguez, A., & Pérez, A. (2017). Métodos científicos de indagación y de construcción del conocimiento. *Revista Escuela de Administración de Negocios*, 82, pp. 1-26. Recuperado de: <https://www.redalyc.org/pdf/206/20652069006.pdf>
- Santana, L., & Salas, J. (2007). Combinación de bandas óptima para la discriminación de sabanas tropicales, usando imágenes Landsat ETM+. *Entorno Geográfico*, 1(5), pp. 77-102. Recuperado de: <https://doi.org/10.25100/eg.v0i5.3594>
- Schloeder, C. A., Zimmerman, N. E., & Jacobs, M. J. (2001). Comparison of Methods for Interpolating Soil Properties Using Limited Data. *Soil Science Society of America Journal*, 65(2), pp. 470-479. Recuperado de: <https://doi.org/10.2136/SSSAJ2001.652470X>
- Sobrino, J. A., Jiménez, J. C., & Paolini, L. (2004). Land surface temperature retrieval from LANDSAT TM 5. *Remote Sensing of Environment*, 90, pp. 434-440. Recuperado de: <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.02.003>
- Squeo, F. A., Warner, B. G., Aravena, R., & Espinoza, D. (2006). Bofedales: turberas de alta montaña de los Andes centrales. *Historia Natural*, 79, pp. 245-255. Recuperado de: https://www.scielo.cl/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S0716-078X2006000200010
- USGS. (2018, julio 18). *Thematic Mapper (TM) Nivel-1 Datos multiespectrales de 30 metros de Landsats 4 y 5. (1982 a 2012)*. Recuperado de:

<https://www.usgs.gov/centers/eros/science/usgs-eros-archive-landsat-archives-landsat-4-5-thematic-mapper-tm-level-1-data>

USGS. (2022). *Landsat 9 Data Users Handbook*. Recuperado de: https://d9-wret.s3.us-west-2.amazonaws.com/assets/palladium/production/s3fs-public/media/files/LSDS-2082_L9-Data-Users-Handbook_v1.pdf

Valeria, F. (2017). *Predicción de bofedales en la Reserva de Producción de Fauna Chimborazo a través del tratamiento de imágenes satelitales* [Tesis de grado]. Escuela superior politécnica de Chimborazo. Recuperado de: <http://dspace.espoch.edu.ec/handle/123456789/8200>

Veneros, J., García, L., Morales, E., Gómez, V., Torres, M., & López, F. (2020). Aplicación de sensores remotos para el análisis de cobertura vegetal y cuerpos de agua. *IDESA*, 38(4), pp. 99-107. Recuperado de: <https://www.scielo.cl/pdf/idesia/v38n4/0718-3429-idesia-38-04-99.pdf>

Villasante, J. (2021). *Influencia del cambio climático sobre los humedales altoandinos: Estudio comparativo entre un humedal manejado (Perca, Castilla, Arequipa) y uno no manejado (Ccallaccapcha, La unión, Arequipa)* [Tesis de Maestría]. Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa. Recuperado de: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12773/13200/UPvibejf.pdf?sequence=1&isAllowed=y>

Zimmer, A., Meneses, R., Rabatel, A., Soruco, A., & Anthelme, F. (2014). Caracterizar la migración altitudinal de las comunidades vegetales altoandinas frente al calentamiento global mediante cronosecuencias post-glaciales recientes. *Ecología En Bolivia*, 49(3), pp. 27-41. Recuperado de: http://www.scielo.org.bo/pdf/reb/v49n3/v49n3_a04.pdf

