



FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y ECOTURISMO

ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO –

CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

**Línea de investigación:
Biodiversidad, ecología y conservación**

Tesis para optar el Título Profesional de Ingeniero Ambiental

Autor

Martinez Reyes, Dany Ruben

Asesora

Guillen León, Rogelia

ORCID: 0000-0003-0152-495X

Jurado

Gomez Escriba, Benigno Paulo

Sernaque Auccahuasi, Fernando Antonio

Reyna Mandujano, Samuel Carlos

Lima - Perú

2026



**FACULTAD DE INGENIERÍA GEOGRÁFICA, AMBIENTAL Y
ECOTURISMO**

**ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA,
LIMA, PERÚ 1995 - 2025**

Línea de investigación:

Biodiversidad, ecología y conservación

Tesis para optar el título profesional de Ingeniero Ambiental

Autor

Martinez Reyes, Dany Ruben

Asesora

Guillen León, Rogelia

ORCID: 0000-0003-0152-495X

Jurado

Gomez Escriba, Benigno Paulo

Sernaque Aucahuasi, Fernando Antonio

Reyna Mandujano, Samuel Carlos

Lima – Perú

2026

ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

INFORME DE ORIGINALIDAD

9%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

2%

PUBLICACIONES

2%

TRABAJOS DEL
ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	idoc.pub Fuente de Internet	1%
2	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	editorial.inudi.edu.pe Fuente de Internet	1%
4	repositorio.lamolina.edu.pe Fuente de Internet	<1%
5	www.coursehero.com Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.unsaac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositorio.unac.edu.pe Fuente de Internet	<1%
8	Submitted to Universidad Nacional Federico Villarreal Trabajo del estudiante	<1%
9	repositorio.upn.edu.pe Fuente de Internet	<1%
10	hdl.handle.net Fuente de Internet	<1%
11	Roque Quiroz, Ruben Anthony. "Tendencia del NDVI en el Área de Conservación Regional	<1%

Dedicatoria

Dedico esta tesis a mis padres, Rubén y Celydet, quienes con su esfuerzo, sacrificio y amor han sido la base de cada uno de mis logros. A mis hermanas, Andrea y Aivy, por acompañarme siempre con su cariño y confianza. A mi pareja, Indra, por brindarme paciencia, motivación y apoyo incondicional en los momentos más exigentes de esta etapa. Finalmente, a mis amigos, por sus palabras de aliento y por compartir conmigo este camino hacia una meta tan importante en mi vida profesional.

Agradecimiento

Expreso mi más sincero agradecimiento a mi familia, especialmente a mis padres, Rubén y Celydet, y a mis hermanas, Andrea y Aivy, por su respaldo constante y por creer siempre en mí. A mi pareja, Indra, por su comprensión, compañía y ánimo durante el desarrollo de esta investigación.

También agradezco a mis amigos, quienes con su apoyo, consejos y motivación hicieron más llevadero este proceso, contribuyendo de manera significativa a la culminación satisfactoria de esta tesis. A Universidad Nacional Federico Villarreal, mi alma mater, y a sus docentes por haberme brindado los conocimientos, valores y experiencias que contribuyeron de manera significativa a mi formación académica y profesional

ÍNDICE

RESUMEN	13
ABSTRACT.....	14
I. INTRODUCCIÓN	15
1.1. Descripción y formulación del problema.....	16
1.1.1. <i>Problema general</i>	17
1.1.2. <i>Problemas específicos</i>	17
1.2. Antecedentes	18
1.2.1. <i>Antecedentes internacionales</i>	18
1.2.2. <i>Antecedentes nacionales</i>	21
1.2.3. <i>Antecedentes locales</i>	24
1.3. Objetivos	27
1.3.1. <i>Objetivo general</i>	27
1.3.2. <i>Objetivos específicos</i>	27
1.4. Justificación	27
1.4.1. <i>Teórica</i>	27
1.4.2. <i>Metodológica</i>	28
1.4.3. <i>Práctica</i>	28
1.5. Hipótesis	29
1.5.1. <i>Hipótesis general</i>	29
1.5.2. <i>Hipótesis específica</i>	29
II. MARCO TEÓRICO.....	31

2.1.	Bases teóricas sobre el tema de investigación	31
2.1.1.	<i>Cambio climático</i>	31
2.1.2.	<i>Eventos climáticos</i>	32
2.1.3.	<i>Clasificación climática</i>	33
2.1.4.	<i>Ecosistema</i>	35
2.1.5.	<i>Servicios ecosistémicos</i>	36
2.1.6.	<i>Restauración ecológica</i>	37
2.1.7.	<i>Resiliencia de ecosistemas</i>	37
2.1.8.	<i>Degradación de ecosistemas</i>	38
2.1.9.	<i>Riesgo ecológico</i>	40
2.1.10.	<i>Software</i>	40
2.1.11.	<i>Imagen satelital</i>	46
2.1.12.	<i>Índice de vegetación ajustado al suelo - savi</i>	50
2.1.13.	<i>Modelos de exergía cósmica</i>	51
III.	MÉTODO	53
3.1.	Tipo de investigación	53
3.2.	Ámbito temporal y espacial	53
3.2.1.	<i>Ámbito temporal</i>	53
3.2.2.	<i>Ámbito espacial</i>	54
3.3.	Variables	54
3.3.1.	<i>Variable 1</i>	54

3.3.2.	<i>Variable 2</i>	54
3.3.3.	<i>Matriz de operacionalización de variables</i>	55
3.4.	Población y muestra.....	57
3.4.1.	<i>Población</i>	57
3.4.2.	<i>Muestra</i>	57
3.5.	Instrumentos.....	58
3.5.1.	<i>Equipos</i>	58
3.5.2.	<i>Software</i>	58
3.5.3.	<i>Materiales</i>	59
3.6.	Procedimientos.....	59
3.6.1.	<i>Determinar las tendencias de cambio que refleja el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de cantá, región lima entre los años 1995 al 2025</i>	59
3.6.2.	<i>Determinar las variables climáticas como indicadores del cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda, en la provincia de cantá, región lima, entre los años 1995 al 2025.</i>	62
3.6.3.	<i>Evaluar la percepción de las comunidades locales sobre los cambios en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda y el clima en la provincia de cantá, lima; entre los años 1995 al 2025.</i>	63
3.7.	Análisis de datos.....	64
3.8.	Consideraciones éticas.....	65
IV.	RESULTADOS.....	66

4.1.	Dinámica del índice espectral savi en el ecosistema pajonal de puna húmeda (1995-2025)	66
4.1.1.	<i>Análisis espacial del savi</i>	66
4.1.2.	<i>Análisis temporal del savi</i>	69
4.1.3.	<i>Variación de la cobertura del ecosistema pajonal de puna húmeda</i>	73
4.2.	Comportamiento de las variables climáticas (1995-2025)	75
4.2.1.	<i>Análisis de la precipitación</i>	76
4.2.2.	<i>Análisis de la temperatura máxima</i>	77
4.2.3.	<i>Análisis de la temperatura mínima</i>	79
4.3.	Percepción de las comunidades locales sobre cambios ambientales	80
4.4.	Relación del índice savi y variables climáticas	92
4.4.1.	<i>Relación entre savi y la precipitación</i>	92
4.4.2.	<i>Relación entre SAVI y las temperaturas máximas y mínimas</i>	94
4.4.3.	<i>Análisis integral de la correlación ecosistema pajonal de puna húmeda – variables climáticas</i>	95
V.	DISCUSIÓN DE RESULTADOS	100
VI.	CONCLUSIONES	102
VII.	RECOMENDACIONES	104
VIII.	REFERENCIAS	105
IX.	ANEXOS	112
	Anexo A	112
	Anexo B	113

Anexo C	114
Anexo D	121
Anexo E	123
Anexo F.....	125

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ubicación geoespacial del área de estudio	54
Tabla 2 Matriz operacional de las variables de la investigación	55
Tabla 3 Clasificación para el índice SAVI	61
Tabla 4 Cálculo de SAVI Sano	96
Tabla 5 Variables climatológicas.....	96

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Mapa de clasificación climática del Perú	34
Figura 2	Niveles de Organización del Ecosistema: Perspectivas Tradicionales e Integradas	35
Figura 3	Imagen Satelital Procesada.....	47
Figura 4	Índice Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI).....	51
Figura 5	Estructura del modelo dinámico de sistema basado en EcE (EESDM) – exergía cósmica	52
Figura 6	Flujograma del 1er proceso	60
Figura 7	Flujograma del 2do proceso	63
Figura 8	Fases del procedimiento de la investigación	64
Figura 9	Rangos y distribución espacial del índice SAVI cada 5 años (1995 – 2025)..	66
Figura 10	Evolución temporal de la clasificación planta muerta del índice SAVI (1995 – 2025)	69
Figura 11	Evolución temporal de la clasificación planta enferma del índice SAVI (1995 – 2025)	70
Figura 12	Evolución temporal de la clasificación planta medianamente sana del índice SAVI (1995 – 2025).....	71
Figura 13	Evolución temporal de la clasificación planta muy sana del índice SAVI (1995 – 2025)	72
Figura 14	Evolución temporal de la clasificación del índice SAVI (1995 – 2025).....	74
Figura 15	Precipitaciones (1995 – 2025)	76
Figura 16	Temperatura máxima (1995 – 2025)	78
Figura 17	Temperatura mínima (1995 – 2025).....	79
Figura 18	1. ¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?	81

Figura 19 2.	¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?.....	82
Figura 20 3.	¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?	83
Figura 21 4.	¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?83	
Figura 22 5.	¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?	84
Figura 23 6.	¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?	85
Figura 24 7.	¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?.....	85
Figura 25 8.	¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?86	
Figura 26 9.	¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad?87	
Figura 27 10.	¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?	87
Figura 28 11.	¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?	88
Figura 29 12.	¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?	89
Figura 30 13.	¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?.....	89
Figura 31 14.	¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?	90
Figura 32 15.	¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?.....	91
Figura 33	Relación del índice SAVI y de la precipitación (1995 – 2025).....	92
Figura 34	Relación del índice SAVI y de las temperaturas máximas y mínimas (1995 – 2025)	94
Figura 35	Savi Sano y Precipitación (1995 – 2025)	97

Figura 36 Savi Sano y Temperatura Máxima (1995 – 2025).....	98
Figura 37 Savi Sano y Temperatura Mínima (1995 – 2025)	99

RESUMEN

Objetivo: Determinar la relación entre el ecosistema pajonal de puna húmeda y el cambio climático en la provincia de Canta, Lima, durante el periodo 1995-2025. **Método:** La investigación es de tipo aplicada y nivel correlacional - explicativo. Se empleó teledetección mediante el procesamiento de imágenes satelitales para el cálculo del índice SAVI y un análisis meteorológico de temperaturas (máximas y mínimas) y precipitación acumulada. La relación entre variables se cuantificó mediante el coeficiente de correlación de Spearman (p). Complementariamente, se aplicaron encuestas de percepción ambiental a la comunidad local para la validación social de los hallazgos. **Resultados:** Se identificó una degradación progresiva del vigor vegetativo, donde la categoría "Planta Enferma" alcanzó su máxima extensión de 38,667.0 ha en el año 2025. El análisis climático reveló un incremento térmico de 4.1 °C en la temperatura máxima y 4.9 °C en la mínima. El coeficiente de Spearman mostró una correlación positiva fuerte con la precipitación ($p = 0.679$), sin embargo, el estrés térmico actual inhibe la recuperación del ecosistema. El 82.2% de los pobladores percibe un entorno más seco, validando la tendencia técnica observada. **Conclusiones:** Existe una relación directa y significativa entre el cambio climático y el deterioro del pajonal. El aumento acelerado de la temperatura actúa como el principal motor de degradación, superando la capacidad de resiliencia del ecosistema ante la variabilidad pluvial y consolidando un estado de vulnerabilidad crítica hacia el final del periodo evaluado.

Palabras clave: pajonal de puna húmeda, cambio climático, índice SAVI, teledetección

ABSTRACT

Objective: To determine the relationship between the moist puna grassland ecosystem and climate change in the province of Canta, Lima, during the period 1995-2025. **Method:** The research is of an applied type and correlational-explanatory level. Remote sensing was employed through satellite imagery processing to calculate the SAVI index, alongside a meteorological analysis of temperatures (maximum and minimum) and accumulated precipitation. The relationship between variables was quantified using the Spearman correlation coefficient (p). Additionally, environmental perception surveys were applied to the local community for social validation of the findings. **Results:** A progressive degradation of vegetative vigor was identified, where the "Unhealthy Plant" category reached its maximum extent of 38,667.0 ha in the year 2025. The climate analysis revealed a thermal increase of 4.1 °C in the maximum temperature and 4.9 °C in the minimum. The Spearman coefficient showed a strong positive correlation with precipitation ($p = 0.679$); however, current thermal stress inhibits ecosystem recovery. 82.2% of the inhabitants perceive a drier environment, validating the observed technical trend. **Conclusions:** A direct and significant relationship exists between climate change and the deterioration of the grassland. The accelerated increase in temperature acts as the main driver of degradation, surpassing the ecosystem's resilience capacity in the face of rainfall variability and consolidating a state of critical vulnerability towards the end of the evaluated period.

Keywords: moist puna grassland, climate change, SAVI index, remote sensing

I. INTRODUCCIÓN

Los ecosistemas altoandinos del Perú cumplen un rol fundamental en la regulación hídrica, la conservación de la biodiversidad y el mantenimiento de los servicios ecosistémicos que sostienen a diversas poblaciones humanas. Dentro de estos, los pajonales de puna húmeda destacan por su capacidad de almacenamiento de agua, su aporte a la recarga hídrica y su función como hábitat de especies adaptadas a condiciones extremas. Sin embargo, estos ecosistemas presentan una alta vulnerabilidad frente a procesos de degradación asociados tanto a factores naturales como antrópicos, lo que compromete su estabilidad y funcionalidad a lo largo del tiempo. En este contexto, el análisis de su estado de conservación resulta clave para comprender su dinámica y proponer estrategias de manejo sostenible. A nivel nacional, los cambios en la cobertura vegetal de los ecosistemas altoandinos han sido asociados a múltiples factores, entre los cuales destacan la variabilidad climática, el incremento de la temperatura y la alteración en los patrones de precipitación. Estas modificaciones generan impactos directos sobre la estructura y composición de la vegetación, afectando su distribución espacial y su capacidad de regeneración. Diversos estudios han evidenciado que la respuesta de la vegetación frente a estos cambios no es uniforme, sino que depende de las características propias de cada ecosistema y de su grado de intervención. En este sentido, el monitoreo de la cobertura vegetal mediante herramientas de teledetección se ha consolidado como una metodología eficiente para evaluar estos cambios en periodos prolongados (Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR], 2021).

En el caso de los pajonales de puna húmeda, la dinámica de la vegetación se encuentra estrechamente relacionada con las condiciones climáticas, particularmente con la disponibilidad de agua y las variaciones de temperatura. Estas variables influyen directamente en los procesos fisiológicos de las plantas, determinando su crecimiento, vigor y distribución. En las últimas décadas, se han reportado cambios en los patrones climáticos en diversas

regiones del Perú, lo que ha generado modificaciones en el comportamiento de estos ecosistemas. La evaluación de estas relaciones resulta fundamental para comprender los procesos de degradación o recuperación de la cobertura vegetal, así como para identificar tendencias que permitan anticipar posibles escenarios futuros. (Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC], 2023).

En este contexto, el presente estudio tiene como objetivo analizar la relación entre el ecosistema pajonal de puna húmeda y el cambio climático en la provincia de Canta, región Lima, durante el periodo 1995–2025. Para ello, se emplean herramientas de teledetección y análisis de datos climáticos que permiten evaluar la dinámica de la cobertura vegetal y su interacción con variables como la precipitación y la temperatura. Asimismo, se incorpora la percepción de las comunidades locales como un componente complementario que permite contrastar la información técnica con la realidad observada en el campo. De esta manera, la investigación busca aportar evidencia que contribuya a la comprensión del comportamiento de estos ecosistemas frente a las variaciones climáticas, así como a la formulación de estrategias de gestión y conservación.

1.1.Descripción y formulación del problema

El cambio climático está cambiando drásticamente los ecosistemas a nivel global, afectando su biodiversidad, funciones ecológicas y capacidad para proveer servicios esenciales. El incremento de temperaturas, los cambios en los modelos de precipitación y los eventos climáticos extremos están provocando la degradación de hábitats críticos, como bosques y humedales. Estos impactos reducen la resiliencia de los ecosistemas, amenazando su capacidad para regular el clima, purificar el agua y sostener la vida silvestre. En respuesta, muchos países han implementado políticas de conservación y restauración, reconociendo que la protección de estos sistemas naturales es clave para aminorar los efectos del cambio climático y garantizar la sostenibilidad ambiental. (Yimeng y Yongjuan, 2023).

Para evaluar los cambios en los ecosistemas a escala global, se utilizan herramientas como imágenes satelitales y modelos biofísicos que permiten analizar su evolución en el tiempo y el espacio. Métodos como la valoración de servicios ecosistémicos y el análisis de energía incorporada ofrecen marcos cuantitativos para medir su salud y funcionalidad. Sin embargo, los enfoques tradicionales basados en valoración económica tienen limitaciones, ya que no capturan plenamente los procesos ecológicos subyacentes. Por ello, técnicas avanzadas de teledetección y modelos de exergía cósmica están ganando relevancia, ya que permiten una evaluación más integral, considerando tanto los flujos naturales como las presiones antropogénicas. Estos análisis son fundamentales para diseñar estrategias de conservación efectivas y políticas de adaptación al cambio climático. (Yimeng y Yongjuan, 2023)

El ecosistema de pajonal de puna húmeda se localiza en la franja altoandina, entre los 3800 y 4800 m.s.n.m., y se define por una cobertura vegetal herbácea que se extiende tanto en planicies como en terrenos escarpados. Sin embargo, su conservación enfrenta serios desafíos debido a la presión antrópica y al pastoreo excesivo sin manejo técnico, los cuales reducen la cobertura vegetal y degradan el suelo. Esta vulnerabilidad se intensifica por las dificultades en la gestión territorial, ocasionadas por la superposición de derechos de uso y el escaso involucramiento de los gobiernos locales en su protección. (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2021)

1.1.1. Problema general

¿Cuál es la relación del ecosistema pajonal de puna húmeda y el cambio climático, en la provincia de Canta, región Lima; entre los años 1995 al 2025?

1.1.2. Problemas específicos

- ¿Qué tendencias de cambio reflejan el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025?

- ¿Qué parámetros meteorológicos indican el cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025?
- ¿Cuál es la percepción de las comunidades locales sobre los cambios en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda y el clima en la provincia de Canta, Lima; entre los años 1995 al 2025?

1.2. Antecedentes

1.2.1. Antecedentes internacionales

Wang y Huaju (2025), realizan un estudio de la diferenciación espacio-tiempo y factores que influyen en la salud del ecosistema (2000-2020) en el Parque Nacional de las Tres Fuentes (TNP), en China, con el fin de fundamentar estrategias de conservación. Se empleó un modelo "Vigor-Servicio-Resiliencia" (VSR) con datos multi-fuente (uso de suelo, clima, NPP) y el método GeoDetector para evaluar impactos naturales/antrópicos. Los resultados revelan: Una mejora general débil del índice de salud (IDS: +5.58%), aunque predominó el nivel frágil; Patrón espacial marcado (NO-SE), con mayor salud en el este (agregación "alto-alto") y vulnerabilidad en el noroeste ("bajo-bajo"); El vigor fue la dimensión más contributiva al IDS (+20.72%); (4) Factores clave: intensidad de uso de suelo y precipitación, con interacciones naturaleza-hombre amplificando los efectos. Se destaca la necesidad de políticas adaptadas a sub-regiones (mayor sensibilidad a factores humanos en fuentes del Yangtsé/Amarillo vs. naturales en Lancang).

Zerong y Nawal (2025), realizan el estudio de evaluación de la dinámica espacio-tiempo de servicios ecosistémicos (SE) y riesgo ecológico (1990-2023) en la zona ribereña del río Luo (Shaanxi, China), para guiar su gestión sostenible. Se integró la valoración de SE (método de factor equivalente por unidad de área) y evaluación de riesgo ecológico (índices de paisaje), utilizando análisis SIG y categorización por puntos naturales. Los resultados revelan:

Cambios críticos en uso de suelo: +4,530.21 hm² en áreas construidas (expansión urbana) y -9,472.68 hm² en tierras cultivadas, afectando la estructura ecológica; El valor de servicios ecosistémicos (ESV) aumentó un 3.15% (30.12 a 31.06 × 10⁸ CNY), liderado por cuerpos de agua (>50% del aporte); El riesgo ecológico (LER) disminuyó globalmente, con expansión del 12.45% en zonas de bajo riesgo; Se definieron cuatro zonas prioritarias mediante estandarización Z: restauración (área +62.34%, máxima intervención), reconstrucción (-8.92%), conservación y protección. La metodología permitió identificar que la regulación hídrica es el servicio clave (>50% del ESV) y priorizar acciones según riesgo-SE.

Oliveira y Bergier (2025) realizaron un estudio cuyo objetivo fue predecir atributos físico - químicos de los suelos degradados en pastizales del Cerrado brasileño mediante integración de percepción remota y machine learning (ML), para apoyar restauración ecológica y agricultura de precisión. La metodología empleada incluyó: Delimitación de 99 zonas de manejo (MZs) homogéneas mediante algoritmos genéticos en ArcGISPRO; Colección de muestras compuestas a 0-0.2 m y 0.2-0.4 m de profundidad (n=99), analizando textura, pH, materia orgánica (SOM), capacidad de intercambio catiónico (CEC) y nutrientes; Procesamiento de 128 variables orbitales (Sentinel-1/2, ALOS-PALSAR: bandas espectrales, índices de vegetación, backscatter SAR, métricas GLCM y topográficas); Implementación de cuatro enfoques de Random Forest (RF), evaluando estadísticos (media, mediana, varianza) y selección de variables con algoritmo Boruta. Los resultados obtenidos mostraron: Modelos con Boruta mejoraron precisión en 89% de los casos; Métricas de correlación (mediana/varianza) superaron a la media en 72% de predicciones; Atributos mejor estimados: arcilla (R²=0.86; RMSE=19.1% en 0.2-0.4m), CEC (R²=0.73), arena (R²=0.78) y SOM (R²=0.68); Elevación y texturas GLCM fueron predictores transversales claves.

Zhong et al., (2025) realizó un estudio cuyo propósito fue evaluar la salud ecosistémica en áreas carbón-grano con alta capa freática (Tangshan, China, 1985-2020), desarrollando un

índice integrado (HGT-CEHI) para conciliar minería y conservación ambiental. La metodología empleada incluyó: Construcción del marco Presión-Estado-Respuesta-Demanda (PSRD) con variables hidrológicas, edáficas, de vegetación y paisaje; Procesamiento de datos Landsat (GEE) e índices de calidad ecológica (RSEI como referencia); Análisis espacio - temporal mediante *Global Moran's I* y modelos PLS-SEM para identificar drivers. Los resultados obtenidos revelaron: Tendencias temporales tripartitas: degradación acelerada (1985-1995, HGT-CEHI mínimo=0.559), recuperación gradual (1995-2010) y estabilización (2010-2020, HGT-CEHI=0.606); Patrones espaciales dicotómicos: clústeres alto-alto en zonas agrícolas del sur/oeste (47.3% del área) y bajo-bajo en áreas mineras/urbanas centrales (32.1%), con autocorrelación significativa ($p < 0.01$); (3) Mecanismos causales: actividades humanas (minería, expansión urbana) como principal *driver* de degradación pre-2015 (coeficiente PLS-SEM=-0.68), mientras factores ecológicos (restauración hidrológica, revegetación) impulsaron la recuperación post-2015 (coeficiente=+0.74). El HGT-CEHI mostró alta correlación con RSEI ($r=0.93$), validando su precisión.

Qian y Yangong (2022) realizaron una investigación cuyo propósito fue caracterizar cuantitativamente el patrón espacial de praderas arbustivas alpinas degradadas y los servicios ecosistémicos en diferentes niveles de degradación. Se utiliza la metodología de procesamiento y clasificación de imágenes para evaluar los servicios ecosistémicos en praderas de arbustos alpinos. La biomasa aérea palatable, el carbono orgánico presente en el suelo, el nitrógeno total del suelo y el agua del suelo se utilizan como medidas de los servicios de suministro de forraje, almacenamiento de carbono, suministro de nitrógeno y retorno de agua, respectivamente. Las imágenes sin procesar se preprocesan utilizando Agisoft PhotoScan y luego se clasifican en arbustos alpinos, praderas alpinas y suelo desnudo utilizando el software eCognition 9.0. La clasificación se basa en dos procesos: segmentación multiresolución y clasificación por método de umbral. Los resultados muestran que la degradación de las praderas de arbustos alpinos en

la meseta Qinghai-Tibetan tiene un impacto en la fragmentación de los arbustos y las praderas de alpinos, lo que conduce a una disminución en la proporción de área y tamaño promedio, así como a un aumento en la distancia entre los parches. Además, se observa que los servicios ecosistémicos continúan disminuyendo en ligera y moderada degradación, mientras que los servicios de regulación aumentan de nuevo en la degradación pesada.

1.2.2. Antecedentes nacionales

Cairampona J, (2025), tuvo como objetivo investigar los pajonales de Puna humedad en el Perú, en relación con el cambio climático, para ello utilizo índices fenológicos y de congelamiento y descongelamiento, la investigación se desarrolló de manera cuantitativa, explicativa, desarrollándose en cuatro ciudades (Macusani, Chongos Alto, Paracsha y Chuquibambilla), se utilizaron imágenes de satélite Landsat 5, 7 y 8 procesado con el programa DTimeS, os parámetros fenológicos fueron medidos con la prueba de Mann-Kendall y la pendiente de Sen para analizar tendencias, los índices de congelamiento (AFI) y descongelamiento (ATI) fueron analizados con proyecciones climáticas de la base BASD-CMIP6_PE (grillado de precipitación y temperatura diaria), en los escenarios de SSP126, SSP370 y SSP585 (originados del ajuste de sesgo y reducción de escala estadística BASD), se obtuvo como resultado una gradiente latitudinal en la fenología, más marcado en Chongos Altos, mientras que en Chuquibambilla presentó un adelanto significativo y en, Paracsha y Macusani no mostraron tendencias de cambio. En cuanto a AFI y ATI la localidad de Paracsha mostró estabilidad relativa, Macusani presento cambios más intensos, los escenarios más severos de intensificaron especialmente bajo SSP585.

Matthew y Kristell (2024) realizan un estudio con el fin de cuantificar la distribución espacial y emisiones de carbono por degradación y deforestación de turberas de aguajales (*Mauritia flexuosa*) en la Amazonía peruana (1990-2018). La metodología empleada integró: (1) Datos de sensores remotos (Landsat, ALOS-PALSAR, GEDI LiDAR) para mapear

ecosistemas formadores de turba (palmerales, herbazales, bosques de varillal); (2) Clasificación supervisada (*Random Forest*) con validación de precisión (>84%); (3) Combinación con mapa regional de turberas y densidades de carbono para estimar stocks y emisiones. Los resultados obtenidos revelaron: (1) Stocks de C: 3.88 ± 0.12 Pg C almacenados en 5.1 ± 0.9 Mha de turberas (73% del área de ecosistemas formadores), dominadas por palmerales (83%); (2) Degradación vs. deforestación: $535,423 \pm 8,419$ ha afectadas (1990-2018), con clara predominancia de degradación (85%) por tala selectiva de *M. flexuosa*; (3) Aceleración: Tasas de degradación aumentaron 14% (15,400 a 17,650 ha/año) y deforestación 117% (1,900 a 4,200 ha/año) en 2007-2018 vs. 1990-2007; (4) Emisiones: 39.3 ± 4.0 Tg C totales, principalmente por degradación (26.3 ± 3.5 Tg C), equivalentes al 77% de las emisiones peruanas por combustibles fósiles (2021).

Cerna et al., (2024), realizan un estudio con el fin de evaluar la influencia protectora de los pastizales altoandinos (puna húmeda y seca) frente a deslizamientos en Perú (2003-2016), comparando su efectividad con zonas agrícolas/urbanas. La metodología empleada integró: (1) Análisis descriptivo de 4,235 eventos de movimientos en masa (INDECI); (2) Determinación de umbrales críticos de precipitación (PISCO) y pendiente (SRTM); (3) Modelado predictivo con *machine learning* (regresión lineal, procesos gaussianos, *random forest*, SVM) usando 128 variables reducidas a 8 componentes principales (PCA al 95% de varianza). Los resultados obtenidos revelaron: (1) Distribución espacial: 96% de deslizamientos en áreas intervenidas vs. 4% en pastizales; (2) Umbrales elevados en pastizales: Requieren +30% de precipitación y +15° de pendiente para activar deslizamientos vs. zonas antropizadas; (3) Impacto diferencial: Convertir pastizales en agricultura/urbano multiplica riesgos: ocurrencias (x7.08 en puna seca), muertes (x10.49), viviendas destruidas (x7.51), carreteras dañadas (x7.37); (4) Modelos precisos: Regresión lineal y procesos gaussianos con $R^2=0.80$. Los aluviones mostraron mayor letalidad (53 muertes/100 eventos).

Zuloaga y Natividad (2023) investigaron los cambios de uso de suelo y su impacto en la cobertura vegetal del Parque Nacional Tingo María (PNTM, Perú) entre 2006-2021, identificando actores clave en su gestión. La metodología empleada combinó: (1) Análisis cuantitativo: Procesamiento de imágenes Landsat (2006, 2011, 2016, 2021) en QGIS para mapear tres categorías (cursos de agua, vegetación escasa, bosque mixto) y calcular tasas de cambio; (2) Enfoque cualitativo: 15 entrevistas semiestructuradas a actores claves (gestores del parque, población local) mediante muestreo por conveniencia. Los resultados obtenidos revelaron: (1) Estabilidad general: Cambios mínimos en cobertura vegetal (bosque mixto: 4,722.461 ha en 2006 vs. 4,719.54 ha en 2021); (2) Dinámicas locales: Incremento puntual de vegetación escasa (74,061 → 78,030 ha), concentrada en Zonas de Uso Especial (norte) y Amortiguamiento, vinculada a agricultura de subsistencia (plátano, yuca); (3) Causalidad: Reducción de tala ilegal post-2000 por gestión colaborativa (guardaparques + comunidades + universidades), aunque con leve repunte en 2021 por limitaciones de vigilancia durante la pandemia; (4) Modelo exitoso: Participación activa de actores territoriales frenó degradación significativa (solo 0.06% pérdida anual de bosque), convirtiendo al PNTM en referente de conservación mediante eco negocios.

Roque (2022) investigó la evaluación de la tendencia espacio-tiempo del NDVI en el Área de Conservación Regional Angostura Faical (Tumbes, Perú) durante 1999-2019 para monitorear la salud de la vegetación del Bosque Seco Ecuatorial. La metodología empleada integró: (1) Procesamiento de 72 imágenes Landsat (TM/ETM+/OLI) en Google Earth Engine; (2) Cálculo anual de NDVI (bandas NIR-Red); (3) Análisis de tendencia con test de Mann-Kendall (librería *Kendall* en RStudio) clasificando píxeles en tendencia negativa (τ : -1 a 0), neutral (0) o positiva (0 a 1); (4) Cuantificación de áreas en QGIS 3.22.5. Los resultados obtenidos revelaron: (1) Dominancia de estabilidad: 83.06% del área (7,304.568 ha) con tendencia neutral, indicando comportamiento vegetal normal; (2) Mejora significativa: 16.94%

(1,489.457 ha) con tendencia positiva (aumento de biomasa); (3) Degradación mínima: Solo 0.46 ha (0.0054%) con tendencia negativa, localizadas en la quebrada La Angostura, asociadas a erosión hídrica durante escorrentías. Estos hallazgos contrastan con estudios en otras regiones áridas (ej. Patagonia con 37.9% de degradación), evidenciando la efectividad de las prácticas de conservación en el área.

1.2.3. Antecedentes locales

López (2021) realiza un estudio para determinar cómo la periurbanización afecta la degradación de los humedales en Ventanilla (Lima, 2021), focalizándose en el Asentamiento Humano Valle Verde. La metodología empleada fue cuantitativa no experimental con diseño transversal correlacional: Operacionalización de variables: Periurbanización (infraestructura urbana, actividades socioeconómicas, ocupación territorial) y Degradación (actividades agropecuarias, contaminación, desarrollo urbano); Recolección de datos: 60 encuestas validadas (Alfa Cronbach=0.82) aplicadas a pobladores >18 años; Análisis: Estadística descriptiva y correlacional en SPSS 25. Los resultados obtenidos revelaron: Correlación significativa ($p<0.05$) entre expansión urbana y degradación: 89% de los encuestados vinculó la ocupación territorial informal con fragmentación de humedales; Mecanismos críticos: Infraestructura no planificada (drenajes inadecuados en 78% de respuestas) y actividades socioeconómicas (comercio/industria informal en 65%) aumentan contaminación por residuos sólidos y aguas residuales; Impacto socioambiental: 72% reportó reducción de actividades agropecuarias tradicionales (junco, totora) por pérdida de suelo fértil. Se concluye que la periurbanización acelera la degradación mediante tres vías: invasión de áreas ribereñas, falta de saneamiento básico y sustitución de economías locales sostenibles.

