

**UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN CRISTÓBAL
DE HUAMANGA**

FACULTAD DE CIENCIAS AGRARIAS

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AGRÍCOLA



TESIS:

**Evolución de la cobertura glaciar de los nevados de la cuenca del
río Cachi en el periodo 1990 - 2024**

Para optar el título profesional de:
INGENIERO AGRÍCOLA

PRESENTADO POR:

Bach. Rodrigo Fernando YUPANQUI VILLANUEVA

ASESOR:

Mtro. Ronald ROJAS NACCHA

AYACUCHO - PERÚ

2025

DEDICATORIA

Dedico esta investigación con todo mi corazón a mi querida madre, Asteria, quien ya no se encuentra entre nosotros, pero cuya memoria vive en mí a través de su amor incondicional y su dedicación incansable ante cualquier adversidad. También a mi padre, Máximo, y a todos mis seres queridos, quienes siempre me han acompañado y apoyado. A mis profesores, mi asesor y a todos quienes han formado parte de este camino. Gracias infinitas por su apoyo, amor y orientación, sin los cuales este logro no sería posible.

AGRADECIMIENTO

Quiero expresar mi más sincero agradecimiento a la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, mi alma mater, por ser la institución que me brindó la formación necesaria para convertirme en profesional en Ingeniería Agrícola. Gracias por ser el lugar donde pude aprender, crecer y prepararme para enfrentar los desafíos del mundo laboral.

A la Facultad de Ciencias Agrarias y a la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, les agradezco profundamente por darme la oportunidad de formar parte de esta gran comunidad académica. Fue en sus aulas donde adquirí los conocimientos y habilidades que hoy me permiten avanzar en mi carrera, y por ello siempre estaré agradecido.

A mi asesor de tesis, el Mtro. Ronald Rojas Naccha, le agradezco de todo corazón por su invaluable orientación y guía durante todo el proceso de realización de esta investigación. Su apoyo constante y su conocimiento fueron fundamentales para alcanzar este logro.

Agradezco sinceramente a los miembros del jurado, Mtro. Ing. Richard Alex Oscco Peceros, Dr. Juan Charapaqui Anccasi e Ing. Eduardo Pacori Quispe, por sus valiosas observaciones, sugerencias y aportes que contribuyeron a la mejora y fortalecimiento de este trabajo de investigación.

Finalmente, quiero agradecer a todos los docentes de la Escuela Profesional de Ingeniería Agrícola, quienes desempeñaron un papel fundamental en mi formación profesional y personal. Cada uno de ustedes, con su dedicación y pasión por la enseñanza, contribuyó de manera significativa a mi crecimiento, y por ello, les estoy eternamente agradecido.

INDICE GENERAL

1. CAPITULO I MARCO TEORICO.....	5
1.1. Antecedentes.....	5
1.2. Climático e Impacto en los Glaciares	6
1.3. El volumen de los nevados y su impacto ambiental.	7
1.4. Proceso de pérdida y retroceso glaciar a nivel nacional.	8
1.5. Impacto de la cuenca hidrográfica.....	9
1.6. Los glaciares ubicados en la cuenca del río Cachi	10
1.7. Cuencas en función a su cambio climático	11
1.8. Caracterización de la microcuenca del río Cachi	11
1.9. Sistema hidrológico de la cuenca del rio Cachi.....	13
1.10. Ecosistemas en los nevados de la cuenca cachi	14
1.10.1. Flora	14
1.10.2. Fauna	14
1.11. Dinámica del área glaciar	14
1.12. Clima	14
1.13. Precipitación	15
1.13.1. Formas de precipitación	15
1.13.2. Clasificación de la precipitación.....	16
1.13.3. Temperatura.....	18
1.14. Glaciar	18
1.15. Partes de un glaciar	18
1.15.1. Zona de acumulación.....	18
1.15.2. Zona de ablación	18
1.15.3. Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA).....	18
1.16. Tipos de glaciares.....	18
1.17. Glaciares en el Perú.....	19

1.18.	Volumen de los glaciares.....	20
1.19.	Línea de Equilibrio (ELA).....	21
1.20.	Área de Acumulación (AA).....	22
1.21.	Teledetección	23
1.21.1.	Sensores	23
1.21.2.	Resolución de sensores remotos	24
1.22.	Tipos de imagen satelital teledetección.....	27
1.22.1.	Imagen multiespectral	27
1.22.2.	Imagen pancromática	28
1.22.3.	Imagen estéreo	28
1.23.	Procesamiento de imágenes satelitales	29
1.23.1.	Corrección geométrica	29
1.23.2.	Corrección radiométrica	29
1.24.	Índice Normalizado de diferenciación de nieve.....	29
1.24.1.	Aplicación del NDSI en diferentes satélites:	30
1.25.	Satélites.....	30
1.25.1.	Landsat:	30
1.25.2.	Sentinel-2:.....	31
1.25.3.	El PerúSAT-1.....	31
1.25.4.	Spot -6	32
1.26.	Clasificación de Imágenes Satelitales	33
1.26.1.	Detección de Cambios.....	33
1.26.2.	Modelado Espacial	33
1.26.3.	Análisis Estadístico	34
1.27.	Programas	34
1.27.1.	Google earth engine	34
1.27.2.	ArcGIS.....	36

1.27.3.	R.....	36
2.	CAPITULO II MEDODOLOGIA	37
2.1.	Ubicación del lugar.....	37
2.2.	Procedimiento para el cálculo del volumen glaciar.....	37
2.2.1.	Selección de imágenes satélites satelitales.....	37
2.2.2.	Pasos para la selección de imágenes en el entorno de GEE.....	38
2.2.3.	Procesamiento de imágenes	42
2.2.4.	Análisis de resultado.....	44
2.2.5.	Procediendo final para determinar las áreas de nieve.....	45
2.2.6.	Validación de resultados.	45
2.2.7.	Exportación de resultado.....	46
2.2.8.	Procedimiento para la obtención del año 2024	47
2.3.	Procedimiento para el cálculo de línea de equilibrio.....	53
2.3.1.	Recopilación de datos climáticos	53
2.3.2.	Preparación de datos	53
2.3.3.	Cálculo del ELA	54
2.4.	Procedimiento para el cálculo de área de acumulación (AA).....	55
2.4.1.	Análisis de la evolución de las áreas de nevados	55
2.4.2.	Validación cruzada con los datos de glaciares en Perú	56
3.	CAPITULO III RESULTADO.....	57
3.1.	Volumen de glaciar en el año 1990.	57
3.1.1.	Imágenes seleccionadas en GEE	57
3.1.2.	Resultado de procesamiento de imagen satelital.....	59
3.1.3.	Resultado de la clasificación SVM.....	60
3.1.4.	Comparación de la clasificación por SVM y cálculo de NDSI.....	64
3.1.5.	Cálculo de área glaciar del año 1990 con la clasificación SVM.	65
3.1.6.	Volumen del glaciar.....	65

3.2.	Volumen de glaciar en el año 2000	66
3.2.1.	Selección de imágenes satelitales	66
3.2.2.	Resultado de procesamiento de imagen satelital	66
3.2.3.	Resultado mediante la clasificación SVM	66
3.2.4.	Comparación de la clasificación por SVM y cálculo de NDSI.....	70
3.2.5.	Cálculo de área glaciar con la clasificación SVM.....	70
3.2.6.	Volumen de glaciar en el año 2000	71
3.3.	Volumen del glaciar en el año 2010	71
3.3.1.	Selección de imágenes satelitales.....	71
3.3.2.	Cálculo de NDSI para el año 2010	72
3.3.3.	Cálculo del área glaciar del año 2010 con NDSI.....	72
3.3.4.	Volumen del glaciar año 2010.....	73
3.4.	Volumen de glaciar en el año 2024	73
3.4.1.	Selección de imágenes satelital	73
3.4.2.	Resultado mediante la clasificación SVM	74
3.4.3.	Cálculo del área glaciar del año 2024 con la clasificación SVM.....	78
3.4.4.	Volumen del glaciar.....	78
3.5.	Resultado general del volumen de glaciar año 1990-2024	79
3.5.2.	Correlación entre el resultado del volumen y los factores climáticos	80
3.6.	RESULTADO DEL CALCULO DE LINEA DE EQUILIBRIO	86
3.6.1.	Cálculo del ELA para cada año	86
3.6.2.	Análisis temporal del ELA.....	87
3.6.3.	Correlación entre el ELA y los parámetros climáticos	88
3.6.4.	Tendencias a lo largo del tiempo.....	88
3.7.	RESULTADO DEL CALCULO DE AREA DE ACUMULACION	90
3.7.1.	Procedimiento de cálculo	91
3.7.2.	Resultados por Año.....	91

3.7.3.	Validación cruzada del cálculo de área de nieve.....	92
3.7.4.	Validación con datos del campo.....	94
3.7.5.	Extensión de valores según la línea de tendencia.....	95
4.	CAPITULO IV CONCLUSION.....	97
5.	RECOMENDACIONES	99
6.	REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS	101
7.	ANEXOS	105

ÍNDICE DE FIGURA

Figura 1-1:	Pérdida de superficie glaciar en las montañas del Perú.....	5
Figura 1-2:	Comparación de la presencia de área glaciar año 2004 y 2019.	6
Figura 1-3:	Glaciares en el año 2024, glaciares Ritipata y Chicllarazo.	6
Figura 1-4:	Pérdida de glaciares en américa del sur en porcentajes	7
Figura 1-5:	Cordilleras con nevados en Perú	8
Figura 1-6:	Cuenca cachi ubicado en la región de Ayacucho	10
Figura 1-7:	Cuenca cachi y los nevados en la cabecera.....	11
Figura 1-8:	Mapa de pendientes cuenca cachi.....	13
Figura 1-9:	Red hidrográfica de la cuenca Cachi.	13
Figura 1-10	Precipitación convencional	16
Figura 1-11:	Precipitación orográfica.....	16
Figura 1-12:	Precipitación ciclónica.....	17
Figura 1-13:	Volumen de glaciar versus área para los 144 glaciares compilados.	20
Figura 1-14:	Balance de masas glaciar	22
Figura 1-15:	Glaciar en las montañas	23
Figura 1-16:	Fuente de radiación de un sensor activo	23
Figura 1-17:	Sensor activo de un satélite.....	24
Figura 1-18:	Resolución espacial (calidad de imagen según el tamaño de pixel).....	24
Figura 1-19:	Comparación de bandas ASTER Y LANDSAT ETM ⁺	25
Figura 1-20:	Comparación de bandas SENTINEL 2, LANDSAT 7 y 8	25

Figura 1-21: Comparación de los niveles de gris o valores digitales (nd) presentes en una imagen	26
Figura 1-22: Codificación de los ND de una imagen Landsat 8 bits.....	26
Figura 1-23: Formación de la Imagen multiespectral.....	28
Figura 1-24: Captura de imágenes de diferentes ángulos	28
Figura 1-25: Procedimiento de corrección geométrica en el caso de la subcuenca Santa Cruz	29
Figura 1-26: Entorno de R.	36
Figura 2-1: Mapa de ubicación de la cuenca cachi y las zonas con nevados.....	37
Figura 2-2: Ubicación de la zona glaciar de la cuenca cachi	38
Figura 2-3: GEE, Procedimiento para la importación de la geometría	39
Figura 2-4: Colección del satélite landsat5 reflectancia TOA de nivel 1 de la colección 2 ...	40
Figura 2-5: Imagen seleccionada de la colección Landsat5	41
Figura 2-6: Diagrama de procesamiento de imagen satélite en el entorno GEE.....	42
Figura 2-7: Resultado del NDSI en GEE.....	43
Figura 2-8: Resultado de la imagen de sombra.....	44
Figura 2-9: Resultado en índice de agua en GEE.....	45
Figura 2-10: Resultado de la exportación de imagen a Google drive	47
Figura 2-11: puntos en entrenamiento en la imagen satelital.....	49
Figura 2-12: Visualización de resultado	50
Figura 3-1: Imágenes en el mapa de la plataforma GEE en composición de color de falso color.	58
Figura 3-2: Imágenes en falso color (2, 3, 4, 5,6 y el promedio) en falso color.	58
Figura 3-3: Resultado del cálculo de NDSI para el año 1990 para la imagen elegida.	59
Figura 3-4: Puntos de entrenamiento en la imagen.	61
Figura 3-5: Bandas de la imagen satelital Landsat 5	61
Figura 3-6: Resultado de la clasificación supervisada por suport vector machine	64
Figura 3-7: Comparación del resultado del área de nieve.....	65
Figura 3-8: Datos estadísticos del área de glaciar año 1990	65
Figura 3-9: Diferencia de la clasificación por SVM y el cálculo de NDSI para el año 2000. 70	
Figura 3-10: Estadística del área de glaciar en el año 2000.....	71
Figura 3-11: Estadística del área de glaciar en el año 2000.....	72
Figura 3-12: Áreas de nieve en la cabecera de la cuenca año 2010.	73

Figura 3-13: Puntos de entrenamiento para la clasificación año 2024	74
Figura 3-14: Clasificación por el método SVM para el año 2024, en la imagen satelital spot6	78
Figura 3-15: Estadística del área Glaciar en el año 2024.....	78
Figura 3-16: Correlación de volumen calculado y la temperatura	80
Figura 3-17: Comportamiento de temperatura con respecto a los fenómenos naturales	82
Figura 3-18: Correlación entre área glaciar vs radiación neta térmica.....	83
Figura 3-19: Correlación de área glaciar y radiación neta solar	84
Figura 3-20: Correlación de área glaciar y flujo de calor latente.....	84
Figura 3-21: Correlación del área glaciar y flujo de calor sensible.....	85
Figura 3-22: Correlación de área glaciar y evaporación del suelo desnudo	85
Figura 3-23: Datos de SPI 3 para el análisis de sequías.	86
Figura 3-24: Grafica de los datos de ONI.....	86
Figura 3-25: Evolución de línea de equilibrio 1990-2024	87
Figura 3-26: Relación entre la ELA y la temperatura.....	88
Figura 3-27: Cambio de línea de equilibrio en el cerro apacheta.....	90
Figura 3-28: Perfil longitudinal del cerro con el respectivo capa de nieve	90
Figura 3-29 Área de acumulación del glaciar para diferentes años.....	92
Figura 3-30 Vista 3d del nevado en la cuenca alta de Cachi.....	92
Figura 3-31: Lugares con presencia de nevados en la región de Ayacucho.	93
Figura 3-32: Medición en campo de la altura de nieve.....	94
Figura 3-33: Grafica de las líneas de tendencia y la extrapolación	96

INDICE DE TABLA

Tabla 1.2: Tipologías más recurrentes para la clasificación de glaciares	18
Tabla 1.3: Tabla de valores de la constante C en la relación Volumen -área de los glaciares	20
Tabla 1.4: Resolución temporal de los diferentes satélites	27
Tabla 2.1: Características de las bandas del satélite landsat 5	41
Tabla 2.2: Diferencia entre índice de agua y nieve	45
Tabla 3.1: Imágenes filtrados para el año 1990.....	57
Tabla 3.2: Diferencia de trabajar con una imagen y promedio de imagen.	57
Tabla 3.3: Matriz de confusión de la clasificación SVM del año 1990	62

Tabla 3.4: Matriz de clase del SVM en la clasificación para imagen satelital landsat5	63
Tabla 3.5: Resultado de las imágenes filtradas para el año 2000 en GEE	66
Tabla 3.6: Cantidad de puntos de entrenamiento para cada clase (Año 2000)	67
Tabla 3.7: Resultado de matriz de confusión año (2000)	67
Tabla 3.8: Valores del resultado de clasificación SVM año 2000.....	69
Tabla 3.9: Imágenes satelitales para el año 2010 de Landsat 5.....	71
Tabla 3.10: Clases de puntos de entrenamiento en la imagen spot6 año 2024.	75
Tabla 3.11: Resultado de matriz de confusión de la clasificación por el método SVM año 2024	75
Tabla 3.12: Valores del resultado del modelo SVM en la clasificación (Año 2024)	76
Tabla 3.13: Volúmenes de glaciación para el año 2024.....	80
Tabla 3.14: Relación de la pérdida del área glaciación con otras investigaciones e inventarios..	94
Tabla 3.15: Puntos tomados en campo para la validación	94
Tabla 3.16: Altura de nieve en función al área y volumen calculado.....	95
Tabla 3.17: Resultado de área según las líneas de tendencia	96

LISTA DE ACRÓNIMOS

AA: Área de acumulación

ELAs: Estudio de la línea de balance

ELA: Línea de equilibrio

GEI: Gases de efecto invernadero

UGRH: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos

ANA: Autoridad Nacional del Agua

NDSI: Índice de Diferencia Normalizada de Nieve

CONIDA: Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial

ASTER: Radiómetro espacial avanzado de emisión y reflexión térmica

INRENA: Instituto Nacional de Recursos Naturales

BID: Banco Interamericano de Desarrollo

SVM: Support Vector Machine

INAIGEM: Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña

UGRH: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar los cambios en la cobertura glaciar de la cuenca del río Cachi de la cordillera del nevado Chonta y los cerros (Ritipata, Sayhuaccasa, Chicllarazo, Hatun Urqu y Choccoro) entre 1990 y 2024, y los factores climáticos que han influido en esos cambios. Este estudio es relevante debido a los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos y los ecosistemas de montaña, con un enfoque en el volumen de los nevados, la Línea de Equilibrio de Nieve (ELA) y el área de acumulación de nieve. El procedimiento metodológico incluyó el uso de imágenes satelitales de Landsat, Sentinel-2, SPOT-6 y PeruSAT-1, junto con herramientas como Google Earth Engine, R y ArcGIS para procesar y analizar los datos. El volumen glaciar fue estimado mediante una fórmula empírica debido a la falta de datos exactos sobre la altura de nieve. La Línea de Equilibrio se calculó utilizando un Modelo Digital de Terreno (MDT), aunque con limitaciones en la precisión debido a la dispersión de las áreas glaciares. Para el cálculo del área de acumulación, se utilizaron imágenes satelitales de baja y alta resolución para los diferentes años. Los resultados muestran una pérdida de más del 99% del volumen glaciar, una ascensión de 199.86 metros en el ELA, y una reducción del área de acumulación en más del 97%. Estos cambios se deben al incremento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, confirmando el impacto del calentamiento global. Se recomienda el uso de imágenes satelitales de alta resolución y tecnologías avanzadas como LiDAR y drones para obtener mediciones más precisas y mejorar el monitoreo continuo de los glaciares, lo que permitirá prever los efectos del cambio climático y gestionar los recursos hídricos de forma más eficiente.