ANEXOS

Anexo N° 1. Matriz de consistencia

TÍTULO: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo de los distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”				
PROBLEMA	OBJETIVOS	HIPÓTISIS	VARIABLES	METODOLOGÍA
1. Problema general	1. Objetivo general	1. Hipótesis general	Variable 1	Tipos de estudio
¿Cómo influye la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo de los distritos Chuschi y Vinchos durante el periodo de 1988-2022?	Determinar la influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022.	La variabilidad climática influye de manera significativa en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.	Dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos	Explicativa Diseño No experimental Enfoque Cuantitativo
2. Problemas específicos	2. Objetivos específicos	Hipótesis específicas	Variable 2	Población
¿Cuál es la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022?	Estimar la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988-2022.	Existe variabilidad espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.	Variabilidad climática	Microcuenca Chicllarazo, Apacheta, Vinchos y Paccha Muestra Microcuenca Chicllarazo Técnica Observación de campo no experimental Instrumento - Ficha de registro adquisición de imágenes satelitales - Ficha de registro de adquisición de datos climáticos - Ficha de registro de la extensión multianual de la cobertura de los bofedales
¿Cuál es la variabilidad de la temperatura en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?	Determinar la variabilidad de la temperatura en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.	Existe variabilidad de la temperatura en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.		
¿Cuál es la variabilidad de la precipitación en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?	Determinar la variabilidad de la precipitación en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.	Existe variabilidad de la precipitación en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.		
¿Cómo influye la variabilidad de la temperatura en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?	Analizar la influencia de la variabilidad de la temperatura en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.	La variabilidad de temperatura influye significativamente en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.		
¿Cómo influye la variabilidad de la precipitación en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022?	Analizar la influencia de la variabilidad de la precipitación en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.	La variabilidad de precipitación influye significativamente en la dinámica espacio temporal de los bofedales en la microcuenca Chicllarazo durante el periodo de 1988 al 2022.		

Anexo N° 2. Ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales.

FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE IMÁGENES SATELITALES						
Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”						
DATUM: WGS84		ZONA: 18S		PATH/ROW: 005/069 Y 006/069		
Año	Fecha de toma de la imagen. A/M/D*	Sensor	ID de la imagen	Porcentaje de nubosidad	Nivel de procesamiento de la imagen.	Plataforma
1988	1988/07/15	Landsat 5 TM	LT05_L1TP_005069_19880715_20170208_01_T1	<20%	L1TP	USGS Earth explorer
			LT05_L1TP_006069_19880706_20170208_01_T1	<20%	L1TP	
1990	1990/07/28		LT05_L1TP_006069_19900728_20170129_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_005069_19900619_20170130_01_T1	<20%	L1TP	
1992	1992/07/17		LT05_L1TP_006069_19920717_20170122_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_005069_19920710_20170122_01_T1	<20%	L1TP	
1994	1994/07/16		LT05_L1TP_005069_19940716_20170114_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_006069_19940707_20170113_01_T1	<20%	L1TP	
1995	1995/07/21		LT05_L1TP_006069_19950811_20170107_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_005069_19950719_20170108_01_T1	<20%	L1TP	
1998	1998/07/02		LT05_L1TP_006069_19980702_20161223_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_005069_19980609_20161224_01_T1	<20%	L1TP	
2001	2001/07/15		LT05_L1TP_006069_20010811_20161210_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_005069_20010804_20161211_01_T1	<20%	L1TP	
2003	2003/08/01		LT05_L1TP_006069_20030801_20161205_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_005069_20030709_20161205_01_T1	<20%	L1TP	
2006	2006/07/01		LT05_L1TP_005069_20060701_20161120_01_T1	<20%	L1TP	
			LT05_L1TP_006069_20060708_20161120_01_T1	<20%	L1TP	
2008	2008/07/22	LT05_L1TP_005069_20080722_20161030_01_T1	<20%	L1TP		
		LT05_L1TP_006069_20080814_20161030_01_T1	<20%	L1TP		
2010	2010/08/20	LT05_L1TP_006069_20100820_20161014_01_T1	<20%	L1TP		
		LT05_L1TP_005069_20100728_20161014_01_T1	<20%	L1TP		
2014	2014/07/14	Landsat 8 OLI	LC08_L1TP_006069_20140714_20170421_01_T1	<20%	L1TP	
			LC08_L1TP_005069_20140824_20170420_01_T1	<20%	L1TP	
2017	2017/07/17	Sentinel 2 MSI	L1C_T18LWL_A010804_20170717T151029	<20%	L1C	
2020	2020/07/11		L1C_T18LWL_A026391_20200711T150930	<20%	L1C	
2022	2022/08/25		L1C_T18LWL_A028565_20220825T151122	<20%	L1C	
2010	01/01/2010	Alos Palsar	AP_21137_FBS_F6910_RT1	-	-	ASF ALASKA