Javes y Chipana (2022), investiga la finalidad de evaluar la alteración del ecosistema de las Lomas de Amancaes (Lima, Perú) por expansión urbana entre 2016-2021 mediante teledetección. La metodología empleada incluyó: Clasificación supervisada de imágenes

Sentinel-1/2 (resolución 10m) en ArcGIS 10.4 y SNAP; Validación con matriz de confusión e índice Kappa; Muestreo censal de 237 ha mediante 14 puntos estratégicos (no probabilístico); Análisis cuantitativo de velocidad de invasión y áreas críticas. Los resultados obtenidos revelaron: Invasión acelerada: Pérdida de 8.37 ha en 6 años (1.4 ha/año), con picos de 2.51 ha en periodos específicos; Foco crítico: 57% de la degradación concentrada en el sector de San Juan de Lurigancho (4.77 ha); Precisión metodológica: 66% de exactitud global (Kappa=0.54) en detección de áreas alteradas; Patrón espacial: Avance urbano desde cotas bajas (380 msnm) hacia pendientes pronunciadas (22-38%). La teledetección evidenció que la presión antropogénica fragmentó el ecosistema frágil, pese a su estatus de protección (Resolución 404-2013-MINAGRI).

Guerra (2021), en su investigación trata de analizar la relación de espacio-tiempo entre la cobertura vegetal (NDVI) y el crecimiento poblacional en la provincia de Lima, Perú (2000-2019). La metodología empleada integró: Procesamiento de imágenes Landsat 7/8 (USGS) con corrección atmosférica (FLAASH) y cálculo de NDVI en ArcGIS 10.3; Clasificación no supervisada de cobertura vegetal en rangos de NDVI (-1 a 1); Análisis estadístico (SPSS 25) de datos poblacionales (INEI) y series temporales de vegetación, aplicando prueba de Shapiro-Wilks (normalidad) y correlación lineal. Los resultados obtenidos revelaron: Crecimiento poblacional acelerado: +3.04 millones de habitantes (+2.1% total), con máximos en Lima Este (+2.86%) y Lima Norte (+2.58%); Pérdida crítica de vegetación: -2,769.5 ha (-1.73%), concentrada en Lima Norte (-1,717.9 ha, -3.10%); Correlación significativa: 86% de la reducción de NDVI explicada por expansión urbana ($p < 0.01$), especialmente en Lima Norte ($R^2 = 0.72$); Recuperaciones puntuales: Aumentos temporales de NDVI en Lima Centro/Sur (2001, 2016) vinculados a eventos ENSO.

Santa y Socorro (2023), realizan un estudio con el fin de determinar la relación entre el crecimiento urbano y los cambios de cobertura vegetal en la Loma Manchay (Lima, 1986-

2022). La metodología empleada integró: Análisis de vegetación: Cálculo de NDVI (Landsat TM/OLI-TIRS) clasificado en vegetación sana, no saludable y sin cobertura; Medición de urbanización: Digitalización de polígonos en Google Earth Pro + datos censales (INEI) para superficie construida y población, complementados con tasas de crecimiento anual interpoladas; Análisis estadístico: Correlación de Spearman segmentada en periodos 1986-2011 y 2013-2022 (por cambio de sensores). Los resultados obtenidos revelaron: Correlaciones significativas: Relación negativa moderada ($\rho=-0.55$) entre población y vegetación sana en 1986-2011, que se intensificó a negativa alta ($\rho=-0.82$) en 2013-2022; simultáneamente, correlación positiva alta ($\rho=0.71$) entre expansión urbana y áreas sin vegetación; Pérdida crítica: Reducción del 63% de vegetación sana en zonas limítrofes con asentamientos; Aceleración post-2013: Incremento del 40% en superficie urbanizada informal vinculada a degradación vegetal acelerada. Se excluyeron como no significativas las relaciones entre vegetación no saludable y urbanización (2013-2022).

Emelyn y Félix (2021), realizan un estudio con el fin de evaluar el estado de salud de los bofedales en la microcuenca de Acocancha (Lima, 2021) mediante teledetección y análisis *in situ*. La metodología empleada integró: Teledetección: Procesamiento de imágenes Landsat 8 (2013/2017/2019) en ENVI para calcular NDVI (vigor vegetal) y NDWI (estrés hídrico) en épocas secas/húmedas; Evaluación multidimensional: Aplicación de la *Guía de evaluación de bofedales* con análisis de agua (pH, calidad), suelo (pH, materia orgánica), biota (transectos para especies invasoras) y paisaje (presión antrópica por ganadería). Los resultados obtenidos revelaron: Dinámica espectral: NDVI con rango 0.047 (seca)-0.9627 (húmeda) indicando recuperación lenta ("regular"); NDWI desde -0.64 (seca) hasta -1 (húmeda) confirmando estrés hídrico intermedio; Indicadores críticos: Agua ligeramente ácida ($\text{pH}<7$), suelo neutro con alta materia orgánica, presencia de especies invasoras (ej. *Pennisetum clandestinum*) y degradación paisajística por sobrepastoreo; Estado integral: Clasificado como

"regular" según guía metodológica, evidenciando vulnerabilidad como fuente hídrica del río Chillón.

1.3.Objetivos

1.3.1. Objetivo general

Determinar la relación del ecosistema pajonal de puna húmeda y el cambio climático, en la provincia de Canta, región Lima; entre los años 1995 - 2025.

1.3.2. Objetivos específicos

- Determinar las tendencias de cambio que refleja el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta, región Lima entre los años 1995 al 2025
- Determinar las variables climáticas como indicadores del cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025.
- Evaluar la percepción de las comunidades locales sobre los cambios en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda y el clima en la provincia de Canta, Lima; entre los años 1995 al 2025.

1.4.Justificación

1.4.1. Teórica

La investigación desarrolló variables sobre el cambio climático y el ecosistema pajonal de puna húmeda, en tal sentido ampliaron los conceptos del cambio climático debido a su cuestionamiento sobre el termino usado, pero que en los últimos años la población ha entendido como el cambio de temperatura en aumento, sin embargo, las definiciones por instituciones científicas y expertos se citas en la presente investigación de tal forma de afirmar los términos,

en el caso del ecosistema de pajonal de puna húmedo es considerar la gran importancia de este ecosistema frágil, protegido por nuestro país, para poder entender la biodiversidad endémica que es afectada a los cambios de precipitaciones y temperatura, así como el recursos hídrico, captura de carbono que componen los servicios ecosistémicos.

1.4.2. Metodológica

El estudio se ejecutó mediante un enfoque metodológico mixto, combinando el análisis cuantitativo de imágenes satelitales con técnicas cualitativas como la aplicación de encuestas a pobladores locales. Para evaluar la afectación del ecosistema de pajonal de puna húmeda, se utilizó software especializado como ArcGIS y QGIS, empleando el índice espectral SAVI, que permitió detectar cambios en la cobertura vegetal entre los años 2000 y 2025. Este análisis se complementó con información obtenida mediante encuestas dirigidas a locadores, con el fin de conocer su percepción sobre las transformaciones ambientales observadas en el territorio. La integración de datos espaciales y sociales permitió validar los resultados desde múltiples dimensiones. Esta metodología, además de adaptarse a las condiciones del contexto andino, se propone como un modelo replicable para estudios similares en otros ecosistemas altoandinos afectados por el cambio climático. La combinación de tecnología geoespacial con información local fortaleció el análisis territorial y permitió generar conocimiento interdisciplinario sobre la dinámica de los ecosistemas y sus amenazas.

1.4.3. Práctica

Los resultados de la investigación permitieron identificar zonas críticas de degradación del ecosistema de pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta, así como entender los factores vinculados a su deterioro, por el cambio climático. Esta información es clave para las autoridades locales, instituciones ambientales y organizaciones, quienes pueden tomar decisiones orientadas a la conservación y restauración de estos ecosistemas frágiles. Asimismo,

se espera que el estudio contribuya a sensibilizar a la población sobre el valor ecológico del pajonal y fomentar prácticas sostenibles de uso del suelo. La investigación también brinda elementos para el desarrollo de diagnósticos ambientales, proyectos de reforestación o políticas de adaptación al cambio climático en zonas similares. De esta manera, el estudio no solo amplía el conocimiento científico, sino que tiene un impacto directo en la gestión ambiental local, aportando herramientas para la planificación territorial, la educación ambiental y la disminución de los efectos del cambio climático.

1.5.Hipótesis

1.5.1. Hipótesis general

H_0 = El ecosistema pajonal de puna húmeda tiene una relación muy alta con el cambio climático, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 – 2025.

H_1 = El ecosistema pajonal de puna húmeda no tiene una relación muy alta con el cambio climático, en la provincia de Canta, Región Lima, entre los años 1995 – 2025.

1.5.2. Hipótesis específica

Objetivo específico 1

H_0 = El índice espectral, SAVI, no refleja una tendencia alta de cambio en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda en Canta, Lima, durante el periodo 1995 al 2025.

H_1 = El índice espectral, SAVI, refleja una tendencia alta de disminución en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda en Canta, Lima, durante el periodo 1995 al 2025.

Objetivo específico 2

H_0 = Los parámetros meteorológicos no indican un cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025.

H_1 = Los parámetros meteorológicos indican un cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025.

Objetivo específico 3

H_0 = Las comunidades locales no perciben cambios significativos en la cobertura vegetal del Ecosistema Pajonal de Puna Húmeda ni en el clima, en la provincia de Canta, Lima, entre los años 1995 al 2025.

H_1 = Las comunidades locales perciben cambios significativos en la cobertura vegetal del Ecosistema Pajonal de Puna Húmeda ni en el clima, en la provincia de Canta, Lima, entre los años 1995 al 2025.

II. MARCO TEÓRICO

2.1. Bases teóricas sobre el tema de investigación

2.1.1. *Cambio climático*

En un análisis reciente, se explora cómo el cambio climático está reconfigurando los bosques a través del incremento de temperaturas, patrones erráticos de precipitación y eventos extremos (sequías, incendios). La evidencia recopilada revela una disminución crítica en la capacidad de estos ecosistemas para actuar como sumideros de carbono, junto con la pérdida acelerada de especies endémicas. Efectos indirectos, como la fragmentación de hábitats y la disrupción de redes tróficas, agravan el escenario. El estudio enfatiza la necesidad de estrategias adaptativas integrales—desde manejo forestal sostenible hasta políticas globales de descarbonización—y advierte que, sin intervenciones urgentes, la degradación de los bosques comprometerá irremediablemente sus servicios ecosistémicos. Este trabajo refuerza la idea del cambio climático como un fenómeno multidimensional, cuyos impactos trascienden lo ecológico para afectar directamente el bienestar humano. (Intergovernmental Panel on Climate Change, 2021).

Se entiende como una modificación persistente del estado medio del clima o de su variabilidad, identificable mediante análisis estadísticos y sostenida, por lo general, durante periodos iguales o superiores a treinta años, originada tanto por procesos naturales internos y forzamientos externos (como la actividad volcánica) como, de manera predominante en el contexto actual, por la acción antropogénica asociada a la alteración de la composición de la atmósfera global y al incremento de los gases de efecto invernadero, los cuales intensifican el calentamiento de la superficie terrestre y generan efectos sistémicos sobre el ciclo hidrológico y la distribución de las zonas de vida; en los ecosistemas de alta montaña, estas alteraciones se expresan en una elevada vulnerabilidad biofísica, debido a que el aumento de la temperatura y

la mayor irregularidad de las precipitaciones comprometen la estabilidad de la cobertura vegetal, la regulación hídrica, la biodiversidad y la disponibilidad de recursos esenciales para las poblaciones locales, por lo que la comprensión de dichos forzamientos resulta fundamental para el análisis de la resiliencia de sistemas frágiles, donde el desajuste entre la precipitación y la demanda evaporativa del suelo puede acelerar los procesos de degradación ecológica y la pérdida de servicios ecosistémicos. (Díaz, 2022)

2.1.2. *Eventos climáticos*

Los fenómenos climáticos extremos -entre ellos sequías devastadoras, inundaciones catastróficas, huracanes intensos y olas de calor sin precedentes- representan perturbaciones críticas que superan la capacidad adaptativa natural de los ecosistemas. Estos eventos disruptivos provocan transformaciones estructurales profundas: modifican radicalmente la composición de comunidades biológicas, alteran los patrones de productividad primaria y desestabilizan los regímenes hidrológicos fundamentales. Casos paradigmáticos incluyen la mortalidad masiva de vegetación por estrés hídrico o la erosión acelerada de suelos fértiles durante inundaciones, procesos que frecuentemente liberan contaminantes acumulados. Al exceder los umbrales históricos de variabilidad natural, estos fenómenos comprometen irreversiblemente la resiliencia ecológica, impulsando transiciones hacia estados degradados de menor biodiversidad y funcionalidad. Esta realidad exige enfoques innovadores de restauración que incorporen criterios de adaptación climática: selección de genotipos tolerantes, diseño de paisajes funcionales resistentes y sistemas de monitoreo continuo, estrategias clave para enfrentar la intensificación proyectada de estos eventos en el contexto del cambio climático global. (García y Moreno, 2021)

2.1.3. Clasificación climática

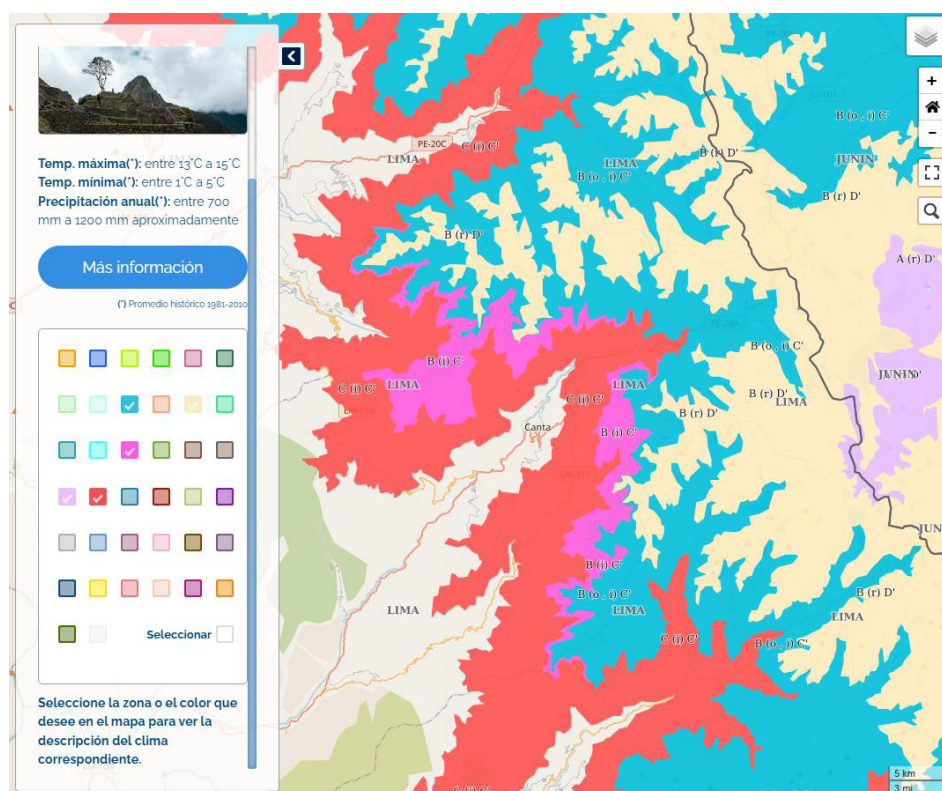
La clasificación climática propuesta por Charles Warren Thornthwaite se sustenta en un enfoque analítico basado en el balance hídrico, diferenciándose de los sistemas tradicionales que se apoyan principalmente en promedios de temperatura. En este método, el elemento central para la caracterización climática es la evapotranspiración potencial (ETP), entendida como la cantidad máxima de agua que podría transferirse a la atmósfera por efecto conjunto de la evaporación del suelo y la transpiración vegetal, bajo la condición de una disponibilidad óptima de humedad en el suelo. A partir de la relación entre la precipitación y la ETP se obtiene el Índice de Humedad Global (Im), el cual constituye un indicador cuantitativo que permite clasificar los climas en diferentes categorías, que abarcan desde condiciones per húmedas hasta áridas. En el caso de los ecosistemas de pajonal de puna húmeda, este enfoque resulta particularmente pertinente, ya que posibilita analizar la eficiencia real de la precipitación y estimar los excedentes y déficits hídricos a lo largo del año. En este marco conceptual, el clima se define en función de la capacidad del medio para cubrir su demanda evaporativa, aspecto fundamental para interpretar la respuesta de la cobertura vegetal frente a las variaciones de las variables climáticas. (Thornthwaite, 1948)

2.1.3.1. Clasificación climática del ecosistema pajonal de puna húmeda por

Thornthwaite. El ecosistema de pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta se clasifica, según el método de clasificación climática de C. W. Thornthwaite, aplicado en el Mapa Climático del Perú por el Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI, 2020), en diversos tipos climáticos identificados mediante códigos específicos. A partir del análisis espacial en la plataforma del SENAMHI y su intersección con el área de estudio, se determinaron principalmente los climas B(o,i)C', B(r)D', B(i)C', A(r)D' y C(i)C', los cuales representan combinaciones particulares de condiciones de humedad, régimen estacional de precipitaciones y características térmicas. La presencia de estos tipos climáticos evidencia la variabilidad y heterogeneidad climática del área evaluada, lo que permite una caracterización más detallada del ecosistema de pajonal de puna húmeda y su relación con las condiciones hidroclimáticas predominantes. (SENAMHI, 2020)

Figura 1

Mapa de clasificación climática del Perú



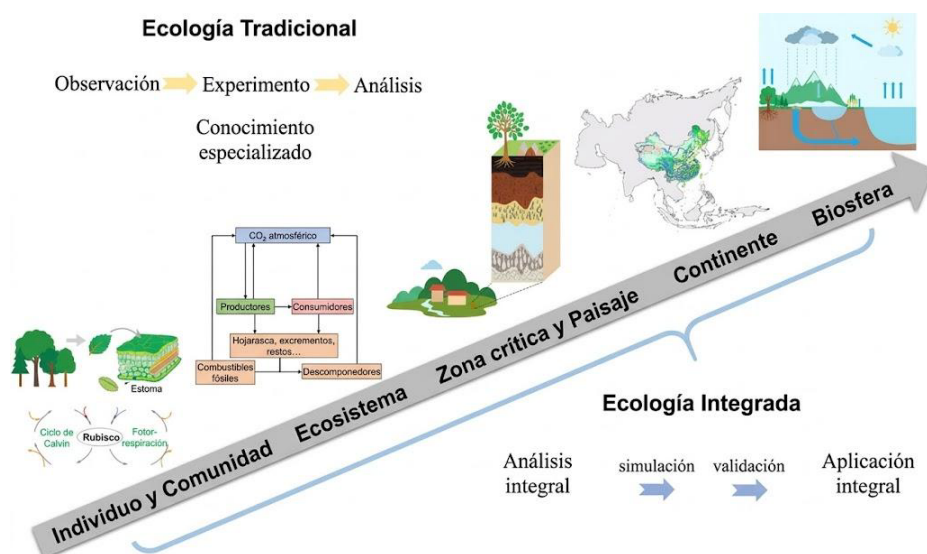
Nota. Tomado del mapa de clasificación climática del Perú (2020) – SENAMHI.

2.1.4. Ecosistema

Un ecosistema constituye una red compleja donde organismos (flora, fauna, microorganismos) interactúan entre sí y con su entorno físico (agua, suelo, atmósfera) mediante flujos de energía y ciclos biogeoquímicos. Procesos como la fotosíntesis, la descomposición de materia orgánica o las relaciones depredador-presa sostienen su equilibrio y resiliencia. Más allá de su valor intrínseco, estos sistemas proveen servicios indispensables: regulación hídrica y climática, provisión de alimentos, mantenimiento de la biodiversidad y sustento cultural para comunidades humanas. Su preservación es, por tanto, fundamental para la estabilidad planetaria y la supervivencia de nuestras sociedades. (Hobbs y Suding, 2021)

Figura 2

Niveles de Organización del Ecosistema: Perspectivas Tradicionales e Integradas



Nota. Adaptado de *Moving toward a new era of ecosystem science*, por R. Hobbs y C. Suding, 2021.

2.1.4.1. Pajonal de puna húmeda. Este ecosistema de pastizales altoandinos (3,800–4,500 msnm), dominado por gramíneas resistentes a condiciones extremas de frío, radiación UV y humedad, desempeña un rol ecológico estratégico. Funcionando como una esponja natural, captura hasta el 80% del agua lluvia, regula escorrentías y recarga acuíferos, mitigando así sequías en regiones aguas abajo. Además de su capacidad para almacenar carbono, alberga biodiversidad única y sustenta prácticas ganaderas ancestrales. Su conservación es clave para la adaptación climática en los Andes, ya que protege tanto medios de vida locales como servicios ecosistémicos de escala regional. (Núñez et al., 2021)

2.1.4.2. Biomasa. La biomasa representa la materia orgánica viva (vegetal, animal, microbiana) presente en un ecosistema en un momento determinado, expresada en masa por unidad de área. Es un indicador directo de productividad primaria, salud ecológica y potencial de secuestro de carbono. Su cuantificación es esencial para entender dinámicas como la transferencia de energía en cadenas tróficas, diseñar estrategias de restauración o evaluar el impacto de proyectos de compensación ambiental. En el contexto de crisis climática, medir la biomasa adquiere relevancia adicional para modelos predictivos y mercados de carbono basados en soluciones naturales. (Hang et al., 2023)

2.1.5. Servicios ecosistémicos

Los servicios ecosistémicos son las aportaciones vitales que la naturaleza provee a la humanidad, agrupadas en cuatro categorías interdependientes: aprovisionamiento (recursos como alimentos, agua y materias primas), regulación (estabilidad climática, calidad del aire y control hidrológico), soporte (procesos esenciales como ciclos de nutrientes y polinización) y culturales (valores recreativos, espirituales e identitarios). Su valoración integral - tanto ecológica como económica - permite incorporar el capital natural en políticas públicas, planeamiento territorial y modelos de negocio sostenibles. Este enfoque es crucial para preservar la biodiversidad e implementar soluciones basadas en la naturaleza, transformando

la relación sociedad-ecosistema hacia un paradigma de corresponsabilidad que garantice tanto el bienestar humano como la salud planetaria. (Sven, 1999)

2.1.6. Restauración ecológica

La restauración ecológica es un proceso activo para recuperar la integridad funcional y estructural de ecosistemas degradados. Combinando técnicas como reintroducción de especies nativas, control de invasoras, rehabilitación de suelos y monitoreo adaptativo, con el fin de restaurar procesos ecológicos autosostenibles. Enmarcada en iniciativas como la Década de la Restauración de la ONU (2021–2030), esta disciplina busca no solo revertir daños ambientales, sino también fortalecer la resiliencia de los ecosistemas ante futuras perturbaciones, asegurando la provisión duradera de sus servicios esenciales para las generaciones presentes y futuras. (Society for Ecological Restoration [SER], 2004)

2.1.7. Resiliencia de ecosistemas

La resiliencia ecológica constituye la capacidad intrínseca de los ecosistemas para resistir perturbaciones -ya sean naturales o antropogénicas- preservando su integridad estructural y funcional, mientras mantienen la facultad de auto recuperarse sin transicional a estados alternativos indeseables. Esta propiedad emergente se sustenta en pilares fundamentales como la diversidad genética, la complejidad trófica, la conectividad del paisaje y la redundancia funcional entre especies. Cuando estos atributos se deterioran, los sistemas ecológicos pierden su capacidad amortiguadora, aproximándose peligrosamente a umbrales críticos que pueden desencadenar cambios abruptos e irreversibles hacia regímenes degradados, frecuentemente caracterizados por la homogenización biológica y el dominio de especies generalistas. El seguimiento de parámetros ecológicos sensibles -desde la estabilidad en la productividad primaria hasta la dinámica de poblaciones clave- funciona como sistema de alerta temprana para implementar medidas correctivas. Preservar esta resiliencia no es solo

una prioridad ecológica, sino un requisito fundamental para garantizar servicios ecosistémicos esenciales, desde la regulación climática hasta la provisión de alimentos, especialmente en un contexto de creciente variabilidad ambiental. (Rocha, 2021)

2.1.8. Degradación de ecosistemas

La degradación de ecosistemas representa un deterioro progresivo de sus funciones vitales, donde servicios clave como regulación climática, fertilidad del suelo, retención hídrica y biodiversidad se ven comprometidos por actividades humanas (deforestación, contaminación, sobreexplotación) y fenómenos climáticos extremos. Este proceso se manifiesta en la pérdida de productividad biológica (hasta un 40% en casos críticos), alteración de ciclos biogeoquímicos y fragmentación de hábitats, reduciendo su capacidad de resiliencia. Sus impactos son multidimensionales: desde la escasez de agua y colapso de polinizadores hasta la intensificación de desastres naturales. La convergencia de múltiples presiones acelera sinergias negativas, llevando a umbrales irreversibles, como la desertificación o la homogenización biótica. Combatir esta crisis exige enfoques integrados que combinen restauración ecológica, políticas de conservación proactivas y modelos económicos regenerativos. (Johnson et al., 1997)

2.1.8.1. Cambio de uso de suelo. La transformación antropogénica del territorio implica la conversión irreversible de ecosistemas naturales -como bosques, humedales y pastizales- en superficies destinadas a actividades humanas, generando impactos ecológicos profundos que incluyen la fragmentación de hábitats, pérdida de biodiversidad, alteración de ciclos hidrológicos y degradación de suelos. Este proceso, particularmente evidente en ecosistemas altoandinos donde humedales y pajonales son reemplazados por tierras de cultivo, compromete funciones ecosistémicas clave como el almacenamiento de carbono y la regulación hídrica. Las tecnologías de teledetección permiten monitorear estas transformaciones, proporcionando evidencia científica fundamental para desarrollar políticas de ordenamiento territorial que equilibren las demandas productivas con la conservación ambiental, promoviendo así un manejo sostenible del paisaje que mitigue los impactos acumulativos de esta transformación. (Cano et al., 2023)

2.1.8.2. Actividad antrópica. El impacto humano sobre los sistemas naturales ha alcanzado una escala planetaria sin precedentes, manifestándose a través de transformaciones radicales del paisaje como la conversión de bosques en tierras agrícolas, la expansión descontrolada de áreas urbanas y la explotación intensiva de recursos minerales. Estas intervenciones humanas alteran profundamente los procesos ecológicos fundamentales: modifican los ciclos globales del carbono y nitrógeno, aceleran la erosión de la biodiversidad y generan contaminación a gran escala. La huella ecológica de estas actividades es tan profunda que los científicos proponen reconocer una nueva era geológica -el Antropoceno- donde el ser humano se ha convertido en el principal agente de cambio ambiental. Frente a este escenario, se hace imperativo implementar estrategias integradas que combinen: prácticas de producción regenerativa, programas de rehabilitación de ecosistemas críticos y marcos normativos que limiten las emisiones contaminantes, buscando restaurar el equilibrio entre las necesidades humanas y los límites biofísicos del planeta. (Crutzen y Steffen, 2008)

2.1.9. *Riesgo ecológico*

El riesgo ecológico representa la vulnerabilidad de los ecosistemas a sufrir alteraciones críticas en su funcionamiento y capacidad de proveer servicios ambientales, debido a factores como contaminación, fragmentación de hábitats o fenómenos climáticos extremos. Su análisis sistemático considera tres dimensiones clave: la magnitud de la amenaza (exposición), la susceptibilidad del ecosistema (sensibilidad) y su potencial de recuperación (resiliencia), conformando un marco integral para identificar áreas prioritarias de intervención. Esta aproximación cuantitativa sustenta la toma de decisiones ambientales, permitiendo optimizar recursos hacia las zonas de mayor fragilidad ecológica, particularmente en escenarios de presión antropogénica acelerada. Los resultados de estas evaluaciones son fundamentales para diseñar estrategias de adaptación proactivas, minimizar impactos sobre la biodiversidad y garantizar la sostenibilidad de los sistemas naturales ante disturbios crecientes, representando una herramienta indispensable para la gestión ambiental contemporánea. (Munns et al., 2009)

2.1.10. *Software*

El software representa el componente intangible y lógico que da vida a los sistemas informáticos, conformado por secuencias de instrucciones, algoritmos y programas diseñados para ejecutar funciones específicas. A diferencia del hardware (componentes físicos), opera como el cerebro digital que gestiona el procesamiento de información, la interacción usuario-máquina y la ejecución de tareas. Se estructura en tres categorías principales: (1) software de sistema (ej. sistemas operativos), (2) software de aplicación (ej. herramientas SIG, suites ofimáticas) y (3) software de desarrollo (ej. IDEs, librerías de programación). En el ámbito geo ambiental, adquiere especial relevancia al permitir el manejo de macrodatos, la implementación de modelos predictivos y el análisis de dinámicas territoriales, siendo herramientas como los SIG fundamentales para estudios de cambio climático, gestión de recursos hídricos y planificación urbana sostenible. La revolución del open - source ha eliminado barreras

económicas, fomentado la innovación colaborativa y ampliado las capacidades analíticas de instituciones académicas, gobiernos y organizaciones, transformando radicalmente cómo abordamos los desafíos socioambientales mediante soluciones tecnológicas accesibles y escalables. (Sommerville, 2016)

2.1.10.1. ArcGis. ArcGIS, desarrollado por ESRI, constituye un sistema integral de información geográfica que facilita el manejo completo de datos espaciales, desde su captura y almacenamiento hasta el análisis avanzado y visualización interactiva. Esta plataforma versátil ofrece soluciones especializadas para diversos campos, incluyendo ordenamiento territorial, gestión ambiental, respuesta a emergencias y estudios demográficos, mediante herramientas sofisticadas de geoprocесamiento, modelado 3D del terreno e integración con servicios web geoespaciales. Su amplia adopción en el ámbito profesional se debe a su combinación única de capacidades técnicas: una interfaz de usuario accesible para distintos niveles de especialización, acceso a bases de datos cartográficos globales continuamente actualizados, y un potente motor de procesamiento capaz de manejar grandes volúmenes de información georreferenciada con elevado rendimiento. (Esri, 2020)

2.1.10.2. Global moran's I. El índice Global Moran's I representa una poderosa herramienta de análisis espacial que cuantifica patrones de autocorrelación geográfica, determinando si los datos muestran tendencias hacia la concentración (clustering), dispersión o distribución aleatoria en el espacio geográfico. Este indicador genera valores normalizados entre -1 (dispersión óptima), 0 (distribución aleatoria) y +1 (agrupamiento perfecto), complementados con pruebas de significancia estadística (valores z y p) que validan los resultados. Su aplicación resulta particularmente valiosa en estudios geográficos para: 1) detectar hotspots de fenómenos ambientales como deforestación o contaminación, 2) analizar patrones epidemiológicos, y 3) evaluar desigualdades socioeconómicas territoriales, proporcionando así evidencia cuantitativa para la toma de decisiones en gestión territorial y políticas públicas. (Esri, 2025)

2.1.10.3. ArcGIS pro. ArcGIS Pro representa la evolución más desarrollada de los sistemas de información geográfica de escritorio, integrando capacidades revolucionarias para el procesamiento y análisis espacial. Esta plataforma unificada combina herramientas de mapeo 2D/3D de última generación con un entorno de modelado visual (ModelBuilder) y soporte nativo para lenguajes de programación como Python y R, permitiendo automatización y análisis estadístico avanzado. Destaca particularmente por su capacidad para manejar grandes volúmenes de datos (big data) e incorporar algoritmos de inteligencia artificial, facilitando el descubrimiento de patrones espaciales complejos. Su arquitectura innovadora soporta workflows colaborativos en tiempo real y publicación directa de mapas interactivos en la nube, consolidando todas las fases del trabajo geográfico -desde la captura de datos hasta el análisis avanzado y la visualización profesional- en un entorno integrado y altamente eficiente. Esta solución todo-en-uno está transformando la forma en que profesionales y organizaciones trabajan con información georreferenciada. (Esri, 2025)