Palabra clave: Cambio climático, cobertura glaciar e imágenes satelitales.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático global ha generado una mayor variabilidad en las temperaturas y las precipitaciones. Mientras las temperaturas han mostrado un aumento claro, los patrones de precipitación no siguen tendencias definidas. Este fenómeno tiene un impacto directo en la disponibilidad y gestión del agua, afectando tanto las prácticas agrícolas como los ecosistemas. La incertidumbre en los patrones de precipitación, junto con el incremento de temperaturas extremas, presenta grandes desafíos de adaptación a nivel local (Puertas O. y otros, 2011). Por ello, comprender estos procesos climáticos es esencial para desarrollar estrategias de manejo y adaptación ante los retos del cambio climático.

En Perú, la cobertura de hielo en los glaciares disminuye a un ritmo alarmante del 1% anual. Mientras que las grandes cordilleras de alta altitud retroceden más lentamente, los glaciares de menor altitud se están derritiendo más rápido. Por ejemplo, la Cordillera La Viuda en la Sierra de Lima ha perdido el 88% de su superficie en las últimas seis décadas (INAIGEM, s.f.). Este retroceso glaciar afecta no solo la disponibilidad de agua dulce, sino que también reduce la capacidad de amortiguación durante las sequías, lo que afecta gravemente la seguridad alimentaria, la calidad del agua, y el potencial turístico de la región (Tejada & Bernex, 2010). El retroceso de los glaciares tiene implicaciones directas en los ecosistemas socioecológicos de la región, alterando la temperatura local, la cobertura vegetal, el ciclo hidrológico y las poblaciones que dependen de estos frágiles ecosistemas. Dada su importancia, es esencial comprender y gestionar este fenómeno para garantizar el futuro sostenible de las regiones andinas.

La presente investigación se enfoca en analizar cómo se comporta el área glaciar en la cuenca del río Cachi perteneciente a la cordillera del nevado Chonca en los cerros (Ritipata, Sayhuaccasa, Chicllarazo, Hatun Urqu y Choccoro) durante el periodo 1990 a 2024. Este estudio busca identificar el impacto del cambio climático en el retroceso glaciar y cómo estos cambios afectan los recursos hídricos y las actividades dependientes del agua.

Descripción del problema y justificación

En las últimas décadas, los glaciares de la cuenca del río Cachi han experimentado un significativo retroceso, asociado principalmente con las variaciones de temperatura y las precipitaciones. Entre 1990 y 2024, la superficie glaciar ha disminuido, lo que plantea interrogantes sobre el impacto de estos cambios en el volumen de los nevados, el Área de Acumulación (AA) y la Línea de Equilibrio (ELA). Este retroceso glaciar afecta gravemente la

región, dado que los glaciares funcionan como depósitos naturales de agua dulce, esenciales para la modulación del flujo de ríos y la preservación de ecosistemas locales.

La reducción del volumen glaciar y el ascenso de la ELA podrían generar impactos negativos en el abastecimiento hídrico, las actividades agrícolas, la producción acuícola y la biodiversidad. Estudiar la dinámica glaciar en la cuenca del río Cachi es crucial para comprender cómo el cambio climático está afectando estos glaciares. Determinar el volumen glaciar, la ELA y el AA permitirá evaluar el estado actual de los glaciares y proyectar los cambios futuros en la región.

Los resultados de esta investigación proporcionarán datos clave para el desarrollo de estrategias de adaptación y mitigación frente a las variaciones del clima. La información sobre el volumen glaciar y la ELA permitirá diseñar políticas de manejo del agua, garantizando el suministro continuo para las comunidades y los sectores dependientes del agua. Además, esta investigación contribuirá al avance científico en el modelamiento de glaciares, fomentando el progreso tecnológico en el estudio de las cuencas similares.

El impacto de este estudio será significativo para la gestión de los recursos naturales, mejorando la gestión del agua para riego, potenciando la resiliencia frente al cambio climático y ayudando a preservar los ecosistemas dependientes del caudal glaciar. Los beneficios sociales incluyen una gestión hídrica mejorada para las comunidades cercanas que dependen del agua glaciar para riego y consumo.

Formulación del problema

1. Problema general

¿Cómo ha evolucionado la cobertura glaciar de los nevados en la cuenca del río Cachi entre 1990 y 2024, y cuáles son los factores climáticos que han influido en estos cambios?

2. Problemas específicos

- ¿Cuánto ha variado el volumen de los nevados en la cuenca del río Cachi durante el periodo de 1990 - 2024?
- ¿Cómo ha cambiado la Línea de Equilibrio (ELA) de los nevados en función de diferentes parámetros climáticos durante el periodo de 1990 - 2024?
- ¿Existen cambios en el Área de Acumulación (AA) de los nevados desde 1990 hasta 2024?

Formulación de los objetivos

1. Objetivo general

Analizar la dinámica del área glaciar de los nevados en la cuenca del río Cachi entre 1990 y 2024 y los factores climáticos que han influido en estos cambios.

2. Objetivos específicos

- Determinar el volumen de los nevados de la cuenca del río Cachi desde 1990 hasta 2024.
- Calcular y analizar los cambios en la Línea de Equilibrio (ELA) de los nevados en función de diferentes parámetros climáticos entre 1990 y 2024.
- Cuantificar y evaluar el Área de Acumulación (AA) de los nevados desde 1990 hasta 2024.

Hipótesis

1. Hipótesis general

Los cambios en la cobertura glaciar en la cuenca del río Cachi entre 1990 y 2024 son significativos, debido a la influencia de diversos factores climáticos.

2. Hipótesis específicas

- El volumen de los nevados de la cuenca del río Cachi ha experimentado una reducción de al menos un 30% entre 1990 y 2024, correlacionándose negativamente con el aumento del promedio de temperatura anual.
- La Línea de Equilibrio (ELA) en los nevados ha ascendido en altitud a una tasa promedio de 10 metros por año durante el periodo 1990-2024, mostrando una correlación positiva con el incremento del promedio de temperatura anual y una correlación negativa con la precipitación media anual.
- El área de acumulación (AA) de los nevados de la cuenca del río Cachi ha disminuido en un 25% o más desde 1990 hasta 2024, con una tasa de reducción más acelerada en los últimos 10 años debido a la intensificación de factores climáticos adversos.

CAPITULO I

MARCO TEORICO

1.1. Antecedentes

Según la publicación del Colegio de Ingenieros del Perú (s.f.), las cadenas montañosas Volcánica, Chila, La Raya, Huanzo y Chonta son las más vulnerables al retroceso glaciar. Sus capas de hielo no superan los 6 kilómetros y su extinción es inminente.

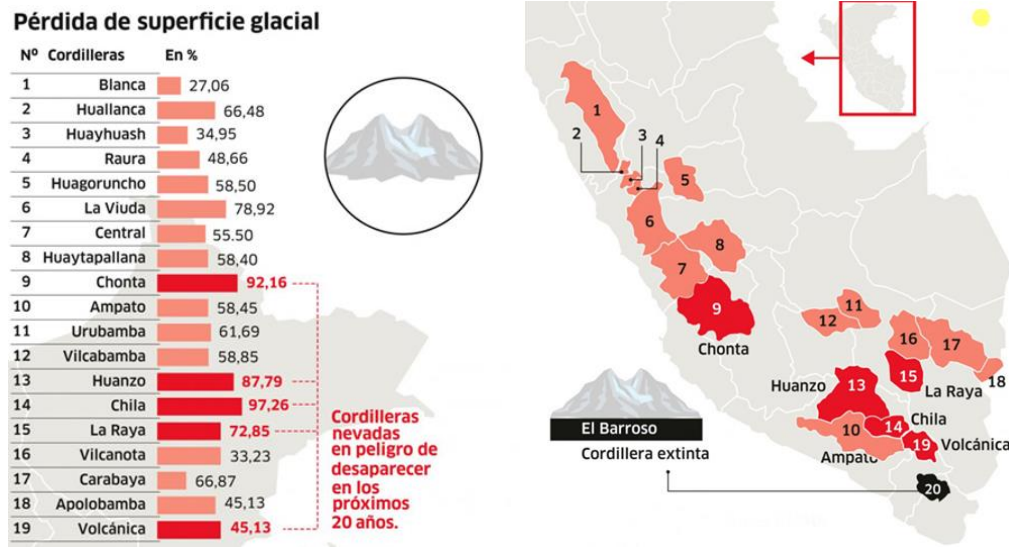


Figura 1-1: Pérdida de superficie glaciar en las montañas del Perú

Fuente: Extraído de la publicación de colegio de ingenieros (<https://www.cip.org.pe/perdida-de-glaciares-por-cambio-climatico-en-peru/#:~:text=Es%20pues%20el%20Barroso%20la,registros%20hist%C3%B3ricos%20de%20este%20glaciar>).

Los glaciares tropicales están experimentando un retroceso acelerado debido al cambio climático. En este estudio, se observa que el tamaño de los glaciares ha disminuido significativamente en comparación con sus dimensiones iniciales (1955/1962). En orden de mayor a menor pérdida de superficie glaciar, los glaciares afectados son: Ampato con una reducción de 103,7 km² (70,7%), Huanzo con 35,97 km² (93,8%), Chonta con 17,62 km² (98,7%) y Chila con 34,46 km² (99,8%) (Taksi Palacios, 2023).

Según la Autoridad Nacional del Agua (2025), en un foro reciente, Menciona que la cordillera del Huaytapallana ha perdido el 71.7% de su superficie glaciar en los últimos 58 años, con un promedio anual de desaparición de 0.8 km². Este fenómeno ha sido acelerado por el cambio climático, lo que ha causado la desaparición de 1,514 glaciares en la última década en el Perú. Además, se alertó que, si no se implementan medidas urgentes, otros departamentos como Huancavelica y Apurímac podrían enfrentar una situación similar, afectando gravemente sectores como la agricultura, la ganadería, el turismo y la disponibilidad de agua.

En la presentación de Huñuq Mayu (2020), se menciona que para el año 2019 se registró una pérdida de área en el glaciar de Ritipata debido al cambio climático y otros factores que afectan la superficie glaciar de la región.



Figura 1-2: Comparación de la presencia de área glaciar año 2004 y 2019.

Fuente: extraído de la presentación de Huñuq Mayu (2020)

En décadas pasadas, los glaciares que cubrían los nevados como Ritipata, Sayhuaccasa, Chicllarazo y Hatun Urqu se mantenían presentes durante todo el año. Durante los años de 1990, estos glaciares presentaban una cobertura permanente de nieve y hielo, lo cual aseguraba una fuente constante de agua proveniente del deshielo para las comunidades y ecosistemas cercanos.



Figura 1-3: Glaciares en el año 2024, glaciares Ritipata y Chicllarazo.

1.2. Climático e Impacto en los Glaciares

El cambio climático, causado principalmente por el ser humano al contribuir en la producción de GEI (Gases de Efecto Invernadero) y la deforestación, altera significativamente algunos patrones climáticos globales. Sus efectos en los glaciares son particularmente notables, provocando un aumento de las temperaturas y un derretimiento acelerado del hielo.

En los Andes peruanos, este fenómeno ha resultado en un retroceso pronunciado de los glaciares. Esta regresión tiene consecuencias de gran alcance, afectando no solo los ecosistemas de alta montaña, sino también las comunidades locales que dependen de estos glaciares.

El impacto se extiende hacia la accesibilidad al agua, actividades como agricultura, la generación de piscigranjas y la biodiversidad local. Además, las comunidades andinas enfrentan desafíos significativos en sus prácticas tradicionales y sistemas culturales vinculados a estos entornos glaciares.

En resumen, el cambio climático está transformando rápidamente los glaciares andinos peruanos, generando una serie de efectos ecológicos, socioeconómicos y culturales que plantean importantes retos para la adaptación y la sostenibilidad de estas regiones (Monge, et al, 2022).

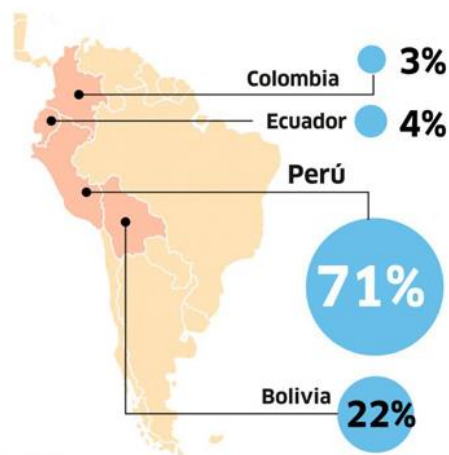


Figura 1-4: Pérdida de glaciares en América del Sur en porcentajes

Fuente: Extraído de (peru, s.f.), página web <https://www.cip.org.pe/perdida-de-glaciares-por-cambio-climatico-en-peru/>

1.3. El volumen de los nevados y su impacto ambiental.

Perú cuenta entre 18 y 20 cordilleras (si se toman en cuenta las volcánicas) que exhiben nevados de un rango de entre 18 y 20 metros. Diversas dimensiones. Estos tropicales nevados son impactados por las variaciones que suceden en el tiempo. Este es el resultado del Calentamiento Global y del Cambio Climático. Los nevados son una señal de la estación de lluvia.

El incremento constante de la temperatura (cerca de 0,76 °C en las últimas 100 años) de acuerdo con los especialistas), dado que son impactados con rapidez por las variaciones de temperatura (Peirano, s. f.).

1.4. Proceso de pérdida y retroceso glaciar a nivel nacional.

Las pérdidas y retrocesos glaciares en Perú pueden impactar de forma adversa en los recursos de agua. De acuerdo con el Ministerio del Ambiente, el porcentaje de 71 de los glaciares tropicales globales se encuentran en Perú. Por esta razón, se recurre a la cartografía nacional, la cual nos facilita determinar las áreas en Perú con nevados en la cordillera y, a su vez, que los recursos hídricos sean afectados negativamente, representan un retroceso glaciar, en nuestro país tenemos entre 18 y 20 cordilleras con nevados de grandes extensiones, el cambio climático y el calentamiento global producen que los nevados sean afectados como consecuencia se van derritiendo debido a que la temperatura va aumentando, perdiéndose extensiones de nevados en las cordilleras peruanas, desprendiéndose grandes bloques de hielo, esto tiene un impacto directo en las comunidades que residen cerca de los glaciares.

Nombre de la cordillera	Longitud (km)	Extensión (km ²)
Cordillera Blanca	200	723.40
Cordillera de Vilcanota	120	539
Cordillera Central	100	176.30
Cordillera de Vilcabamba	85	173
Cordillera de Huanzo	57	158
Cordillera Ampato	140	105
Cordillera Apolobamba	35	102
Cordillera de Carabaya	75	100
Cordillera Huayhuash	26	88.11
Cordillera La Raya	60	88
Cordillera Raura	20	57.03
Cordillera de Chilla	80	52
Cordillera Huagaruncho	10	48
Cordillera de Chonta	50	42
Cordillera Huaytapallana	17	35
Cordillera La Viuda	130	28.50
Cordillera Urubamba	30	23
Cordillera Huallanca	19	22.41
Cordillera del Barroso	110	20
Cordillera Volcánica	50	15

Figura 1-5: Cordilleras con nevados en Perú

Fuente: Extraído de (CEPLAN, 2023)

Dentro de los estudios realizados por el CEPLAN, concluyen que los glaciares se van derritiendo, teniendo consecuencias negativas durante las épocas de sequía donde la lluvia carece y la temperatura se incrementa, afectando a la producción de la agricultura, la capacidad de poder suministrar agua potable a la población, la energía, el Ministerio del Ambiente menciona que el 50% de los glaciares que posee el país se han perdido teniendo consecuencias

negativas como generando pérdidas económicas que pueden alcanzar hasta los 200 millones de dólares.