Elaboración propia

Anexo N° 3. Ficha de registro de adquisición de datos climáticos

1. FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS				
Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”				
Nombre de la Estación: Estación virtual N° 1		Latitud: -13.35	Longitud: -74.35	
Año	Temperatura (°)		Precipitación (mm)	
	Máxima	Mínima	Acumulada	Máxima
1988	20.26	2.33	10.50	8.27
1989	19.33	2.36	29.66	12.97
1990	19.58	3.11	46.67	16.64
1991	20.26	2.24	25.88	15.67
1992	19.89	2.71	18.91	8.51
1993	19.76	2.34	34.13	14.05
1994	20.22	2.48	12.45	7.89
1995	20.95	2.64	17.16	11.17
1996	19.99	2.53	14.83	9.67
1997	20.22	2.67	33.58	25.73
1998	21.20	3.24	6.97	4.62
1999	20.04	2.59	11.77	4.82
2000	20.01	3.24	31.14	16.76
2001	19.73	2.98	44.94	17.54
2002	19.64	3.57	44.99	22.95
2003	20.21	3.02	24.38	15.57
2004	19.42	2.73	34.13	15.42
2005	20.83	2.08	11.19	5.62
2006	20.36	2.56	18.27	12.77
2007	20.36	2.78	15.45	7.45
2008	20.69	2.15	14.80	6.86
2009	20.71	2.89	20.50	10.12
2010	21.40	2.99	7.60	3.94
2011	20.50	2.91	15.32	9.28
2012	20.64	2.84	15.84	6.16
2013	20.18	3.61	48.31	22.34
2014	20.73	3.40	21.58	10.69
2015	20.92	3.55	37.95	15.26
2016	21.38	3.02	15.97	6.45
2017	19.71	0.64	9.62	57.18
2020	20.31	1.73	8.77	22.49
2022	19.89	0.46	5.92	15.62

Elaboración propia

2. FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”

Nombre de la Estación: Estación virtual N° 2 **Latitud:** -13.35 **Longitud:** -74.25

Año	Temperatura (°)		Precipitación (mm)	
	Máxima	Mínima	Acumulada	Máxima
1988	19.02	1.83	6.38	4.30
1989	18.07	1.43	21.28	7.56
1990	18.47	2.12	35.40	14.68
1991	19.14	1.54	17.41	8.00
1992	18.54	1.92	19.77	9.72
1993	18.56	1.52	31.18	9.41
1994	19.11	1.55	8.13	3.51
1995	19.46	1.95	11.81	6.20
1996	18.60	1.79	11.66	8.48
1997	18.91	1.75	27.23	21.03
1998	19.57	2.44	6.67	4.74
1999	18.51	1.85	8.60	4.71
2000	18.45	2.12	23.79	10.01
2001	18.66	1.95	38.89	16.35
2002	18.61	2.68	43.66	27.90
2003	18.97	2.26	20.16	14.76
2004	18.73	1.98	34.61	17.36
2005	19.83	1.45	9.01	3.81
2006	19.44	1.94	16.96	11.24
2007	19.15	2.18	11.73	3.85
2008	19.07	1.39	12.22	5.86
2009	19.36	1.98	16.87	10.41
2010	19.97	2.25	5.07	2.03
2011	19.35	2.09	11.12	5.47
2012	19.66	1.81	15.37	6.80
2013	19.00	2.52	37.03	15.91
2014	19.76	2.53	17.34	7.33
2015	20.01	2.62	35.61	11.27
2016	20.19	2.16	13.69	6.75
2017	19.71	0.64	9.62	57.18
2020	20.31	1.73	8.77	22.49
2022	19.89	0.46	5.92	15.62

Elaboración propia

3. FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”

Nombre de la Estación: Estación virtual N° 3 **Latitud:** -13.45 **Longitud:** -74.55