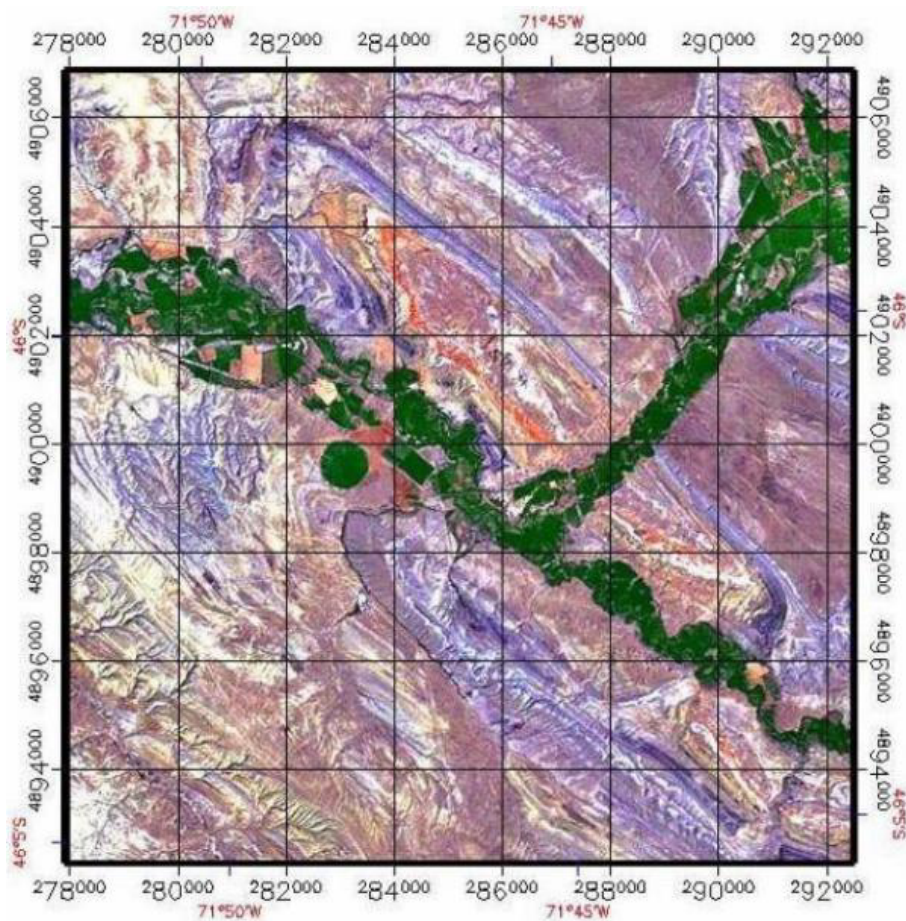
2.1.10.4. QGis. QGIS emerge como una potente alternativa open - source en el ámbito de los Sistemas de Información Geográfica, ofreciendo un conjunto completo de funcionalidades para el procesamiento de datos espaciales. Esta plataforma gratuita proporciona capacidades avanzadas de visualización cartográfica, edición vectorial, análisis geoespacial y automatización de procesos mediante plugins desarrollados en Python, permitiendo adaptar el software a necesidades específicas. Su naturaleza de código abierto les otorga ventajas distintivas frente a soluciones propietarias, particularmente en términos de adaptabilidad (permite modificaciones a nivel de código), personalización ilimitada (a través de extensiones) y el soporte de una comunidad global de desarrolladores y usuarios que contribuyen continuamente a su mejora. Esta combinación de herramientas profesionales accesibles y desarrollo colaborativo ha posicionado a QGIS como una opción técnicamente robusta y económicamente accesible para instituciones, investigadores y profesionales de la geografía. (QGIS, 2018)

2.1.10.5. Peruvian interpolated data of the senamhi's climatological and hydrological observations – pisco. La base de datos PISCO (Peruvian Interpolated data of the Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú – SENAMHI) constituye una referencia técnica fundamental para los estudios ambientales desarrollados en territorios de relieve complejo, como los Andes de la provincia de Canta. Este producto de información espacial se elabora a partir de la combinación de series históricas provenientes de estaciones meteorológicas convencionales y datos de origen satelital de alta resolución, integrados mediante técnicas de interpolación geoestadística. Este procedimiento permite construir series temporales continuas de precipitación y temperatura con una resolución espacial de 0,1°, reduciendo de manera significativa las limitaciones asociadas a la baja densidad de estaciones en zonas altoandinas. En el análisis del ecosistema de pajonal de puna húmeda, el uso de PISCO resulta clave, ya que aporta información climática consistente y validada para describir la variabilidad climática y evaluar las tendencias de largo plazo, constituyéndose en una herramienta central para el estudio de la resiliencia de los ecosistemas y la simulación de respuestas biofísicas frente al cambio climático en el ámbito peruano. (Aybar, 2020)

2.1.10.6. eCognition. eCognition constituye una solución tecnológica avanzada para el procesamiento de imágenes de percepción remota mediante el enfoque de análisis orientado a objetos (GEOBIA), permitiendo la segmentación inteligente y clasificación precisa de imágenes multiespectrales y de ultra alta resolución mediante el uso combinado de: (1) reglas semánticas contextuales, (2) descriptores espaciales-texturales y (3) algoritmos de machine learning. Su implementación resulta particularmente eficaz en dominios aplicados como monitoreo de expansión urbana, agricultura de precisión, evaluación de recursos forestales y estudios de cambio ambiental, destacando por su capacidad única para transformar datos ráster complejos en información geográfica temática de alto valor analítico, superando las limitaciones de los métodos tradicionales de clasificación pixel-based. (Lemenkova, 2018)

2.1.11. Imagen satelital

Estas son imágenes que se obtienen a través de satélites que orbitan alrededor de la Tierra. Estos satélites están equipados con cámaras y sensores especializados que capturan imágenes de la superficie terrestre desde diferentes ángulos y altitudes. Las imágenes satelitales pueden ser aptas para un gran número de usos, incluyendo la cartografía, la observación de la Tierra, la agricultura, la planificación urbana, la detección de desastres y la gestión de recursos naturales. Hay dos tipos principales de satélites que se utilizan para obtener imágenes satelitales: satélites que observan a la tierra y los satélites meteorológicos. Los satélites de observación de la Tierra están diseñados para capturar imágenes de alta resolución de la superficie terrestre con el fin de producir mapas precisos y detallados de la tierra, agua y vegetación. Estos satélites también se emplean para estudiar las transformaciones en la Tierra y para detectar desastres naturales. Los satélites meteorológicos, por otro lado, están diseñados para capturar imágenes de la atmósfera y el clima con el fin de producir pronósticos del tiempo precisos. (Valdivia, 2019)

Figura 3*Imagen Satelital Procesada*

Nota. Tomado de *Guía básica de imágenes satelitales*, por Valdivia, 2019.

2.1.11.1. Imágenes satelitales sentinel-2. Sentinel-2 es un proyecto europeo que emplea imágenes multispectrales con alta resolución y una amplia cobertura espacial. Integrado en el programa Copernicus de la UE, esta misión está orientada a aplicaciones operativas relacionadas con la superficie terrestre, como el seguimiento de la vegetación, los suelos, las masas de agua, así como la observación de ríos y áreas costeras.

Los satélites gemelos S-2B y S-2C comparten órbita, pero están separados por 180° para optimizar su cobertura. Su diseño garantiza una elevada frecuencia de revisita, de 5 días en la zona ecuatorial. Adicionalmente, el satélite S-2A opera temporalmente con un desplazamiento de 36° respecto al S-2B. (Copernicus, 2025)

La configuración espectral de Sentinel-2 se definió tras consultar a los usuarios durante su fase de desarrollo. El satélite cuenta con un instrumento óptico que captura 13 bandas espectrales distribuidas en: Cuatro bandas a 10 m de resolución, Seis bandas a 20 m y Tres bandas con 60 m de resolución espacial (Copernicus, 2025)

2.1.11.2. Imágenes satelitales landsat. La “constelación” de satélites Landsat se utilizan para obtener imágenes de la superficie como del suelo terrestre. En un principio estos pues se nombraron ERTS (Earth Resources Technology Satellites), Estados Unidos lanzo esta primera misión para así poder monitorear los recursos que hay en la tierra. Estos satélites se utilizan principalmente para estudios ambientales y agrícolas, y se basan en el uso de firmas espectrales para identificar y extraer información de los objetos y fenómenos en la superficie terrestre. Además, se menciona que los metadatos son un elemento clave para compartir esta información, aunque actualmente no hay un estándar para los metadatos de las firmas espectrales. (INGEGI, 2020)

A. Landsat 7. El satélite Landsat 7, puesto en órbita en abril de 1999, marcó un avance tecnológico al integrar el sensor ETM+ (Enhanced Thematic Mapper Plus), diseñado para capturar imágenes multiespectrales de alta resolución con calibración radiométrica y georreferenciación precisa. Según Goward et al. (2001), esta misión no solo optimizó la monitorización satelital de la superficie terrestre, sino que también sentó las bases para estudios longitudinales en dinámicas de uso de suelo, transformaciones ambientales y variabilidad climática. Su diseño robusto y calibración meticulosa permitieron identificar alteraciones mínimas en coberturas vegetales, expansión urbana y patrones hidrológicos, con aplicaciones transversales en agricultura de precisión, gestión sostenible del agua y conservación de ecosistemas costeros. La consistencia de sus datos a lo largo de décadas ha consolidado al Landsat 7 como un pilar indispensable para la ciencia de la observación terrestre, ofreciendo

insights clave en la comprensión de procesos ecológicos a escala global y la gestión de recursos naturales. (Resources Landsat 7 , 2017).

B. *Landsat 8-9.* El satélite LDCM fue lanzado en febrero de 2013 con el objetivo de proseguir con la iniciativa de tomar imágenes desde el espacio de los Estados Unidos que ha estado en marcha desde 1972. El equipo de detección incluye el radiómetro multicanal OLI y el radiómetro infrarrojo TIRS. El instrumento OLI, fabricado por “Ball Aerospace & Technologies”, opera en 9 longitudes de onda y proporciona imágenes de alta resolución. Los dispositivos de misión del satélite tienen un diseño nuevo y más confiable que aumenta su vida útil en 5 años. También se pueden hacer observaciones mediante dos longitudes de onda adicionales que pues estas serán fundamentales para poder analizar los cirros y también para evaluar la pureza de las aguas como en lagos y en especial de las zonas costeras. El instrumento TIRS tiene una resolución espacial de 100m y se utiliza para evaluar las etapas de transferencia de humedad y calor en la gestión del agua y la agricultura. A diferencia de los satélites Landsat anteriores, TIRS puede realizar observaciones en dos combinaciones de 8 bandas de longitud de onda infrarroja y utiliza un sistema de barrido que reduce la distorsión radiométrica. (Analytics, Eos Data, 2018)

2.1.11.3. Clasificación de las imágenes satelitales. La clasificación de las imágenes satelitales consta de los datos satelitales multiespectrales e hiperespectrales permiten observar la Tierra desde el espacio, permitiendo estudiar objetos y fenómenos en la superficie terrestre. Sin embargo, los requerimientos de información específica y el tiempo necesario para procesar estos datos han generado un cambio fundamental en este proceso. Una vez que los patrones de interés han sido identificados, es posible llevar a cabo su reconocimiento mediante una clasificación espectral, que convierte los datos satelitales en información sobre los objetos y fenómenos de la superficie terrestre. La clasificación es un método para evaluar las características morfológicas y estadísticas de los elementos de una imagen, y su finalidad es determinar los píxeles con valores semejantes dentro de ciertas condiciones estadísticas. El resultado ideal es obtener clases mutuamente excluyentes y exhaustivas. (López y Torres, 2018)

2.1.12. Índice de vegetación ajustado al suelo - savi

Es una medida espectral diseñada para evaluar la cobertura vegetal en imágenes satelitales, especialmente en áreas donde la vegetación es escasa y el suelo expuesto puede influir en los resultados. A diferencia de otros índices como el NDVI, el SAVI incorpora un factor de corrección del suelo (L) que reduce el impacto de la reflectancia del terreno descubierto, haciendo que los valores del índice sean más representativos de la vegetación real presente. Este valor de ajuste suele tomar el valor de 0.5 cuando no se tiene conocimiento detallado del tipo de cobertura. El SAVI se calcula utilizando las bandas del rojo y del infrarrojo cercano, lo que permite distinguir áreas con mayor actividad fotosintética. Su uso es especialmente útil en regiones semiáridas, agrícolas o degradadas, donde el fondo del suelo puede distorsionar los resultados del análisis espectral. Por ello, es una herramienta clave en estudios de monitoreo ambiental y agrícola. (Beers, 2016)

Figura 4*Índice Soil Adjusted Vegetation Index (SAVI)*

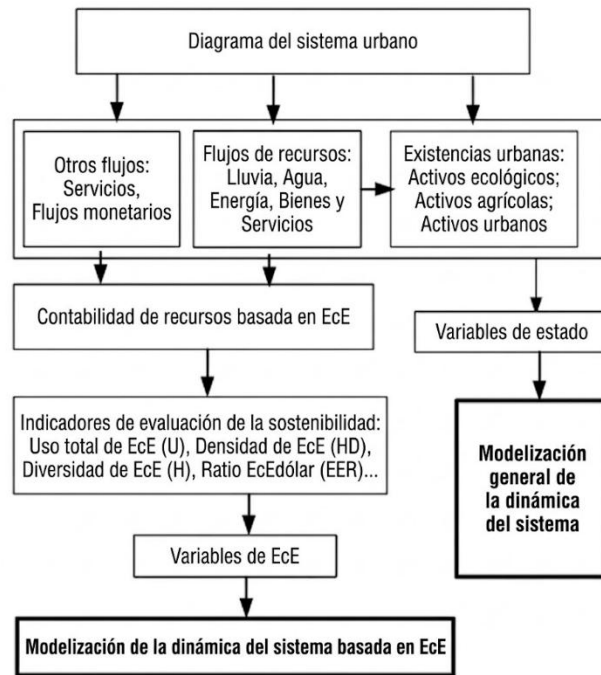
Nota. Tomado de *Cálculo del índice de vegetación SAVI*, por Beers GIS, 2016.

2.1.13. Modelos de exergía cósmica

Los modelos de exergía cósmica representan un enfoque termodinámico innovador que cuantifica la fracción utilizable de la energía solar y cósmica (exergía) capaz de realizar trabajo efectivo en sistemas naturales y antropizadas. A diferencia de la energía bruta, la exergía evalúa el potencial cualitativo para mantener procesos biológicos (como la fotosíntesis) o tecnológicos (en infraestructuras energéticas), funcionando como un indicador de eficiencia sistémica. Estos modelos permiten: diferenciar entre energía incidente y capacidad real de transformación, evaluar la sostenibilidad ambiental mediante balances energéticos precisos, y optimizar diseños tecnológicos mediante la identificación de pérdidas termodinámicas. Al comparar el desempeño exergético de ecosistemas naturales con sistemas urbanos, proveen un marco científico para desarrollar estrategias de uso energético más eficientes, reduciendo la degradación ambiental y promoviendo la simbiosis entre procesos ecológicos y necesidades humanas. (Jiang y Chen, 2011)

Figura 5

Estructura del modelo dinámico de sistema basado en EcE (EESDM) – exergía cósmica



Nota. Adaptado de *Integrated urban ecosystem evaluation and modeling based on embodied cosmic exergy*, por M. M. Jiang y B. Chen, 2011.

III.MÉTODO

3.1.Tipo de investigación

La investigación es aplicada, enfocada en resolver problemas específicos utilizando conocimientos científicos ya existentes o creando nuevos, con el propósito de ofrecer soluciones prácticas y efectivas para situaciones reales. Al contrario de la investigación básica, que se dirige a expandir el saber teórico sin una aplicación directa, la investigación aplicada trabaja en escenarios concretos, como comunidades, entornos naturales o áreas industriales. De esta manera, logra conectar el estudio académico con demandas sociales, ecológicas o económicas, proporcionando recursos que facilitan la toma de decisiones, el manejo responsable de recursos o la reducción de efectos adversos. (Veracruzana, 2014)

Es de nivel correlacional-explicativo no solo se limita a describir un fenómeno, sino que también examina las conexiones entre variables y determina las razones detrás de su comportamiento. En este enfoque investigativo, se emplean datos cuantitativos para evaluar si hay un vínculo relevante entre distintos elementos, como la asociación entre un indicador ambiental y un factor meteorológico. (Veracruzana, 2014)

3.2.Ámbito temporal y espacial

3.2.1. *Ámbito temporal*

La investigación se desarrolló entre los meses de setiembre del año 2025 al mes de marzo del año 2026, el periodo de procesamiento y análisis de las imágenes satelitales se encuentran comprendido entre los años 1995 – 2025, de esta forma se evaluó los cambios de temperatura y precipitación y relacionar con los índices de SAVI del ecosistema pajonal de puna húmeda (Canta, Lima).

3.2.2. *Ámbito espacial*

La provincia de Canta se ubica en el departamento de Lima, la cual tiene un área de 168,700 ha, y se encuentra a una altitud de 2,820 m.s.n.m. Por otro lado, el ecosistema pajonal de puna húmeda dentro de la provincia tiene un área de 40,271.40 ha.

Límites:

- Por el Norte con la provincia de Huaral
- Por el Oeste con la provincia de Lima
- Por el Sur con las provincias de Lima y Huarochirí
- Por el Este con la provincia de Yauli

Tabla 1

Ubicación geoespacial del área de estudio

Área de la Zona de Estudios	Puntos Extremos	Coordenadas UTM WGS 84 Zona 18 S	
		Este	Norte
Provincia de Canta	Noroeste	273632.8m	8750830.4m
	Noreste	353007.9m	8752100.4m
	Suroeste	277125.3m	8694632.8m
	Sureste	353484.2m	8697966.6m

Nota. Coordenadas extraídas del Instituto Geográfico Nacional.

3.3. Variables

3.3.1. *Variable 1*

Cambio Climático

3.3.2. *Variable 2*

Ecosistema pajonal de puna húmeda

3.3.3. Matriz de operacionalización de variables

Título: ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025.

Tabla 2

Matriz operacional de las variables de la investigación

VARIABLES	DEFINICION CONCEPTUAL	DEFINICION OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	INSTRUMENTOS DE MEDIDA
Variable 1 Cambio climático	El cambio climático constituye un cambio importante en los patrones climáticos globales, impulsada principalmente por funciones antrópicas que acrecen las acumulaciones de gases de efecto invernadero. Este fenómeno afecta múltiples sistemas naturales (ecosistemas) y antropogénicos, incluida la generación de energía renovable. (Nichols y Hill, 2025)	Según la OMM y las clasificaciones climáticas elaboradas por Thornthwaite, utilizan 30 años de información para dar a conocer un clima, en la investigación se analizará la precipitación y la temperatura por 30 años.	Patrones climáticos	- Variación de la temperatura - Variación de la precipitación	°C en el SIG - PP mm, en el SIG
			Actividades humanas	- Cambios en la siembra - Cambios de inicios de las lluvias - Cambio del volumen del agua - Cambios de la presencia de especies - Cambios de las costumbres tradicionales	Aplicación del instrumento de investigación

Variable 2 Ecosistema pajonal de puna húmeda	Un ecosistema es una sociedad de seres vivos y su entorno físico en un lugar determinado. Los ecosistemas pueden ser de cualquier tamaño, desde pequeñas pozas de marea hasta la biosfera completa. Sin embargo, los lagos, pantanos y bosques son ejemplos comunes de los ecosistemas que se consideran a menudo al discutir la diversidad de los ecosistemas. (Armenteras & González, 2018)	El ecosistema pajonal de puna húmeda será analizado con el índice de vegetación ajustada al suelo – SAVI, esto se realizará a través del análisis de las imágenes de satélite que nos proporciona valores de +1 a -1, donde los valores positivos muestran la buena salud de la vegetación y los valores negativos muestran la vegetación muerta.	• Área de la vegetación del ecosistema • Salud de la vegetación	• Pérdida de cobertura forestal • SAVI	• Imágenes satelitales Landsat
--	--	--	--	---	--

Nota. Operación de variables de la investigación

3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

Se consideró como población al ecosistema pajonal de puna húmeda de la provincia de Canta con una extensión de 40,271.40 ha, considerando que el ecosistema se extiende hacia el norte y sur de la provincia.

3.4.2. Muestra

Se consideró la muestra por conveniencia al ecosistema pajonal de puna húmeda del área de la provincia de Canta, cuya extensión es de 40,271.4 ha, en la investigación se evaluó la degradación del ecosistema pajonal de puna húmeda mediante índices espectrales y su relación con el cambio climático.

La aplicación del instrumento se tomó en cuenta el Centro Poblado de Huaros en distrito del mismo nombre el cual tiene una población de 822 personas (según estimaciones del INEI, 2021), considerando la población entre los 25 a más de 65 años se tiene una población de 504 personas, por lo cual la muestra está definida por la siguiente fórmula:

$$n = \frac{N Z^2 \sigma^2}{e^2(N - 1) + \sigma^2 Z^2}$$

donde:

- n = El tamaño de la muestra
- N = tamaño de la población de 504 personas
- σ = Desviación estándar de la población, que generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor constante de 0,5.

- Z = Valor obtenido mediante niveles de confianza. Es un valor constante que, si no se tiene su valor, se lo toma en relación con el 90% de confianza equivale a 1.65.
- e = Limite aceptable de error muestral que, generalmente cuando no se tiene su valor, suele utilizarse un valor que varía entre el 1% (0,01) y 9% (0,09), para dicho estudio se ha tomado el valor del 9%

Por lo cual resulta un valor de 73 personas encuestadas.

3.5.Instrumentos

Como instrumento se elaboró una encuesta para la toma de datos de los pobladores en campo, esta encuesta se realizó a personas mayores de los 25 años y que tengan residencia permanente en la zona. (ver Anexos)

3.5.1. Equipos

- Laptop ACER NITRO 5
- GPS Garmin GPSMAP CSx76
- Cámara fotográfica digital CANON
- Celular POCO x5 pro (Android)

3.5.2. Software

- ARCGIS 10.5
- Qgis 3.34.12
- Jupyter Notebook / Anaconda
- Microsoft Excel
- Microsoft Word
- Microsoft Power point

3.5.3. *Materiales*

- Imágenes Satelitales Landsat de la plataforma USGS.
- Cartografía base (shp, kmz, tif, dem)
- Carpetas de campo (protocolos estandarizados para la toma de datos)
- Extracción de data: “Pisco” R-studio
- Datos Climáticos: Data de Worldclim

3.6.Procedimientos

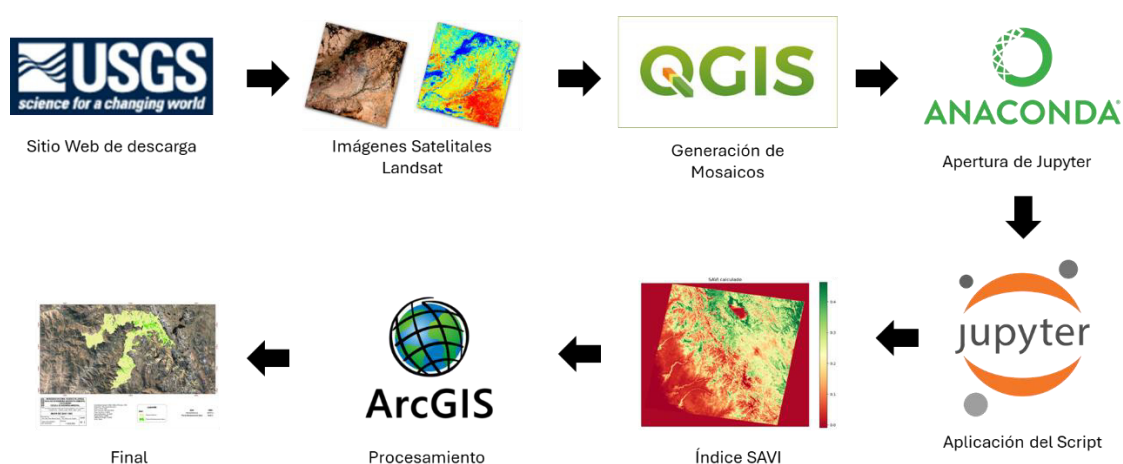
3.6.1. *Determinar las tendencias de cambio que refleja el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de cantu, región lima entre los años 1995 al 2025*

Para el desarrollo de este objetivo, se realizó una selección de imágenes satelitales correspondientes a los sensores Landsat 4-5, 7 y 8-9, para los meses de temporada húmeda, con la finalidad de visualizar la zona de estudio. La adquisición de estas imágenes se llevó a cabo a través de la plataforma USGS Earth Explorer o mediante el software QGIS, empleando la delimitación del área en formato shp o kmz. El análisis contempló intervalos de cinco años, específicamente para 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2025, permitiendo observar la variación de la cobertura vegetal frente al cambio climático. El procesamiento inicial se ejecutó en QGIS para generar mosaicos de la zona, luego se realizó el cálculo del índice SAVI en los programas Anaconda y ArcGIS. Se empleó el software Anaconda como entorno de gestión para acceder al lenguaje de programación mediante Jupyter Notebook, con la finalidad de ejecutar un script automatizado orientado al cálculo del índice SAVI en imágenes satelitales correspondientes a múltiples años. Este procedimiento permitió optimizar el procesamiento masivo de datos, reduciendo significativamente el tiempo de análisis y

mejorando la eficiencia en la obtención de resultados. Asimismo, el script incorporó rutinas de corrección específicas para imágenes Landsat 7, considerando que algunas escenas requieren ajustes en determinadas bandas debido a limitaciones propias del sensor, lo que garantizó una mayor consistencia y confiabilidad en el análisis multitemporal. Finalmente, se creó un archivo shp del ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta para detallar su extensión y realizar un monitoreo que identifique las variaciones y el desarrollo del ecosistema en los rangos de años definidos. Se detalla el procedimiento en la siguiente figura.

Figura 6

Flujograma del 1er proceso



Nota. Flujograma que explica el proceso para determinar las tendencias del cambio que refleja el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta.

3.6.1.1. Clasificación del estado de la vegetación mediante SAVI. Para la interpretación del índice espectral SAVI en el ecosistema pajonal de puna húmeda, se establecieron rangos de clasificación que permiten diferenciar el estado de la cobertura vegetal en función de la respuesta espectral registrada en cada periodo de análisis. El índice SAVI presenta valores comprendidos entre -1 y 1, lo que posibilita identificar gradientes de vegetación desde condiciones de ausencia o degradación hasta estados de alta densidad y vigor vegetal.

En ese contexto, la clasificación adoptada se estructuró en cuatro categorías que representan distintos niveles de condición de la vegetación: valores entre -1 y 0, asociados a áreas con presencia de vegetación muerta o prácticamente inexistente; valores entre 0 y 0.33, correspondientes a vegetación en estado enfermo o con bajo vigor; valores entre 0.33 y 0.66, que indican una condición medianamente sana de la vegetación; y valores entre 0.66 y 1, los cuales representan vegetación muy sana con alta densidad y actividad fotosintética.

Esta clasificación permite analizar de manera diferenciada la distribución espacial y temporal del estado del ecosistema, facilitando la identificación de zonas con distintos niveles de conservación o degradación. Asimismo, constituye una herramienta clave para interpretar los cambios observados en la cobertura vegetal a lo largo del periodo de estudio, permitiendo establecer patrones de comportamiento del ecosistema frente a las variaciones ambientales registradas.

Tabla 3

Clasificación para el índice SAVI

Rango SAVI	Clasificación	Interpretación
-1 – 0	Planta muerta	Ausencia o pérdida de cobertura vegetal
0 – 0.33	Planta enferma	Bajo vigor vegetal
0.33 – 0.66	Planta medianamente sana	Cobertura intermedia

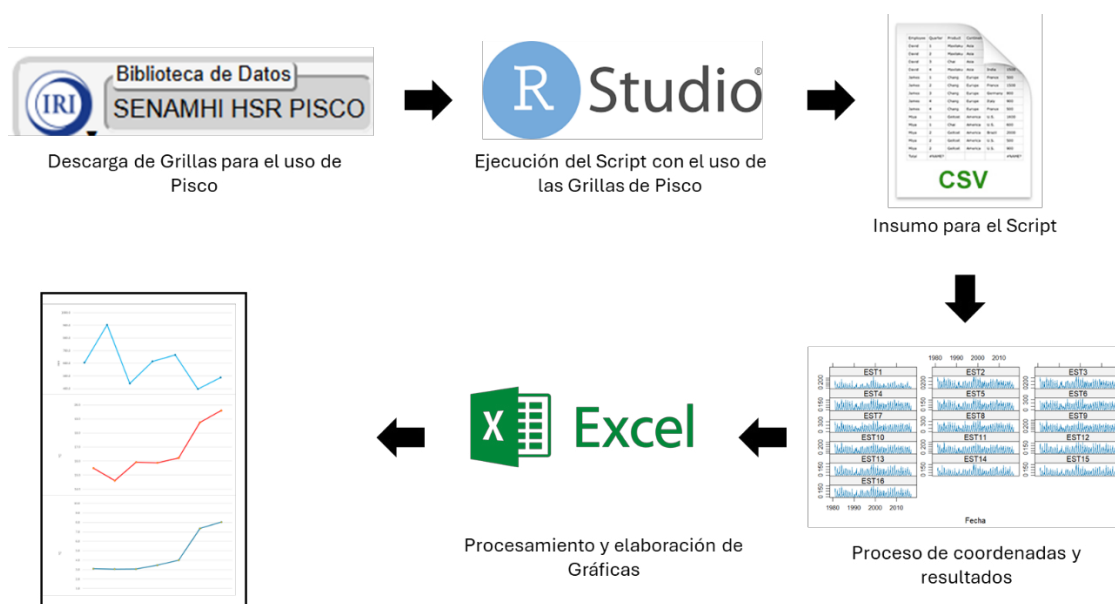
Rango SAVI	Clasificación	Interpretación
0.66 – 1	Planta muy sana	Alta densidad y vigor vegetal

Nota. Rangos del índice Savi

De esta manera, la clasificación establecida sirve como base para el análisis comparativo entre los distintos años evaluados, permitiendo evidenciar tendencias de mejora o deterioro en el ecosistema pajonal de puna húmeda.

3.6.2. Determinar las variables climáticas como indicadores del cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025.

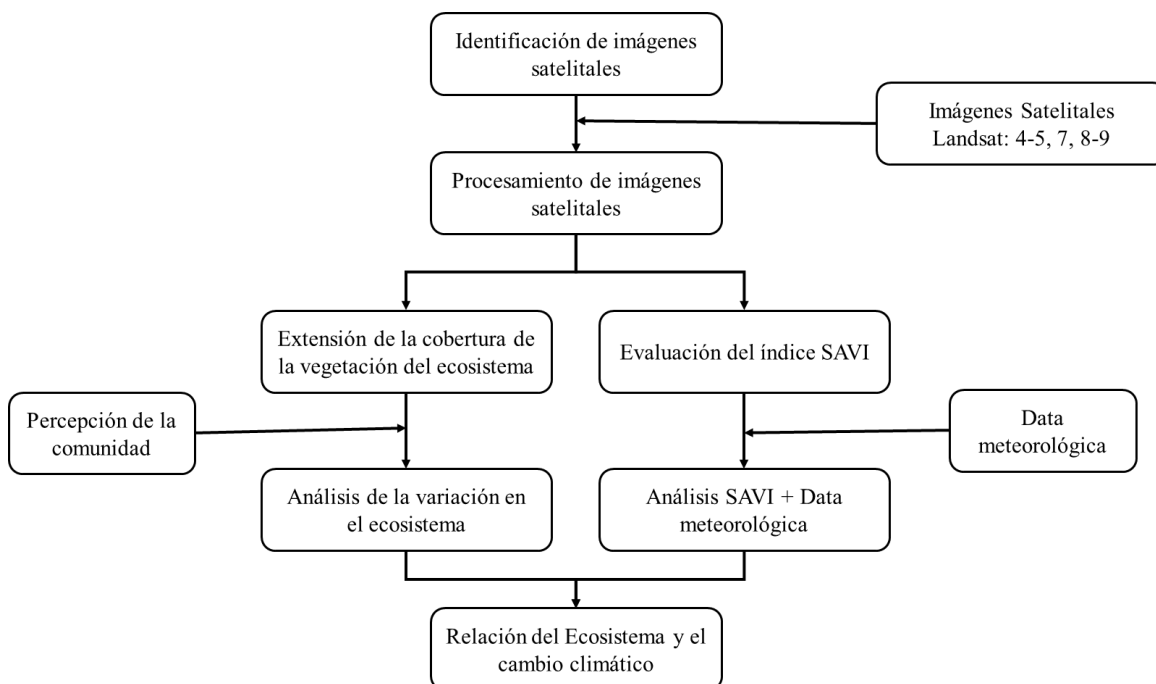
La determinación de las variables climáticas consistió en la descarga de datos de precipitación, temperatura máxima y mínima mediante el entorno de programación R-Studio, utilizando la base de datos grillada PISCO del SENAMHI. Asimismo, esta información fue complementada con datos meteorológicos provenientes de WorldClim. Posteriormente, los datos fueron procesados e integrados con los valores del índice espectral SAVI obtenidos para el área de estudio. A partir de esta integración, se realizó un análisis estadístico con el fin de determinar la relación entre la dinámica del ecosistema pajonal de puna húmeda y las variables climáticas.

Figura 7*Flujograma del 2do proceso*

Nota. Flujograma que explica como determinar las variables climáticas como indicadores del cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta.

3.6.3. Evaluar la percepción de las comunidades locales sobre los cambios en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda y el clima en la provincia de canta, lima; entre los años 1995 al 2025.

Para evaluar la percepción de las comunidades sobre las variaciones en la cobertura vegetal y el clima, se desarrolló una etapa de campo por un periodo de 5 días, donde se gestionó el hospedaje local y el uso de equipos GPS y cámara fotográfica bajo la modalidad de alquiler. Se aplicó la encuesta a los pobladores residentes y aledaños al ecosistema. El propósito de este levantamiento de información fue segregar y analizar los resultados obtenidos para relacionarlos con los datos técnicos del estudio. Este procedimiento permitió corregir posibles errores y contar con datos actualizados y precisos, contrastando la evidencia satelital y meteorológica con la realidad observada directamente en el campo por la población local.

Figura 8*Fases del procedimiento de la investigación*

Nota. La figura muestra el orden de desarrollo del análisis de la información

3.7. Análisis de datos

En marco del estudio para los resultados de obtener la correlación del ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta mediante índices espectrales y el cambio climático, se ha considerado evaluarlo con la exactitud temática de la información satelital y cartográfica. Los datos serán procesados por los programas del sistema de información geográfica y el programa Microsoft Excel. (Chuvieco, 2008)

Así mismo a estos resultados se aplicó el coeficiente de correlación de Spearman (ρ), el cual permite evaluar la asociación entre variables sin requerir supuestos de normalidad. Este análisis fue desarrollado empleando el entorno de programación Jupyter Notebook mediante Anaconda.