Para lo cual se concluye la necesidad de gestionar los recursos hídricos que se pueden obtener del derretimiento de los glaciares y de esta manera poder crear una fuente de agua dulce que sean utilizados por las poblaciones cercanas en diversas actividades, así como el consumo humano, así evitando que retorne al océano (CEPLAN, 2023).

1.5. Impacto de la cuenca hidrográfica

Desde una perspectiva hidrológica, Una cuenca hidrográfica se define como una región natural delimitada por una línea divisoria de tipo topográfico, conocida como Divortium Aquarum. Esta cuenca recoge las precipitaciones y dirige el agua de escorrentía hacia un cauce principal, que generalmente es un río (Vásquez, 2023).

En la cuenca Katari y Lago Menor del Titicaca en Bolivia debido a su gran densidad poblacional somete a estos ecosistemas a varias presiones como la erosión de las áreas de recarga, contaminación de manantiales, secado de lagunas y reducción de las poblaciones de aves acuáticas, peses nativos, y anfibios, afectando de manera negativa a la totora que es una planta acuática importante que mantiene la calidad del agua de la cuenca del Titicaca. Para la recuperación y conservación de las aguas se elaboró plan que director con el apoyo del Fondo que contiene un diagnóstico detallado sobre la región enfocándose en la creación e implementación de un marco estratégico, programático, operativo que permitan alcanzar el objetivo. En base al plan y mediante un préstamo de BID, el Ministerio de Medio Ambiente y Agua de Bolivia implemento el programa de inversión destinado a la recuperación y mejorar el saneamiento de la cuenca. (Demuestran que es posible recuperar nevados en Ayacucho – Inforegión, 2011).

El Proyecto Glaciares Perú, que tiene seis meses investigando sobre la restauración de los glaciares peruanos, ha demostrado ser una óptima respuesta a los cambios climáticos, tal como lo demuestran los resultados que se han obtenido en el pico Chalón Sombrero ubicado en la comunidad de Licapa, Ayacucho. El investigador principal Eduardo Gold, afirmó que la capa Blanca aplicada en el pico de Chalón Sombrero han mantenido su espesor de cinco centímetros a pesar de que en la zona no ha presencia de nevados, así mismo destacando la viabilidad del proyecto, la disposición de los pobladores para poder recuperar los glaciares que durante los últimos 15 años no se han podido divisar.

Finalmente, tras la participación no solo de los pobladores sino también de los funcionarios municipales, acordaron complementar el estudio requerido por el Banco Mundial lo que

permitirá facilitar que desembolse más de 200 mil dólares para finalizar los informes faltantes (Demuestran que es posible recuperar nevados en Ayacucho – Info región, 2011).

1.6. Los glaciares ubicados en la cuenca del río Cachi

La cuenca en el río Cachi, situada en la vertiente atlántica o amazónica del Perú, abarca una extensión de 360,985.5 hectáreas según datos del INRENA. Esta cuenca se caracteriza por la unión del río Cachi con el río Urubamba, ubicado en la provincia de Angaraes, y fluye desde el oeste hacia el este.

La cuenca se subdivide en 11 microcuencas, organizadas de la siguiente manera:

- En la parte inferior se encuentra la microcuenca "Huanta", que se extiende hasta que confluyen los cauces de Cachi y Pongora.
- Siguiendo su curso, el río Cachi hacia el suroeste, desde la parte inferior hasta la superior, se encuentran seis microcuencas: Huamanga, Chillico, Paccha, Vinchos, Chicllarazu y Apacheta.
- En el sureste de la cuenca se ubican las microcuencas de Pongora, Alameda, Huatatas y Yucaes.

Esta estructura hidrográfica resalta la complejidad y diversidad del sistema fluvial en esta parte de Ayacucho, esto tiene implicaciones significativas para la gestión del agua, ecología local y las actividades humanas en la zona (INRENA & PNUD, 1994).

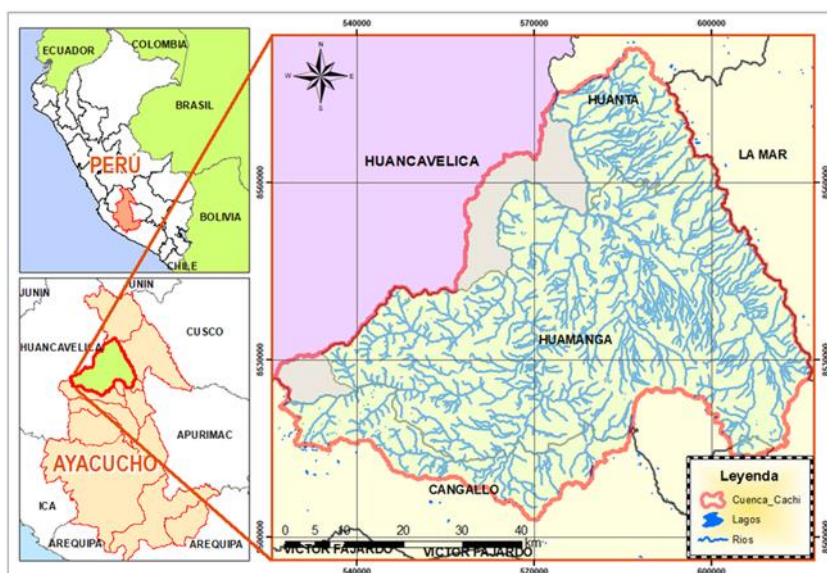


Figura 1-6: Cuenca cachi ubicado en la región de Ayacucho

Fuente: Extraído de Moncada, y otros, 2020. Microcuencas

1.7. Cuencas en función a su cambio climático

En el Perú a nivel mundial posee 71% de los glaciares tropicales que representa 13 millones 500 mil km²; sin embargo, debido al calentamiento global se podrían perder entre el 78% y 90% de su volumen, para evitar que esto suceda, es imprescindible llevar a cabo proyectos, investigaciones que ayuden a la conservación y recuperación de los glaciares perdidos, en la cuenca Cachi de los 36,90 km² de glaciares tropicales que existían actualmente solo quedan 3,7km² teniendo como consecuencia que la población rural andina se vea afectada, y también la fauna silvestre, Ayacucho contaba con 25 cabeceras de cuenca que representaba 34,667 km² de glaciares tropicales de los cuales se han perdido el 80% que son m27,734 debido a los cambios climáticos y el calentamiento global (cepes .org, s. f.).

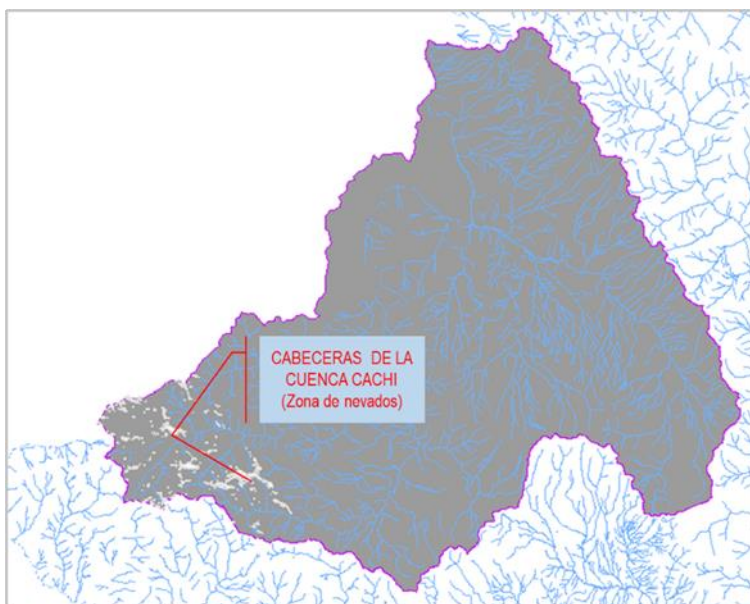


Figura 1-7: Cuenca cachi y los nevados en la cabecera

1.8. Caracterización de la microcuenca del río Cachi

El Valle Intermontano (VImfi): son formaciones que se realizan en el fondo del valle interactuando con las partes bajas de las laderas montañosas, son de origen coluvio aluvial, con relieves que varían de ondulados a inclinados, presentado presentando pendientes de moderadas a fuertemente inclinadas (4-15%). En el área de estudio, su presencia es limitada y se observa solo en las márgenes del río Huanta.

La Cima de Montaña con Alta Inclinación (CMaC): Se ubica en la margen izquierda del río Huanta, en la región central del área de estudio. Esta unidad se caracteriza por un relieve ondulado en la cima de la montaña, con una pendiente pronunciada, que varía entre 8 y 15%.

Las geoformas en esta zona sufren procesos leves de erosión laminar y presentan una incisión apenas perceptible.

La Cima de Montaña con Inclinación Moderada (CMaD): Se encuentra en la margen derecha del río Huanta, al sur del área de estudio. Esta unidad exhibe un relieve ondulado en la cima de la montaña y una topografía moderadamente empinada, con pendientes que oscilan entre 15 y 25%. Los procesos de erosión en esta zona son leves, y la incisión es generalmente poco marcada.

La Ladera de Montaña con Inclinación Moderada (LMaD): Se distribuye de manera irregular en el oeste del área de estudio. Estas laderas montañosas presentan una topografía moderadamente empinada, con pendientes entre 15 y 25%. Debido a su inclinación, estas áreas presentan un riesgo bajo de erosión hídrica y escorrentía superficial. Los afloramientos rocosos son escasos en estas geoformas.

La Ladera de Montaña con Alta Inclinación (LMaE): Es común en el área de estudio, especialmente en las zonas sur y norte. Estas laderas presentan una topografía compleja, con pendientes que varían de moderadamente empinadas a muy abruptas, alcanzando entre 25 y 50%. Los frecuentes afloramientos rocosos aumentan el riesgo de erosión hídrica y la escorrentía superficial. Estas laderas se extienden a ambos lados del río Huanta, el principal sistema de drenaje del área.

La Ladera de Montaña con Inclinación Muy Alta (LMaF): Se caracteriza por una topografía escarpada y compleja, con pendientes extremadamente empinadas, que van del 50% al 75%. Los afloramientos rocosos son comunes en estas áreas, lo que aumenta significativamente la erosión hídrica y la escorrentía superficial.

La Ladera de Montaña Extremadamente Empinada (LMaG): es poco frecuente en el área de estudio, encontrándose principalmente en la margen derecha del río Huanta. Estas laderas montañosas presentan una topografía escarpada y abrupta, con afloramientos rocosos intrincados. Las pendientes superan el 75%, lo que incrementa considerablemente la erosión hídrica y la escorrentía superficial (Oré Huamán, 2016).

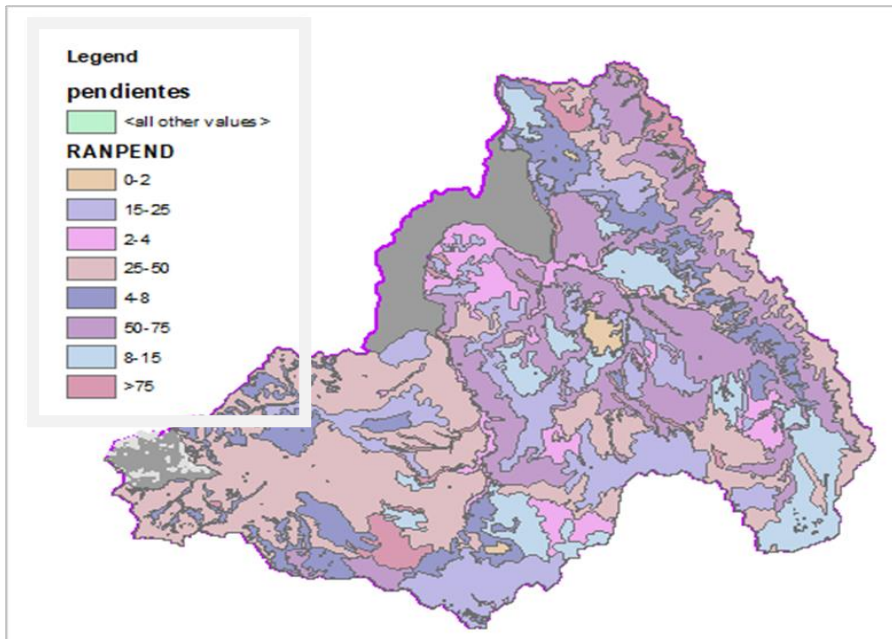


Figura 1-8: Mapa de pendientes cuenca cachi

1.9. Sistema hidrológico de la cuenca del río Cachi

La red hidrográfica de la cuenca cachi Consiste en una red de ríos y arroyos que fluyen desde las altas montañas y nevados pasando por valles interandinos y eventualmente desembocando en cuencas más grandes, como el río Apurímac, que es un afluente del río Urubamba y parte de la cuenca del Amazonas.

Los nevados existentes en la parte altoandina de la cuenca cachi alimentan a los ríos principales como, Apacheta, Choccoro, Chicllarazo intersectando en su recorrido con el río Vinchos, Compañía, Cachimayo y así sucesivamente hasta desembocar en el río Mantaro.

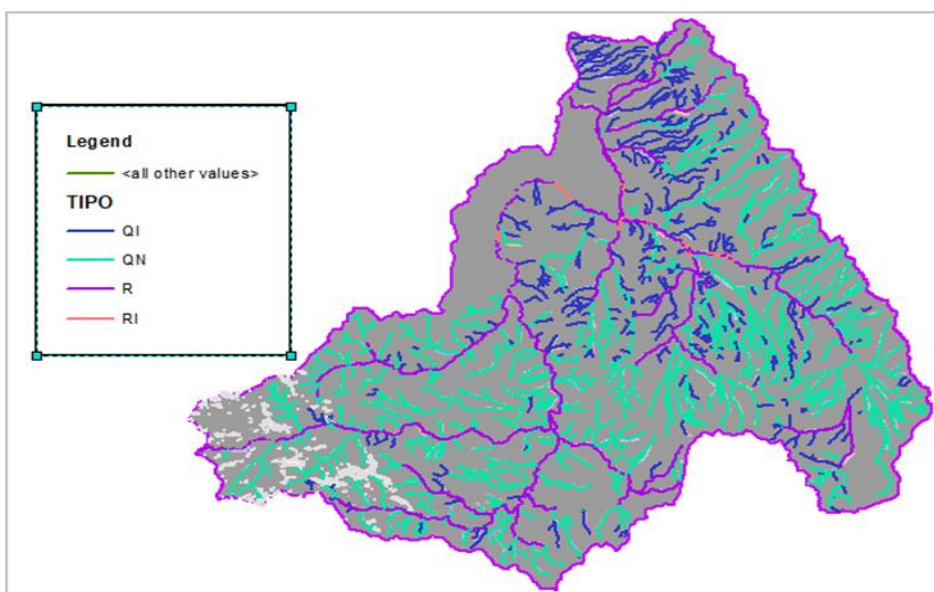


Figura 1-9: Red hidrográfica de la cuenca Cachi.

1.10.Ecosistemas en los nevados de la cuenca cachi

El ecosistema en la zona de nevado es limitado como por ejemplo se tiene.

1.10.1.Flora

Musgos, Helechos, taya, Cuncuma, pacopaco, conoca, puya, sutuma, tuyca, putqui.

1.10.2.Fauna

Zorros, viscacha, vicuña, araranca, pucopuco, culi culi, quivio, lombriz.

1.11. Dinámica del área glaciar

El área glaciar se define como la superficie cubierta por hielo y nieve permanente. Su medición es fundamental para evaluar el estado y la evolución de los glaciares. La dinámica de esta área está influenciada por diversos factores, principalmente:

- Temperatura
- Precipitación
- Características geomorfológicas de la región

Para monitorear el área glaciar, se emplean varios métodos:

- Observaciones satelitales
- Estudios de campo
- Análisis de imágenes aéreas

Estas técnicas permiten detectar y cuantificar los cambios en la extensión de los glaciares a lo largo del tiempo, proporcionando datos relevantes para comprender los impactos sobre los cambios en el clima y diferentes componentes ambientales en estos importantes ecosistemas (Cuellar y Quispe, 2024).

1.12.Clima

El clima de la cuenca del río Cachi, caracterizado por un clima templado con veranos cálidos e inviernos secos, influye directamente en las precipitaciones y el comportamiento hidrológico de la región. La humedad atmosférica tiene un promedio anual de 64.24%, con variaciones significativas a lo largo del año. La humedad relativa alcanza su mínimo en julio (4.5%) y su máximo en febrero (76.43%), lo que refleja las variaciones en la temperatura y la presión atmosférica, los cuales tienen un impacto importante en las precipitaciones que alimentan los ríos de la cuenca.