Año	Temperatura (°)		Precipitación (mm)	
	Máxima	Mínima	Acumulada	Máxima
1988	15.42	-0.43	26.13	19.70
1989	14.75	-0.71	54.34	25.86
1990	15.02	-0.10	72.93	27.08
1991	15.62	-0.66	40.63	24.84
1992	14.95	-0.22	21.60	10.90
1993	14.97	-0.31	47.06	20.12
1994	15.57	-0.51	26.60	16.41
1995	15.65	-0.33	27.55	16.79
1996	15.19	-0.31	30.96	23.38
1997	15.54	-0.31	66.54	54.98
1998	15.90	0.31	17.73	10.56
1999	14.96	-0.23	23.76	12.73
2000	15.01	-0.10	40.08	21.78
2001	15.37	-0.18	41.82	16.06
2002	15.44	0.58	42.77	14.87
2003	15.66	0.16	29.53	19.27
2004	15.44	-0.08	41.52	16.03
2005	16.39	-0.72	13.75	5.22
2006	15.92	-0.11	29.18	20.41
2007	15.51	0.01	22.11	10.58
2008	15.44	-0.86	21.06	7.38
2009	15.81	-0.23	28.96	12.27
2010	16.29	0.07	14.20	5.72
2011	15.74	-0.09	20.39	9.77
2012	16.39	-0.29	16.40	4.65
2013	15.51	0.44	69.94	38.58
2014	16.27	0.38	25.19	9.21
2015	16.60	0.53	39.29	16.67
2016	16.63	0.14	20.73	6.30
2017	19.71	0.64	9.62	57.18
2020	20.31	1.73	8.77	22.49
2022	19.89	0.46	5.92	15.62

Elaboración propia

4. FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”

Nombre de la Estación: Estación virtual N° 4 **Latitud:** -13.45 **Longitud:** -74.45

Año	Temperatura (°)		Precipitación (mm)	
	Máxima	Mínima	Acumulada	Máxima
1988	17.45	1.21	23.05	17.63
1989	16.41	0.90	48.34	19.28
1990	16.77	1.57	68.35	25.08
1991	17.56	0.85	36.85	22.99
1992	17.01	1.27	21.67	10.65
1993	16.83	0.68	46.17	19.45
1994	17.46	0.90	23.08	14.52
1995	17.97	1.29	28.02	18.51
1996	17.00	1.09	25.73	16.89
1997	17.21	0.91	66.60	55.28
1998	18.06	1.77	14.85	8.89
1999	16.97	1.20	20.43	10.14
2000	16.87	1.55	41.42	23.95
2001	16.91	1.34	50.22	19.80
2002	16.71	2.02	49.86	20.20
2003	17.26	1.56	35.29	23.47
2004	16.95	1.30	44.82	14.86
2005	18.18	0.67	14.98	6.53
2006	17.73	1.20	29.60	20.82
2007	17.61	1.51	22.39	10.97
2008	17.64	0.64	21.17	7.30
2009	17.85	1.29	29.44	12.08
2010	18.52	1.57	14.17	6.75
2011	17.69	1.43	22.09	12.32
2012	17.83	1.17	17.83	4.97
2013	17.34	1.96	74.39	39.71
2014	18.08	1.87	27.17	11.28
2015	18.35	1.93	44.54	16.88
2016	18.62	1.45	22.75	7.67
2017	19.71	0.64	9.62	57.18
2020	20.31	1.73	8.77	22.49
2022	19.89	0.46	5.92	15.62

Elaboración propia

5. FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS

Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”

Nombre de la Estación: Estación virtual N° 5 **Latitud:** -13.45 **Longitud:** -74.35