3.8.Consideraciones éticas

El estudio se fundamentó en los principios de honestidad académica, rigor científico y responsabilidad social, conforme al Código de Ética de la Universidad Nacional Federico Villarreal. Se garantizó la autenticidad y transparencia en el procesamiento de los datos meteorológicos y satelitales, sin alterar los resultados.

Asimismo, en el trabajo de campo se respetó la autonomía y bienestar de los participantes del Centro Poblado de Huaros mediante consentimiento voluntario, asegurando estricta confidencialidad y anonimato en sus respuestas. Finalmente, se salvaguardó la propiedad intelectual mediante la citación rigurosa de las fuentes consultadas, orientando los hallazgos hacia la conservación del ecosistema y el beneficio comunitario.

IV.RESULTADOS

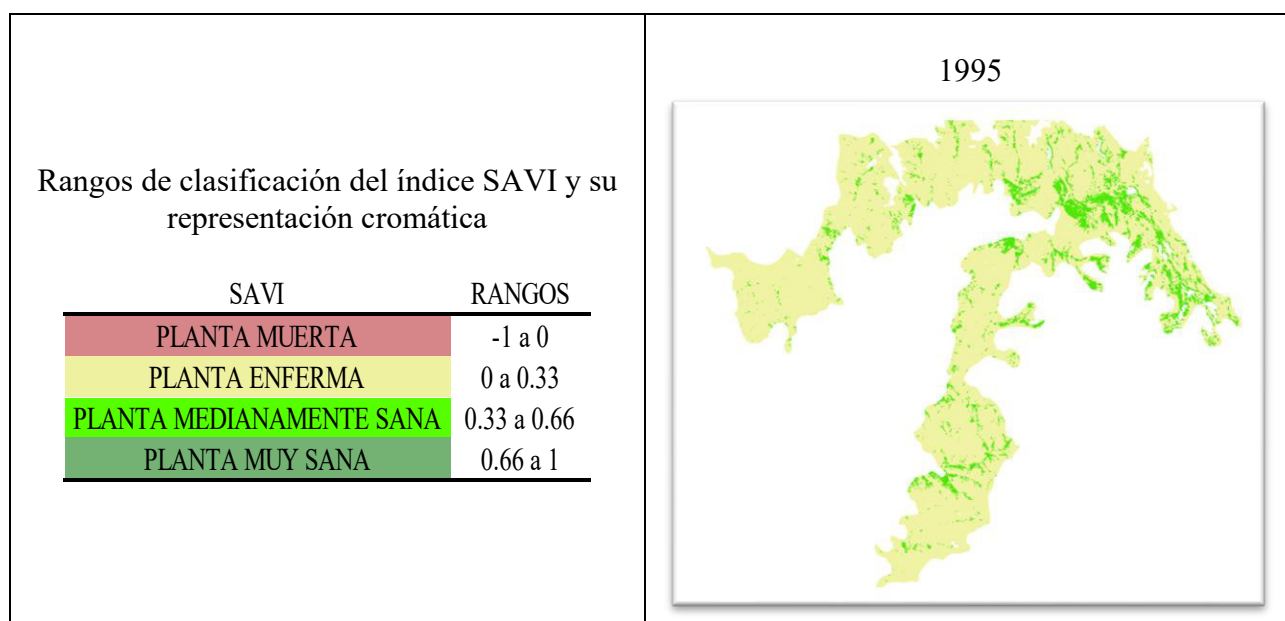
4.1.Dinámica del índice espectral savi en el ecosistema pajonal de puna húmeda (1995-2025)

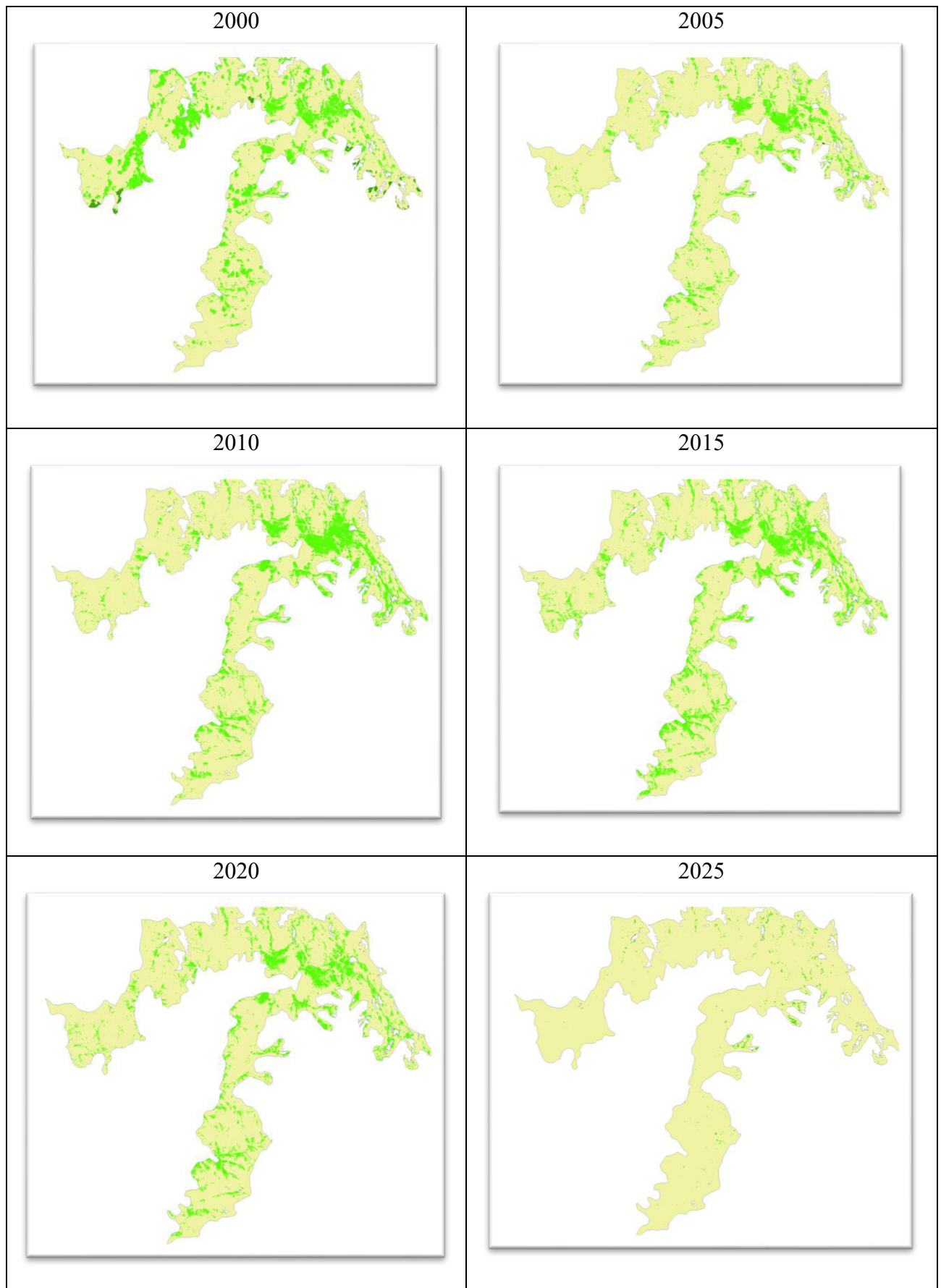
4.1.1. *Análisis espacial del savi*

El análisis espacial del índice SAVI correspondiente al periodo 1995–2025 con un análisis de cada cinco (05) años, permite identificar la distribución de la cobertura vegetal dentro del ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta. A partir de los mapas generados, se analizan los patrones espaciales asociados a los diferentes niveles de condición de la vegetación, evidenciando variaciones en su localización y extensión a lo largo del área de estudio.

Figura 9

Rangos y distribución espacial del índice SAVI cada 5 años (1995 – 2025)





Nota. La figura muestra la distribución de la salud de la vegetación cada 5 años, observándose que para el año 2000 hay una mayor cantidad del estado de la vegetación buena. (los mapas SAVI en escala real se encuentran en Anexos-Mapas)

En los años iniciales del periodo analizado, se identifica una mayor continuidad espacial de áreas con valores intermedios y altos del índice SAVI, lo cual refleja la presencia de sectores con vegetación en condiciones relativamente estables y con mayor vigor. Estas zonas se encuentran concentradas principalmente en determinadas áreas del ecosistema, evidenciando núcleos de cobertura vegetal con mejor estado fisiológico.

No obstante, conforme avanza el periodo de evaluación, se observa una reconfiguración progresiva de esta distribución espacial, caracterizada por la reducción de dichas áreas y la expansión de zonas con valores bajos del índice. Esta transición espacial sugiere una disminución en la extensión de superficies con cobertura vegetal en buen estado, acompañada de un incremento en áreas con condiciones menos favorables.

De manera complementaria, se evidencia un proceso de fragmentación de la cobertura vegetal, donde las áreas con valores altos del índice SAVI pierden continuidad y pasan a presentarse de forma más dispersa y aislada. Este comportamiento indica una alteración en la estructura espacial del ecosistema, reflejando cambios en la organización y distribución de la vegetación a lo largo del tiempo.

Asimismo, se identifican sectores específicos donde esta dinámica se manifiesta con mayor intensidad, presentando una mayor concentración de valores bajos del índice en comparación con otras zonas del área de estudio. Estas diferencias espaciales permiten reconocer áreas con mayor grado de afectación dentro del ecosistema, evidenciando una variabilidad interna en la condición de la cobertura vegetal.

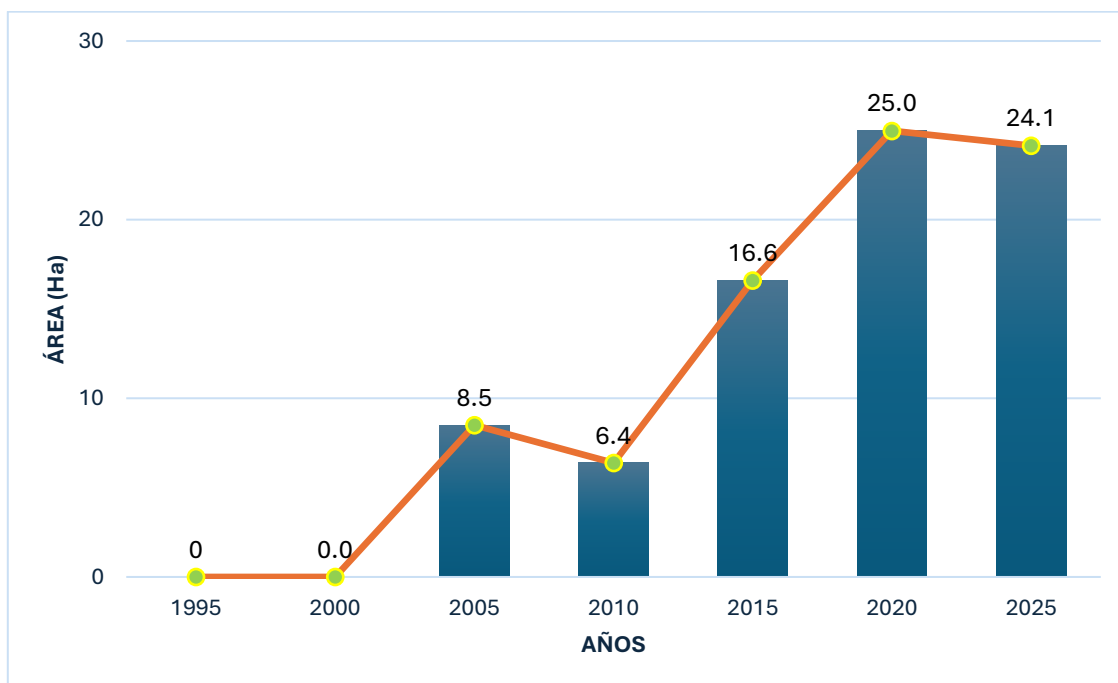
En conjunto, los resultados obtenidos permiten evidenciar una transición en la configuración espacial del índice SAVI, caracterizada por la disminución de áreas con mayor densidad y vigor vegetal, así como por el incremento y expansión de zonas con menor cobertura. Esta dinámica refleja cambios significativos en la estructura espacial del ecosistema pajonal de puna húmeda durante el periodo evaluado.

4.1.2. *Análisis temporal del savi*

El análisis temporal del índice SAVI se desarrolló a partir de la evaluación de su comportamiento en el periodo 1995–2025, considerando las categorías de clasificación de la vegetación establecidas. Para ello, se generaron cuatro gráficos correspondientes a las categorías de planta muerta, planta enferma, planta medianamente sana y planta muy sana, los cuales permiten examinar la evolución de cada condición de la cobertura vegetal a lo largo del tiempo.

Figura 10

Evolución temporal de la clasificación planta muerta del índice SAVI (1995 – 2025)



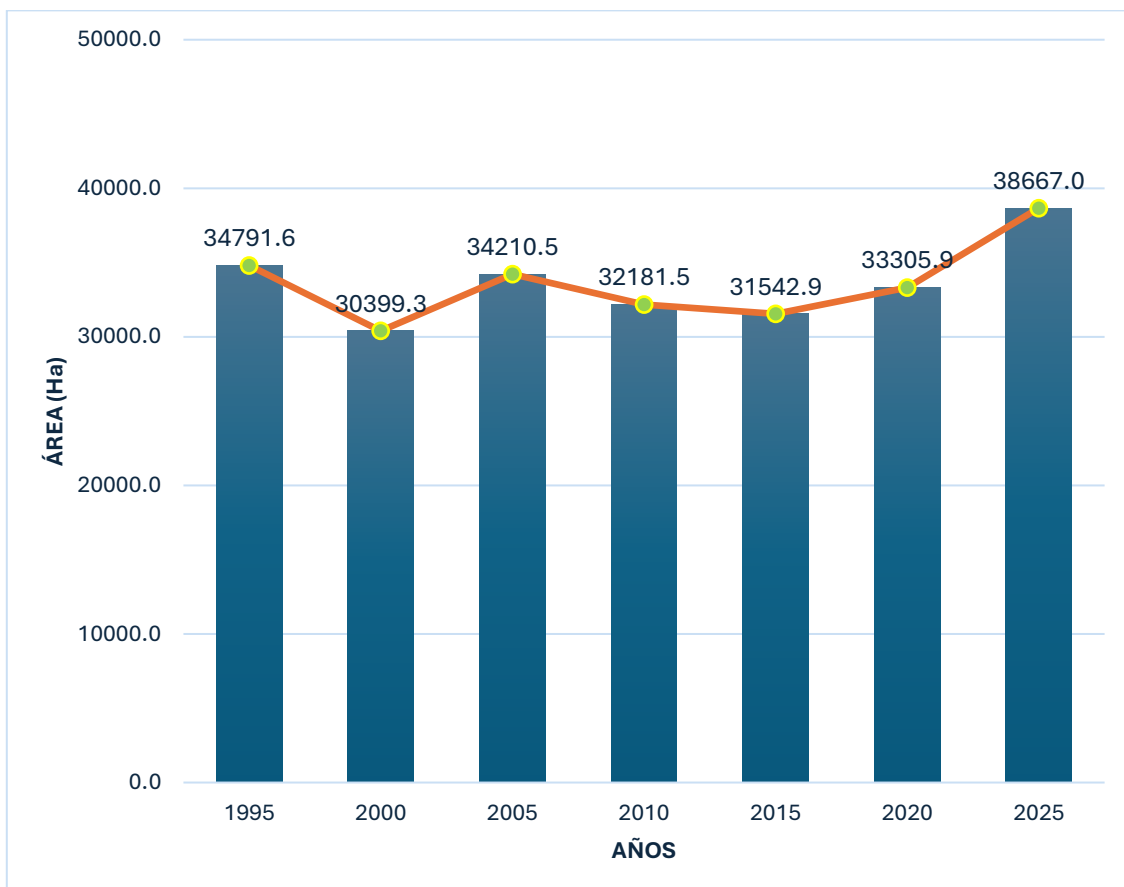
Nota. Tendencia multianual de los valores en hectáreas de planta muerta (SAVI).

En la categoría correspondiente a planta muerta, se evidencia una evolución claramente ascendente a lo largo del periodo analizado. En los años iniciales, los valores registrados son prácticamente nulos, lo que indica una escasa presencia de áreas sin cobertura vegetal. Sin embargo, a partir del año 2005 se identifica un incremento progresivo, el cual se acentúa en los años posteriores hasta alcanzar su punto máximo hacia el año 2020.

Esta tendencia se mantiene en el año 2025, evidenciando una consolidación de áreas con vegetación inexistente o completamente degradada. El comportamiento observado refleja una expansión sostenida de zonas en condición crítica dentro del ecosistema, lo cual representa un cambio significativo en la dinámica de la cobertura vegetal a lo largo del tiempo.

Figura 11

Evolución temporal de la clasificación planta enferma del índice SAVI (1995 – 2025)



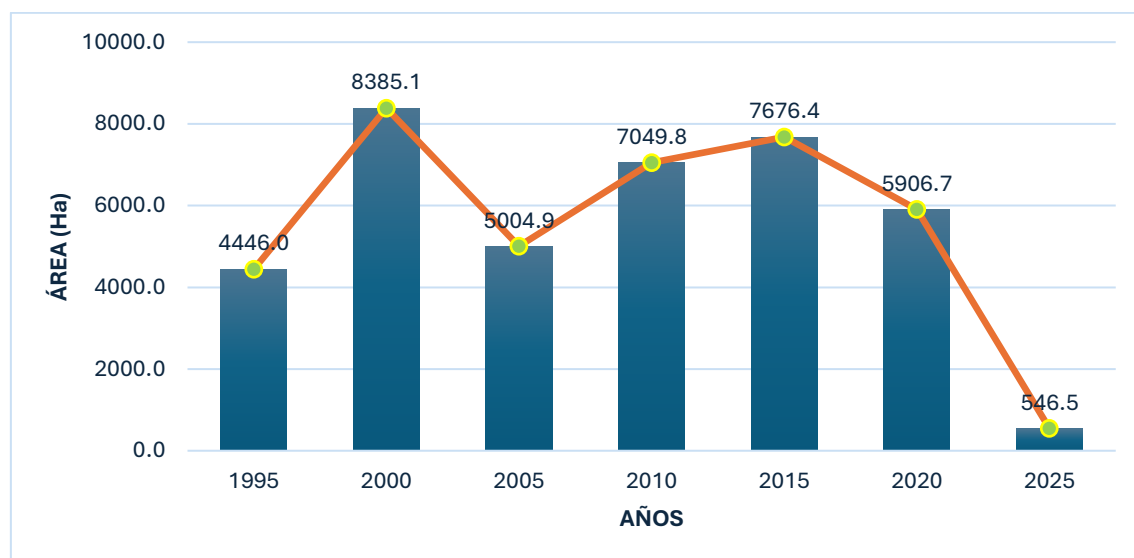
Nota. Tendencia multianual de los valores en hectáreas de planta enferma (SAVI).

En la categoría de planta enferma, el comportamiento del índice SAVI presenta una variabilidad moderada durante el periodo de estudio, con fluctuaciones entre los distintos años evaluados. En los primeros años, los valores se mantienen en niveles relativamente estables; sin embargo, a partir de los años intermedios se registran incrementos progresivos, alcanzando su mayor valor en el año 2025.

Este patrón evidencia un aumento en la presencia de áreas con bajo vigor vegetal, lo cual sugiere una tendencia hacia condiciones menos favorables para el desarrollo de la cobertura vegetal. La evolución de esta categoría indica una transición progresiva hacia estados de mayor deterioro en determinadas zonas del ecosistema.

Figura 12

Evolución temporal de la clasificación planta medianamente sana del índice SAVI (1995 – 2025)



Nota. Tendencia multianual de los valores en hectáreas de planta medianamente sana (SAVI).

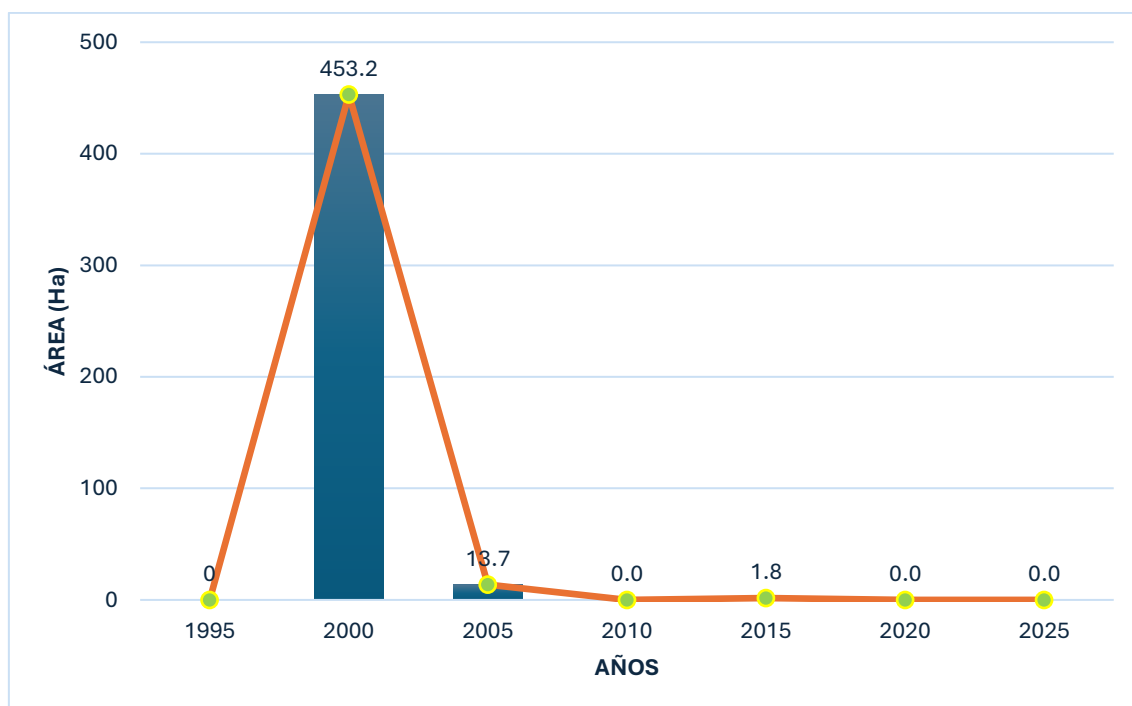
La categoría de planta medianamente sana muestra un comportamiento variable a lo largo del periodo analizado. Se observa un incremento significativo hacia el año 2000,

seguido de fluctuaciones en los años posteriores. No obstante, a partir del año 2015 se identifica una tendencia descendente, la cual se acentúa hacia el año 2025.

Esta disminución refleja una reducción de áreas con cobertura vegetal en condiciones intermedias, lo que podría indicar un proceso de transición hacia estados de menor calidad vegetal. El comportamiento observado sugiere una pérdida progresiva de superficies que anteriormente presentaban condiciones relativamente estables dentro del ecosistema.

Figura 13

Evolución temporal de la clasificación planta muy sana del índice SAVI (1995 – 2025)



Nota. Tendencia multianual de los valores en hectáreas de planta muy sana (SAVI).

En la categoría de planta muy sana, se identifican valores bajos durante la mayor parte del periodo de análisis, evidenciando una limitada presencia de áreas con alta densidad y vigor vegetal. Se registra un incremento puntual hacia el año 2000; sin embargo, en los años posteriores los valores disminuyen considerablemente, manteniéndose cercanos a niveles mínimos hasta el año 2025.

Este comportamiento refleja una reducción sostenida de las áreas con mejores condiciones de cobertura vegetal, indicando una disminución en la presencia de zonas con alta actividad fotosintética dentro del ecosistema. La tendencia observada pone en evidencia la fragilidad de estas áreas frente a los cambios registrados en el periodo evaluado.

En conjunto, el análisis temporal del índice SAVI evidencia una evolución diferenciada entre las categorías de la cobertura vegetal, caracterizada por el incremento de áreas en condición crítica, representadas por las categorías de planta muerta y planta enferma, así como por la disminución de aquellas con mejores condiciones, correspondientes a planta medianamente sana y planta muy sana.

Esta dinámica refleja una tendencia general hacia el deterioro de la cobertura vegetal en el ecosistema pajonal de puna húmeda durante el periodo 1995–2025, evidenciando cambios significativos en su comportamiento a lo largo del tiempo.

4.1.3. Variación de la cobertura del ecosistema pajonal de puna húmeda

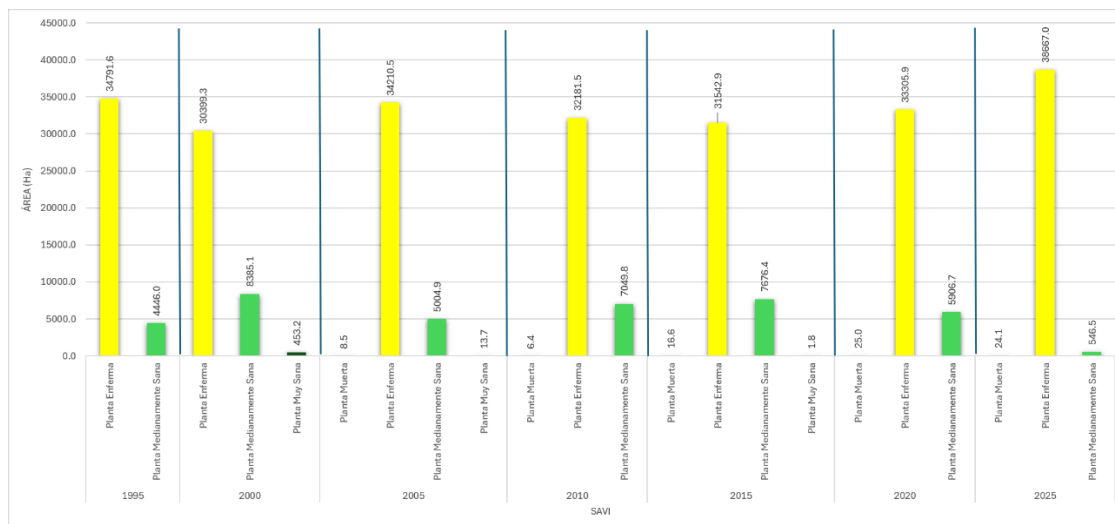
A partir de la cuantificación de las áreas correspondientes a cada categoría del índice SAVI, se evaluó la variación de la cobertura del ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta durante el periodo 1995–2025. La siguiente figura muestra la distribución de la cobertura vegetal en términos de superficie (ha), diferenciada según los estados de la vegetación, lo que permite identificar cambios en la composición y condición del ecosistema a lo largo del tiempo.

Los resultados evidencian una modificación progresiva en la distribución de las áreas, reflejando variaciones en la proporción de superficies asociadas a cada categoría de vegetación. Este comportamiento permite analizar la evolución del estado del ecosistema en función de la extensión ocupada por cada condición, proporcionando una

visión integral de los cambios registrados en la cobertura vegetal durante el periodo evaluado.

Figura 14

Evolución temporal de la clasificación del índice SAVI (1995 – 2025)



Nota. Índice SAVI para el ecosistema pajonal de puna húmeda con tendencia multianual.

A partir de la evaluación de las áreas correspondientes a cada categoría de vegetación, se identifican variaciones significativas en la cobertura del ecosistema pajonal de puna húmeda a lo largo del periodo analizado. En este sentido, la categoría de planta enferma presenta la mayor extensión durante todos los años evaluados, evidenciando además una tendencia general al incremento, pasando de aproximadamente 34,791 ha en 1995 a valores superiores a 38,667 ha en el año 2025. Este comportamiento indica una expansión progresiva de áreas con bajo vigor vegetal dentro del ecosistema.

En relación con la categoría de planta medianamente sana, se observa un comportamiento fluctuante, con un incremento hacia el año 2000, seguido de variaciones en los años posteriores. Sin embargo, hacia el final del periodo se registra una disminución en su extensión, lo que evidencia una reducción de áreas con cobertura vegetal en condiciones intermedias.

Por su parte, la categoría de planta muy sana presenta una participación reducida en términos de superficie a lo largo del periodo evaluado. Se identifica un valor máximo en el año 2000, seguido de una disminución considerable en los años posteriores, manteniéndose en niveles bajos hacia el año 2025. Este comportamiento refleja una limitada presencia de áreas con alta densidad y vigor vegetal dentro del ecosistema.

En cuanto a la categoría de planta muerta, se evidencia un incremento progresivo en su extensión, pasando de valores prácticamente nulos en los primeros años a aproximadamente 24 ha en el año 2025. Este aumento indica una expansión de áreas sin cobertura vegetal o con vegetación completamente degradada.

En conjunto, la variación de la cobertura vegetal evidencia una modificación en la composición del ecosistema, caracterizada por el incremento de áreas en condiciones desfavorables, representadas principalmente por la categoría de planta enferma, así como por la reducción de aquellas con mejores condiciones, correspondientes a planta medianamente sana y planta muy sana. Esta dinámica refleja cambios en la estructura y estado de la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda durante el periodo 1995–2025.

4.2.Comportamiento de las variables climáticas (1995-2025)

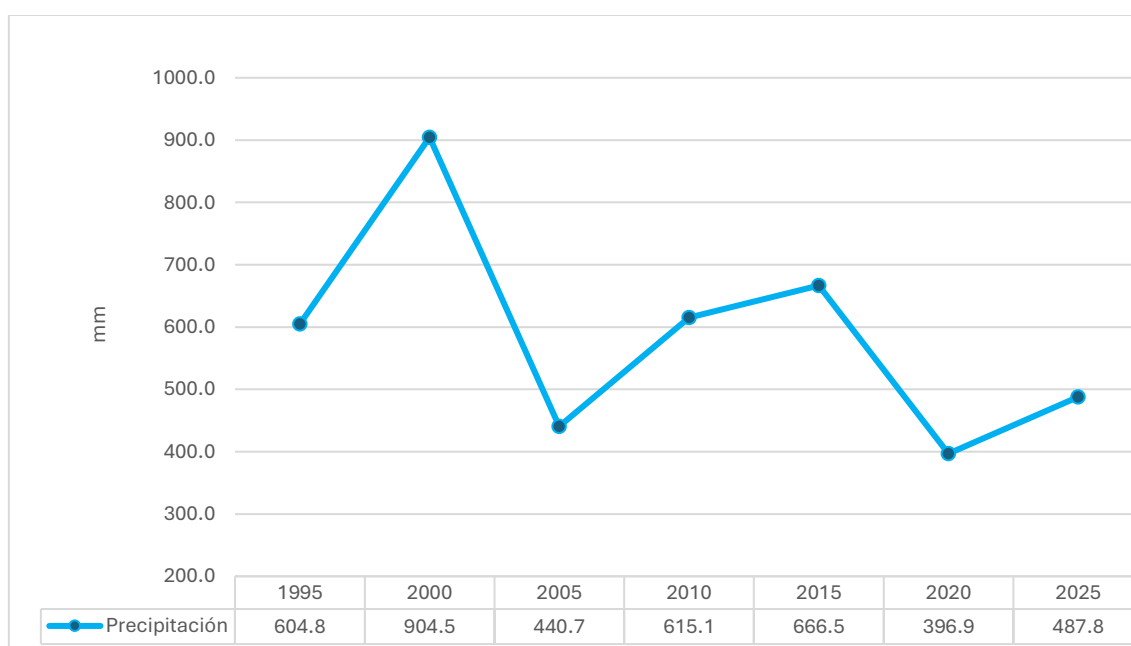
El comportamiento de las variables climáticas fue evaluado para el periodo 1995–2025 a partir del análisis de la precipitación y las temperaturas máxima y mínima en el área de estudio. Los resultados obtenidos permiten identificar las variaciones registradas en estas variables a lo largo del tiempo, evidenciando patrones de comportamiento que caracterizan las condiciones climáticas del ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta.

4.2.1. Análisis de la precipitación

El análisis de la precipitación se realizó a partir de los registros correspondientes al periodo 1995–2025, con el objetivo de evaluar su comportamiento temporal en el área de estudio. En la siguiente figura se presenta la variación de la precipitación a lo largo de los años evaluados, permitiendo identificar cambios en su distribución y magnitud.

Figura 15

Precipitaciones (1995 – 2025)



Nota. Parámetro meteorológico: precipitación multianual

En los primeros años del periodo, la precipitación presenta un incremento notable, alcanzando su valor máximo en el año 2000 con aproximadamente 904.5 mm. Posteriormente, se registra una disminución significativa hacia el año 2005, donde la precipitación desciende a cerca de 440.7 mm, evidenciando una reducción considerable en comparación con el periodo anterior.