En cuanto a las precipitaciones, el promedio anual registrado es de 811 mm, con una marcada estacionalidad. Los meses con presencia de lluvias es de enero a marzo, alcanzando hasta 137.21 mm en febrero, lo que provoca un aumento significativo en los caudales de los ríos. Sin

embargo, a partir de abril, la precipitación disminuye considerablemente, con los meses más secos entre mayo hasta septiembre. Esta distribución estacional de las lluvias es crucial para la planificación del uso del agua, ya que determina la disponibilidad de caudal para el riego y otras necesidades del proyecto.

Además de la variabilidad estacional, es importante destacar las diferencias en las precipitaciones entre las zonas altas y bajas de la cuenca. Las zonas altas reciben más precipitaciones debido a su mayor altitud, mientras que las zonas bajas experimentan menores precipitaciones, lo que genera una disparidad en la disponibilidad de agua. El manejo adecuado de estas diferencias es esencial para el éxito del proyecto, ya que se deben considerar tanto las fuentes de agua permanentes, como los tributarios de caudal perenne, como las intermitentes, dependientes de las lluvias estacionales.

En conclusión, las precipitaciones juegan un papel determinante en el desarrollo del Proyecto Especial Río Cachi, ya que influyen en la disponibilidad de agua para riego y otros usos. La infraestructura hidráulica debe ser diseñada para adaptarse a los patrones estacionales y asegurar un suministro constante de agua durante todo el año, incluso en los períodos secos. El análisis de las precipitaciones y su variabilidad es clave para garantizar que el proyecto cumpla sus objetivos de mejorar la producción agropecuaria, generar energía y satisfacer las necesidades de agua potable de la población (Proyecto Especial Río Cachi, s. f.).

1.13.Precipitación

Es toda forma de humedad que originándose en la nube llega hasta la superficie del suelo de las formas como lluvias, granizadas, garuas y nevados (Villón Béjar, 2002).

1.13.1.Formas de precipitación

Según Villón (2002), las formas de precipitación son:

- Llovizna: Son pequeñas gotas de agua con un diámetro que oscila entre 0.1 y 0.5 mm, que caen a velocidades muy lentas.
- Lluvia: Consiste en gotas de agua cuyo diámetro supera los 0.5 mm.
- Escarcha: Se forma como una capa de hielo, generalmente transparente y suave al tacto.
- Nieve: Compuesta principalmente por cristales de hielo blanco translúcido, que suelen tener una forma compleja.
- Granizo: Se trata de precipitaciones de hielo en forma de bolas o estructuras irregulares, originadas por nubes convectivas. El diámetro de estos fragmentos varía entre 5 y 125 mm.

1.13.2. Clasificación de la precipitación

Según Villón (2002), La precipitación se clasifica en:

1.13.2.1. Precipitación de convección

En los tiempos calurosos por la abundancia evaporación de la superficie se elevan sufriendo un enfriamiento.

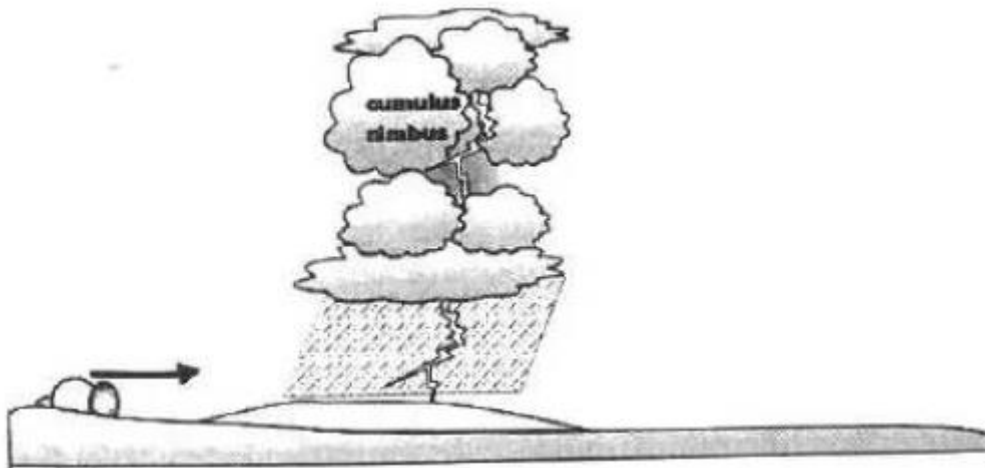


Figura 1-10 Precipitación convencional

Fuente: extraído del libro autor (Villón Béjar, 2002), pagina 71.

1.13.2.2. Precipitación orográfica

Ocurre cuando el vapor de agua, originado sobre la superficie acuática, es transportado por el viento hacia las montañas, donde asciende a altitudes elevadas.

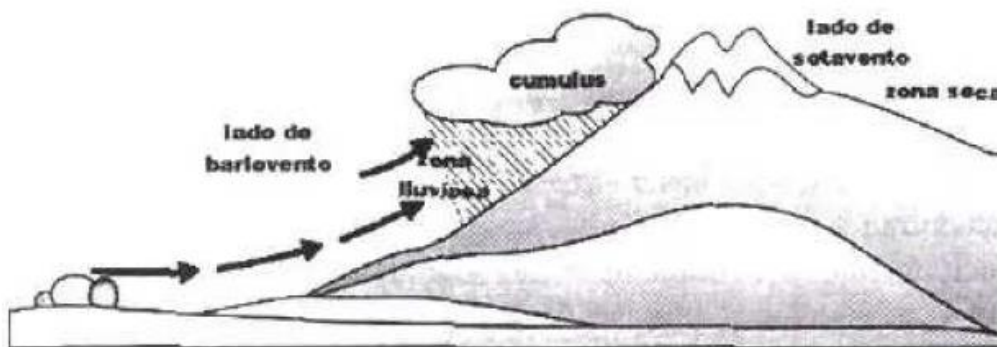


Figura 1-11: Precipitación orográfica

Fuente: Extraído de libro (Villón Béjar, 2002) página 72.

1.13.2.3. Precipitación ciclónica

Ocurre cuando dos masas de aire con diferentes temperaturas y humedades se encuentran. Las nubes calientes son empujadas hacia las partes más altas de la atmósfera, donde se produce la

condensación y la lluvia. Este fenómeno está asociado con el paso de ciclones o zonas de baja presión.

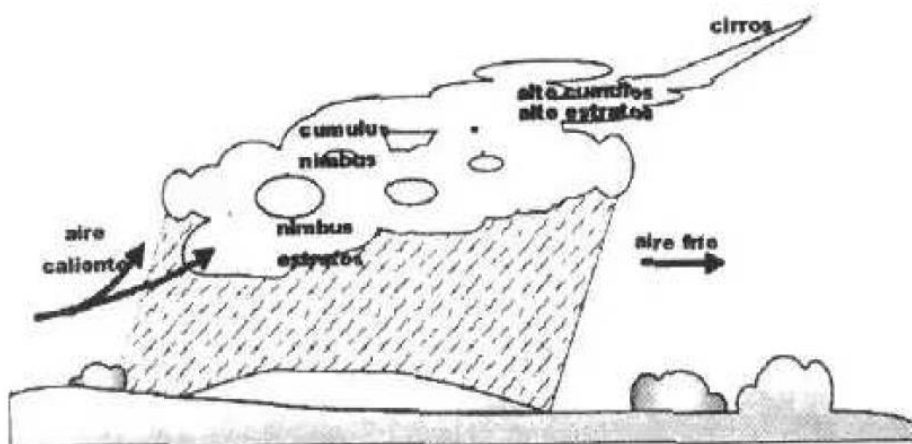


Figura 1-12: Precipitación ciclónica

Fuente: extraído del libro (Villón Béjar, 2002) , página 73.

Durante 1991 a 2008, en la cuenca del río Cachi, debido a la naturaleza de su evolución, su enfoque es cuantitativo descriptivo, no experimental, longitudinal, basado en una serie cronológica de 3016 registros de las precipitaciones mensuales en 22 estaciones hidrometeorológicas gestionadas por el Gobierno Regional de Ayacucho. Los datos se estructuraron en Excel y se procesaron en SPSS. Después se llevó a cabo el análisis de varianza, utilizando la estadística descriptiva y las múltiples comparaciones de Duncan. Se notó que al menos uno de los promedios de la precipitación mensual difiere de los demás. Los hallazgos indicaron que, entre 1991 y 1999, la media de precipitación mensual en la cuenca mostró mínimas variaciones cíclicas que indican una transición de un nivel bastante bajo a uno levemente elevado, excepto en el año 1993 (Descriptores de la precipitación de la cuenca del río cachi de Ayacucho | Revista Científica Ciencias Ingenieriles, s. f.).

El incremento de caudal en el río Cachi, gracias a las contribuciones de los ríos Pongora y Chillico que se unen en Chillico esta región, a causa de las lluvias excepcionales, generó una intensa intensidad.

La erosión se produce en ambas riberas del río Cachi que expandió el cauce hasta alcanzar el límite de 300 m de anchura, dejando el espacio para el ancho de 300 puentes de luz para vehículos de 65 metros de longitud en el medio del cauce, de la misma manera los demás cauces, de igual manera los demás cauces espigones dispuestos en la margen de la costa izquierda para salvaguardar territorios de agricultura y residencias de la población de Llamoctachi no

resultaron efectivos. Par  regular el progreso del río con el fin de regular el desarrollo del mismo caliente.

Esta  rea crítica es común con otras zonas críticas, la región Huancavelica debido al río Huancavelica, Cachi representa la frontera entre ambas áreas (Informe Técnico Geología Ambiental - Zonas críticas por peligros geológicos en la Región Ayacucho, 2024).

1.13.3. Temperatura

Según (Clima.com), la cuenca Cachi predomina el clima frio en las zonas alto andinas. Según datos disponibles, la temperatura media anual en la zona es de 10 C, con una temperatura máxima media de 17 C y una mínima media de 4 C. Se registran aproximadamente 17 días de lluvia al año, acumulando alrededor de 81 mm de precipitación, y vientos con una velocidad media de 8 km/h.

1.14. Glaciar

Los glaciares son masas de hielo compactas que se mueven lentamente bajo la influencia de la gravedad. Representan alrededor del 10% de la superficie terrestre y acumulan alrededor del 75% del agua dulce mundial (Johansen Synnove, y otros, 2018).

1.15. Partes de un glaciar

Las partes de glaciar según (INAIGEM, 2017).

1.15.1. Zona de acumulación

Volumen de nieve y hielo acumulado durante un año hidrológico. Ofrece datos sobre la cantidad de precipitaciones sólidas retenidas por el glaciar a lo largo de dicho período.

1.15.2. Zona de ablación

Es una zona del glaciar donde los procesos de fusión, evaporación, sublimación y separación de bloques de hielo son predominantes.

1.15.3. Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA)

Es la línea que divide las áreas de acumulación y ablación en un glaciar.

1.16. Tipos de glaciares

Existen distintas tipologías para identificar las diferentes masas de hielo en el mundo.

Tabla 1.1: Tipologías más recurrentes para la clasificación de glaciares

Parámetro de clasificación	Tipo	Descripción
Morfología	Valle	Son glaciares que siguen la trayectoria de un valle preexistente, la lengua glaciar salargada.

	Montaña	Masas de hielo adheridas a las paredes rocosas, cuyo frente glaciar se encuentra alejada de los valles, distribuida generalmente en pendientes pronunciadas.
	Glaciares	Pequeñas masas de hielo, cuyas zonas de acumulación y ablación no son claramente detectables, este tipo de glaciar generalmente se presenta en glaciares fragmentados.
	Capa de hielo	Masa glaciar en forma de domo, cuyo flujo es en forma radial. La temperatura del hielo es de 0°C. Existe agua entre la masa de hielo y una probabilidad más alta de deformación. Estos glaciares se desplazan sobre los flujos de agua líquida de la base.
	Templados	Glaciares por debajo del punto de fusión, sin agua basal y poco aporte superficial.
Temperatura	Fríos	Glaciares con movimiento rápido y evacuación de detritos.
	Activos	Glaciares que fluyen lentamente, lo cual dificulta la evacuación de rocas y la conformación de morrenas. Asociados a masas de hielo en retroceso.
	Pasivos	Glaciares que no tienen alimentación y presentan lenta fusión del hielo. Pueden considerarse como 'relictos sin movimiento'.
Dinámica	Estáticos	Glaciares 'Blancos' con cobertura superficial característica de nieve y hielo.
	Limpio	Glaciares cubiertos parcial o total por restos adyacentes (detritos y/o fragmentos de rocas) erosionados en su área terminal.
	Cubiertos	Denominados también glaciares rocosos, presentan una acumulación lenta de restos rocosos (angulares), generalmente con un patrón de cresta/surco distintivo y pendientes empinadas y laterales, cuya longitud es generalmente mayor que su ancho (en forma de lengua) existente en un valle de montaña.
Contenido de impurezas	De roca	Ubicados en latitudes altas o zonas polares.
	Polares	
	Ecuatoriales/Tropicales	Ubicados cerca de la línea ecuatorial.
	Intertropicales internos	Ubicados entre los trópicos y cercanos a la línea ecuatorial (por ejemplo, Colombia y Ecuador).
Localización	Intertropicales externos	Ubicados entre los trópicos y alejados de la línea ecuatorial (por ejemplo, glaciares de Perú y Bolivia).

Fuente: Extraído del libro (INAIGEM, 2017), pagina 25.

1.17. Glaciares en el Perú

En el Perú, los glaciares con las formas especiales se deben a la posición geográfica y, naturalmente al clima imperante en la zona (INAIGEM, 2017).

- a. Glaciares colgados: Son masas de hielo y nieve acumuladas durante años, ubicadas comúnmente en las zonas más altas de los glaciares.
- b. Glaciares muertos: Son glaciares que han quedado cubiertos por una gran morrena de ablación, sin recibir alimentación en su parte superior.
- c. Glaciares reconstituidos: Son glaciares que no cuentan con una fuente directa de alimentación, y se forman a partir de la acumulación de bloques de hielo desprendidos de los glaciares colgados.

1.18. Volumen de los glaciares

El volumen glaciar es una medida que cuantifica la cantidad total de hielo presente en un glaciar, y está estrechamente relacionado con su área superficial. Para estimar este volumen, se utiliza la fórmula empírica de Bahr y Klein Isacks, que permite calcular el volumen a partir del área glaciar conocida.

La fórmula se expresa de la siguiente manera: (B. Bahr, Tad Pfeffer, & Kaser, 2015)

$$V = C * S^\gamma \dots \dots \dots (1)$$

Donde:

- V=Volumen del glaciar (en m³)
- S: Área de la superficie del glaciar (en Km²).
- C: Una variable aleatoria que varía por glaciar, por región, por tiempo, por pendiente, por parámetros climáticos, por muchos otros factores posibles.
- γ : Es una constante para una clase geométrica que es 1.38.

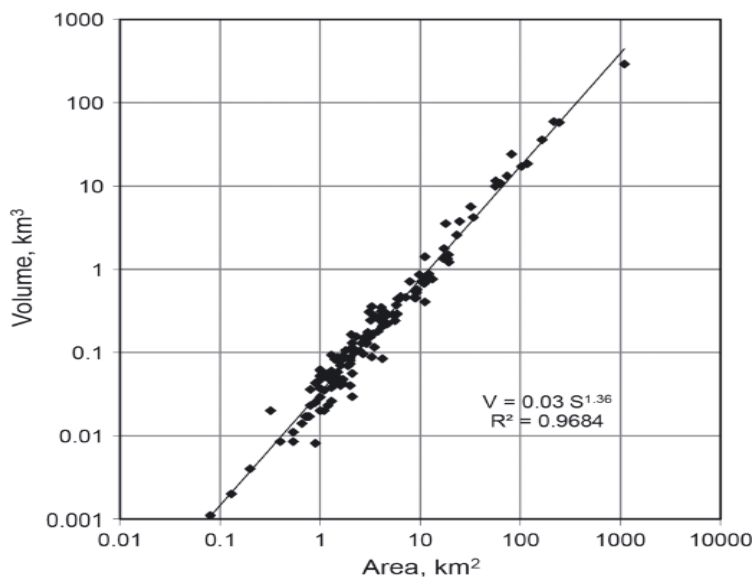


Figura 1-13: Volumen de glaciar versus área para los 144 glaciares compilados.

Fuente: extraído de (B. Bahr, Tad Pfeffer, & Kaser, 2015)

A continuación, se proporciona una tabla de valores típicos de la constante C que se han reportado en varios estudios para diferentes tipos de glaciares, regiones y condiciones.