Año	Temperatura (°)		Precipitación (mm)	
	Máxima	Mínima	Acumulada	Máxima
1988	19.49	1.94	13.72	10.38
1989	18.38	1.68	31.26	12.92
1990	18.77	2.33	45.71	15.18
1991	19.57	1.59	22.79	13.37
1992	19.11	1.99	17.55	9.76
1993	18.86	1.33	33.71	13.28
1994	19.45	1.63	12.80	7.48
1995	20.07	2.02	18.04	11.40
1996	18.94	1.78	17.01	11.55
1997	19.18	1.58	51.14	44.02
1998	20.08	2.50	9.37	5.98
1999	18.95	1.90	12.98	5.60
2000	18.80	2.31	29.06	16.61
2001	18.77	2.05	41.46	15.81
2002	18.60	2.71	41.12	19.61
2003	19.19	2.28	28.98	21.45
2004	18.77	1.99	35.55	13.14
2005	20.12	1.38	11.18	4.83
2006	19.69	1.88	22.75	16.89
2007	19.57	2.18	15.42	6.67
2008	19.66	1.40	14.91	5.56
2009	19.82	2.06	20.33	9.07
2010	20.47	2.31	9.20	4.85
2011	19.66	2.15	15.44	9.00
2012	19.67	1.97	13.70	4.47
2013	19.29	2.72	53.77	23.81
2014	19.97	2.61	20.21	8.92
2015	20.20	2.67	36.12	13.88
2016	20.58	2.14	16.64	5.49
2017	19.71	0.64	9.62	57.18
2020	20.31	1.73	8.77	22.49
2022	19.89	0.46	5.92	15.62

Elaboración propia

6. FICHA DE REGISTRO DE ADQUISICIÓN DE DATOS CLIMÁTICOS				
Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”				
Nombre de la Estación: Estación virtual N° 6		Latitud: -13.45		Longitud: -74.25
Año	Temperatura (°)		Precipitación (mm)	
	Máxima	Mínima	Acumulada	Máxima
1988	19.46	2.29	9.45	7.08
1989	18.45	1.91	21.72	9.03
1990	18.86	2.60	32.11	10.19
1991	19.58	2.00	17.89	10.14
1992	19.01	2.39	16.62	9.89
1993	18.97	1.87	31.29	11.44
1994	19.52	1.99	8.61	4.47
1995	19.98	2.41	13.04	7.54
1996	19.00	2.21	12.96	9.43
1997	19.30	2.15	41.67	35.56
1998	20.04	2.88	7.01	4.70
1999	18.94	2.27	9.93	4.30
2000	18.85	2.59	23.53	13.15
2001	19.00	2.38	37.42	13.43
2002	18.89	3.08	40.30	24.13
2003	19.34	2.68	24.49	19.08
2004	19.06	2.38	33.07	14.87
2005	20.21	1.87	10.16	4.22
2006	19.83	2.35	18.98	14.21
2007	19.59	2.59	12.51	4.83
2008	19.55	1.83	11.76	4.77
2009	19.81	2.44	17.49	10.30
2010	20.43	2.70	6.20	3.68
2011	19.75	2.55	12.82	7.12
2012	19.95	2.30	12.29	4.96
2013	19.40	2.97	43.48	19.19
2014	20.13	2.98	18.17	7.64
2015	20.37	3.06	33.70	12.29
2016	20.63	2.59	14.78	5.74
2017	19.71	0.64	9.62	57.18
2020	20.31	1.73	8.77	22.49
2022	19.89	0.46	5.92	15.62

Elaboración propia

Anexo N° 4. Ficha de registro de la variabilidad de la cobertura de los bofedales

FICHA DE REGISTRO DE LA VARIABILIDAD DE LA COBERTURA DE LOS BOFEDALES			
Tema de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo, distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”			
DATUM: WGS84		ZONA: 18S	
Año	Cobertura del bofedal en hectáreas	Tasa de variación (%) en función al primer año	Porcentaje del bofedal a nivel de la microcuenca
1988	2923.72	0	4.77
1990	4562.11	24.9	7.44
1992	1245.41	-19.2	2.03
1994	2711.11	-1.3	4.42
1995	1653.89	-7.8	2.70
1998	3479.68	1.8	5.68
2001	3297.43	0.9	5.38
2003	2790.22	-0.3	4.55
2006	3026.98	0.2	4.94
2008	1908.12	-2.1	3.11
2010	1123.68	-4.3	1.83
2014	4498.15	1.7	7.34
2017	5631.65	2.3	9.19
2018	4286.61	1.3	6.99
2020	3877.6	0.9	6.33
2022	537.87	-4.9	0.88

Elaboración propia

Anexo N° 5. Validación de los instrumentos por experto N° 1

VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS POR EXPERTO N° 1

Identificación del Experto.