A partir del año 2010, se observa una recuperación en los niveles de precipitación, con valores que alcanzan los 615.1 mm, manteniéndose relativamente altos en el año 2015 con aproximadamente 666.5 mm. Sin embargo, esta tendencia no se mantiene, ya que en

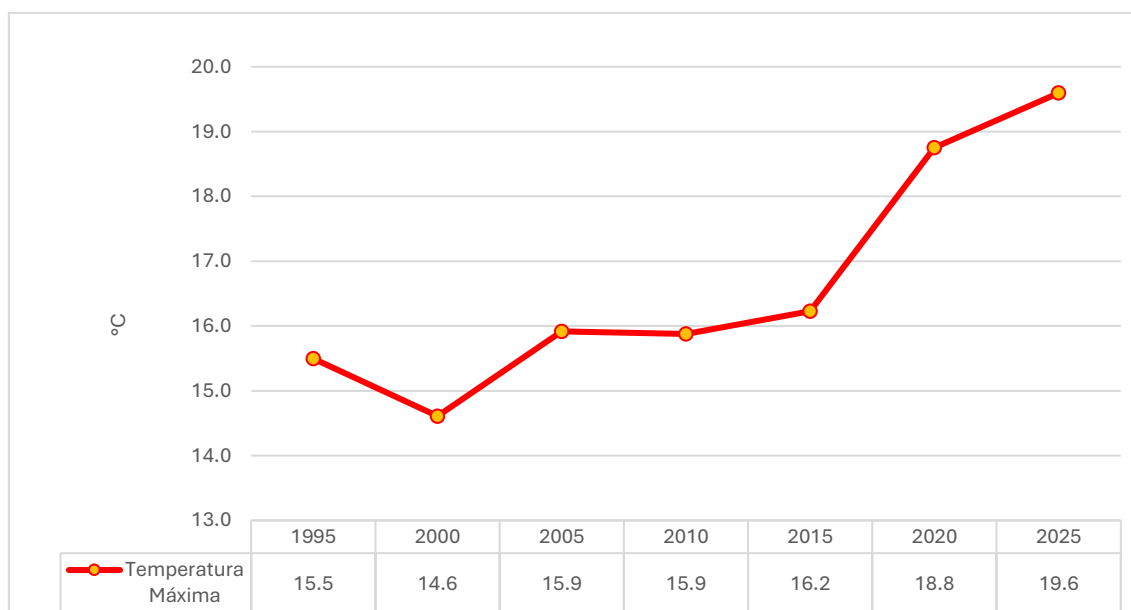
el año 2020 se registra nuevamente una disminución, alcanzando uno de los valores más bajos del periodo con 396.9 mm.

Finalmente, hacia el año 2025 se evidencia una ligera recuperación de la precipitación, alcanzando aproximadamente 487.8 mm, aunque sin llegar a los niveles registrados en los años de mayor intensidad.

En términos generales, la precipitación presenta un comportamiento altamente variable a lo largo del periodo analizado, caracterizado por incrementos y descensos marcados entre los años evaluados. Esta dinámica refleja una alternancia entre periodos con mayor y menor disponibilidad hídrica, evidenciando cambios en el régimen de precipitación en el ecosistema pajonal de puna húmeda.

4.2.2. Análisis de la temperatura máxima

El análisis de la temperatura máxima se fundamentó en los registros recolectados durante el periodo 1995–2025, con el objetivo de evaluar las fluctuaciones térmicas extremas y su tendencia temporal en el área de estudio. En la siguiente figura se presenta la evolución de esta variable, permitiendo identificar periodos de estabilidad y cambios significativos en el calentamiento ambiental del ecosistema pajonal de puna húmeda.

Figura 16*Temperatura máxima (1995 – 2025)*

Nota. Parámetro meteorológico: Temperatura máxima multianual

Al inicio del periodo de estudio, se observa una ligera disminución en los niveles térmicos, descendiendo de 15.5 °C en 1995 hasta alcanzar el valor más bajo del registro en el año 2000 con 14.6 °C. Posterior a este descenso, la temperatura máxima inicia un proceso de recuperación gradual, estabilizándose en 15.9 °C entre los años 2005 y 2010, y mostrando un incremento leve hacia el año 2015, donde se sitúa en 16.2 °C.

A partir del año 2015, se evidencia un cambio drástico en la tendencia, caracterizado por un incremento acelerado y sostenido de la temperatura máxima. Para el año 2020, el valor asciende significativamente a 18.8 °C, y continúa su tendencia al alza hasta alcanzar el máximo histórico del periodo en el año 2025, con una temperatura de 19.6 °C.

En términos generales, el comportamiento de la temperatura máxima muestra una clara trayectoria ascendente, especialmente marcada en la última década del análisis. Este incremento total de 4.1 °C (respecto al valor inicial de 1995) sugiere un proceso de

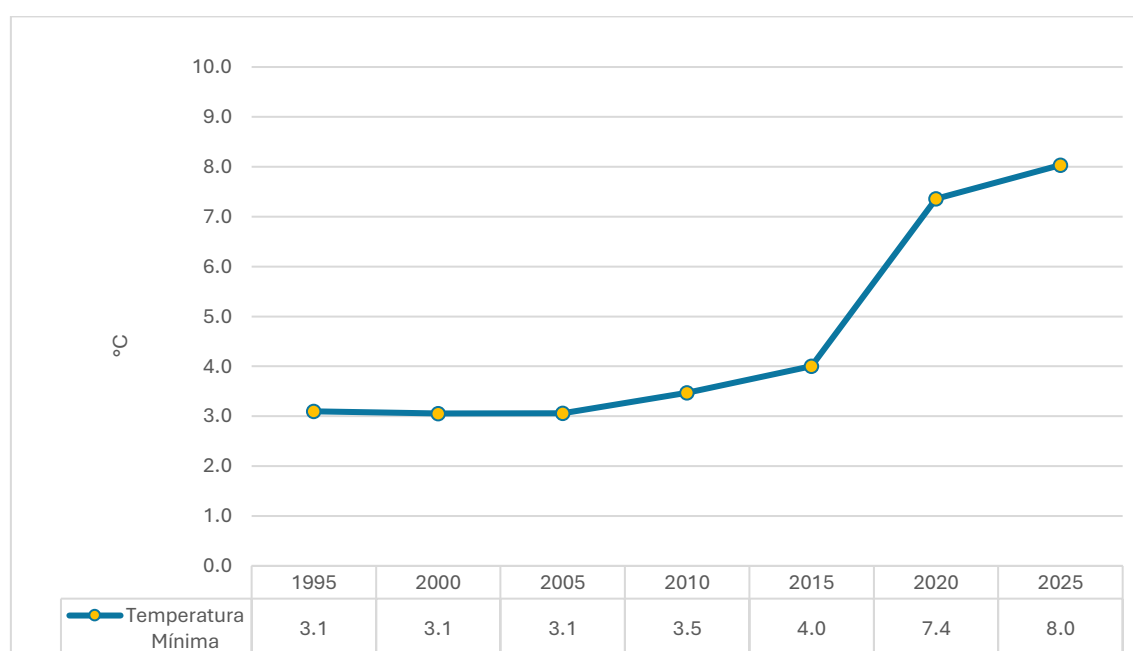
calentamiento progresivo en el ecosistema de pajonal de puna húmeda en Canta, lo cual podría tener implicaciones directas en la evapotranspiración y el equilibrio hídrico de la zona.

4.2.3. *Análisis de la temperatura mínima*

El análisis de la temperatura mínima se realizó con el fin de identificar las variaciones en los límites inferiores de la fluctuación térmica diaria dentro del área de estudio durante el periodo 1995–2025. Los datos presentados a continuación permiten observar el comportamiento de esta variable, la cual es fundamental para entender sus procesos y el confort térmico de la vegetación en el ecosistema de pajonal de puna húmeda.

Figura 17

Temperatura mínima (1995 – 2025)



Nota. Parámetro meteorológico: Temperatura mínima multianual

Durante la primera década del estudio, entre los años 1995 y 2005, la temperatura mínima se mantuvo en un estado de notable estabilidad, registrando un valor constante

de 3.1 °C. A partir del año 2010, se empieza a manifestar una tendencia ascendente, alcanzando los 3.5 °C y continuando con un incremento leve hacia el año 2015, donde se sitúa en 4.0 °C.

Sin embargo, a partir de 2015 se observa un incremento abrupto en los valores mínimos registrados. Para el año 2020, la temperatura mínima asciende significativamente hasta los 7.4 °C, manteniendo su tendencia al alza hacia el final del periodo evaluado, alcanzando los 8.0 °C en el año 2025.

En términos generales, la temperatura mínima muestra un comportamiento de ascenso sostenido y acelerado en la última década, con un incremento total de 4.9 °C respecto a los niveles iniciales. Este aumento en los valores mínimos sugiere una reducción en la severidad de las temperaturas bajas nocturnas, lo cual altera el gradiente térmico del pajonal de puna húmeda en Canta y podría influir directamente en la fenología de las especies vegetales locales.

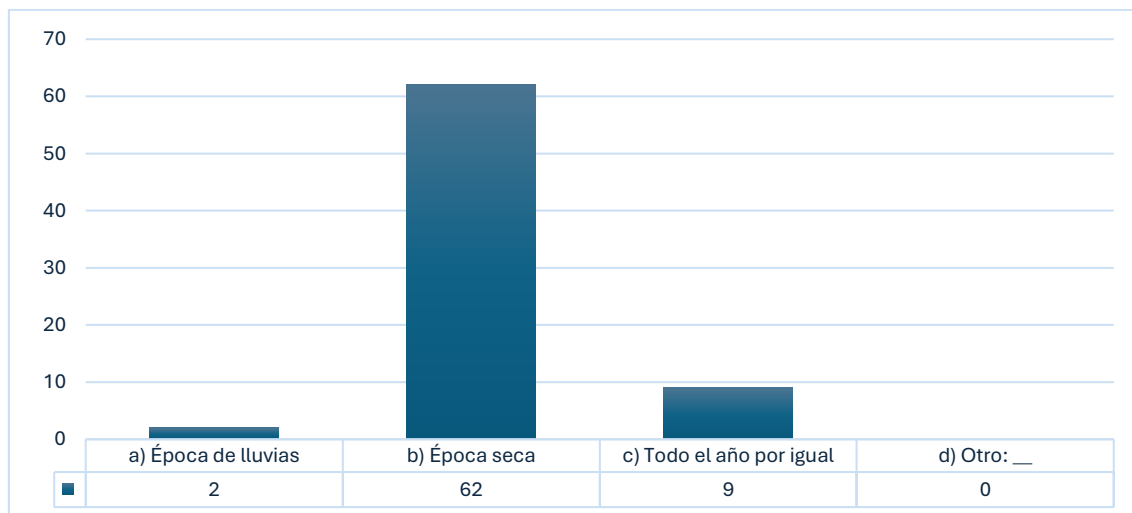
4.3. Percepción de las comunidades locales sobre cambios ambientales

Se evaluó la perspectiva de las comunidades cercanas al ecosistema pajonal de puna húmeda, centrándose específicamente en los residentes del centro poblado de Huaros. Para recolectar esta información, se aplicó un instrumento de investigación consistente en una encuesta estructurada de 15 preguntas, diseñada para capturar la memoria histórica y las observaciones empíricas de la población local respecto a las transformaciones del entorno natural.

De los resultados de las encuestas se tiene:

Figura 18

1. ¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?

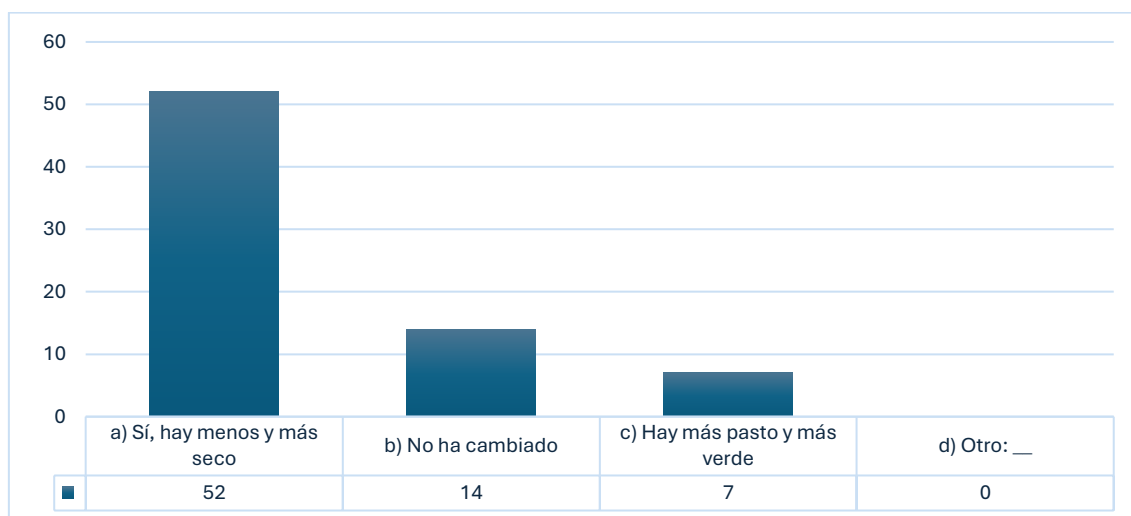


Nota. La mayor pérdida de vegetación se da en la época seca.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 84.9% de los encuestados (62 personas) identifica la época seca como el periodo de mayor criticidad para la pérdida de cobertura vegetal. Técnicamente, esta percepción valida la dependencia del ecosistema hacia la estacionalidad hídrica, sugiriendo que el déficit de precipitación en los meses de estiaje actúa como el principal factor limitante para la persistencia del pajonal en la zona de estudio.

Figura 19

2. ¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?

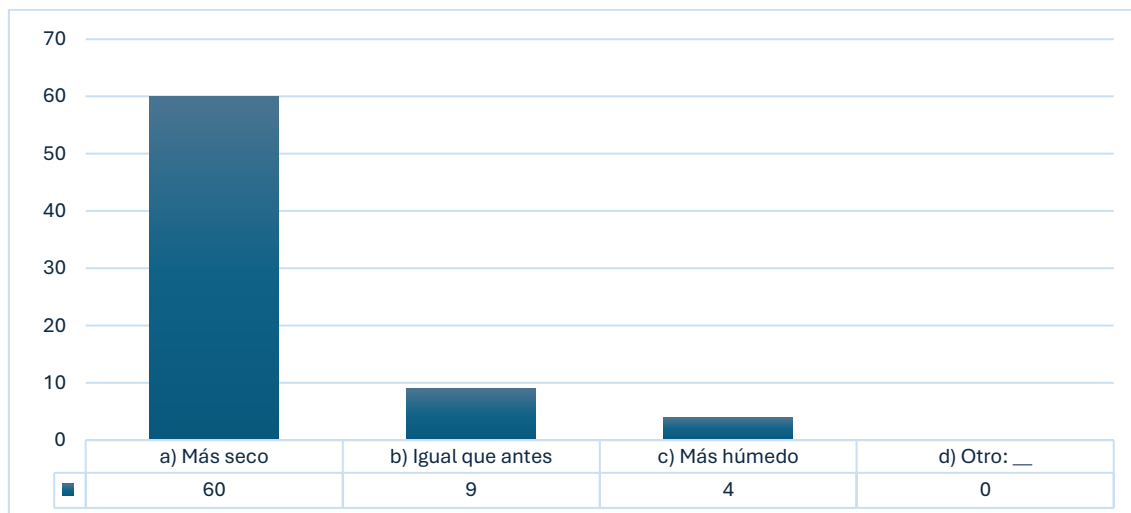


Nota. Sí, hay menos presencia de pasto y este es más seco.

Respecto a las características físicas de la vegetación, el 71.2% de la muestra (52 personas) manifiesta haber observado una reducción cuantitativa de la biomasa y un cambio en la coloración (tendencia a la desecación). Estos resultados proporcionan una validación cualitativa a los hallazgos del índice SAVI, donde el predominio de la categoría "Planta Enferma" hacia el año 2025 guarda una correspondencia directa con la degradación del vigor vegetativo percibida en campo por la población local.

Figura 20

3. ¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?

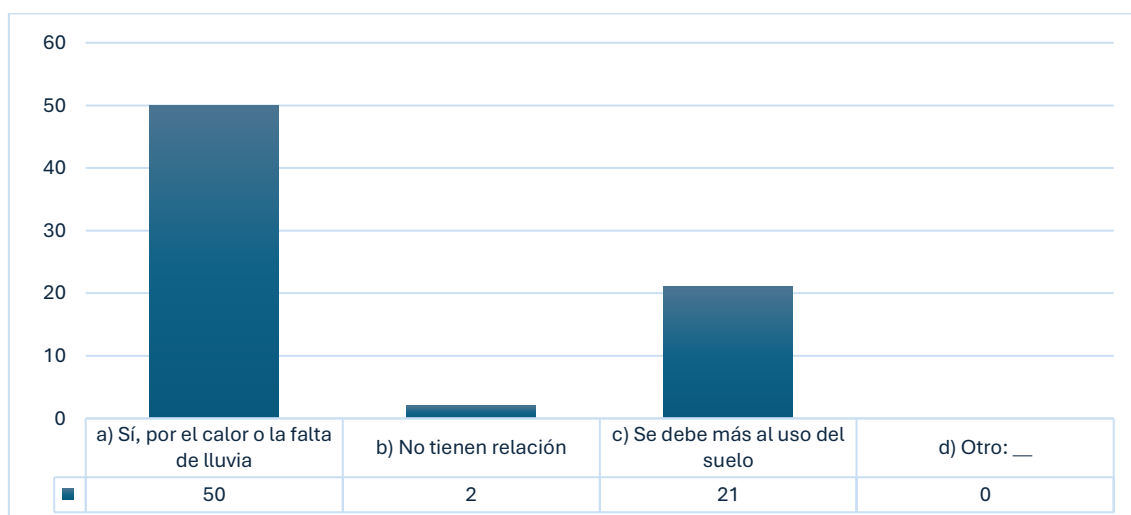


Nota. El ecosistema pajonal de puna húmeda está más seco.

En cuanto a la condición de humedad, el 82.2% de los participantes (60 personas) sostiene que el ecosistema se encuentra actualmente más seco en comparación con periodos anteriores.

Figura 21

4. ¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?

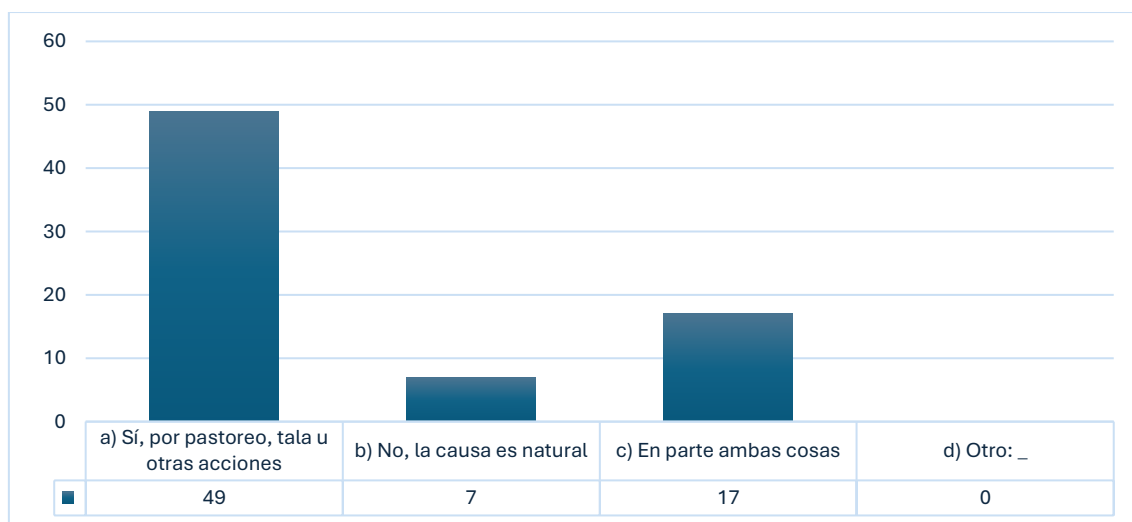


Nota. Los cambios de la vegetación están relacionados con el clima en su mayoría a función del calor o la falta de lluvia.

Al evaluar la relación de causalidad, el 68.5% de los encuestados (50 personas) atribuye los cambios en la vegetación a variables climáticas como el incremento térmico y la irregularidad de las precipitaciones.

Figura 22

5. *¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?*

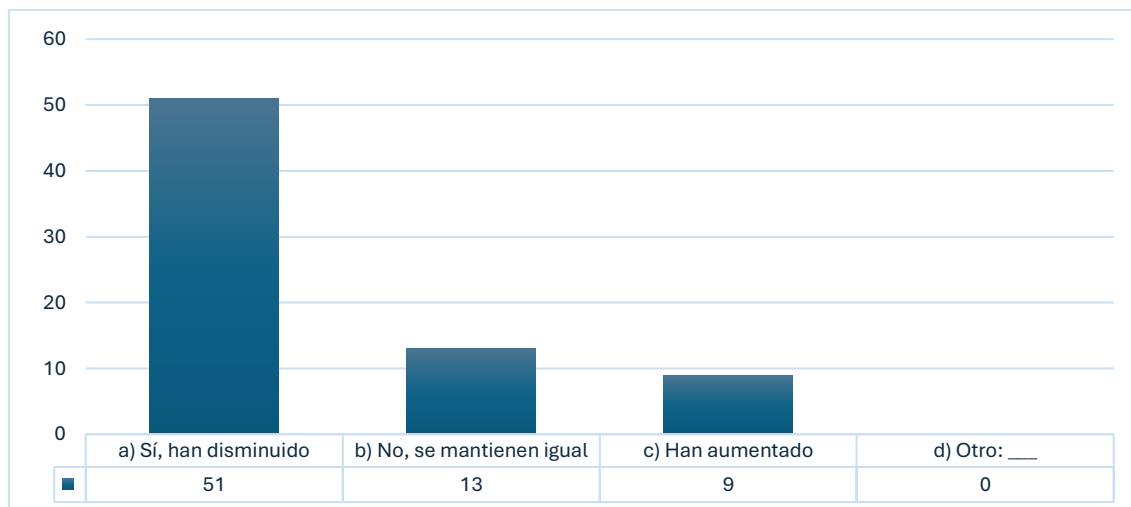


Nota. Las actividades climáticas han contribuido a la pérdida de vegetación en su mayoría por la tala, el pastoreo y otras acciones.

El 67.1% de los evaluados (49 personas) reconoce que factores antrópicos, específicamente el sobrepastoreo y la extracción de recursos, han contribuido a la degradación de la cobertura vegetal.

Figura 23

6. ¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?

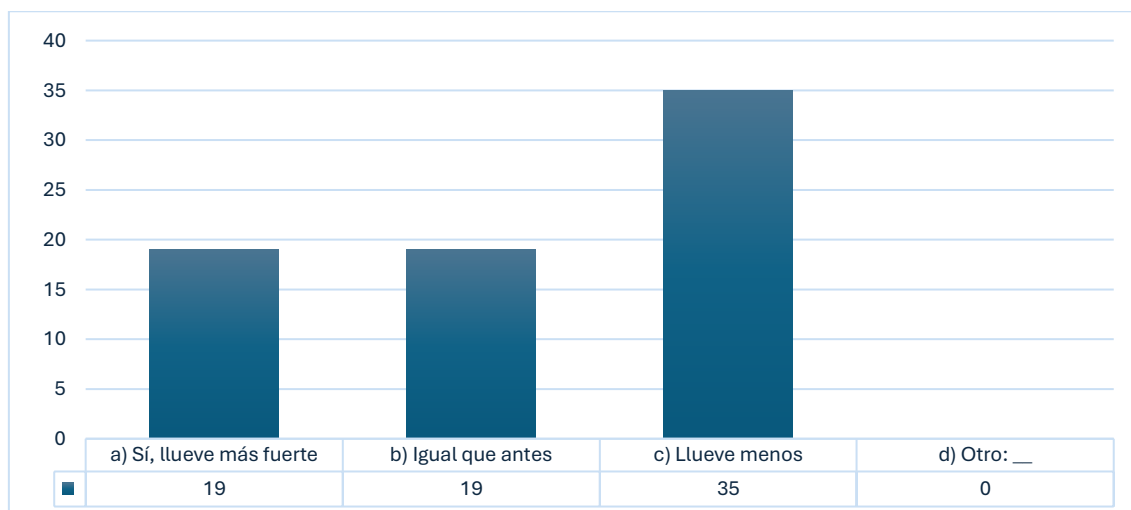


Nota. Las fuentes de agua han disminuido.

En relación con el comportamiento de las fuentes de agua (manantiales y quebradas), el 69.8% de los encuestados (51 personas) reporta una disminución en el caudal de dichas fuentes. Técnicamente, este hallazgo evidencia una alteración en el ciclo hidrológico local, vinculada probablemente a la reducción de la recarga de acuíferos y al aumento de la demanda evaporativa de la atmósfera, factores que comprometen la disponibilidad hídrica necesaria para el mantenimiento del ecosistema.

Figura 24

7. ¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?

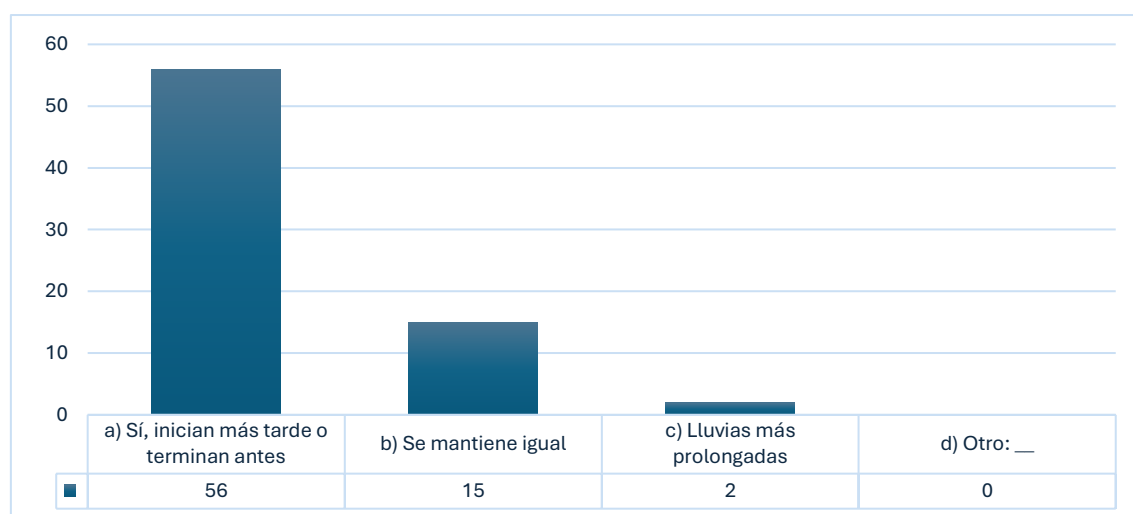


Nota. Respecto a las precipitaciones, llueve menos.

Respecto a la percepción de la intensidad pluvial, el 47.9% de la muestra (35 personas) sostiene que el volumen de lluvia ha disminuido en comparación con periodos históricos.

Figura 25

8. *¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?*

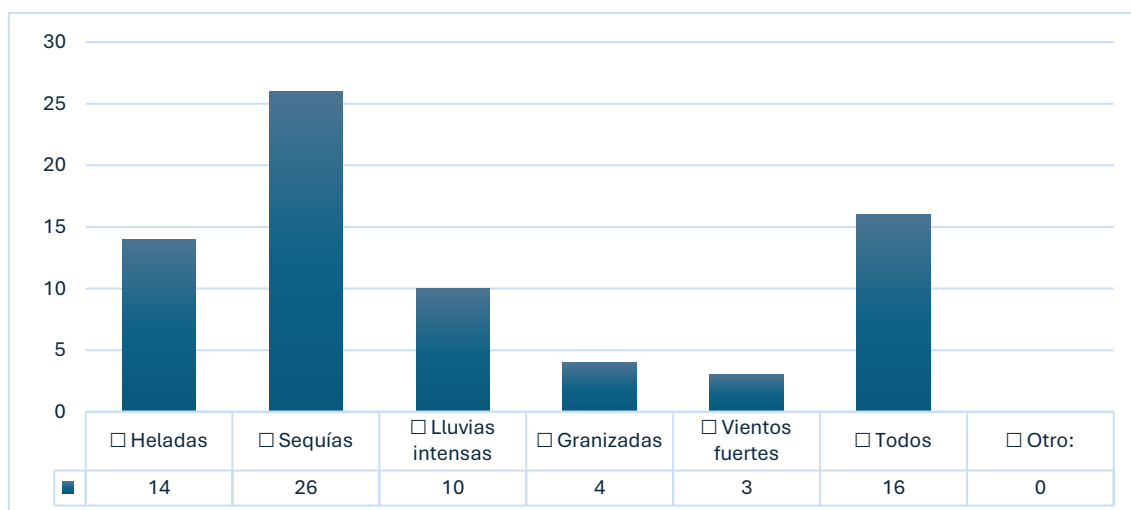


Nota. Las fechas de inicios o fin de las lluvias ahora inician más tarde o terminan antes.

Un resultado determinante es la alteración de la fenología climática: el 76.7% de los evaluados (56 personas) afirma que las fechas de inicio y fin de las lluvias han variado, manifestándose en inicios tardíos o términos prematuros de la temporada húmeda. Esta irregularidad en el calendario pluvial representa un factor de perturbación para los ciclos de crecimiento del pajonal, exacerbando los periodos de senescencia y dificultando la recuperación natural del ecosistema.

Figura 26

9. ¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad?

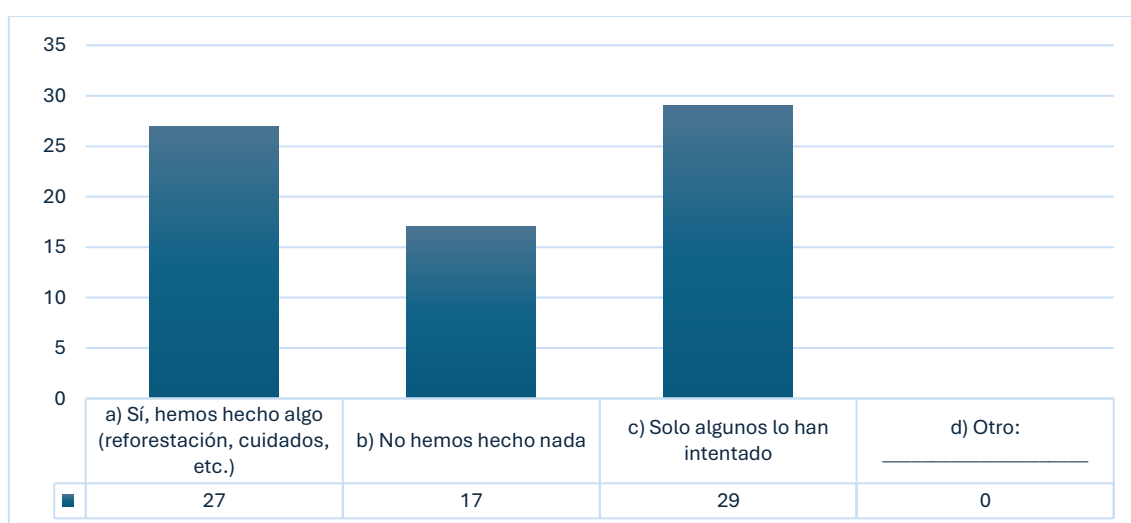


Nota. Los fenómenos climáticos que más se han notado son las sequías y heladas.

Al evaluar la ocurrencia de fenómenos meteorológicos, las sequías se identifican como el evento de mayor recurrencia y cambio percibido (26 menciones), seguido por la percepción de una alteración generalizada de todos los fenómenos climáticos (16 menciones).

Figura 27

10. ¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?

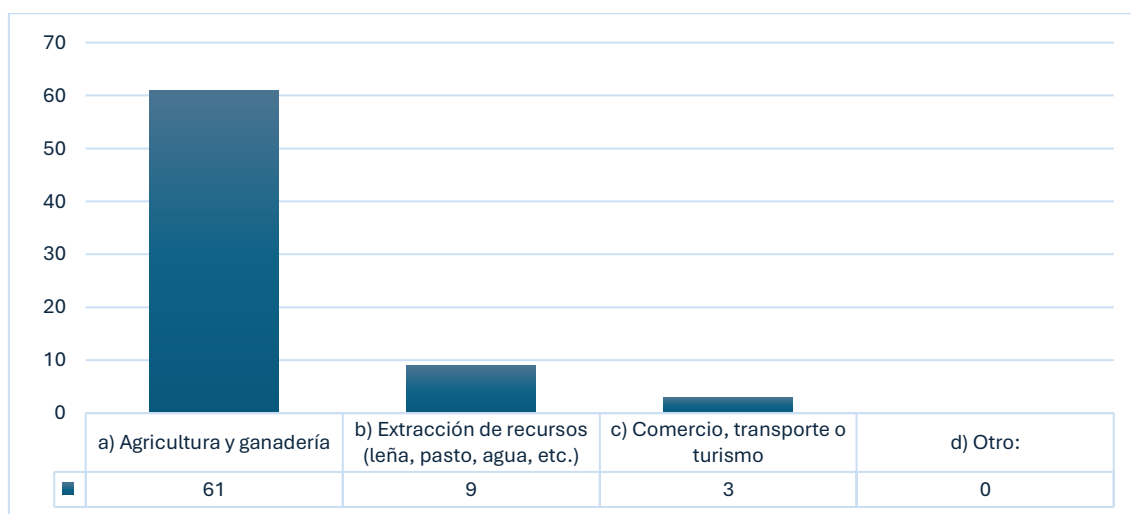


Nota. Predomina la percepción de que solo algunos pobladores han intentado realizar acciones frente a los cambios ambientales.

Sobre la gestión de estos cambios ambientales, predomina la percepción de que solo se han realizado esfuerzos aislados o intentos parciales de respuesta (39.7%), mientras que un 37% indica la ejecución de acciones concretas de mitigación o cuidado. Algunos pobladores indican que la localidad se está preparando para tomar acción frente a esta problemática.