Tabla 1.2: Tabla de valores de la constante C en la relación Volumen -área de los glaciares

Tipo de glaciar/Región	**Constante C	Referencia
------------------------	---------------	------------

	(m ³ /km ²)	
Glaciares de montaña (Alpes, Andes)	10 ³ – 10 ⁴	Bahr y Klein Isacks (1994)
Glaciares alpinos (Rocas, Montañas)	2x10 ³	Cogley (2009)
Glaciares de casquete polar (Groenlandia, Antártida)	10 ⁵ – 10 ⁶	Pfeffer et al. (2014)
Glaciares de montaña en regiones cálidas (Himalayas, Pirineos)	5x10 ³	Kienholz et al. (2016)
Glaciares de montaña en regiones frías (Escandinavia)	3x10 ³	Bahr (1997)
Glaciares de casquete polar (Antártida) – glaciares de gran volumen	10 ⁶	Cogley (2009)
Glaciares en retroceso (regiones tropicales)	2x10 ³	Cogley (2009)
Glaciares en retroceso (Ártico y Áreas Polares)	10 ⁴	Pfeffer et al. (2014)

Esta fórmula es una herramienta valiosa para evaluar con mayor precisión las pérdidas de hielo en los glaciares. Su aplicación ha sido amplia en diversos estudios científicos, abarcando diferentes regiones del mundo. Los resultados de estas investigaciones han revelado, en muchos casos, una disminución significativa del volumen glaciar.

Esta reducción se atribuye principalmente al calentamiento global, que está acelerando el deshielo en muchas regiones glaciares del planeta. La utilización de esta fórmula empírica permite a los científicos cuantificar y monitorear estos cambios de manera más efectiva, proporcionando los datos necesarios para comprender el impacto de los cambios climáticos en los ecosistemas glaciares (Vásquez, et al, 2021).

1.19.Línea de Equilibrio (ELA)

La ELA, Línea de Equilibrio de Altitud se describe como una altitud que hay en la cantidad de nieve que se acumula es igual a la cantidad de hielo que se pierde debido al derretimiento y la sublimación. Este concepto es fundamental para evaluar la salud de un glaciar, ya que proporciona información sobre su estado y dinámica. La ELA está influenciada por varios factores climáticos, siendo los más significativos la temperatura y la precipitación.

Para determinar la ELA, se emplean diferentes métodos, que incluyen observaciones directas en el campo, análisis de imágenes satelitales y la utilización de modelos climáticos que simulan las condiciones atmosféricas. Sin embargo, el cambio climático ha tenido un impacto notable en la ELA, provocando un aumento en su altitud en muchas regiones del mundo. Este ascenso

de la ELA está directamente relacionado con el derretimiento acelerado de los glaciares, lo que plantea serias preocupaciones sobre la accesibilidad al agua dulce y otros ecosistemas que dependen de estos cuerpos de hielo (Campos, 2020).

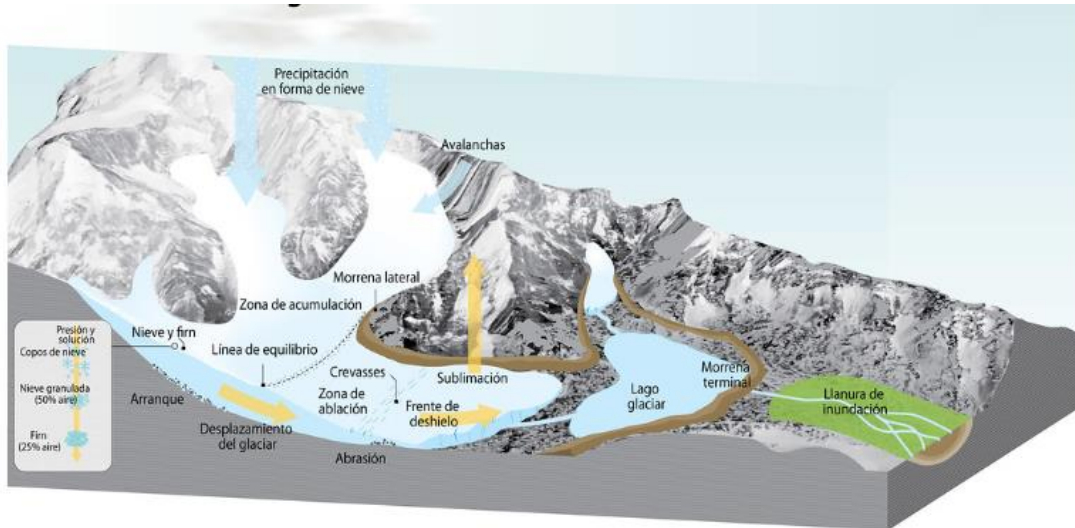


Figura 1-14: Balance de masas glaciar

Fuente: extraído de la página web <https://www.grida.no/resources/12851> (GRIDA-ARENDAL, 2019).

1.20. Área de Acumulación (AA)

El Área de Acumulación (AA) se refiere a la sección del glaciar donde se acumula la nieve, la cual eventualmente se transforma en hielo. Esta área es fundamental para la sostenibilidad del glaciar, ya que su salud determina la capacidad del glaciar para mantenerse en equilibrio. Para medir el AA, se utilizan diversos métodos, que van desde observaciones directas en el campo, hasta análisis de imágenes aéreas y modelos climáticos que permiten simular y predecir cambios en las condiciones del glaciar.

Los cambios en el AA, como una disminución en su extensión, son señales claras de un desequilibrio en la masa de hielo, a menudo vinculadas al incremento de las temperaturas y a una reducción de precipitaciones. Este fenómeno no solo afecta la cantidad de agua dulce disponible, sino que también tiene repercusiones en los ecosistemas que dependen de estos glaciares, impactando la biodiversidad local y la subsistencia de los pobladores situados en alrededores. La comprensión y monitoreo del Área de Acumulación son, por lo tanto, esenciales para la gestión sostenible del agua y la reducción en los impactos del cambio climático.

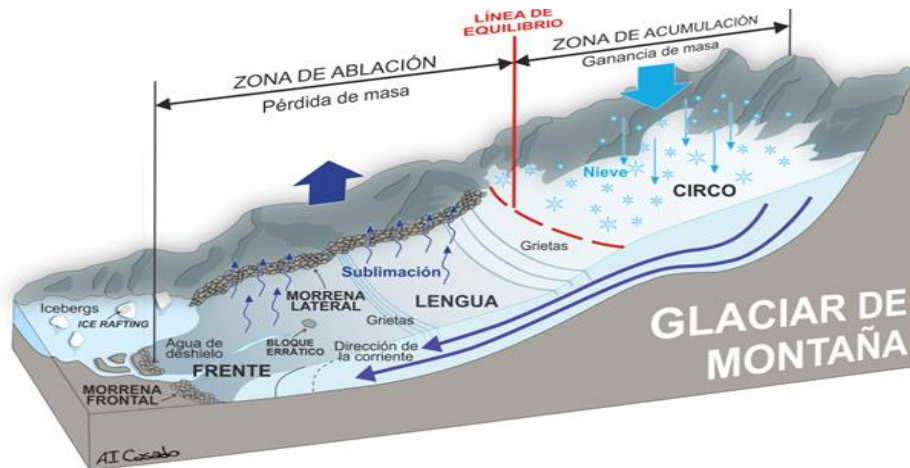


Figura 1-15: Glaciar en las montañas

Fuente: Extraído de Casado & Melón, 2024.

1.21. Teledetección

La teledetección es el proceso de obtener datos sobre un objeto sin estar en contacto físico con él, utilizando sensores remotos para captar las ondas electromagnéticas reflejadas o emitidas por el objeto o superficie" (Lillesand & Kiefer, 2015).

1.21.1. Sensores

Son los aparatos que perciben radiación electromagnética y la transforman en data que es almacenada y transformada a representaciones numéricas, datos o una imagen (cámara, escáner, radar, etc.) (Cunsa Robles, 2024).

Se dividen en lo siguiente. (Bravo Morales, 2017)

Sensores activos. Tiene un valor significativo en la aplicación de la percepción remota para evaluar los recursos naturales. Su función es captar las señales emitidas de manera natural y reflejadas por los objetos observados a través de la radiación solar

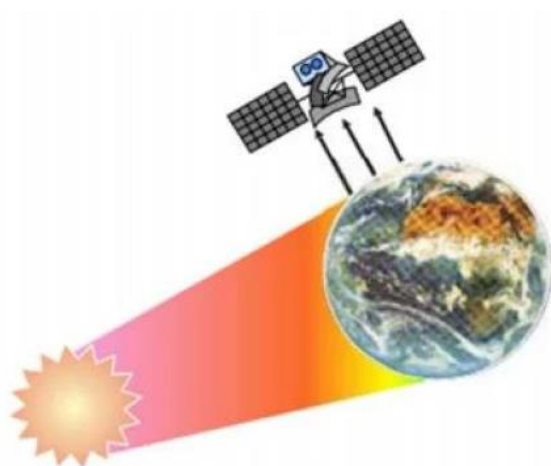


Figura 1-16: Fuente de radiación de un sensor activo

Fuente: extraído del libro (Bravo Morales, 2017), pagina 11.

Sensores activos. - Este tipo de sensor emite radiación hacia el objeto de interés, y la radiación reflejada por dicho objeto es luego detectada y cuantificada por el sensor



Figura 1-17: Sensor activo de un satélite

Fuente: extraído del libro (Bravo Morales, 2017), pagina 12.

1.21.2. Resolución de sensores remotos

Existe varias resoluciones de sensores como: espacial, espectral, radiométrica, angular y temporal (Bravo Morales, 2017).

a. Resolución espacial

Se define como la distancia que representa la unidad mínima de información en una imagen (píxel). De esta manera, cuando el tamaño del píxel disminuye, la resolución espacial aumenta, permitiendo que el sensor capture más detalles de los objetos.

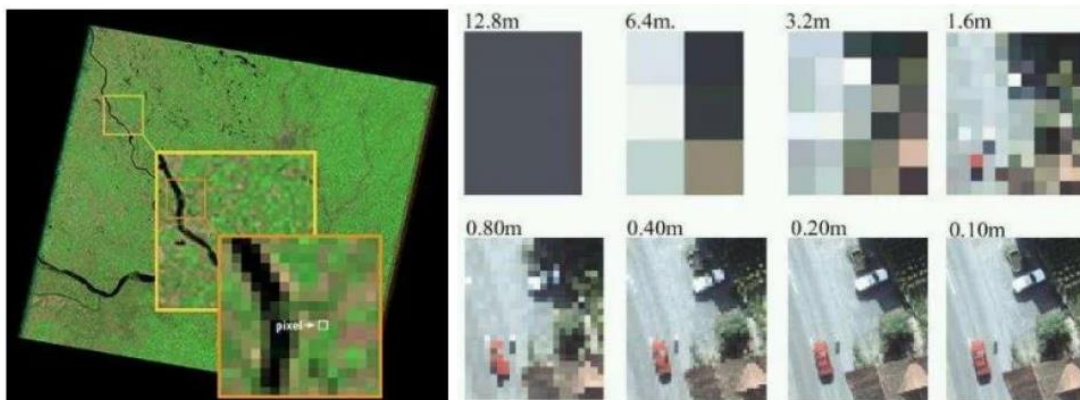


Figura 1-18: Resolución espacial (calidad de imagen según el tamaño de píxel).

Fuente: tomado del libro (Bravo Morales, 2017), pagina 12.

b. Resolución espectral

Indica el número y anchura de las bandas espectrales que puede describir el sensor, a mayor resolución se tendrá información del comportamiento de una misma cobertura de diferentes bandas espectrales.

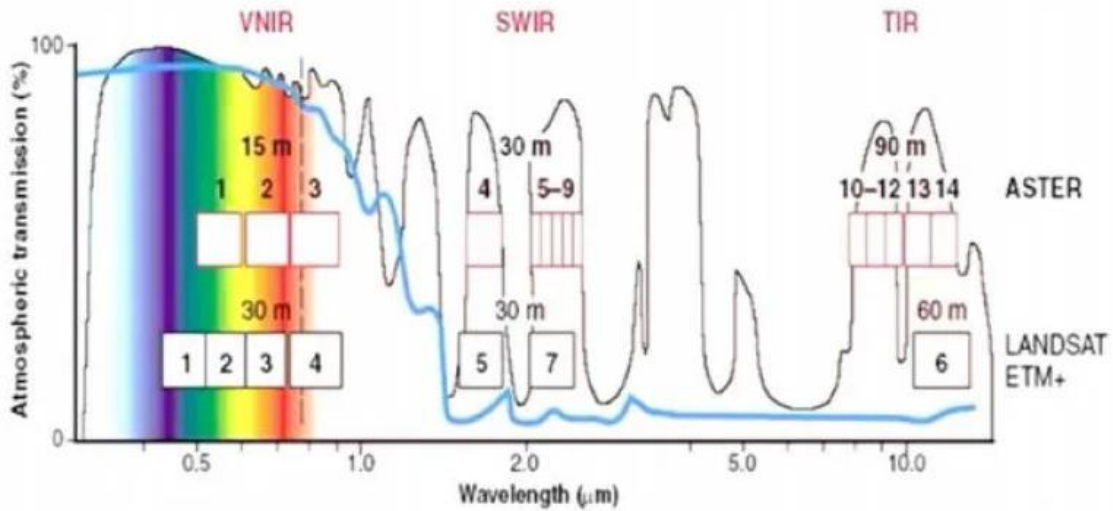


Figura 1-19: Comparación de bandas ASTER Y LANDSAT ETM+

Fuente: extraído del libro (Bravo Morales, 2017), página 13.

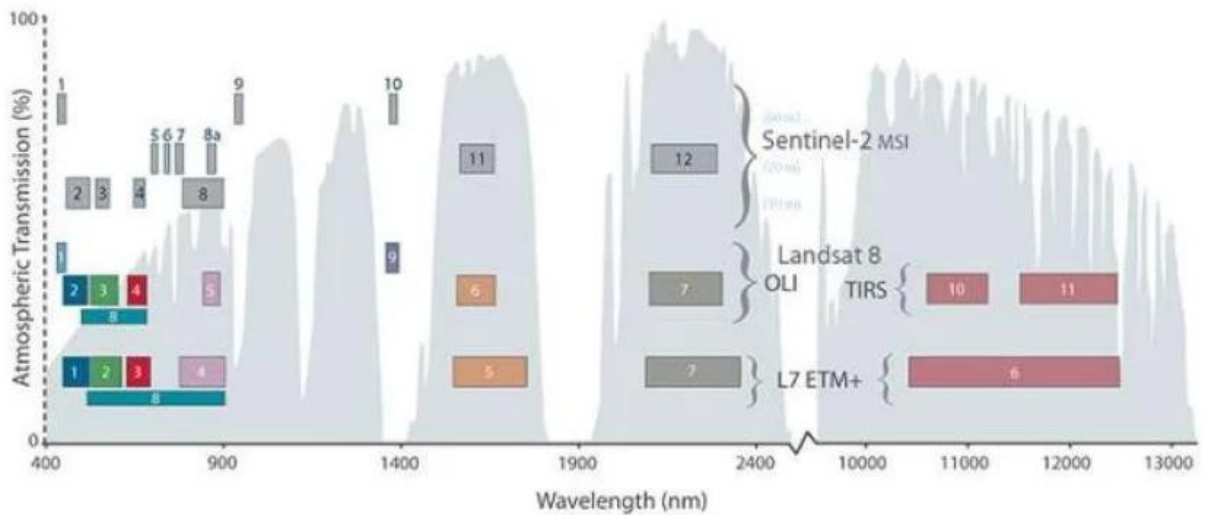


Figura 1-20: Comparación de bandas SENTINEL 2, LANDSAT 7 y 8

Fuente: extraído del libro (Bravo Morales, 2017), página 13.

c. Resolución radiométrica

La resolución radiométrica se mide en bits (dígitos binarios) y representa el rango de niveles de brillo disponibles en una imagen. Este rango de brillo se corresponde con el valor máximo de

los números digitales (DN) que la imagen puede representar. Por ejemplo, una imagen con una resolución de 8 bits tiene 256 posibles niveles de brillo (Bravo Morales, 2017).

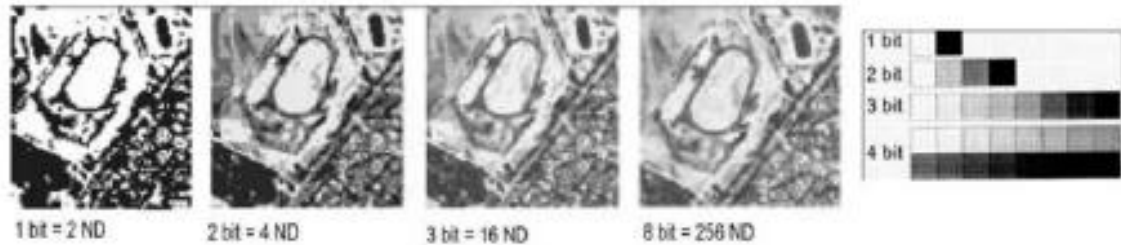


Figura 1-21: Comparación de los niveles de gris o valores digitales (nd) presentes en una imagen

Fuente: extraído de (Bravo Morales, 2017), pagina 14.

- 1 bit: 2 niveles de brillo (ND), lo que solo permite dos tonos (blanco y negro).
- 2 bits: 4 niveles de brillo (ND), proporcionando una mayor gama de tonos grises.
- 3 bits: 16 niveles de brillo (ND), lo que permite una representación más detallada de la imagen.
- 8 bits: 256 niveles de brillo (ND), lo que da como resultado una imagen con una gama completa de tonos de gris.