Nombres y Apellidos: José Luis Zuloaga Obregón

Profesión: Magister en desarrollo ambiental

Dirección del correo electrónico: jose.zuloaga@upn.pe

Título de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo de los distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”

Autor de la investigación: Luis Gilmer Buitrón Sulca (DNI 70457490)

Nombres de los instrumentos que validar:

1. Ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales.
2. Ficha de registro de adquisición de datos climáticos
3. Ficha de registro de datos de la variabilidad de la cobertura del bofedal

CALIFICACIÓN DEL INSTRUMENTOS POR JUICIO DEL EXPERTO

Nombre de instrumento	Calificación de instrumento			¿Se puede poner en marcha el instrumento?		Observación
	Instrumento Deficiente	Instrumento Buena	Instrumento muy bueno	Si	No	
1. Ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales		✓		✓		Agregar campos adicionales
2. Ficha de registro de adquisición de datos climáticos		✓		✓		
3. Ficha de registro de datos de la variabilidad de la cobertura del bofedal.		✓		✓		

Recomendaciones:



Firma del Experto

Elaboración propia

Anexo N° 6. Validación de los instrumentos por experto N° 2

VALIDACIÓN DE LOS INSTRUMENTOS POR EXPERTO N° 2

Identificación del Experto.

Nombres y Apellidos: FREDY ROJAS AVILA

Profesión: GEÓGRAFO

Dirección del correo electrónico: rojasfredy_04@hotmail.com

Título de la investigación: “Influencia de la variabilidad climática en la dinámica espacio temporal de los bofedales altoandinos en la microcuenca Chicllarazo de los distritos Chuschi y Vinchos (1988-2022)”

Autor de la investigación: Luis Gilmer Buitrón Sulca (DNI 70457490)

Nombres de los instrumentos que validar:

4. Ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales.
5. Ficha de registro de adquisición de datos climáticos
6. Ficha de registro de datos de la variabilidad de la cobertura del bofedal

CALIFICACIÓN DEL INSTRUMENTOS POR JUICIO DEL EXPERTO

Nombre de instrumento	Calificación de instrumento			¿Se puede poner en marcha el instrumento?		Observación
	Instrumento Deficiente	Instrumento Buena	Instrumento muy bueno	Si	No	
1. Ficha de registro de adquisición de imágenes satelitales			✓	✓		
2. Ficha de registro de adquisición de datos climáticos			✓	✓		
3. Ficha de registro de datos de la variabilidad de la cobertura del bofedal.			✓	✓		

Recomendaciones:



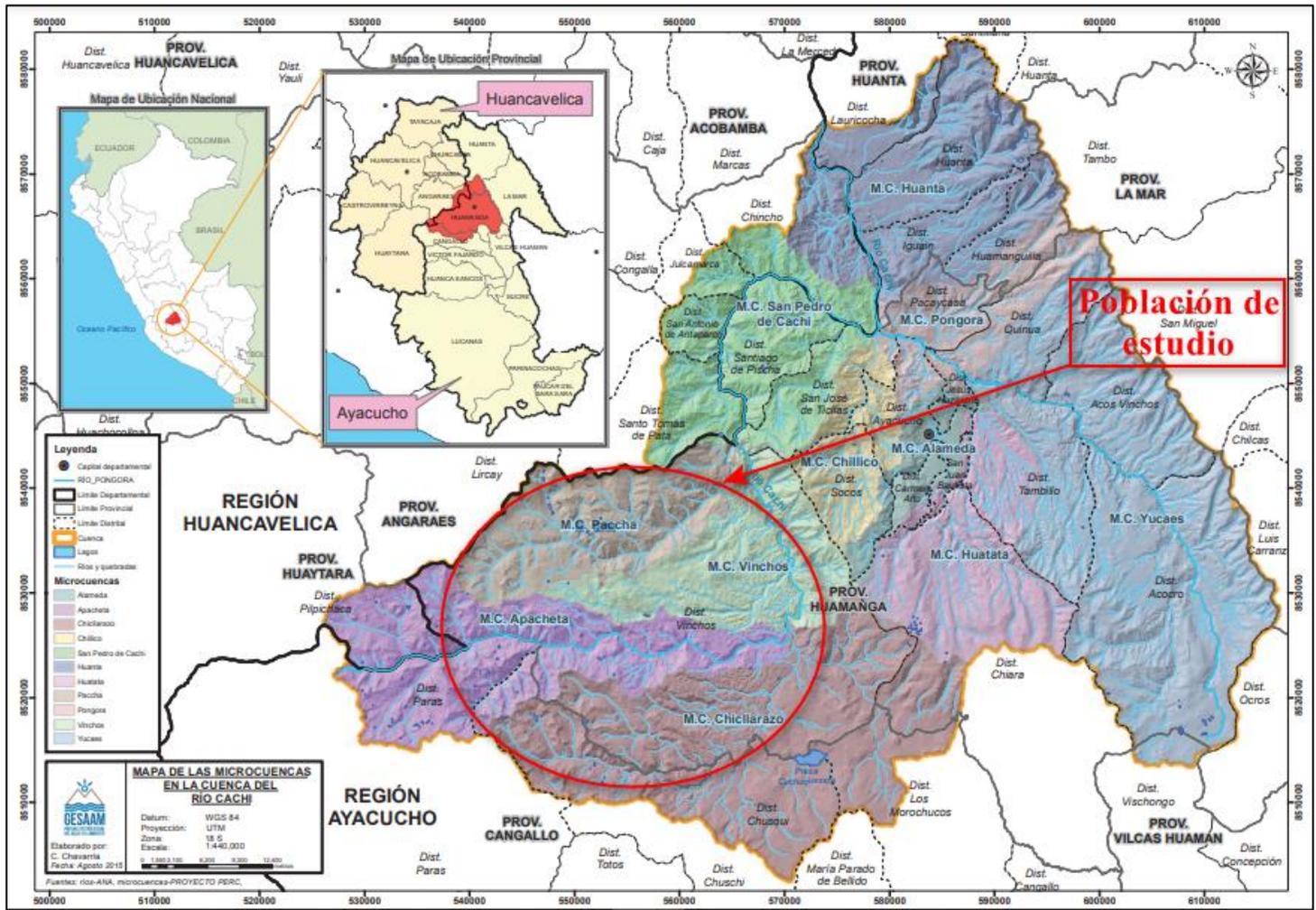
Firma del Experto

Nombres: FREDY ROJAS AVILA

DNI: 76349312

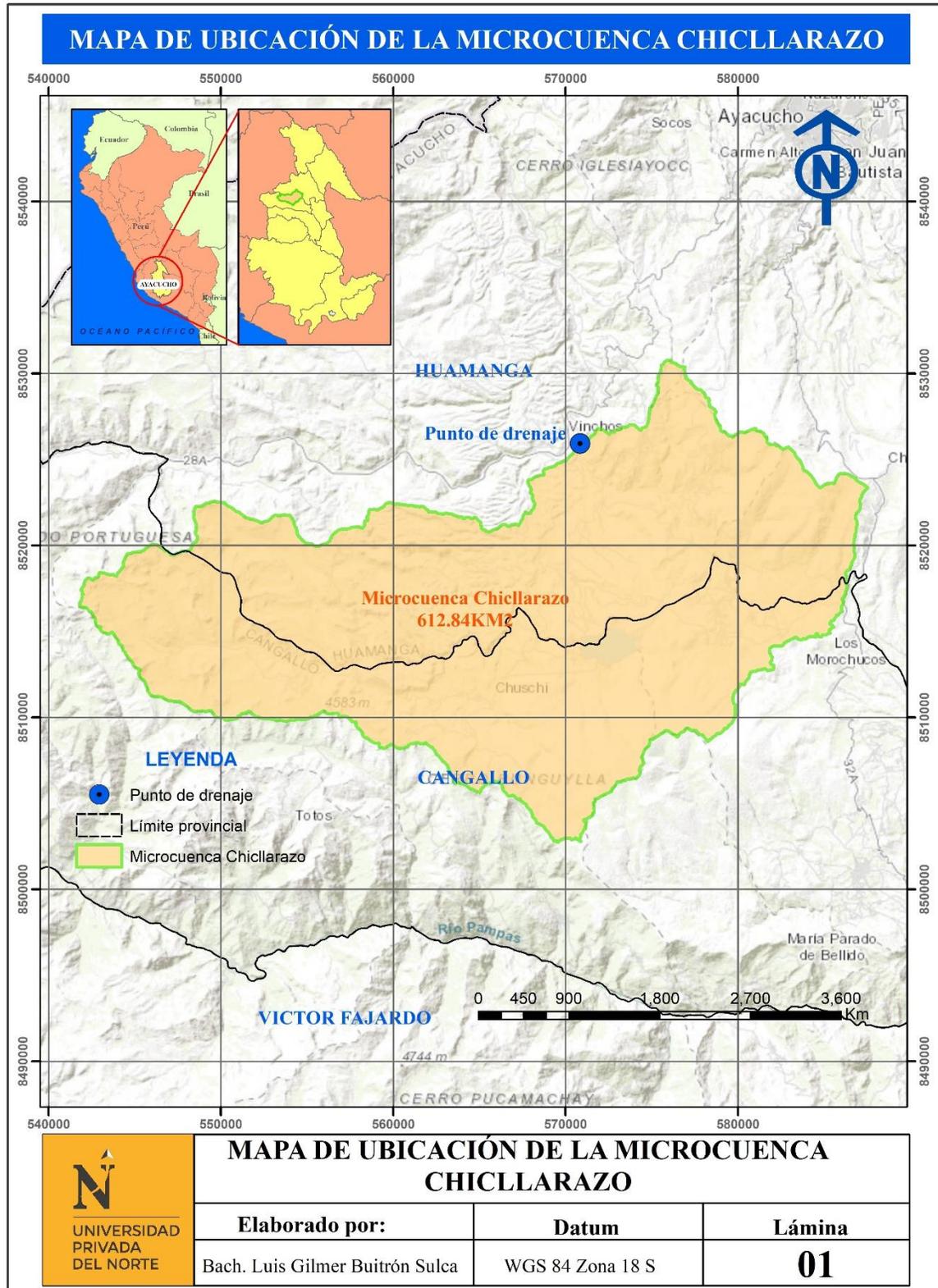
Elaboración propia

Anexo N° 7. Mapa de ubicación de la población de estudio.



Fuente: GESAAM (2015).

Anexo N° 8. Mapa de ubicación de la microcuenca Chicllarazo.



Fuente: Elaboración propia

Anexo N° 9. Matriz de operacionalización de variables.

Variable	Definición operacional	Dimensión	Escala	Indicador	Unidad de medida
Variable independiente					
Variabilidad climática	Constituye la variación de los patrones climáticos, tales como la temperatura máxima y mínima, precipitación máxima y acumulada.	Variación de temperatura máxima y mínima.	Cuantitativa	Grados Celsius de temperatura	°C
		Variación de precipitación máxima y acumulada.	Cuantitativa	Milímetros de precipitación	mm
Variable dependiente					
Dinámica espacial de los bofedales	Consiste en la variación espacial de la cobertura superficial de los bofedales en diferentes series de tiempo	Variación de la cobertura de los bofedales	Cuantitativa	Pérdida o incremento de la cobertura de los bofedales	Ha
				Tasa de cambio anual	%
		Variación de valores del índice de vegetación de diferencia normalizada (NDVI)	Cuantitativa	Índice de vegetación de diferencia normalizada	Valores de NDVI 0.436 - 1