Figura 28

11. *¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?*

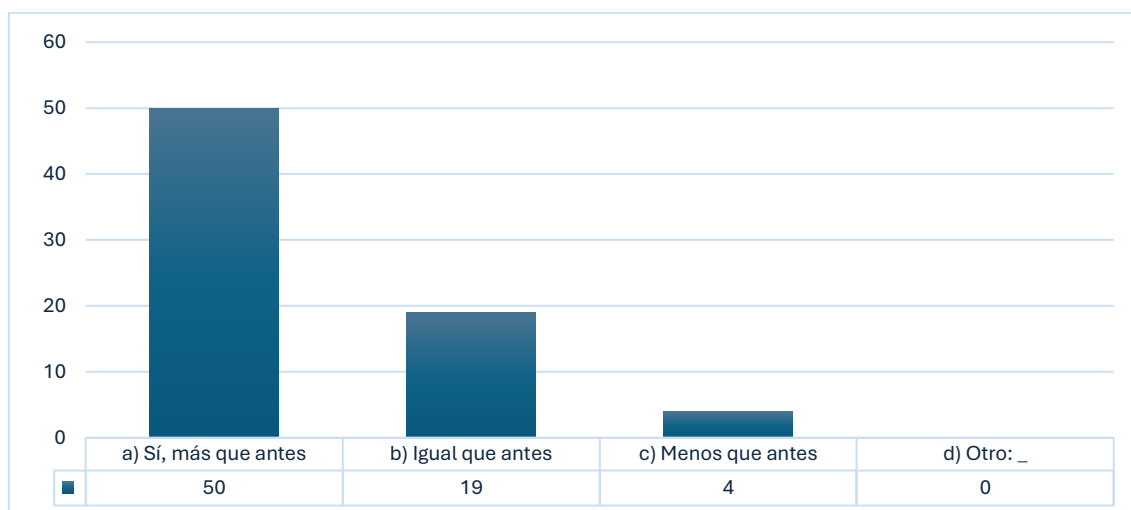


Nota. Predominan las actividades de agricultura y ganadería.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el 83.6% de los encuestados (61 personas) indica que la agricultura y ganadería son las actividades principales en la zona, seguido del 12.3% de los encuestados (9 personas) indican que es por la extracción de los recursos del ecosistema.

Figura 29

12. ¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?



Nota. Respecto a los incendios o sequías, hay más presencia de estos.

Respecto a la frecuencia de eventos perturbadores, el 68.5% de la muestra (50 personas) percibe un incremento en la ocurrencia de incendios y sequías en comparación con años anteriores, mientras que el 26% de la muestra (19 personas) indican que es igual que antes.

Figura 30

13. ¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?

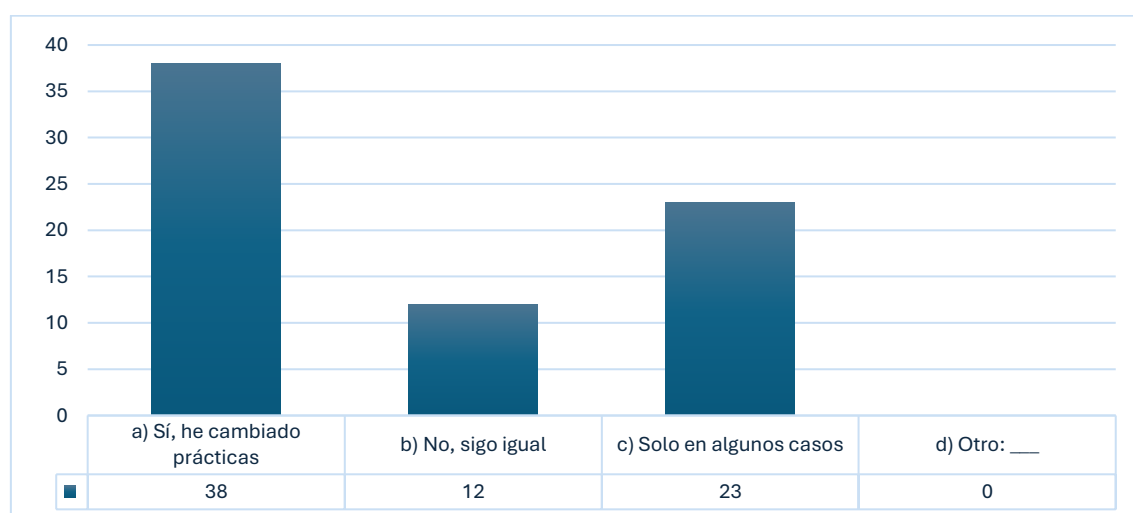


Nota. Respecto a los cambios de temperatura, la percepción local indica que los días son más calurosos y las noches más frías.

En relación con la percepción de la temperatura, el 69.8% de los participantes (51 personas) identifica cambios significativos, señalando que los días son más calurosos y las noches más frías, el 15% (11 personas) indica que se mantiene como antes, y otro grupo de igualmente el 15% (11 personas) indica que hace más frío todo el día.

Figura 31

14. ¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?

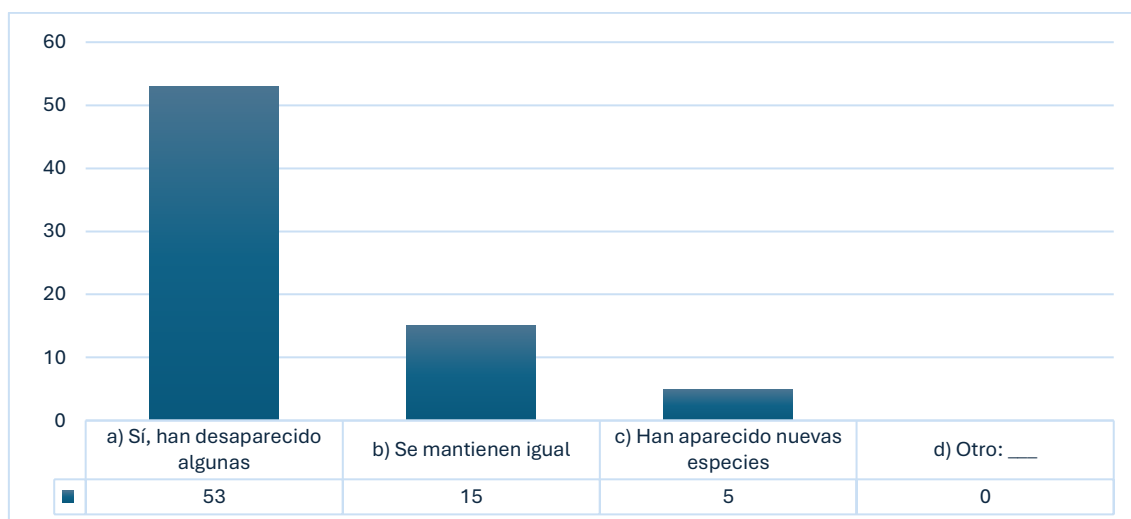


Nota. En su mayoría los pobladores indican a ver cambiado sus prácticas (actividades) por el clima.

Al evaluar la capacidad de respuesta productiva, el 83.6% de los encuestados (sumando cambios totales y parciales) manifiesta haber tenido que modificar sus formas de siembra o crianza debido a las nuevas condiciones climáticas. Algunos indicaron cambiar su cosecha por papa, oca o avas.

Figura 32

15. *¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?*



Nota. Respecto de las plantas y animales en la localidad, algunas de estas han desaparecido.

Finalmente, el 72.6% de la muestra (53 personas) reporta la desaparición o disminución de ciertas especies de flora y fauna en la localidad. Técnicamente, esta percepción de pérdida de biodiversidad es un indicador del deterioro de la integridad ecosistémica. Algunos pobladores principalmente señalaron a la manzanilla.

4.4. Relación del índice savi y variables climáticas

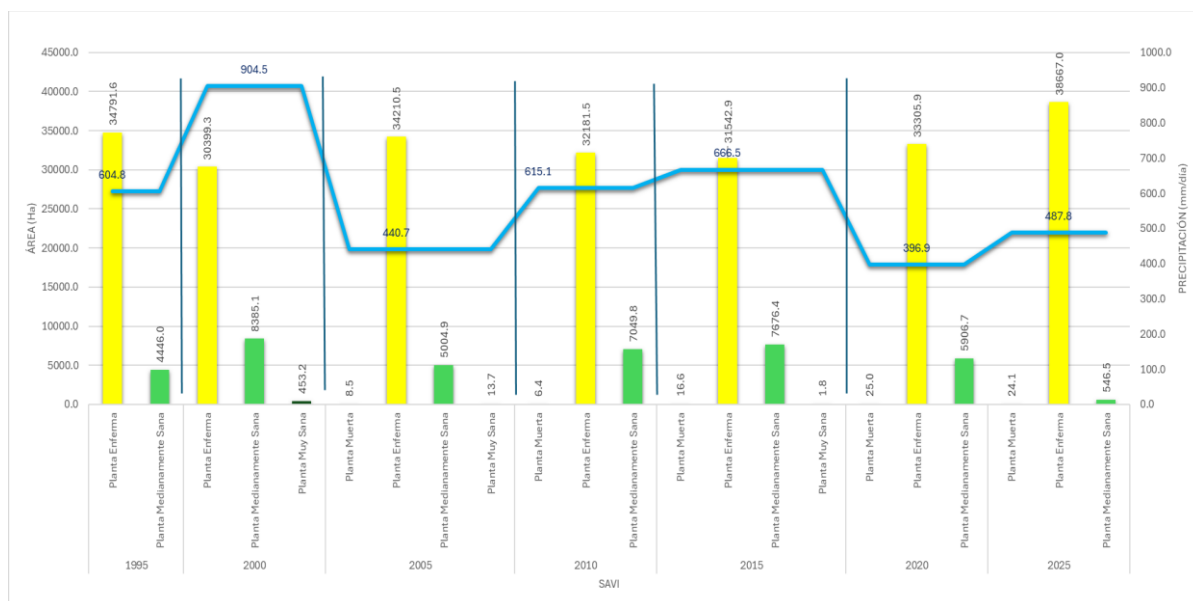
La relación entre el índice SAVI y las variables climáticas fue evaluada para el periodo 1995–2025 a partir del análisis correlacional entre el vigor vegetativo y los registros de precipitación y temperatura en el área de estudio. Los resultados obtenidos permiten identificar la respuesta del ecosistema pajonal de puna húmeda ante las variaciones climáticas en la provincia de Canta, evidenciando patrones de interacción biofísica que caracterizan la sensibilidad de la vegetación frente a los cambios en el entorno meteorológico a lo largo del tiempo.

4.4.1. Relación entre savi y la precipitación

El análisis de la relación entre el índice SAVI y la precipitación permite determinar la dependencia hídrica del vigor vegetativo en el pajonal. A continuación, se presenta el contraste entre la superficie ocupada por las categorías de salud vegetal y los niveles de precipitación acumulada entre 1995 y 2025.

Figura 33

Relación del índice SAVI y de la precipitación (1995 – 2025)



Nota. Índice SAVI y el parámetro meteorológico de la precipitación expuesto multitemporal.

Al contrastar ambas variables, se evidencia que los periodos de mayor disponibilidad hídrica favorecen el incremento de las áreas con mejor vigor vegetativo. En el año 2000, coincidiendo con el pico máximo de precipitación (904.5 mm), se registró la mayor extensión de la categoría "Planta Medianamente Sana" con 8,385.1 Ha y la aparición de 453.2 Ha de "Planta Muy Sana", los valores más altos de salud vegetal en todo el registro.

Por el contrario, durante los años de déficit hídrico, el ecosistema muestra un proceso de degradación inmediata. En el año 2005, ante la caída de la precipitación a 440.7 mm, el área de "Planta Medianamente Sana" se contrajo significativamente a 5,004.9 Ha. Una dinámica similar se observa en el año 2020, donde la precipitación mínima de 396.9 mm redujo el vigor del pajonal, manteniendo la categoría de "Planta Enferma" como la predominante con 33,305.9 Ha.

Hacia el final del periodo (2025), a pesar de registrarse una ligera recuperación en la precipitación (487.8 mm), se observa un fenómeno crítico: la categoría de "Planta Enferma" alcanza su máxima extensión histórica con 38,667.0 Ha, mientras que la vegetación "Medianamente Sana" cae a niveles mínimos de 546.5 Ha.

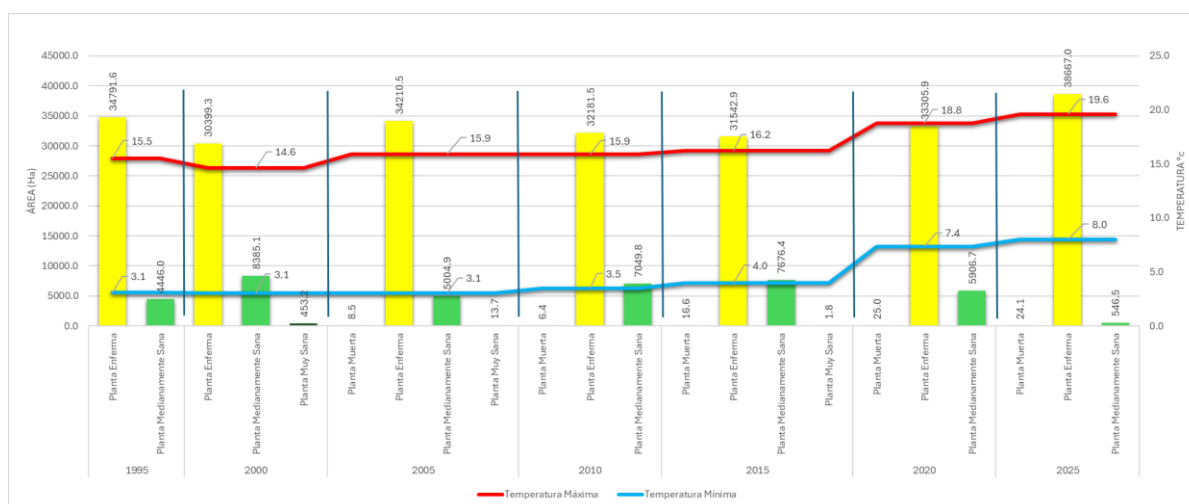
En términos generales, los resultados demuestran que, si bien el pajonal responde positivamente a los años húmedos, existe una tendencia de deterioro progresivo hacia el año 2025. Este comportamiento sugiere que la ligera recuperación hídrica es insuficiente para compensar el estrés ambiental acumulado.

4.4.2. Relación entre SAVI y las temperaturas máximas y mínimas

La relación entre el índice SAVI y las temperaturas máximas y mínimas fue evaluada para el periodo 1995–2025, con el propósito de identificar el impacto del estrés térmico en el vigor de la vegetación. Los resultados permiten observar cómo las fluctuaciones en los extremos térmicos actúan como factores condicionantes en la salud del ecosistema pajonal de puna húmeda.

Figura 34

Relación del índice SAVI y de las temperaturas máximas y mínimas (1995 – 2025)



Nota. Índice SAVI y los parámetros meteorológicos de temperaturas máximas y mínimas, presentado multitemporal.

El análisis comparativo revela que, durante el periodo de relativa estabilidad térmica (1995–2015), el ecosistema mantuvo una capacidad de resiliencia moderada. El punto de mayor salud vegetativa se registró en el año 2000, coincidiendo con la temperatura máxima más baja del periodo (14.6 °C), lo que permitió que la categoría de "Planta Medianamente Sana" alcanzara las 8,385.1 Ha. Durante estos primeros 20 años, la temperatura mínima se mantuvo por debajo de los 4.0 °C, lo que parece estar asociado a una mayor extensión de áreas con vigor vegetal estable.

Sin embargo, a partir del año 2015, se observa una ruptura crítica en esta dinámica. El incremento acelerado de la temperatura máxima (que pasó de 16.2 °C a 19.6 °C) y de la temperatura mínima (de 4.0 °C a 8.0 °C) coincide directamente con la degradación acelerada del pajonal. Para el año 2025, bajo las condiciones térmicas más altas del registro, la categoría de "Planta Enferma" se expandió hasta las 38,667.0 Ha, mientras que la categoría de "Planta Medianamente Sana" sufrió una reducción drástica, quedando relegada a solo 546.5 Ha.

En conclusión, el incremento de las temperaturas mínimas y máximas en la última década ha generado un escenario de estrés térmico que sobrepasa el umbral de tolerancia del pajonal, resultando en una pérdida de vigor vegetativo que no se observa en los periodos de mayor frescura térmica.

4.4.3. Análisis integral de la correlación ecosistema pajonal de puna húmeda – variables climáticas

El análisis integral de la interacción entre el ecosistema de pajonal de puna húmeda y las variables climáticas se realizó mediante la aplicación del coeficiente de correlación de Spearman (p). Para la ejecución de este análisis, se procedió primero a sintetizar el estado biofísico del ecosistema en una variable anual representativa denominada SAVI Sano (%), la cual consolida las superficies categorizadas como "Muy Sana" y "Medianamente Sana" respecto al área total. Este valor representativo fue contrastado con las series anuales de precipitación acumulada y temperaturas extremas, permitiendo cuantificar la sensibilidad y dependencia del vigor vegetativo frente a los factores climáticos en la provincia de Canta.

Para el calculo de porcentaje (%) de Savi sano, se aplicó la siguiente formula:

$$\text{SAVI SANO} = \frac{\text{Planta Muy Sana} + \text{Planta Medianamente Sana}}{\text{Área Total}} \times 100$$

En el cual resultan:

Tabla 4

Cálculo de SAVI Sano

Año	Planta Muy Sana (Ha)	Planta Medianamente Sana (Ha)	Área total (Ha)	SAVI Sano (%)
1995	0	4445.985	39237.633	11.3
2000	453.23	8385.094		22.5
2005	13.699	5004.908		12.8
2010	0	7049.758		18.0
2015	1.795	7676.367		19.6
2020	0	5906.739		15.1
2025	0	546.451		1.4

Nota. Cálculo del SAVI sano con las áreas (Ha) resultado de la aplicación del índice SAVI.

Así también se dio uso a las variables climatológicas:

Tabla 5

Variables climatológicas

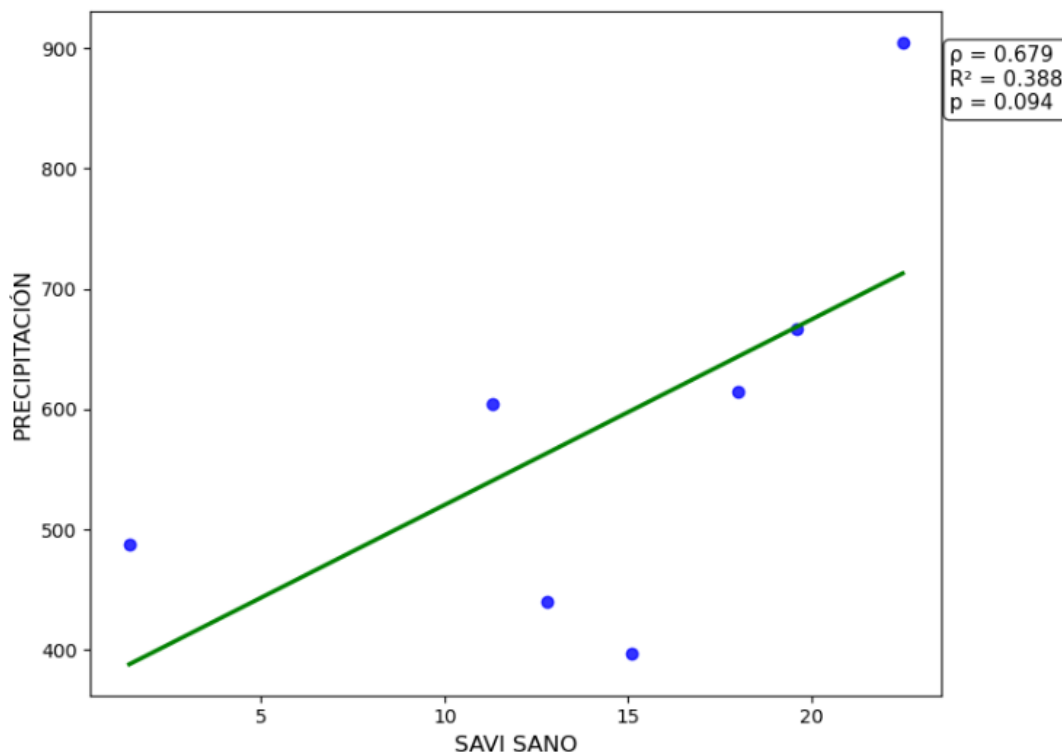
Año	Temperatura máxima	Temperatura mínima	Precipitación
1995	15.5	3.1	604.8
2000	14.6	3.1	904.5
2005	15.9	3.1	440.7
2010	15.9	3.5	615.1
2015	16.2	4.0	666.5
2020	18.8	7.4	396.9
2025	19.6	8.0	487.8

Nota. Cálculo del SAVI sano con las áreas (Ha) resultado de la aplicación del índice SAVI.

A continuación, se presentan las figuras correspondientes a la correlación de Spearman (p) entre el Savi sano y las variables meteorológicas evaluadas.

Figura 35

Savi Sano y Precipitación (1995 – 2025)



Nota. Representación multitemporal de la correlación de Spearman entre el Savi sano y la precipitación.

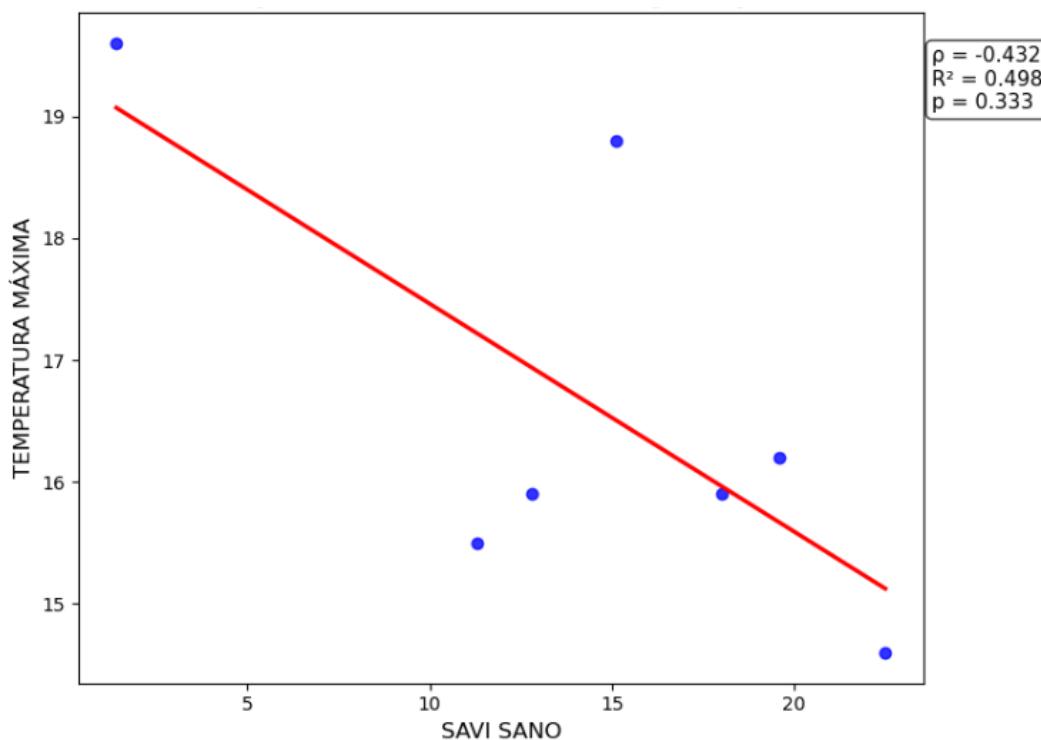
El análisis estadístico revela una correlación fuerte y positiva ($p = 0.679$) entre la disponibilidad hídrica y la salud del pajonal. Este resultado indica que la precipitación es el principal motor de crecimiento en el ecosistema: a mayores niveles de lluvia, se registra un incremento proporcional en el vigor de la vegetación. Con un valor $p = 0.094$, la relación es estadísticamente significativa con un nivel de confianza del 90%.

Desde una perspectiva biofísica, este comportamiento se evidencia claramente en el año 2000, donde el pico máximo de precipitación (904.5 mm) generó el mayor porcentaje de vegetación sana del periodo (22.5%). No obstante, el coeficiente de

determinación ($R^2 = 0.388$) sugiere que, si bien la lluvia es determinante, existen otros factores ambientales que influyen en la variabilidad de la salud del pajonal.

Figura 36

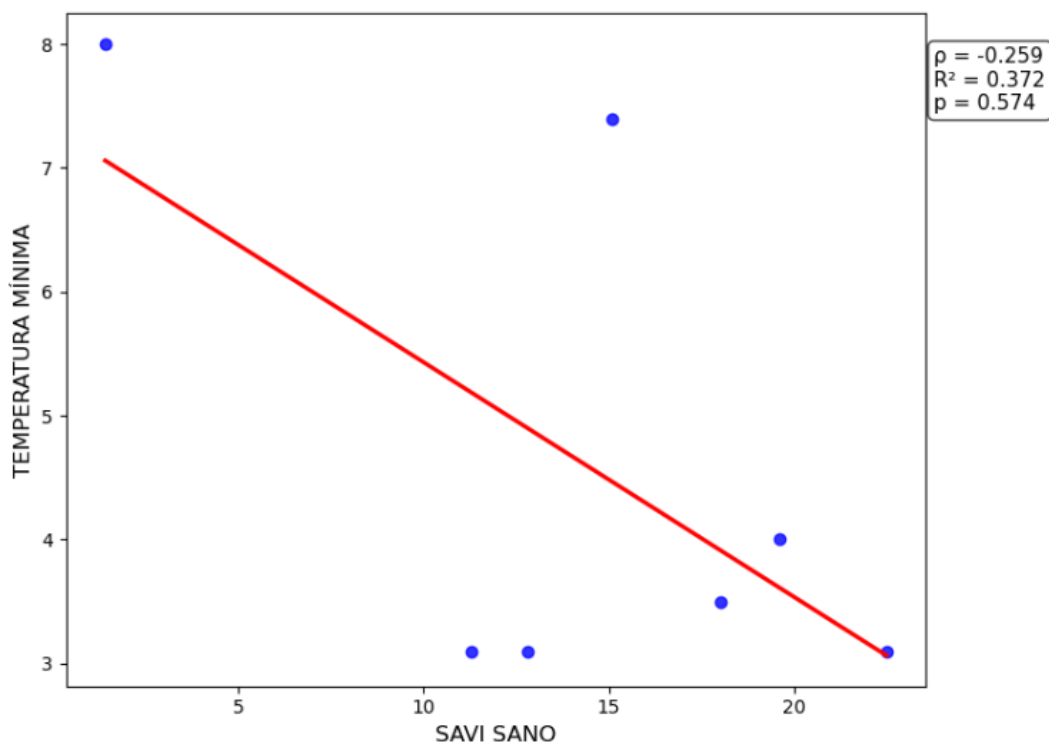
Savi Sano y Temperatura Máxima (1995 – 2025)



Nota. Representación multitemporal de la correlación de Spearman entre el Savi sano y la temperatura máxima.

En cuanto al factor térmico, se determinó una correlación moderada y negativa ($p = -0.432$). Esta relación inversa sugiere que el incremento de las temperaturas máximas actúa como un factor de estrés térmico para el pajonal; es decir, conforme los días se vuelven más calurosos, el área de vegetación sana tiende a reducirse.

Aunque el valor $p = 0.333$ indica que la relación no alcanza una significancia estadística convencional, la tendencia es biológicamente relevante. El análisis gráfico muestra que el aumento drástico de la temperatura hacia el 2025 (19.6 °C) coincide con la caída histórica del SAVI Sano a solo 1.4%, lo que implica que el calor extremo podría estar acelerando los procesos de evapotranspiración y marchitez del ecosistema.

Figura 37*Savi Sano y Temperatura Mínima (1995 – 2025)*

Nota. Representación multitemporal de la correlación de Spearman entre el Savi sano y la temperatura mínima.

Finalmente, la relación con la temperatura mínima presentó una correlación débil y negativa ($p = -0.259$). Al igual que con la temperatura máxima, el signo negativo indica una tendencia donde el aumento de las temperaturas mínimas se asocia con un menor porcentaje de salud vegetativa.

Con un valor $p = 0.574$, esta variable presenta la menor influencia estadística directa sobre el SAVI. Sin embargo, se visualiza que el ascenso sostenido de las temperaturas mínimas desde 2015 contribuye al calentamiento general del área de estudio, lo cual, sumado a la variabilidad de la precipitación, genera un entorno ambiental menos favorable para la resiliencia del pajonal de puna húmeda.

V. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

La presente investigación determinó una degradación progresiva y significativa del vigor vegetativo en el ecosistema pajonal de puna húmeda de Canta entre 1995 y 2025. Los resultados obtenidos mediante el índice SAVI muestran que la categoría "Planta Enferma" se consolidó como predominante, alcanzando las 38,667.0 Ha hacia el final del periodo. Esta tendencia de deterioro guarda una estrecha relación con los hallazgos de Emelyn y Félix (2021), quienes al evaluar bofedales en la microcuenca de Acocancha (Lima), identificaron un estado de salud "regular" condicionado por un fuerte estrés hídrico en épocas secas. Al igual que en dicho estudio, donde el índice NDWI confirmó niveles críticos de humedad, en la provincia de Canta la variabilidad de la precipitación y el aumento térmico han forzado al pajonal hacia un estado de vulnerabilidad hídrica persistente.

En cuanto a la estructura del ecosistema, se observó un proceso de fragmentación y pérdida de continuidad de las áreas con mayor biomasa ("Planta Muy Sana"). Este fenómeno de desarticulación espacial coincide con lo reportado por Javes y Chipana (2022) en las Lomas de Amancaes, donde la presión externa fragmentó un ecosistema frágil. Si bien en las Lomas la causa principal fue la expansión urbana, en el pajonal de Canta la fragmentación responde a una sinergia entre el cambio climático y el factor antrópico. Mientras Javes y Chipana cuantificaron una pérdida de 1.4 ha/año, en esta investigación la reducción de la cobertura sana es aún más drástica debido a la escala del ecosistema, sugiriendo que los ecosistemas frágiles de la región Lima, independientemente de su altitud, comparten una baja resiliencia ante perturbaciones externas.

Finalmente, la influencia de las actividades humanas, específicamente el sobrepastoreo, aparece como un factor común de deterioro. Emelyn y Félix (2021)

identificaron la presión ganadera como una causa de la presencia de especies invasoras y degradación del suelo. En Canta, la percepción local (67.1%) también reconoce que el pastoreo ha contribuido a la pérdida de vegetación. Esto permite inferir que, aunque el cambio climático es el motor principal de la pérdida de vigor detectada por el índice SAVI, las prácticas no sostenibles de uso del suelo actúan como catalizadores que aceleran el tránsito de la vegetación hacia estados de senescencia o muerte, tal como se evidencia en la expansión de la categoría de "Planta Muerta" registrada hacia el año 2025.

VI. CONCLUSIONES

- Se determinó que existe una relación directa y significativa entre el deterioro del ecosistema de pajonal de puna húmeda y las variaciones del cambio climático en Canta. El análisis estadístico mediante el coeficiente de Spearman demostró que, si bien la vegetación mantiene una dependencia positiva de la precipitación ($p = 0.679$), este beneficio es actualmente anulado por el estrés térmico generado por el alza de temperaturas. En consecuencia, el cambio climático actúa como el motor principal de la degradación ecosistémica, llevando al pajonal a su estado de mayor vulnerabilidad biológica hacia el año 2025, donde la resiliencia natural de la vegetación ha sido superada por las nuevas condiciones del entorno meteorológico.
- Se concluye que el ecosistema de pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta presenta una marcada tendencia hacia la degradación biofísica durante el periodo 1995–2025. El análisis del índice SAVI revela una transición crítica desde estados de vigor intermedio hacia un predominio de la categoría "Planta Enferma", la cual alcanzó su máxima extensión histórica de 38,667.0 Ha en el año 2025. Asimismo, la desaparición casi total de las áreas de "Planta Muy Sana" y el incremento progresivo de superficies con "Planta Muerta" evidencian un proceso de fragmentación y pérdida de biomasa que compromete la integridad del ecosistema en las últimas tres décadas.
- Se determinó que el incremento térmico acelerado es el principal indicador del cambio climático en el área de estudio. Durante el periodo evaluado, la temperatura máxima presentó un ascenso de 4.1 °C y la temperatura mínima aumentó en 4.9 °C, con un quiebre de tendencia drástico a partir del año 2015. Por otro lado, la precipitación mostró una alta variabilidad interanual con episodios críticos de déficit hídrico (como el registrado en 2020 con solo 396.9 mm). Estos hallazgos confirman

que la zona atraviesa un proceso de calentamiento sostenido que altera el balance hídrico del pajonal.

- Se concluye que existe una elevada convergencia (triangulación de datos) entre la percepción social y los resultados técnicos. El 82.2% de la población local percibe un ecosistema "más seco", el 12.3% percibe un ecosistema "igual que antes" y un 5.5% percibe un ecosistema más húmedo. El 71.2% identifica una pérdida directa en la calidad y cantidad del pasto, mientras que el 19.2% percibe que no ha cambiado y el 9.6% indica que hay más pasto. La percepción mayoritaria de los pobladores atribuye que estos cambios principalmente se dan con el incremento del calor y la irregularidad de las lluvias. La validación social confirma que el cambio climático ya está impactando los medios de vida, forzando al 83.6% de los comuneros a modificar sus prácticas agropecuarias debido a la degradación de los recursos naturales, mientras que el restante 12.3% indica realizar actividades diferentes tales como la extracción de los recursos naturales, para leña, vender pasto, etc.