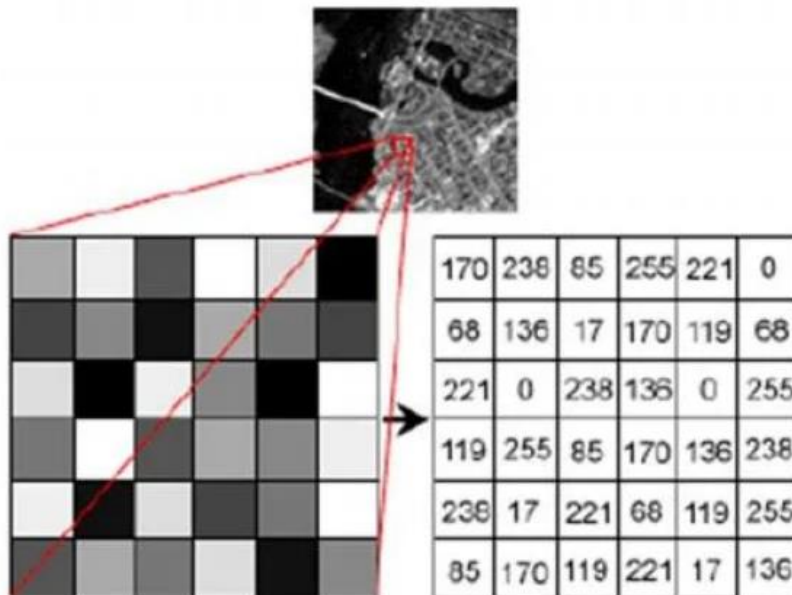


Figura 1-22: Codificación de los ND de una imagen Landsat 8 bits

Fuente: Extraído de (Bravo Morales, 2017), pagina 14.

De la imagen:

- 0: representa el negro (sin brillo),
- 255: representa el blanco (máximo brillo),
- Y los valores intermedios corresponden a tonos grises de diferentes intensidades.

d. Resolución temporal

Se refiere al tiempo que tarda en capturar la misma área de la Tierra. Este ciclo depende de características como la altitud, la velocidad y la inclinación, y se puede distinguir de la siguiente manera:

- Alta resolución temporal: menor de 1 día a 3 días.
- Media resolución temporal: 4 a 16 días.
- Baja resolución temporal mayor a 16 días.

Tabla 1.3: Resolución temporal de los diferentes satélites

Satélite	Resolución Temporal	Notas
Landsat 8	16 días	Landsat tiene un ciclo de 16 días debido a la órbita de la constelación, pero con la combinación de Landsat 7 y 8, puede obtenerse una observación más frecuente.
Sentinel-2	5 días (con la constelación de 2 satélites)	Con la constelación de dos satélites (Sentinel-2A y Sentinel-2B), el ciclo de observación se reduce a 5 días.
SPOT 6	1-3 días	SPOT 6 tiene una alta frecuencia de observación, especialmente en áreas de interés, permitiendo observaciones entre 1 y 3 días.
Perusat-1	2-3 días	El satélite Perusat-1 tiene una resolución temporal de entre 2 y 3 días, permitiendo obtener imágenes con frecuencia para monitoreo detallado.

1.22. Tipos de imagen satelital teledetección

1.22.1. Imagen multiespectral

Las imágenes son capturadas mediante una serie de detectores fotoeléctricos que transforman los niveles de radiancia, procedente de la superficie terrestre, denominados niveles digitales (Pérez Gutierrez & Muñoz Nieto, 2006).

Imagen que lleva asociados varios valores numéricos a cada pixel, la imagen es capturada mediante un sensor digital que mide la reflectancia en muchas bandas (Bravo Morales, 2017).

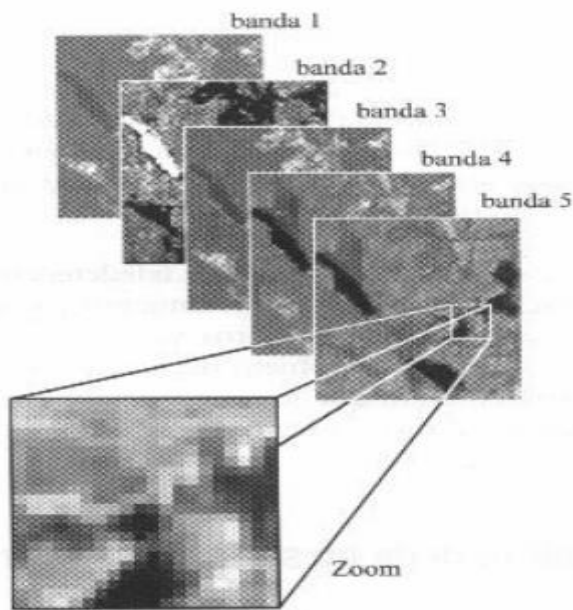


Figura 1-23: Formación de la Imagen multispectral

Fuente: Tomado de (Pérez Gutierrez & Muñoz Nieto, 2006).

1.22.2. Imagen pancromática

Es una imagen en escala de grises que se captura utilizando un solo rango espectral.

Dispone de una sola banda espectral que abarca comúnmente gran parte del visible y comienzo del infrarrojo. Tiene una ventaja de poseer mayor resolución espectral que las multispectrales (Bravo Morales, 2017).

1.22.3. Imagen estéreo

Consiste en dos imágenes de la misma área obtenidas desde ángulos distintas.

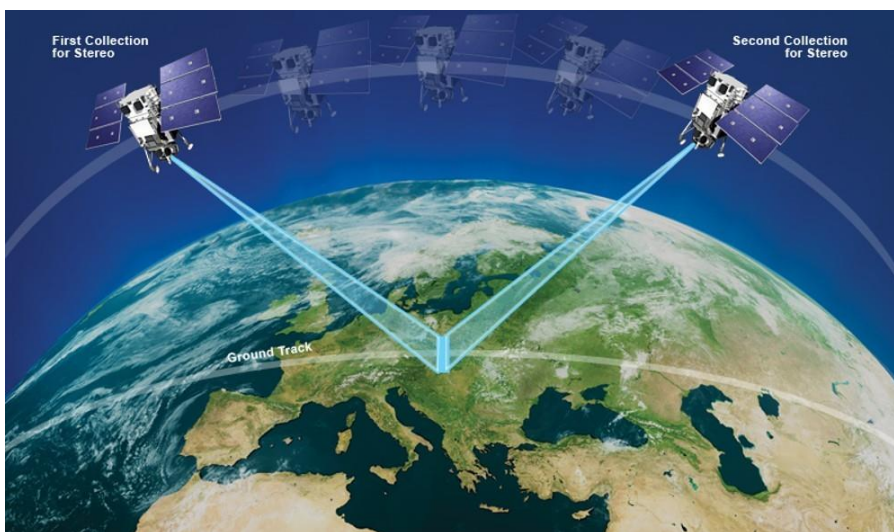


Figura 1-24: Captura de imágenes de diferentes ángulos

Fuente: extraído desde <https://es.linkedin.com/pulse/fotogrametr%C3%ADa-satelital-una-alternativa-tecnol%C3%B3gica-para-mattie>

1.23. Procesamiento de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales como tal necesitan la aplicación de un conjunto de técnicas orientadas a mejorar la presentación y obtener una información adecuada.

1.23.1. Corrección geométrica

Se refiere al proceso de eliminar las distorsiones en la imagen causadas por la rotación de la Tierra, su curvatura y las variaciones en la altitud del satélite en relación con el elipsoide de referencia. La corrección puede operarse bidimensionalmente, utilizando puntos de control en el sistema de coordenadas UTM (INAIGEM, 2017).

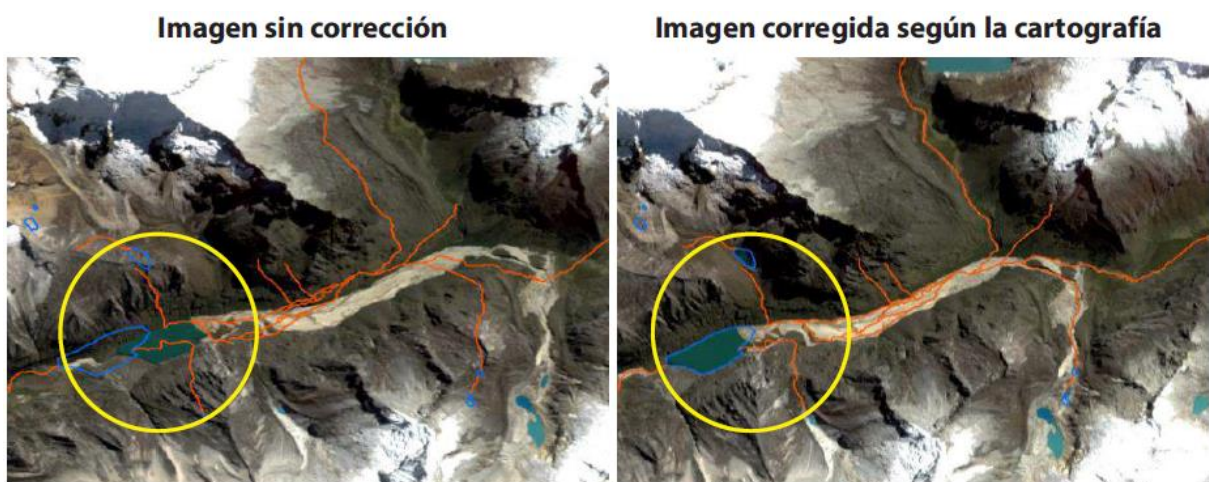


Figura 1-25: Procedimiento de corrección geométrica en el caso de la subcuenca Santa Cruz

Fuente: Extraído de (INAIGEM, 2017), página 46.

1.23.2. Corrección radiométrica

La corrección radiométrica de imágenes consiste en convertir los valores digitales de las imágenes a valores de radiancia y reflectancia en la parte superior de la atmósfera. Esto permite distinguir mejor las diferentes coberturas del terreno al aprovechar las características espectrales corregidas de la imagen (INAIGEM, 2017).

Con la corrección se pretende reestablecer los valores de los niveles digitales de la imagen depurado cualquier anomalía en su registro achacable, bien a defectos en el sistema sensor, bien a las condiciones ambientales de la toma (Pérez Gutierrez & Muñoz Nieto, 2006).

1.24. Índice Normalizado de diferenciación de nieve

La propiedad espectral del glaciar es que tiene una alta reflectancia en el espectro visible (verde) y muy baja en el infrarrojo medio o infrarrojo de onda corta (INAIGEM, 2017).

$$NDSI = \frac{(Banda_{verde} - Banda_{SWIR})}{(Banda_{verde} + Banda_{SWIR})} \dots \dots \dots (2)$$

- Banda Verde (Visible): La nieve refleja fuertemente en la banda verde.
- Banda SWIR (Infrarrojo de onda corta): La nieve absorbe fuertemente en la banda SWIR

Valores cercanos a +1 indican áreas cubiertas de nieve, ya que la nieve refleja fuertemente en la banda verde y tiene una baja reflectancia en el SWIR.

Valores cercanos a 0 generalmente indican áreas sin nieve, como agua o suelos desnudos.

Valores negativos suelen indicar superficies no nevadas como vegetación, agua o áreas urbanas.

1.24.1. Aplicación del NDSI en diferentes satélites:

a. Landsat:

- Banda 3 (Verde): 0.53–0.60 μm
- Banda 5 (SWIR): 1.55–1.75 μm

b. Sentinel-2:

- Banda 3 (Verde): 0.54–0.58 μm
- Banda 11 (SWIR): 1.56–1.66 μm
- Banda 12 (SWIR): 2.01–2.29 μm

1.25. Satélites

(Maturana, 2015), dice que la teledetección usa sensores en satélites para captar imágenes de la superficie terrestre. Estas imágenes son fundamentales para analizar los glaciares debido a su capacidad para proporcionar datos continuos y en grandes áreas. Los sensores pueden capturar información en diferentes bandas espectrales, lo que ayuda a identificar y monitorear la cobertura glaciár.

1.25.1. Landsat:

- Landsat 5 (Thematic Mapper - TM): Lanzado en 1984, ofrece una resolución espacial de 30 metros y una resolución temporal de 16 días. Es útil para estudios históricos debido a su larga serie temporal.
- Landsat 7 (Enhanced Thematic Mapper Plus - ETM+): Lanzado en 1999, también proporciona una resolución espacial de 30 metros, pero con mejoras en la calidad de la imagen y una resolución temporal similar.
- Landsat 8 (Operational Land Imager - OLI): Lanzado en 2013, ofrece una resolución

espacial de 30 metros y una mayor precisión en las bandas espectrales, mejorando la detección de cambios en la cobertura glaciar.

1.25.2.Sentinel-2:

Sentinel-2 Multispectral Instrument (MSI): Parte del programa Copernicus, ofrece una resolución espacial de 10 metros en bandas visibles y de infrarrojo cercano. Su frecuencia de revisita de 5 días proporciona datos actualizados y detallados para el monitoreo de glaciares (Rojas, s.f.).

1.25.3.El PerúSAT-1

Primer satélite de observación terrestre con tecnología de alta resolución. Su puesta en órbita se llevó a cabo el 15 de septiembre de 2016, despegando desde las instalaciones de lanzamiento en Kourou, Guayana Francesa. Este proyecto espacial es fruto de la colaboración entre la empresa europea Airbus Defence and Space y la Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial del Perú (CONIDA, s.f.).

La implementación de este satélite responde a la estrategia nacional de Perú para potenciar sus capacidades de vigilancia y gestión territorial. Este avance tecnológico posiciona a Perú en la vanguardia de la observación satelital en América Latina, proporcionando herramientas cruciales para la toma de decisiones en materia de seguridad nacional y desarrollo sostenible (Lechón F. 2016).

PerúSAT-1 cuenta con las siguientes características principales:

- Resolución: PerúSAT-1 cuenta con una resolución de 0.7 metros, permitiendo la captura de imágenes detalladas de la superficie terrestre.
- Órbita: Opera en una órbita helio sincrónica, lo que asegura imágenes consistentes en términos de iluminación.
- Peso y Dimensiones: Pesa aproximadamente 430 kilogramos y mide alrededor de 1.2 metros de altura.
- Vida Útil: Se estima una vida operativa de unos 10 años.

PerúSAT-1 es utilizado en diversos campos como:

- Desastres naturales: Permite evaluar rápidamente los daños y mejorar la respuesta ante emergencias.
- Agricultura: Facilita la gestión y planificación de cultivos.
- Medio ambiente: Ayuda a monitorear la deforestación y gestionar áreas protegidas.

- Seguridad: Es clave para la vigilancia de fronteras y el combate contra actividades ilegales

Este satélite ha generado beneficios para el Perú. El PerúSAT-1 ha permitido al país tener una independencia significativa en términos de obtención de imágenes satelitales de alta resolución, reduciendo la dependencia de imágenes de satélites extranjeros y mejorando la toma de decisiones en diversas áreas críticas para el desarrollo y seguridad del país (Perú 21, 2019).

1.25.4.Spot -6

Los satélites SPOT-6 y SPOT-7 proporcionan una fuente asequible de información para analizar, monitorear, predecir y gestionar los recursos y las actividades humanas en el planeta. Los productos de SPOT son herramientas de soporte para una amplia gama de aplicaciones, como cartografía civil y militar, gestión de desastres naturales y provocados por el hombre, exploración de recursos naturales, planificación territorial, monitoreo agrícola y forestal, protección ambiental y vigilancia marítima (Airbus Defence and Space, s.f.).

Resolución

- Panchromática: La resolución es de 1.5 metros en el producto ortorrectificado.
- Multiespectral: La resolución es de 6 metros en el producto ortorrectificado.

Bandas espectrales

Producto Panchromático:

- Rango de longitudes de onda: 0.450 μm a 0.745 μm (parte del espectro visible).
- Este producto incluye solo una banda en blanco y negro, con una resolución de 1.5 metros.

Producto Multiespectral:

- Azul: 0.455 μm a 0.525 μm
- Rojo: 0.530 μm a 0.590 μm
- Verde: 0.625 μm a 0.695 μm
- Infrarrojo cercano (NIR): 0.760 μm a 0.890 μm
- Este producto incluye cuatro bandas multiespectrales con una resolución de 6 metros.

Producto Pan-sharpened:

- La fusión de imágenes se realiza entre el producto panchromático (1.5 m) y el multiespectral (6 m) para obtener un producto de 1.5 m de resolución en color mediante el proceso de pan-sharpening.

1.26. Clasificación de Imágenes Satelitales

- Clasificación Supervisada: Algoritmo de Máxima Verosimilitud: Utiliza muestras de entrenamiento para entrenar un modelo que clasifica los píxeles en categorías predefinidas (glaciar, nieve, roca, vegetación). Este método requiere conocimientos previos sobre las características de cada clase (Mather, P. y otros, 2011).
- Clasificación No Supervisada: Algoritmo K-means: Realiza una clasificación inicial sin necesidad de etiquetas previas. Agrupa los píxeles en grupos basados en características espectrales similares, que luego se ajustan manualmente (Pal, M., & Mather, P. M., 2005).

1.26.1. Detección de Cambios

Según Lu, D. & Weng, Q. (2007). La detección de cambios se realiza comparando imágenes de diferentes períodos para identificar variaciones en la extensión glaciar.

Métodos de Detección de Cambios:

1. Análisis Multitemporal: Compara imágenes de diferentes fechas para evaluar la evolución de la cobertura glaciar.
2. Método de Pos clasificación: Compara las imágenes clasificadas de distintos años para identificar y cuantificar los cambios en la cobertura glaciar.

1.26.2. Modelado Espacial

Modelos Predictivos:

- Random Forest: Es un algoritmo de aprendizaje automático que emplea varios árboles de decisión para clasificar y prever la futura distribución de la cobertura glaciar. Este modelo es eficaz para procesar grandes cantidades de datos y generar predicciones precisas
- Support Vector Machines (SVM): Método que encuentra un margen óptimo entre clases para clasificar datos. Efectivo para clasificar datos complejos y no lineales (Li, Z., & Chen, L., 2017).

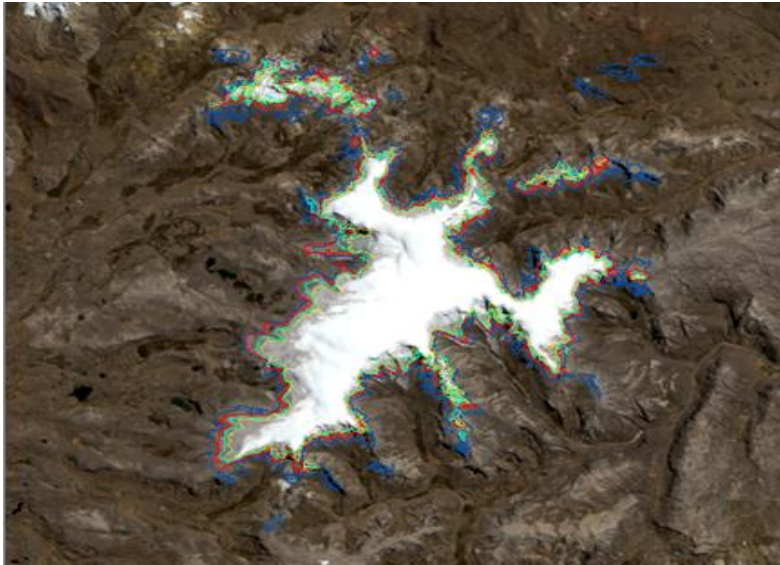


Figura 1.1: Áreas de retroceso glaciar en Quelccaya, Cusco

Fuente: Extraído de Sánchez, E., s.f.

1.26.3. Análisis Estadístico

Correlación con Datos Climático según IPCC (2021):

- Métodos Estadísticos: Utiliza técnicas como regresión lineal y análisis de correlación para relacionar cambios en la cobertura glaciar con variables climáticas como temperatura y precipitación.

Herramientas de Análisis:

- R: Utilizado para análisis estadístico avanzado, proporcionando herramientas para realizar regresión y correlación entre variables (R Core Team 2020).

1.27. Programas

1.27.1. Google earth engine

Este compuesto por cuatro elementos principales:

- El primero es la infraestructura de Google, la cual pone a disposición del usuario sus servidores, permitiendo así hacer análisis en paralelo con cerca de 10 000 CPUs. Esto agiliza la velocidad de procesamiento, en comparación con una computadora individual (Perilla & Jean-Francois, 2020).
- El segundo elemento es el acervo de datos (datasets). Google tiene almacenado todas las imágenes de varios sensores (Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros). Estas bases de datos se actualizan a medida que se toman nuevas imágenes (cerca de 6000 nuevas

escenas diarias), creando así un enorme catálogo de datos geospaciales (Perilla & Jean-Francois, 2020).

- El tercer componente es la API (Interfaz de Programación de Aplicaciones), que consiste en un conjunto de comandos y funciones predefinidas en el lenguaje JAVA, lo que facilita la programación al desarrollar algoritmos para investigaciones. No obstante, estas funciones no son modificables ni se tiene acceso al código, lo que impide al usuario realizar ajustes para llevar a cabo análisis alternativos. Así, la flexibilidad de programación se ve limitada, ya que solo se pueden utilizar las funciones que ofrece la API. Es importante señalar que también existe una API para el lenguaje Python, pero debe descargarse por separado. Esto afecta el rendimiento al consumir memoria de la computadora del usuario (Perilla & Jean-Francois, 2020).
- El cuarto componente es el Code Editor, que se trata de un entorno de desarrollo integrado en línea, donde se centralizan todos los elementos. Aquí es donde el usuario puede, a través de código de trabajo (“scripts”), llamar a los datos, procesar y visualizarlos de manera virtual con los servidores de Google, teniendo así sus resultados e información en la nube (Perilla & Jean-Francois, 2020).

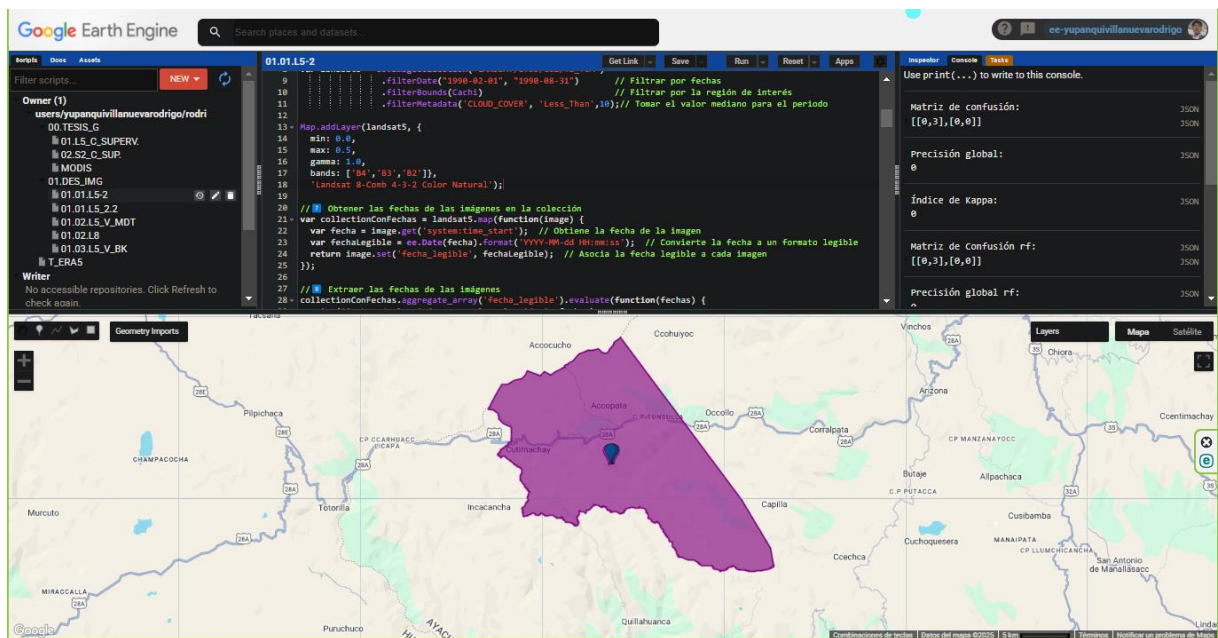


Figura 1.2: Entorno de Google earth engine

1.27.2.ArcGIS

ArcGIS como herramienta GIS es una plataforma para trabajar con sistemas de información geográfica. Desarrollado por Esri (Environmental Systems Research Institute) que permite recopilar, organizar, administrar, analizar, compartir y distribuir información geográfica.

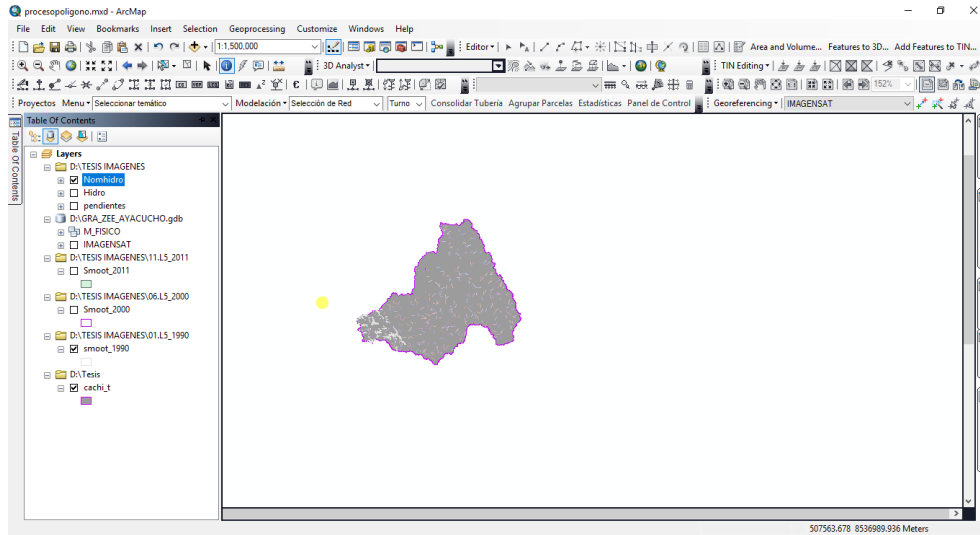


Figura 1.3: Entorno de la plataforma ArcGIS (ArcMap).

1.27.3.R

Utilizado para análisis estadístico avanzado, proporcionando herramientas para realizar regresión y correlación entre variables (R Core Team 2020).

R se utiliza principalmente para el análisis de datos y la estadística, pero con la ayuda de paquetes específicos, se convierte en una plataforma útil para trabajar con datos geospaciales. Al combinar herramientas estadísticas con capacidades geospaciales, R puede ser una excelente alternativa a los sistemas SIG más tradicionales como ArcGIS.

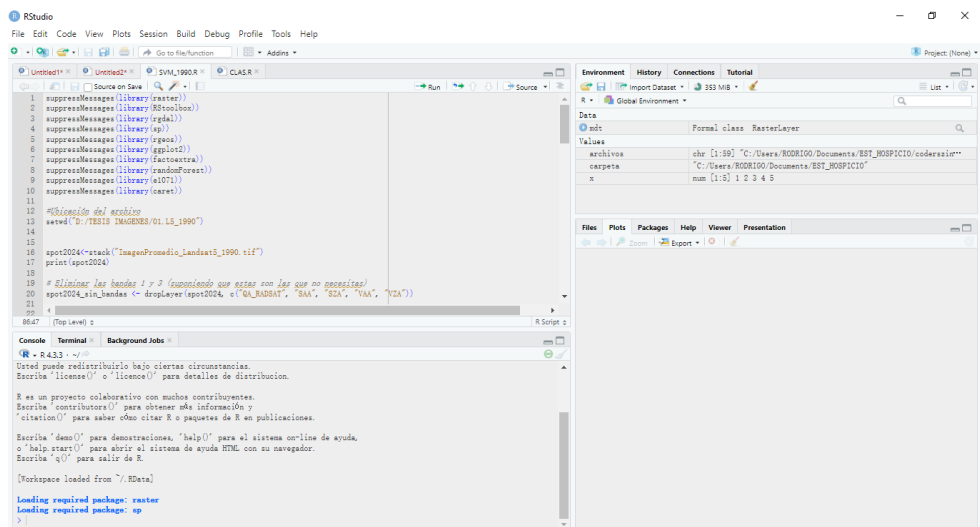


Figura 1-26: Entorno de R.

CAPITULO II MEDODOLOGIA

2.1.Ubicación del lugar

La investigación se centra en la cuenca Cachi, particularmente en las zonas altas, donde los nevados juegan un papel esencial en el ciclo hidrológico de la región. Estos nevados son clave para almacenar agua en forma de nieve y glaciares, cuya posterior fusión contribuye al flujo de los ríos que conforman la cuenca.

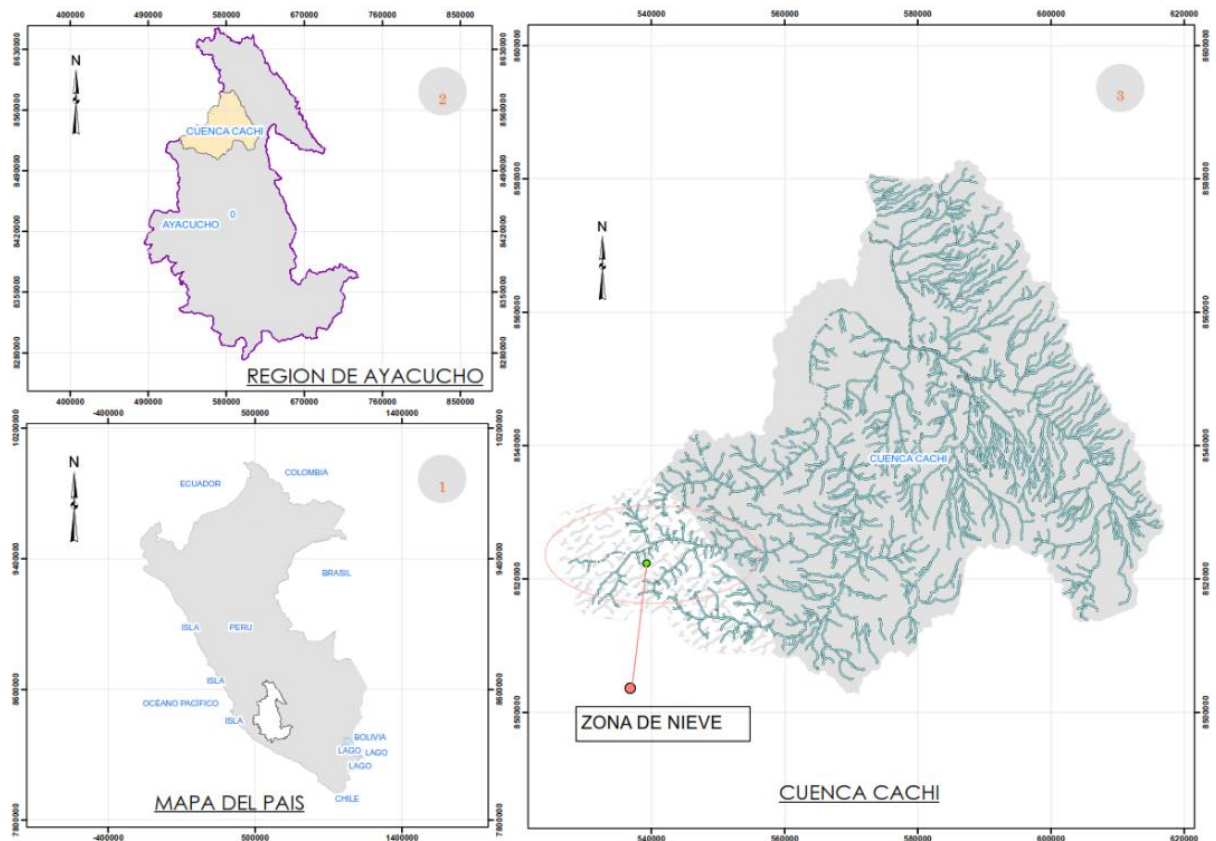


Figura 2-1: Mapa de ubicación de la cuenca cachi y las zonas con nevados.

2.2.Procedimiento para el cálculo del volumen glaciar

2.2.1.Selección de imágenes satelitales

Para llevar a cabo el análisis de la evolución de la cobertura glaciar en la cuenca del río Cachi, se seleccionaron imágenes satelitales de diferentes períodos, abarcando los años 1990, 2000, 2010 y 2024. Estas imágenes son fundamentales para entender cómo han cambiado los glaciares a lo largo del tiempo y cómo estos cambios afectan a la región.