VII. RECOMENDACIONES

- Ante la evidencia de que los pobladores locales están modificando sus prácticas de siembra, optando por cultivos como papa y habas como estrategia de respuesta al clima, se recomienda que el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (MIDAGRI), a través de sus programas regionales, brinde asistencia técnica especializada.
- Se recomienda a la Municipalidad Provincial de Canta y a las comunidades locales establecer un programa de monitoreo permanente del vigor vegetativo utilizando sensores remotos (Sentinel-2 o Landsat-9) y estaciones meteorológicas automáticas. Esto permitirá detectar de forma temprana umbrales críticos de estrés hídrico y térmico, facilitando la toma de decisiones informadas ante eventos climáticos extremos.
- Se sugiere iniciar proyectos de restauración activa en las áreas identificadas como "Planta Muerta" o "Planta Enferma", priorizando el uso de especies nativas altoandinas (como el género *Festuca* o *Calamagrostis*) que posean mayor resiliencia al estrés térmico. La recuperación de la densidad vegetal es clave para restaurar el "efecto esponja" del suelo y asegurar la regulación hídrica de la provincia de Canta.
- Se recomienda que las municipalidades distritales y provinciales en coordinación con las comunidades campesinas, la Autoridad Nacional del Agua, el Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre y el Gobierno Regional de Lima, implementen programas de manejo y restauración del ecosistema pajonal de puna húmeda orientados a reducir su degradación progresiva. Estas acciones deben priorizar la recuperación de la cobertura vegetal mediante prácticas de revegetación con especies nativas, manejo sostenible del pastoreo, protección de zonas de recarga hídrica y regulación del aprovechamiento de recursos naturales.

VIII. REFERENCIAS

- Alarcón, G., Sajami, E., Vásquez, T., Ponce, L., Ramos, D., Rodríguez, L., & Garate, J. (2023). Vegetation dynamics in lands degraded by gold mining in the southeastern Peruvian Amazon. *Trees, Forests and People*, 11, Artículo 100369. <https://doi.org/10.1016/j.tfp.2023.100369>
- Armenteras, D., & González, T. (2018). Revisión del concepto de ecosistema como "unidad de la naturaleza": 80 años de debate. *Ecosistemas*, 25(1), 83–89. <https://doi.org/10.7818/ECOS.2016.25-1.11>
- Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2020). PISCO: A contemporary gridded daily and monthly precipitation dataset for Peru. *Earth System Science Data*, 12(2), 811–826. <https://doi.org/10.5194/essd-12-811-2020>
- Bolund, P., & Hunhammar, S. (1999). Ecosystem services in urban areas. *Ecological Economics*, 29(2), 293–301. [https://doi.org/10.1016/S0921-8009\(99\)00013-0](https://doi.org/10.1016/S0921-8009(99)00013-0)
- Cairampoma, J. (2025). Impactos del cambio climático en los pajonales altoandinos del Perú: un análisis multiescenario. En *III Congreso Internacional de Innovación, Ciencia y Tecnología INUDI – UH* (pp. 1–15). Editorial INUDI. <https://doi.org/10.35622/inudi.c.03.22>
- Cano, D., Pizarro, S., Cacciuttolo, C., & Peñaloza, R. (2023). Study of ecosystem degradation dynamics in the Peruvian Highlands: Landsat time-series trend analysis (1985–2022) with ARVI. *Sustainability*, 15(21), Artículo 15472. <https://doi.org/10.3390/su152115472>
- Cerna, A., Uriarte, K., Lobatón, G., & Corrales, W. (2024). Influence of high Andean grasslands on landslide reduction in Peru. *Scientia Agropecuaria*, 15(2), 235–244. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2024.025>

- Chuvieco, E. (2008). *Teledetección ambiental: La observación de la Tierra desde el espacio* (3.^a ed.). Editorial Ariel.
- Copernicus. (2025). *Sentinel-2: Copernicus Data Space Ecosystem*. Dataspace Copernicus. <https://dataspace.copernicus.eu/explore-data/data-collections/sentinel-data/sentinel-2>
- Crutzen, P., & Steffen, W. (2003). How long have we been in the Anthropocene era? *Climatic Change*, 61(3), 251–257. <https://doi.org/10.1023/B:CLIM.00000004708.74871.62>
- Dębicka, J., & Szombara, S. (2018). Comparative analysis of ArcGIS and QGIS in terms of the transformations' runtime. *Geoinformatica Polonica*, 17, 99–108. <https://doi.org/10.4467/21995923GP.18.009.9639>
- Díaz, D. (2022). *Efectos del cambio climático en las zonas de vida de la Cordillera Carabaya* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Altiplano]. Repositorio Institucional UNAP. <https://repositorio.unap.edu.pe/handle/20.500.14082/19167>
- Dong, Q., & Du, Y. (2022). Impacts of alpine shrub meadow degradation on ecosystem services and spatial patterns in the Qinghai-Tibetan Plateau. *Ecological Indicators*, 141, Artículo 109088. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2022.109088>
- EOS Data Analytics. (4 de marzo de 2018). *Landsat 8: Características y especificaciones del satélite*. <https://eos.com/es/find-satellite/landsat-8/>
- Esri. (2020). *ArcGIS Documentation*. <https://doc.arcgis.com/en/>
- Esri. (2025a). *ArcGIS Pro Documentation Overview*. <https://www.esri.com/en-us/arcgis/products/arcgis-pro/overview>
- Esri. (2025b). *Spatial autocorrelation (Global Moran's I) tool reference*. ArcGIS Pro Documentation. <https://pro.arcgis.com/en/pro-app/latest/tool-reference/spatial-statistics/spatial-autocorrelation.htm>

- García, M., & Moreno, E. (2021). Increasing the resilience of ecological restoration to extreme climatic events. *Frontiers in Ecology and Evolution*, 9, Artículo 724710. <https://doi.org/10.3389/fevo.2021.724710>
- Gis & Beers. (2016). *Cálculo del índice de vegetación SAVI*. <https://www.gisandbeers.com/calculo-del-indice-vegetacion-savi/>
- Guerra, M. (2021). *Análisis espacio-temporal de la cobertura vegetal mediante teledetección en la cuenca del río Lurín* [Tesis de pregrado, Universidad Privada del Norte]. Repositorio Institucional UPN. <https://hdl.handle.net/11537/29557>
- Hang, L., Jiao, C., Jienan, H., Jianjun, L., & Jianan, L. (2023). Biomass models and ecosystem carbon density: A case study of coniferous forests in Northern Hunan. *Forests*, 14(4), Artículo 814. <https://doi.org/10.3390/f14040814>
- Hergoualc'h, K., & Subke, M. (2024). Spatial distribution of degradation and deforestation of palm swamp peatlands and associated carbon emissions in the Peruvian Amazon. *Journal of Environmental Management*, 351, Artículo 119665. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2023.119665>
- Hobbs, R., & Suding, K. (2021). Moving toward a new era of ecosystem science. *Ecosystem Health and Sustainability*, 7(1), Artículo 1928989. <https://doi.org/10.1080/20964129.2021.1928989>
- Huaraca, S. (2023). *El crecimiento urbano y los cambios de cobertura vegetal de la Loma Manchay en el periodo 1986–2022, Lima* [Tesis de pregrado, Universidad Nacional del Callao]. Repositorio Institucional UNAC. <https://hdl.handle.net/20.500.12952/8263>
- Instituto Nacional de Estadística y Geografía [INEGI]. (11 de junio de 2020). *LANDSAT: Datos e información de sensores satelitales*. <https://www.inegi.org.mx>

- Intergovernmental Panel on Climate Change [IPCC]. (2021). *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (V. Masson-Delmotte et al., Eds.). Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/9781009157896>
- Javes, J., & Chipana, C. (2022). *Evaluación de la alteración del ecosistema en las Lomas de Amancaes mediante teledetección* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/100466>
- Jiang, M., & Chen, B. (2011). Integrated urban ecosystem evaluation and modeling based on embodied cosmic exergy. *Ecological Modelling*, 222(13), 2149–2165. <https://doi.org/10.1016/j.ecolmodel.2011.04.012>
- Johnson, D., Ambrose, S., Bassett, T., Bowen, M., Crummey, D., Isaacson, J., Johnson, D., Lamb, P., Saul, M., & Winter-Nelson, A. (1997). Meanings of environmental terms. *Journal of Environmental Quality*, 26(3), 581–589. <https://doi.org/10.2134/jeq1997.00472425002600030002x>
- Lemenkova, P. (2018). Topology, homogeneity and scale factors for object detection: application of eCognition software for urban mapping using multispectral satellite image. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.1901.00726>
- Li, Z., & Al-Ansari, N. (2025). An integrated approach for evaluating the spatial and temporal dynamics of ecosystem services and ecological risk urban agglomerations in China. *Ecological Indicators*, 172, Artículo 113248. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113248>
- López, D., & Torres, A. (2018). *Análisis de datos tipo raster* (Documento de trabajo CONACYT). Centro de Investigación en Ciencias de Información Geoespacial

[CentroGeo].

<https://centrogeo.repositorioinstitucional.mx/jspui/bitstream/1012/181/1/08>

López, E. (2021). *La periurbanización y degradación de los ecosistemas naturales de las lomas costeras en Lima Metropolitana* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/140385>

Mendoza, E., & Ulfe, F. (2021). *Evaluación del estado de salud de bofedales mediante teledetección en la microcuenca de Acocancha-Lima 2021* [Tesis de pregrado, Universidad César Vallejo]. Repositorio Institucional UCV.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/74862>

Meneses, T. (2011). El índice normalizado diferencial de la vegetación (NDVI) y su aplicación a la sequía. *Unasylva*, 62(238), 35–40.
<https://www.fao.org/3/i2560s/i2560s07.pdf>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2019). *Resolución Ministerial N.º 178-2019-MINAM: Aprueban Guía de Evaluación del Estado del Ecosistema*. MINAM.
<https://www.gob.pe/institucion/minam/normas-legales/279128-178-2019-minam>

Ministerio del Ambiente [MINAM]. (2021). *Ficha técnica de estado de conservación: Pajonal de Puna Húmeda - Quntuyuc*. Sistema Nacional de Información Ambiental [SINIA].
https://sinia.minam.gob.pe/sites/default/files/archivos/public/docs/1550843726_FT-PAS-08_Pajonal_de_Puna_H%C3%BAmada_-_Quntuyuc.pdf

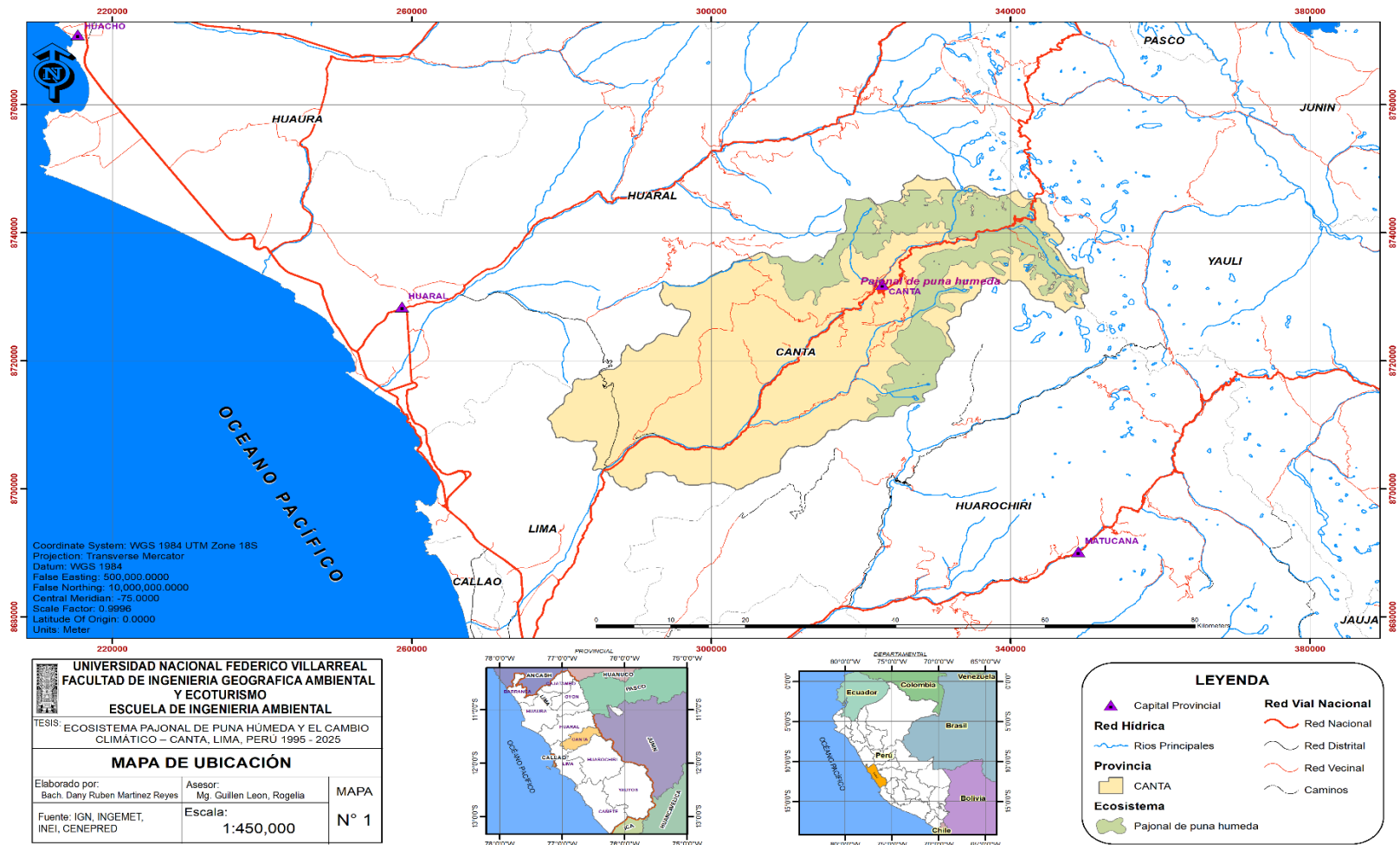
Munns, W., Helm, R., Adams, W., Clements, W., Cramer, M., & Williams, P. (2009). Translating ecological risk to ecosystem service loss. *Integrated Environmental Assessment and Management*, 5(4), 500–514.
https://doi.org/10.1897/IEAM_2009-026.1

- Nichols, C., & Hill, M. (2025). Climate change impacts on solar energy generation in the continental United States, forecasts from deep learning. *Environmental Modelling & Software*, 192, Artículo 106535. <https://doi.org/10.1016/j.envsoft.2025.106535>
- Núñez, J., Pizarro, S., Gutierrez, M., & Ñaupari, J. (2021). Dinámica espacio-temporal de la biomasa aérea en pastizales altoandinos basado en NDVI-MODIS validado por espectrometría in situ. *Revista de Investigaciones Veterinarias del Perú*, 32(3), Artículo e20392. <https://doi.org/10.15381/rivep.v32i3.20392>
- Oliveira, R., & Bergier, I. (2025). Integrating GIS and remote sensing for soil attributes mapping in degraded pastures of the Brazilian Cerrado. *Soil Advances*, 3, Artículo 100044. <https://doi.org/10.1016/j.soilad.2025.100044>
- Rocha, J. (2021). Ecosystems are showing symptoms of resilience loss. *arXiv*. <https://doi.org/10.48550/arXiv.2107.03307>
- Roque, R. (2022). Tendencia del NDVI en el Área de Conservación Regional Angostura Faical de Tumbes, Perú, 1999–2019. *Manglar*, 19(1), 45–52. <https://doi.org/10.17268/manglar.2022.029>
- Servicio Nacional Forestal y de Fauna Silvestre [SERFOR]. (2021). *Ficha técnica de estado de conservación: Ecosistema Pajonal de Puna Húmeda*. SINIA. <https://sinia.minam.gob.pe/documentos/ficha-tecnica-estado-conservacion-ecosistema-pajonal-puna-humeda>
- Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú [SENAMHI]. (2020). *Mapa climático del Perú*. SENAMHI. <https://www.senamhi.gob.pe/?p=mapa-climatico-del-peru>
- Society for Ecological Restoration International [SER]. (2004). *The SER International primer on ecological restoration*. SER International. <https://www.ser.org/>
- Sommerville, I. (2016). *Software engineering* (10.^a ed.). Pearson.

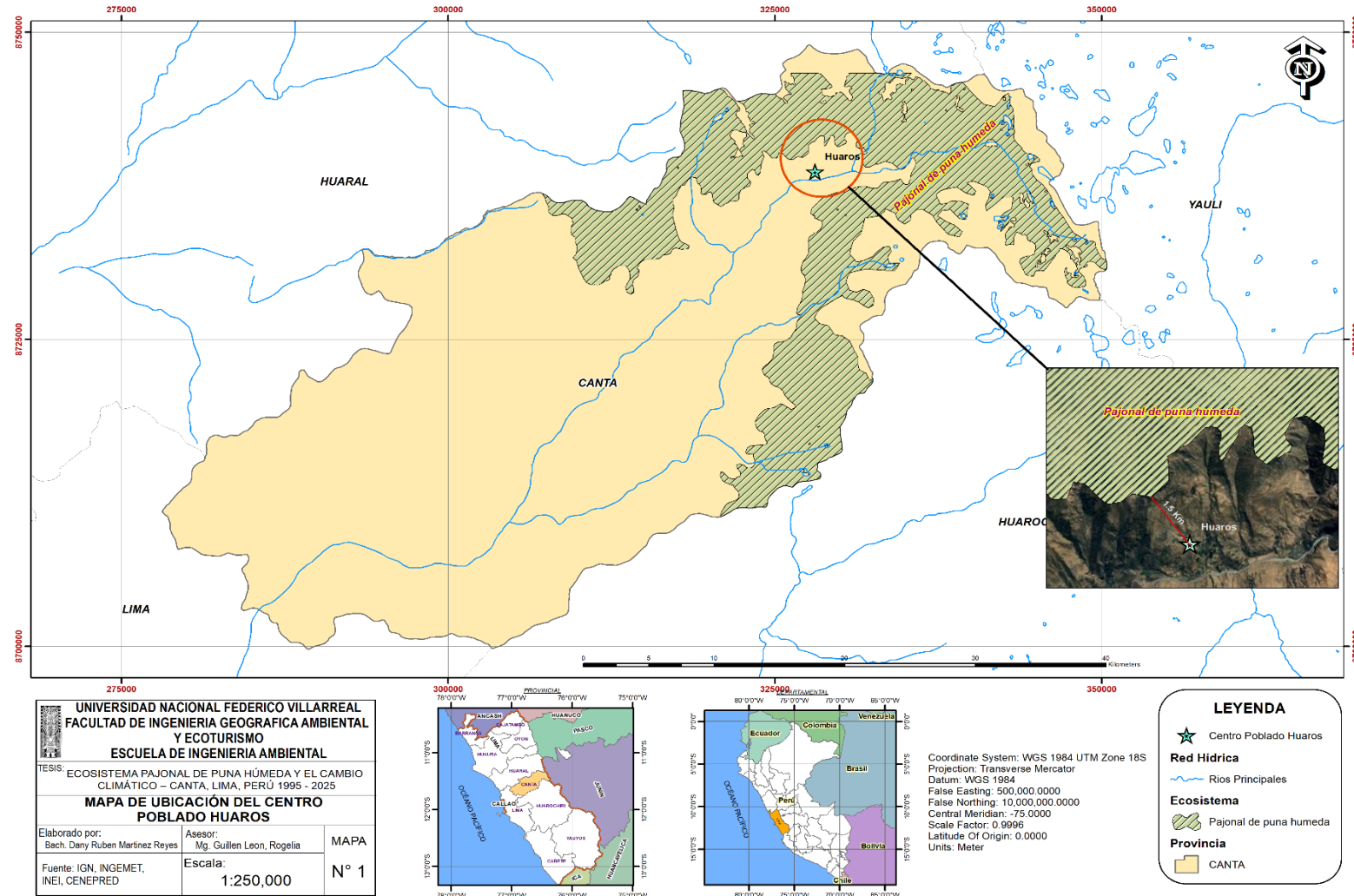
- Thornthwaite, C. (1948). An approach toward a rational classification of climate. *Geographical Review*, 38(1), 55–94. <https://doi.org/10.2307/210739>
- U.S. Geological Survey [USGS]. (2017). *Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper Plus Level-1, Collection 1* [Conjunto de datos]. U.S. Geological Survey. <https://doi.org/10.5066/F7WH2P8M>
- Universidad Veracruzana. (2014). *Introducción a la investigación: Tipos de investigación*. <https://www.uv.mx/apps/bdh/investigacion/unidad1/investigacion-tipos.html>
- Valdivia, B. (2019). *Guía básica de imágenes satelitales* [Guía técnica]. Centro de Recursos Geoespaciales.
- Wang, Y., & Xie, H. (2025). Spatial-temporal differentiation and influencing factors of ecosystem health in Three-River-Source National Park. *Ecological Indicators*, 171, Artículo 113183. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113183>
- Xie, Y., & Xu, Y. (2023). Evaluating temporal-spatial variations of wetland ecosystem service value in China during 1990–2020 from the donor side based on cosmic exergy. *Journal of Cleaner Production*, 414, Artículo 137485. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2023.137485>
- Zhong, A., Hu, Z., Yang, T., & Wang, Z. (2025). Ecosystem health evaluation and driving force analysis of high groundwater table coal-grain complex area based on remote sensing information. *Ecological Indicators*, 176, Artículo 113672. <https://doi.org/10.1016/j.ecolind.2025.113672>
- Zuloaga, J., & Natividad, G. (2023). Cambio de uso de tierra y su impacto en la cobertura vegetal del Parque Nacional Tingo María entre los años 2006–2021. *Revista Kawsaypacha: Sociedad y Medio Ambiente*, (12), Artículo a009. <https://doi.org/10.18800/kawsaypacha.202302.a009>

IX. ANEXOS

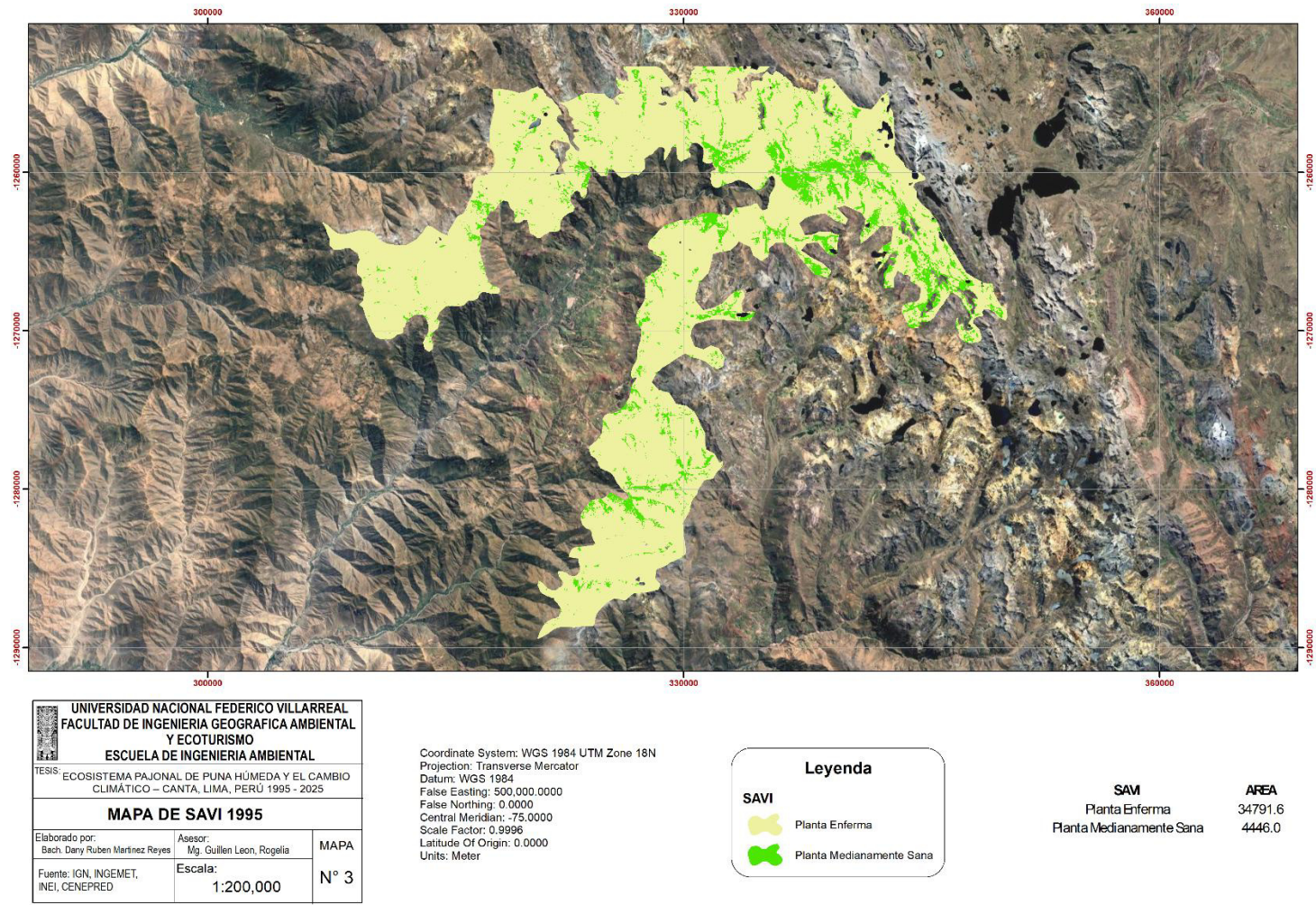
Anexo A

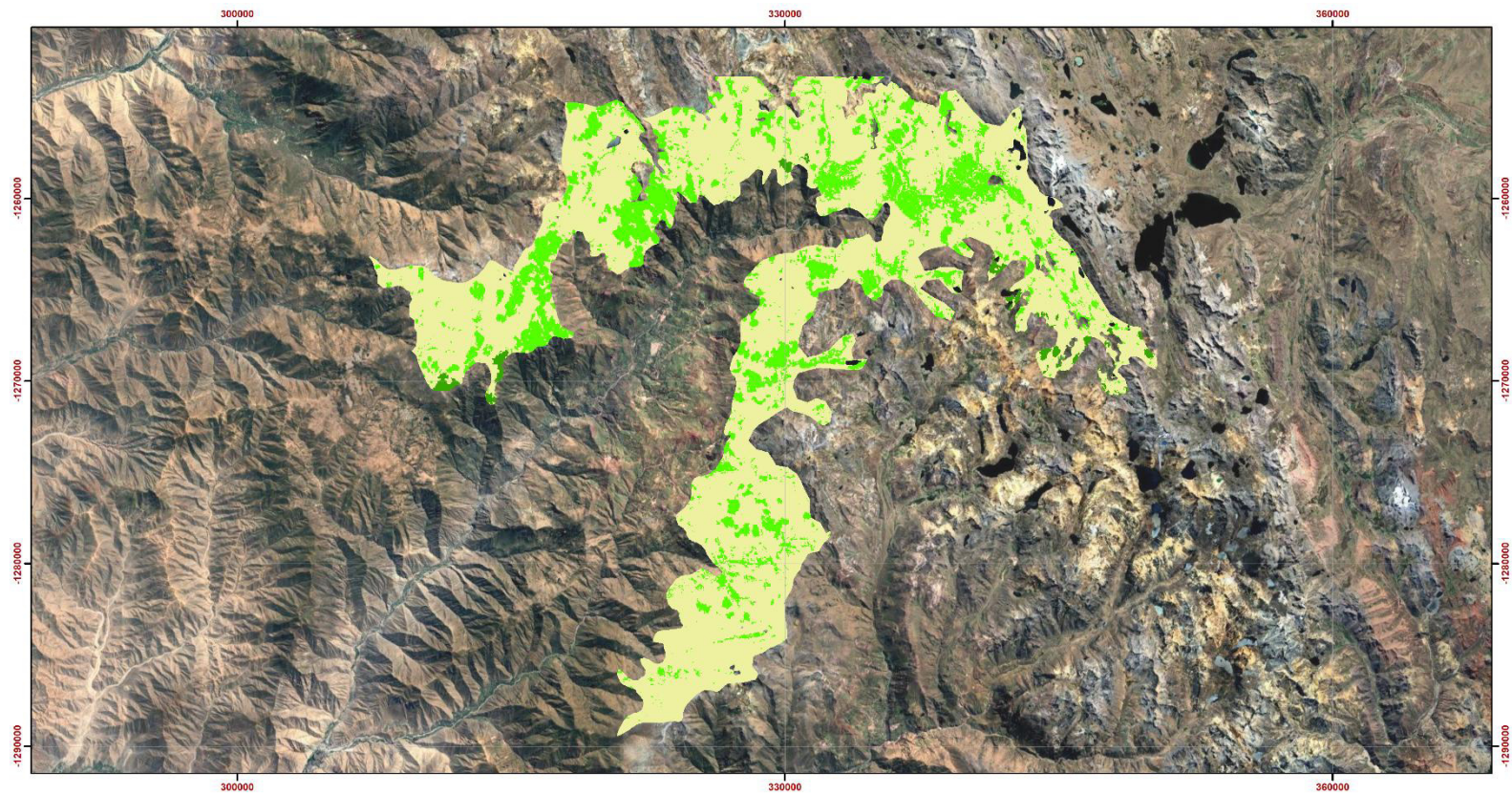


Anexo B



Anexo C







UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL
Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESES:
ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

MAPA DE SAVI 2000

Elaborado por:
Bach. Dany Ruben Martinez Reyes

Asesor:
Mg. Guillen Leon, Rogelia

MAPA

Fuente: IGN, INGEMET, INEI, CENEPRED

Escala:
1:200,000

N° 4

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: -75.0000
Scale Factor: 0.9998
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

Leyenda

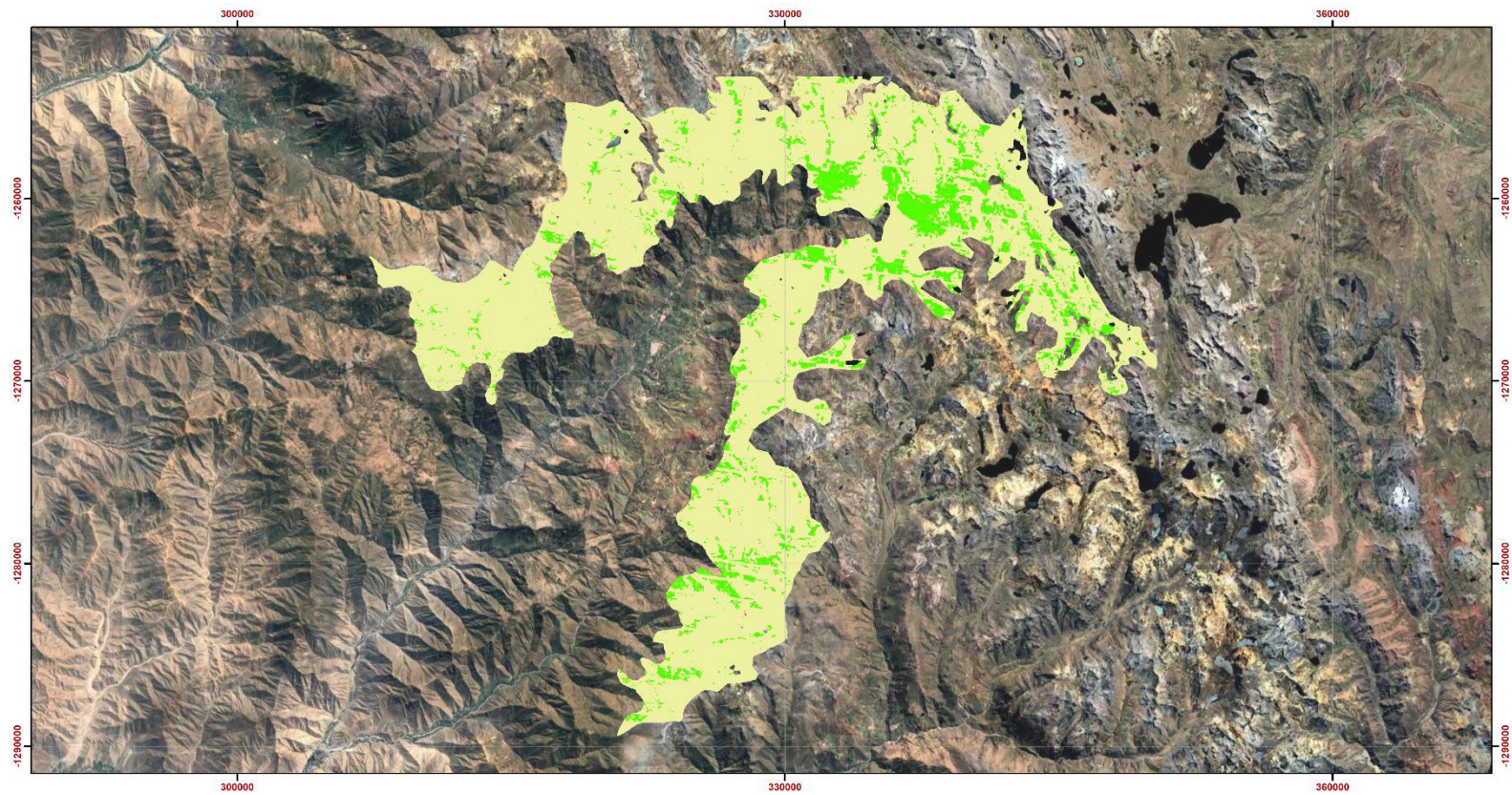
SAVI

 Planta Muy Sana

 Planta Medianamente Sana

 Planta Enferma

SAVI	AREA
Planta Enferma	30399.3
Planta Medianamente Sana	8385.1
Planta Muy Sana	453.2





UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL
Y ECOTURISMO

ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESES:

ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

MAPA DE SAVI 2005

Elaborado por:

Bach. Dany Ruben Martinez Reyes

Asesor:

Mg. Guillen Leon, Rogelia

MAPA

Fuente: IGN, INGEMET, INEI, CENEPRED

Escala:

1:200,000

N° 5

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: -75.0000
Scale Factor: 0.9996
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

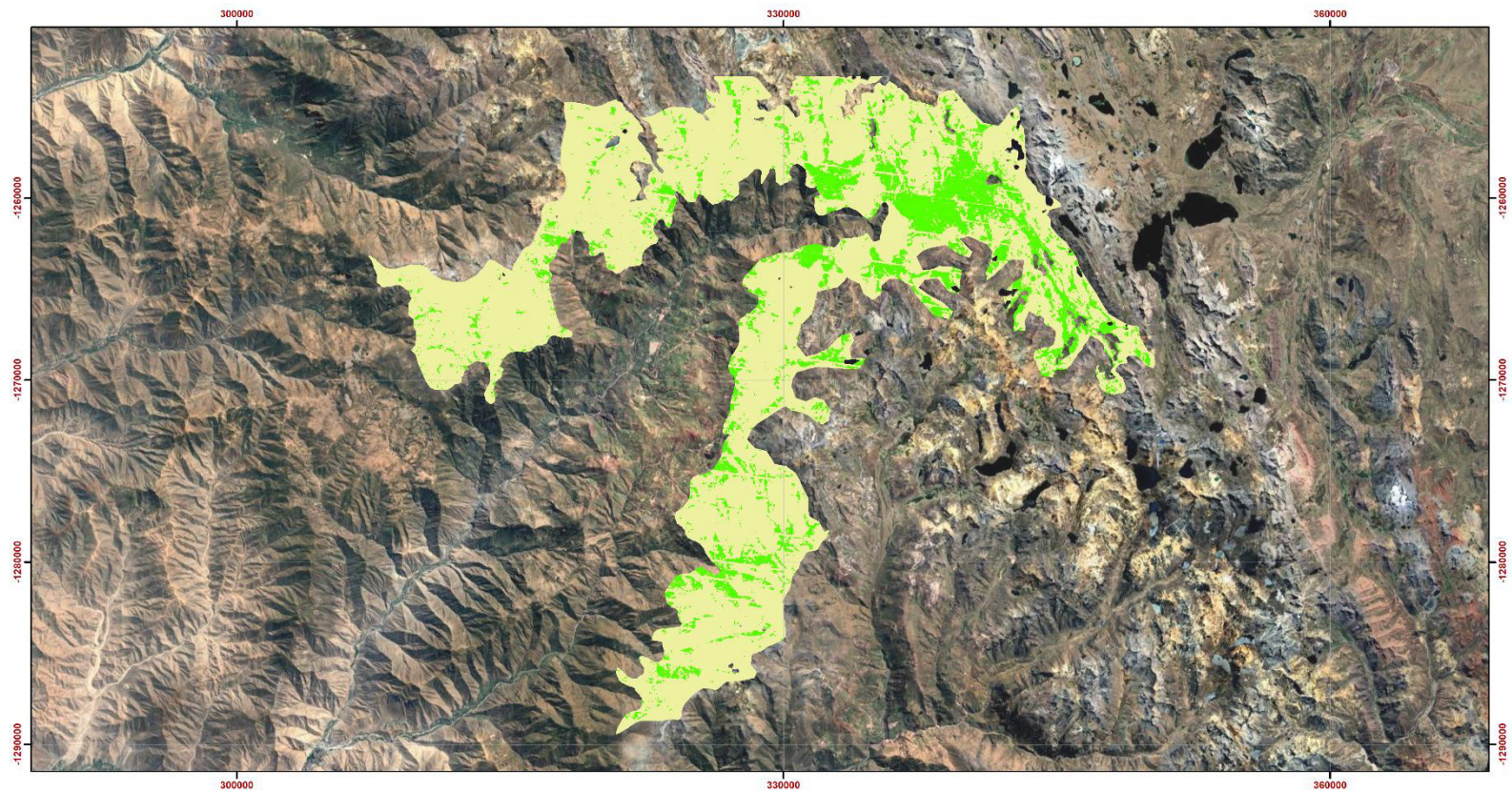
SAVI

Planta Muerta

Planta Enferma

Planta Medianamente Sana

SAVI	AREA
Planta Muerta	8.5
Planta Enferma	34210.5
Planta Medianamente Sana	5004.9
Planta Muy Sana	13.7





UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL
Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESES:
ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

MAPA DE SAVI 2010

Elaborado por: Bach. Dany Ruben Martinez Reyes	Asesor: Mg. Guillen Leon, Rogelia	MAPA N° 6
Fuente: IGN, INGEMET, INEI, CENEPRED	Escala: 1:200,000	

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: -75.0000
Scale Factor: 0.9998
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

Leyenda

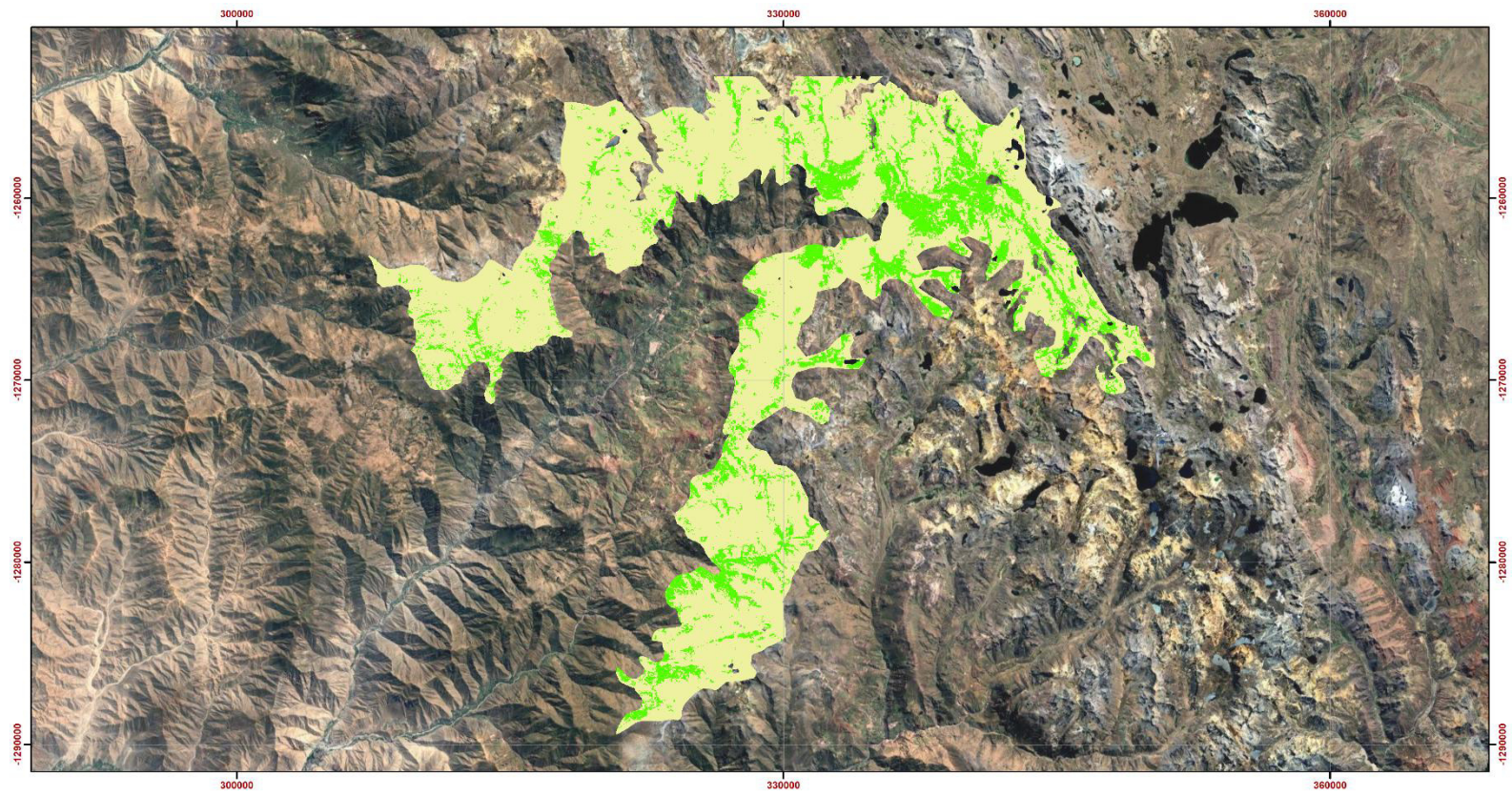
SAVI

 Planta Medianamente Sana

 Planta Enferma

 Planta Muerta

SAVI	AREA
Planta Muerta	6.4
Planta Enferma	32181.5
Planta Medianamente Sana	7049.8





UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL

FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL
Y ECOTURISMO

ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

TEISIS:

ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

MAPA DE SAVI 2015

Elaborado por:

Bach. Dany Ruben Martinez Reyes

Asesor:

Mg. Guillen Leon, Rogelia

MAPA

Fuente: IGN, INGEMET, INEI, CENEPRED

Escala:

1:200,000

Nº 7

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: -75.0000
Scale Factor: 0.9996
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

SAVI



Planta Muerta



Planta Enferma

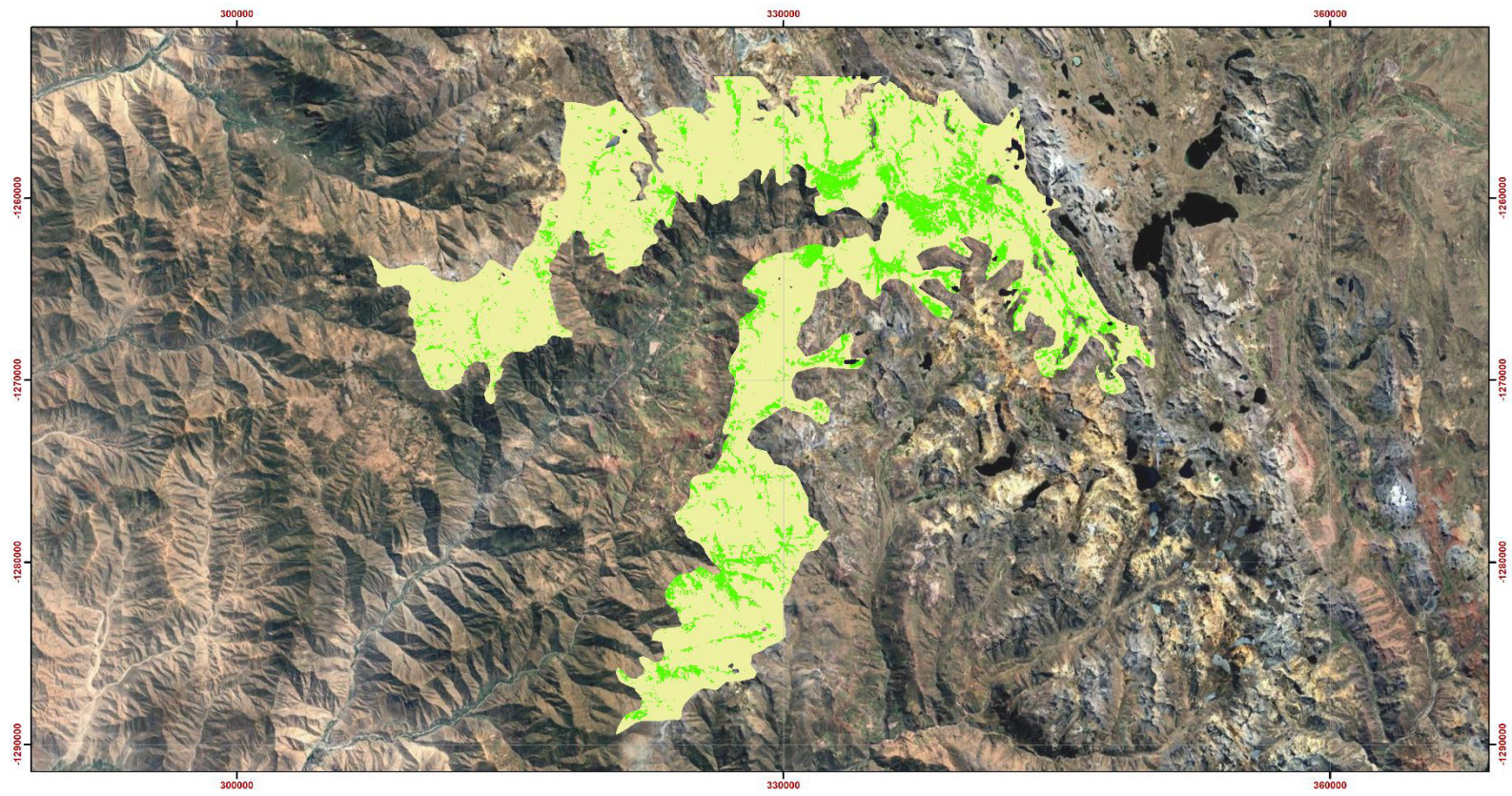


Planta Medianamente Sana



Planta Muy Sana

SAVI	AREA
Planta Muerta	16.6
Planta Enferma	31542.9
Planta Medianamente Sana	7676.4
Planta Muy Sana	1.8





UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL
Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESES:
ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

MAPA DE SAVI 2020

Elaborado por:
Bach. Dany Ruben Martinez Reyes

Asesor:
Mg. Guillen Leon, Rogelia

MAPA

Fuente: IGN, INGEMET, INEI, CENEPRED

Escala:
1:200,000

N° 8

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: -75.0000
Scale Factor: 0.9998
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

Legenda

SAVI

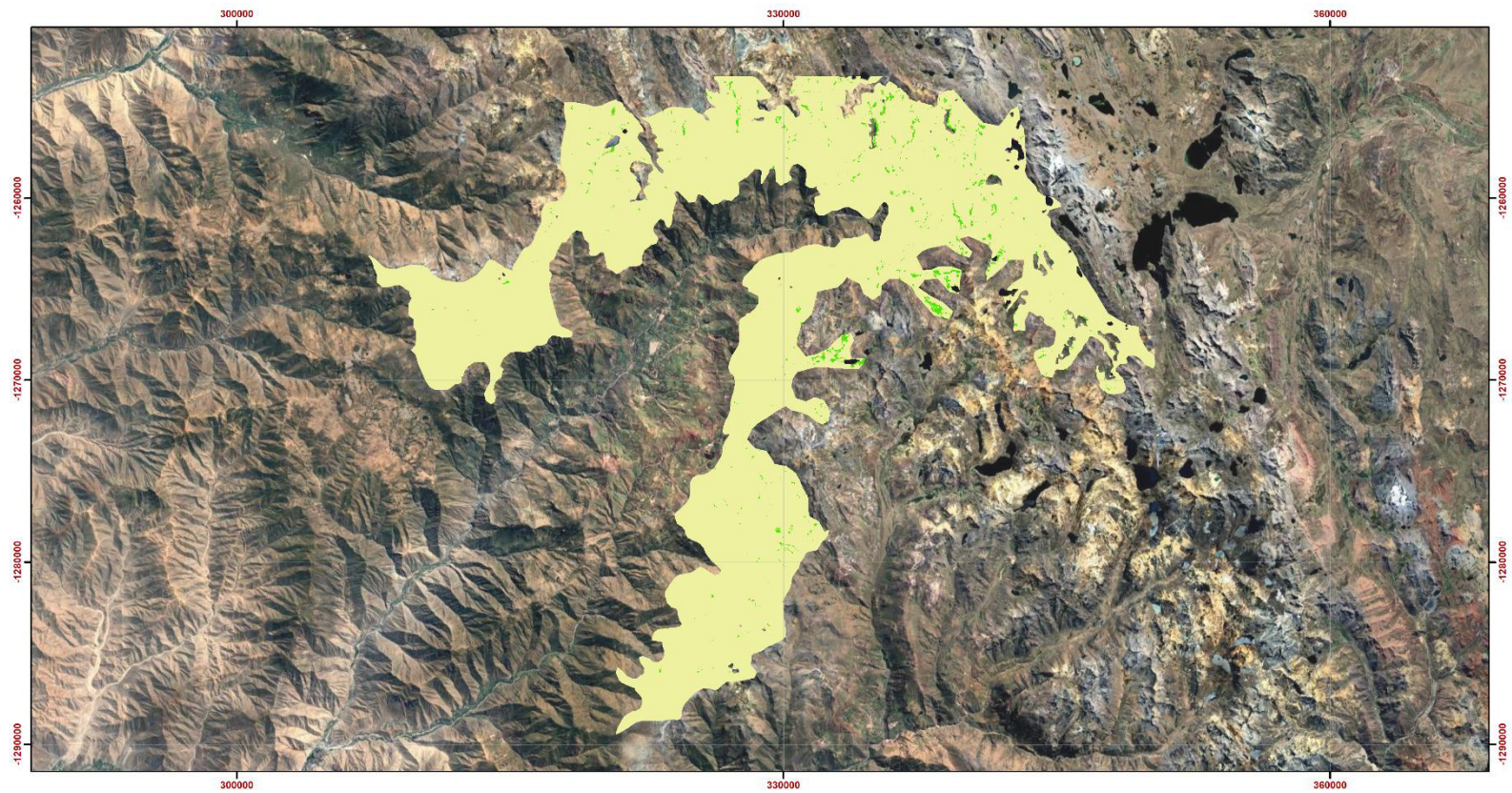
 Planta Muerta

 Planta Enferma

 Planta Medianamente Sana

 Planta Muy Sana

SAVI	AREA
Planta Muerta	25.0
Planta Enferma	33305.9
Planta Medianamente Sana	5906.7





UNIVERSIDAD NACIONAL FEDERICO VILLARREAL
FACULTAD DE INGENIERIA GEOGRAFICA AMBIENTAL
Y ECOTURISMO
ESCUELA DE INGENIERIA AMBIENTAL

TESES:
ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO – CANTA, LIMA, PERÚ 1995 - 2025

MAPA DE SAVI 2025

Elaborado por: Bach. Dany Ruben Martinez Reyes	Asesor: Mg. Guillen Leon, Rogelia	MAPA N° 9
Fuente: IGN, INGEMET, INEI, CENEPRED	Escala: 1:200,000	

Coordinate System: WGS 1984 UTM Zone 18N
Projection: Transverse Mercator
Datum: WGS 1984
False Easting: 500.000.0000
False Northing: 0.0000
Central Meridian: -75.0000
Scale Factor: 0.9998
Latitude Of Origin: 0.0000
Units: Meter

Leyenda

SAVI

 Planta Medianamente Sana

 Planta Enferma

 Planta Muerta

SAVI	AREA
Planta Muerta	24.1
Planta Enferma	38667.0
Planta Medianamente Sana	546.5

Anexo D



Universidad Nacional
Federico Villarreal

**ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CAMBIO CLIMÁTICO –
CANTA, LIMA, PERÚ
1995 – 2025**

Nombre: _____ **Edad:** ____

Fecha: / /

1. ¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?
 - a) Época de lluvias
 - b) Época seca
 - c) Todo el año por igual
 - d) Otro: _____
2. ¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?
 - a) Sí, hay menos y más seco
 - b) No ha cambiado
 - c) Hay más pasto y más verde
 - d) Otro: _____
3. ¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?
 - a) Más seco
 - b) Igual que antes
 - c) Más húmedo
 - d) Otro: _____
4. ¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?
 - a) Sí, por el calor o la falta de lluvia
 - b) No tienen relación
 - c) Se debe más al uso del suelo
 - d) Otro: _____
5. ¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?
 - a) Sí, por pastoreo, tala u otras acciones
 - b) No, la causa es natural
 - c) En parte ambas cosas
 - d) Otro: _____
6. ¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?
 - a) Sí, han disminuido
 - b) No, se mantienen igual
 - c) Han aumentado
 - d) Otro: _____
7. ¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?
 - a) Sí, llueve más fuerte
 - b) Igual que antes
 - c) Llueve menos
 - d) Otro: _____
8. ¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?
 - a) Sí, inician más tarde o terminan antes
 - b) Se mantiene igual
 - c) Lluvias más prolongadas
 - d) Otro: _____
9. ¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad? (Puede marcar más de uno):
 - ☐ Heladas
 - ☐ Sequías
 - ☐ Lluvias intensas
 - ☐ Granizadas
 - ☐ Vientos fuertes
 - ☐ Otro: _____

10. ¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?
- a) Sí, hemos hecho algo (reforestación, cuidados, etc.)
 - b) No hemos hecho nada
 - c) Solo algunos lo han intentado
 - d) Otro: _____
11. ¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?
- a) Agricultura y ganadería
 - b) Extracción de recursos (leña, pasto, agua, etc.)
 - c) Comercio, transporte o turismo
 - d) Otro: _____
12. ¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?
- a) Sí, más que antes
 - b) Igual que antes
 - c) Menos que antes
 - d) Otro: _____
13. ¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?
- a) Sí, los días son más calurosos y las noches más frías
 - b) Se mantiene como antes
 - c) Hace más frío todo el día
 - d) Otro: _____
14. ¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?
- a) Sí, he cambiado prácticas
 - b) No, sigo igual
 - c) Solo en algunos casos
 - d) Otro: _____
15. ¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?
- a) Sí, han desaparecido algunas
 - b) Se mantienen igual
 - c) Han aparecido nuevas especies
 - d) Otro: _____

Anexo E

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Método
Problema General:	Objetivo General:	Hipótesis General:	V1: Cambio Climático	V1:	V1:	Tipo:
¿Cuál es la relación del ecosistema pajonal de puna húmeda y el cambio climático, en la provincia de Canta, región Lima; entre los años 1995 al 2025?	Determinar la relación del ecosistema pajonal de puna húmeda y el cambio climático, en la provincia de Canta, región Lima; entre los años 1995 - 2025.	H0 = El ecosistema pajonal de puna húmeda tiene una relación muy alta con el cambio climático, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 – 2025. H1 = El ecosistema pajonal de puna húmeda no tiene una relación muy alta con el cambio climático, en la provincia de Canta, Región Lima, entre los años 1995 – 2025.	V2: Ecosistema pajonal de puna húmeda	- Parámetros meteorológicos - Percepción de las comunidades locales sobre el clima V2: - Índice espectral - Percepción de las comunidades locales sobre la cobertura vegetal	- Temperatura, Precipitación, Humedad - Entrevistas sobre el clima, Encuestas sobre cambios climáticos V2: - SAVI - Entrevistas sobre vegetación, Encuestas sobre cambios en el pajonal	Aplicada. La investigación es aplicada, está enfocada en resolver problemas específicos, utilizando conocimientos científicos ya existentes o creando nuevos, con el propósito de ofrecer soluciones prácticas y efectivas para situaciones reales. (Veracruzana, 2014) Nivel: Correlacional-explicativo. No solo se limita a describir un fenómeno, sino que también examina las conexiones entre variables y determina las razones detrás de su comportamiento. (Veracruzana, 2014)
Problema Específico 1:	Objetivo Específico 1:	Hipótesis Específica 1:	Variable:	Dimensión:	Indicador:	
¿Qué tendencias de cambio reflejan el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025?	Determinar las tendencias de cambio que refleja el índice espectral en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia de Canta, región Lima entre los años 1995 al 2025	H0 = El índice espectral, SAVI, no refleja una tendencia alta de cambio en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda en Canta, Lima, durante el periodo 1995 al 2025. H1 = El índice espectral, SAVI, refleja una tendencia alta de disminución en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda en Canta, Lima, durante el periodo 1995 al 2025.	Ecosistema pajonal de puna húmeda	Índice espectral	SAVI	
Problema Específico 2:	Objetivo Específico 2:	Hipótesis Específica 2:	Variable:	Dimensión:	Indicadores:	

Problemas	Objetivos	Hipótesis	Variable	Dimensiones	Indicadores	Método
¿Qué parámetros meteorológicos indican el cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025?	Determinar las variables climáticas como indicadores del cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda, en la provincia de Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025.	H0 = Los parámetros meteorológicos no indican un cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025. H1 = Los parámetros meteorológicos indican un cambio climático en el ecosistema pajonal de puna húmeda en la provincia Canta, región Lima, entre los años 1995 al 2025.	Cambio Climático	Parámetros meteorológicos	Temperatura, Precipitación, Humedad	
Problema Específico 3:	Objetivo Específico 3:	Hipótesis Específica 3:	Variables:	Dimensiones:	Indicadores:	
¿Cuál es la percepción de las comunidades locales sobre los cambios en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda y el clima en la provincia de Canta, Lima; entre los años 1995 al 2025?	Evaluar la percepción de las comunidades locales sobre los cambios en la cobertura vegetal del ecosistema pajonal de puna húmeda y el clima en la provincia de Canta, Lima; entre los años 1995 al 2025.	H0 = Las comunidades locales no perciben cambios significativos en la cobertura vegetal del Ecosistema Pajonal de Puna Húmeda ni en el clima, en la provincia de Canta, Lima, entre los años 1995 al 2025. H1 = Las comunidades locales perciben cambios significativos en la cobertura vegetal del Ecosistema Pajonal de Puna Húmeda ni en el clima, en la provincia de Canta, Lima, entre los años 1995 al 2025.	- Cambio Climático - Ecosistema pajonal de puna húmeda	- Percepción de las comunidades locales sobre el clima - Percepción de las comunidades locales sobre la cobertura vegetal	- Entrevistas sobre el clima, Encuestas sobre cambios climáticos - Entrevistas sobre vegetación, Encuestas sobre cambios en el pajonal	

Anexo F

**VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE LA PERCEPCIÓN DE LAS COMUNIDADES LOCALES SOBRE
LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGERAL DEL ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CLIMA**

Nº	DIMENSIONES / ítems	Pertinencia ¹		Relevancia ²		Claridad ³		Sugerencias
		SI	NO	SI	NO	SI	NO	
	Dimensión 1. Área de la Vegetación del Ecosistema							
1	¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?	X		X		X		
2	¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?	X		X		X		
	Dimensión 2. Patrones Climáticos							
3	¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?	X		X		X		
4	¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?	X		X		X		
5	¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?	X		X		X		
6	¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?	X		X		X		
7	¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad?	X		X		X		
8	¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?	X		X		X		
9	¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?	X		X		X		
	Dimensión 3. Actividades Humanas							
10	¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?	X		X		X		
11	¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?	X		X		X		
12	¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?	X		X		X		
13	¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?	X		X		X		
	Dimensión 4. Salud de la Vegetación							
14	¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?	X		X		X		
15	¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?	X		X		X		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): ____ Si hay Suficiencia X

Opinión de aplicabilidad: **Aplicable** [X] **Aplicable después de corregir** [] **No aplicable** []

Apellidos y nombres del juez validador. VALDIVIA ORIHUELA BRAULIO ARMANDO **DNI:** 10472093

Especialidad del validador: INGENIERO GEOGRAFO ESPECIALISTA EN CIENCIAS AMBIENTALES

¹**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

²**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

³**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión

A handwritten signature in black ink, consisting of a large, stylized 'A' followed by a horizontal line and a flourish.

Firma del experto informante

TELF:907565464

Reg.CIP N°160959

**VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE LA PERCEPCIÓN DE LAS COMUNIDADES LOCALES SOBRE
LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGETAL DEL ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CLIMA**

N°	DIMENSIONES / ítems	Pertinencia ¹		Relevancia ²		Claridad ³		Sugerencias
		SI	NO	SI	NO	SI	NO	
Dimensión 1. Área de la Vegetación del Ecosistema								
1	¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?	✓		✓		✓		
2	¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?	✓		✓		✓		
Dimensión 2. Patrones Climáticos								
3	¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?	✓		✓		✓		
4	¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?	✓		✓		✓		
5	¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?	✓		✓		✓		
6	¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?	✓		✓		✓		
7	¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad?	✓		✓		✓		
8	¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?	✓		✓		✓		
9	¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?	✓		✓		✓		
Dimensión 3. Actividades Humanas								
10	¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?	✓		✓		✓		
11	¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?	✓		✓		✓		
12	¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?	✓		✓		✓		
13	¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?	✓		✓		✓		
Dimensión 4. Salud de la Vegetación								
14	¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?	✓		✓		✓		
15	¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?	✓		✓		✓		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): ☒ Si hay Suficiencia _____

Opinión de aplicabilidad: Aplicable ☒ Aplicable después de corregir ☐ No aplicable ☐

Apellidos y nombres del juez validador. VASQUEZ DE ANDA, ANIBER OMAR DNI: 04448964

Especialidad del validador: Gestión Ambiental, Desarrollo Sostenible

¹**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

²**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

³**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión



Firma del experto informante

**VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE LA PERCEPCIÓN DE LAS COMUNIDADES LOCALES SOBRE
LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGERAL DEL ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CLIMA**

Nº	DIMENSIONES / ítems	Pertinencia ¹		Relevancia ²		Claridad ³		Sugerencias
		SI	NO	SI	NO	SI	NO	
	Dimensión 1. Área de la Vegetación del Ecosistema							
1	¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?	X		X		X		
2	¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?	X		X		X		
	Dimensión 2. Patrones Climáticos							
3	¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?	X		X		X		
4	¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?	X		X		X		
5	¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?	X		X		X		
6	¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?	X		X		X		
7	¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad?	X		X		X		
8	¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?	X		X		X		
9	¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?	X		X		X		
	Dimensión 3. Actividades Humanas							
10	¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?	X		X		X		
11	¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?	X		X		X		
12	¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?	X		X		X		
13	¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?	X		X		X		
	Dimensión 4. Salud de la Vegetación							
14	¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?	X		X		X		
15	¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?	X		X		X		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): X Si hay Suficiencia SI

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [X] Aplicable después de corregir [] No aplicable []

Apellidos y nombres del juez validador. PARICOTO SIMON MARIA MERCEDES DNI: 44625683

Especialidad del validador: Gestión Ambiental, Desarrollo Sostenible

¹**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

²**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

³**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión



Firma del experto informante

**VALIDEZ DE CONTENIDO DEL INSTRUMENTO QUE MIDE LA PERCEPCIÓN DE LAS COMUNIDADES LOCALES SOBRE
LOS CAMBIOS EN LA COBERTURA VEGERAL DEL ECOSISTEMA PAJONAL DE PUNA HÚMEDA Y EL CLIMA**

Nº	DIMENSIONES / ítems	Pertinencia ¹		Relevancia ²		Claridad ³		Sugerencias
	Dimensión 1. Área de la Vegetación del Ecosistema	SI	NO	SI	NO	SI	NO	
1	¿En qué época del año nota más la pérdida de vegetación?	X		X		X		
2	¿Ha observado cambios en el color o la cantidad de pasto en los cerros durante los últimos años?	X		X		X		
	Dimensión 2. Patrones Climáticos							
3	¿Cree que los cambios en la vegetación están relacionados con el clima?	X		X		X		
4	¿Las fuentes de agua como manantiales, quebrada, u otros han disminuido su caudal?	X		X		X		
5	¿Considera que las lluvias son más intensas que antes?	X		X		X		
6	¿Han cambiado las fechas de inicio o fin de las lluvias en su localidad?	X		X		X		
7	¿Qué fenómenos climáticos ha notado con más cambio en su localidad?	X		X		X		
8	¿Siente que hay más incendios o sequías que antes en la zona?	X		X		X		
9	¿Ha notado cambios en las temperaturas durante el día y la noche?	X		X		X		
	Dimensión 3. Actividades Humanas							
10	¿Considera que las actividades humanas han contribuido a la pérdida de vegetación?	X		X		X		
11	¿La localidad ha tomado alguna acción frente a estos cambios ambientales?	X		X		X		
12	¿Cuáles son las actividades que más se practican en su zona actualmente?	X		X		X		
13	¿Ha tenido que cambiar su forma de sembrar o criar por el clima?	X		X		X		
	Dimensión 4. Salud de la Vegetación							
14	¿Cree usted que el ecosistema de pajonal está más seco o húmedo que antes?	X		X		X		
15	¿Ha notado que ciertas especies de plantas o animales ya no aparecen como antes?	X		X		X		

Observaciones (precisar si hay suficiencia): X Si hay Suficiencia _____ SI

Opinión de aplicabilidad: Aplicable [X] Aplicable después de corregir [☐] No aplicable [☐]

Apellidos y nombres del juez validador. _AYLAS HUMAREDA, MARIA DEL CARMEN _DNI: 07733045

Especialidad del validador: MEDIO AMBIENTE Y DESARROLLO SOSTENIBLE

¹**Pertinencia:** El ítem corresponde al concepto teórico formulado.

²**Relevancia:** El ítem es apropiado para representar al componente o dimensión específica del constructo

³**Claridad:** Se entiende sin dificultad alguna el enunciado del ítem, es conciso, exacto y directo

Nota: Suficiencia, se dice suficiencia cuando los ítems planteados son suficientes para medir la dimensión



Firma del experto informante