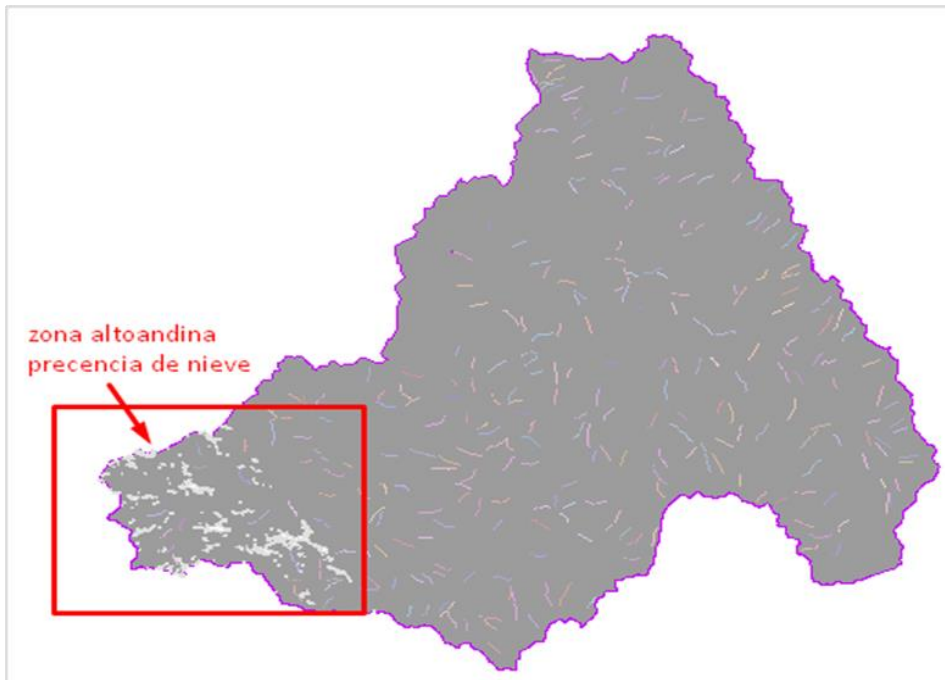


Figura 2-2: Ubicación de la zona glaciar de la cuenca cachi

El campo de estudio abarca los glaciares situados en la parte alta de la cuenca cachi como se muestra en la imagen (Figura 2.2).

La figura 2.2 muestra las zonas con presencia de nieve en el año 1990. Por lo tanto, se seleccionará imágenes que cubren tal zona para los diferentes años como: 1990, 2000, 2010 y 2024.

2.2.2. Pasos para la selección de imágenes en el entorno de GEE

Todo el procedimiento de selección de imágenes satelitales se realiza con Google earth Engine porque es una plataforma muy poderosa y popular para el procesamiento de imágenes satelitales. También Google Earth Engine tiene acceso a imágenes de satélite de alta resolución de diferentes satélites como Landsat, Sentinel, MODIS, entre otros, sino que también cuenta con herramientas para procesar, analizar y visualizar estos datos con gran flexibilidad. Además, su integración con lenguajes de programación como JavaScript y Python lo hace accesible tanto para investigadores como para desarrolladores y científicos de datos. Por lo tanto, a continuación, se presente los pasos:

A. Definición de la región

Como ya se tiene la geometría de la cuenca cachi, se exportará en formato shapefile (.shp) a GEE como se muestra en la figura 2.3.



Figura 2-3: GEE, Procedimiento para la importación de la geometría

Código:

```
Map.centerObject(Cachi);
```

```
//Anadir el archivo vectorial al mapa
```

```
Map.addLayer( Cachi, {color:"purple"}, "Cachi"); //nombre de la geometría
```

B. Cargar la colección

Inicialmente se debe de acceder a la colección de imágenes satelitales de landsat en Google Earth Engine. GEE, tiene acceso a una amplia variedad de satélites y colecciones de datos de diferentes misiones espaciales. Los más utilizados son de la serie Landsat, Sentinel, MODIS, VIIRS, PlanetScope, etc.

Cada satélite tiene sus ventajas y desventajas. Para la investigación se tomará las imágenes landsat5 para los periodos de 1990, 2000 y 2010.

Código:

```
var landsat5 = ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
    .filterDate("1990-02-01", "1990-08-31")
    .filterBounds(Cachi)
    .filterMetadata('CLOUD_COVER', 'Less_Than', 10);
```

La colección utilizada será LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA que tiene las siguientes características.

Reflectancia TOA de nivel 1 de la colección 2 del satéli...



DESCRIPCIÓN ALZACUELLO PROPIEDADES DE LA IMAGEN CONDICIONES DE USO

Reflectancia de la parte superior de la atmósfera (TOA) calibrada de nivel 1 de la colección 2 de Landsat 5 TM. Los coeficientes de calibración se extraen de los metadatos de la imagen. Consulte [Chander et al. \(2009\)](#) para obtener detalles sobre el cálculo de la TOA.

Disponibilidad del conjunto de datos
1984-04-19T13:56:39 - 2011-11-08T14:18:44

Proveedor de conjuntos de datos
[Servicio Geológico de Estados Unidos/Google](#)

Fragmento de la colección

```
ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
```

[See example](#)

Etiquetas

global satélite terrestre Toa
Servicios de Salud de Estados Unidos

Figura 2-4: Colección del satélite landsat5 reflectancia TOA de nivel 1 de la colección 2

Explicación de cada parte:

LANDSAT: Hace referencia al programa de satélite Landsat5 operados por la NASA y USGS. El satélite recopila imágenes desde el año 1972.

LT05: Se refiere al satélite Landsat5, que fue lanzado en 1984 y opero hasta 2013.

CO2: Es la versión del conjunto de datos. “CO2” hace referencia a la colección 2 de los datos de Landsat, cual tiene actualizaciones y mejoras en los datos procesados para asegurar su calidad y precisión.

T1: Indica que los datos están en el Nivel 1, lo que significa que las imágenes han sido procesados para corregir distorsiones geométricas.

TOA: Esto se refiere a la reflexión en la parte superior de la atmosfera (Top of Atmosphere). Es un tipo de datos que muestran la radiación reflejada por la superficie de la tierra. Estos datos han sido corregidos para efectos atmosféricos y ofrecen una visión directa de la radiación reflejada desde la superficie.

Las características del satélite Landsat 5.

Tabla 2.1: Características de las bandas del satélite landsat 5

Nombre	Tamaño de los píxeles	Longitud de onda	Descripción
B1	30 metros	0.45 μm a 0.52 μm	Azul
B2	30 metros	0.52 μm a 0.60 μm	Verde
B3	30 metros	0.63 μm a 0.69 μm	Rojo
B4	30 metros	0.76 μm a 0.90 μm	Infrarrojo cercano
B5	30 metros	Entre 1.55 y 1.75 μm	Infrarrojo de onda corta 1
B6	30 metros	De 10.40 a 12.50 μm	Infrarrojo térmico 1. Se volvió a muestrear de 60 m a 30 m.
B7	30 metros	2.08 μm a 2.35 μm	Infrarrojo de onda corta 2
QA_PIXEL	30 metros		Máscara de bits de control de calidad de TM/ETM de Landsat Collection 2

.FilterData: este filtro selecciona imágenes que fueron tomados dentro del intervalo de fechas seleccionadas. Esto limita la colección a imágenes que coinciden con ese periodo.

FilterBounds: Con el código se filtra la colección de imágenes que cubren una región de interés.

.filterMetadata (“CLOUD: COVER”, “Less_Than”,10), esto filtro selecciona las imágenes que tienes menos del 10% de cobertura de nubes. Este filtro es útil para garantizar que las imágenes seleccionadas sean claras y no estén obstruidas por nubes.



Figura 2-5: Imagen seleccionada de la colección Landsat5

2.2.3. Procesamiento de imágenes

El procesamiento de imágenes satelitales se realizará en la plataforma Google Earth Engine de la siguiente manera:

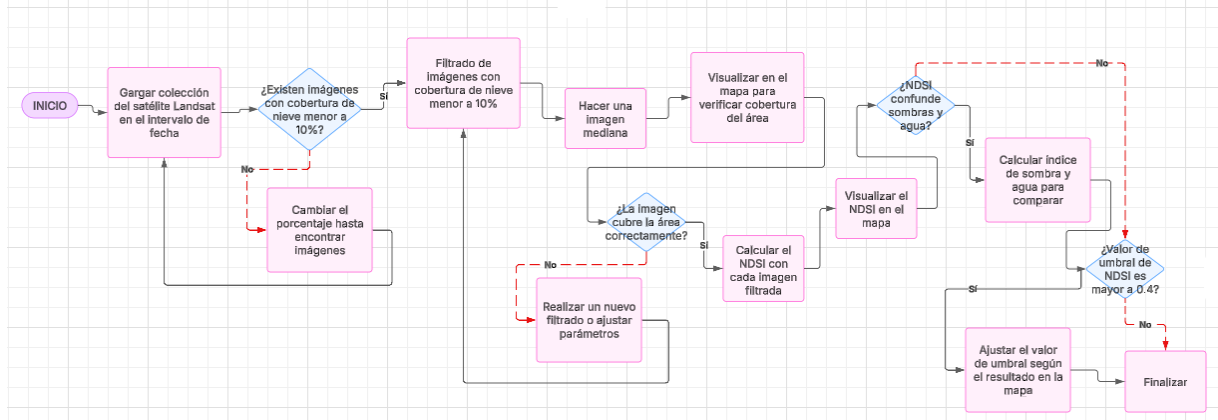


Figura 2-6: Diagrama de procesamiento de imagen satélite en el entorno GEE

Cargado la colección de imagen satelital con los parámetros y filtros correspondientes, se realiza el procesamiento de la siguiente forma.

1. Selección de bandas:

Para Landsat 5 el cálculo de índice nieve normalizado (NDSI) son la banda:

- Banda 2: Azul (Blue)

La Banda Azul (B2) en Landsat 5 es sensible a las longitudes de onda en el rango de 0.45 - 0.52 micrómetros. Esta banda captura la luz visible, que es absorbida por el agua y la nieve. Es útil porque la nieve refleja fuertemente la luz azul, lo que la hace más fácil de detectar

- Banda 5: SWIR (Infrarrojo de onda corta).

La Banda SWIR (B5) en Landsat 5 es sensible a las longitudes de onda en el rango de 1.55 - 1.75 micrómetros. Esta banda es muy útil para distinguir entre nieve y otras superficies debido a que la nieve tiene una reflectancia baja en esta banda, mientras que otras superficies, como vegetación o agua, tienen una mayor reflectancia en el SWIR.

2. Cálculo de NDSI

El NDSI se calcula con la siguiente formula:

$$NDSI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} \dots \dots \dots (3)$$

- NDSI cercano a 1: Indica áreas de nieve (por que la nieve tiene una alta reflectancia en B2 y baja en B5).

- NDSI cercano a 0 o negativo: Indica superficies no nevadas (como agua, vegetación, o suelo).

Numerador (B2-B5).

- Cuando la Banda Azul (B2) es mucho mayor que la Banda SWIR (B5), el numerador es positivo y grande. Esto ocurre cuando hay nieve, que refleja fuertemente en azul y absorbe en SWIR.
- En superficies no nevadas, el valor de la Banda SWIR será mayor que la Banda Azul, resultando en un numerador cercano a cero o negativo.

El código en GEE:

```
var ndsi = imagenMediana.normalizedDifference(['B2', 'B5']).rename('NDSI');
```

3. Visualizar el resultado

Google Earth Engine tiene la facilidad de visualizar en el mapa el índice calculado

```
Map.addLayer(ndsi, {
  min: -1.0,
  max: 1.0,
  palette: ['blue', 'white', 'green']
}, 'NDVI');
```

Min y Max: definen el rango de valores que se van visualizar en el mapa.

Pelette: Define los colores que se usan representar los valores NDSI en el mapa.

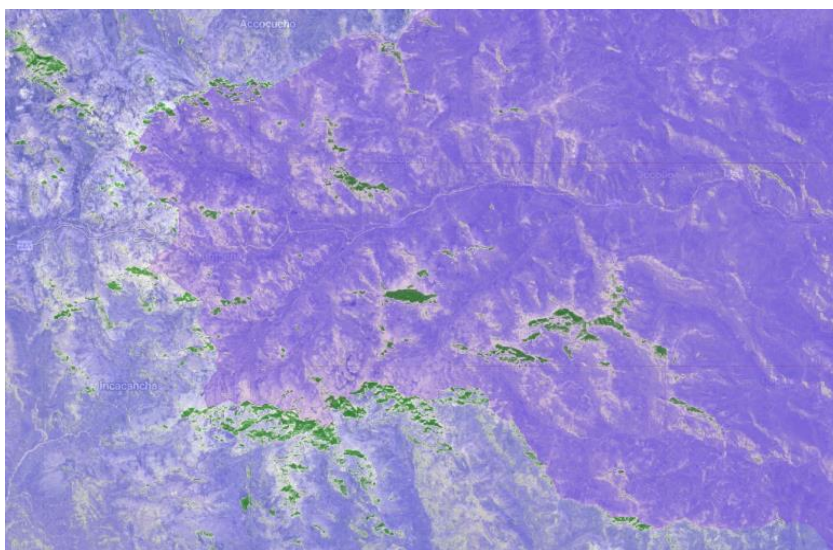


Figura 2-7: Resultado del NDSI en GEE.

2.2.4. Análisis de resultado

Una vez calculado el NDSI, se visualizará para identificar las áreas cubiertas por nieve como se ve en la figura 2.7. El color verde son las posibles áreas con nieve.

El umbral para nieve se define valores mayores a 0.4. lo que significa que cualquier área con un valor de NDSI > 0.4 se considera como cubierta por nieve.

La máscara de nieve se puede confundir con sombra y agua. Por tanto, se calculará el índice de agua y sombra de la siguiente manera en el GEE.

01. Código para el índice de sombra

```
var shadowIndex = imagenMediana.normalizedDifference(['B3', 'B4']).rename('INDICE DE SOMBRA');
```



Figura 2-8: Resultado de la imagen de sombra.

En la figura se muestra el índice de sombra, donde los calores claros son las posibles nieves y los más oscuros representan la sombra.

02. Código para el índice de agua.

```
var ndvi = imagenMediana.normalizedDifference(['B3', 'B5']).rename('AGUA');
```

Aunque ambos índices son distintos, pueden presentar valores similares en ciertas condiciones, o que puede llevar a confusión.

Tabla 2.2: Diferencia entre índice de agua y nieve

Índice	Bandas utilizadas	Propósito	Interpretación
NDWI	Banda 2 (verde), Banda 4 (infrarrojo cercano)	Detectar cuerpos de agua	Valores positivos = agua
NDSI	Banda 2 (verde), Banda 5 (SWIR)	Detectar nieve	Valores positivos = nieve

- El **agua** refleja más en la banda Verde y menos en la banda infrarrojo cercano.
- La **nieve** refleja más en la banda verde y menos en la banda corta.

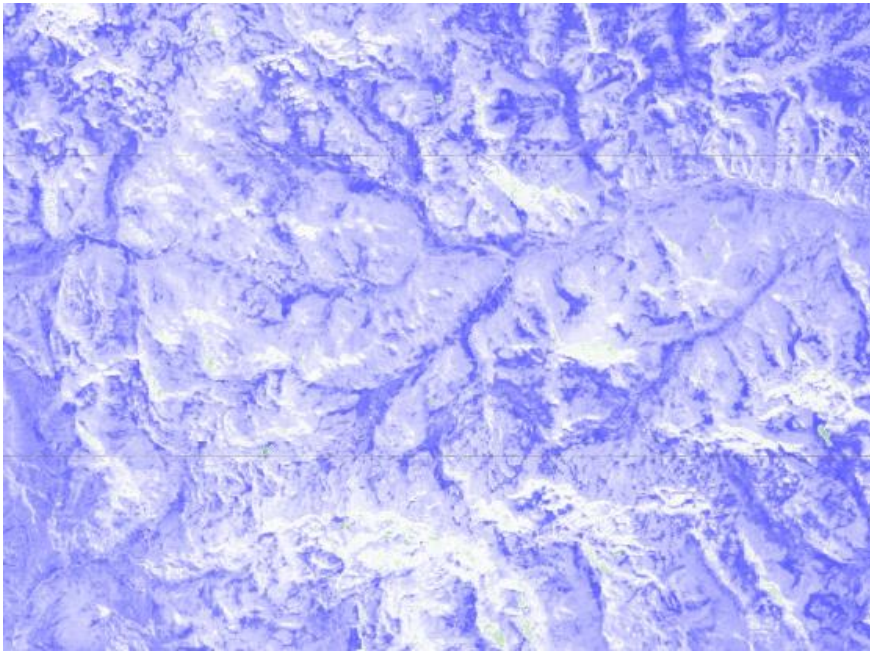


Figura 2-9: Resultado en índice de agua en GEE

En la figura mediante el código descrito se puede obtener resultado, en donde los valores altos determinan el agua y los valores bajos otros (vegetación, piedras, zona urbana, etc.)

2.2.5. Procediendo final para determinar las áreas de nieve

Después de eliminar las posibles confusiones causadas por la sombra y el agua, el siguiente paso es clasificar las áreas que están cubiertas por nieve. Luego, se cuenta la cantidad de píxeles correspondientes a las zonas de nieve. Cada píxel tiene un área determinada que depende de la resolución de la imagen de Landsat 5 (30 m), lo que significa que cada píxel cubre un área de 30 m x 30 m, es decir, 900 m².

2.2.6. Validación de resultados.

- **Compara con datos de campo:** se verifica que las áreas de nieve identificadas por el índice NDSI coincidan con las observaciones de campo.

- **Revisión visual:** Se realiza una inspección visual del mapa clasificado y compáralo con las imágenes originales para asegurar que las áreas de nieve estén correctamente identificadas.
- **Validación cruzada:** Por último, se utiliza otras fuentes de datos, como imágenes de otros satélites, para validar la exactitud de los resultados.

2.2.7. Exportación de resultado

- a. Preparación de áreas de resultado: el NDSI definido en formato ráster se convertirá a polígono en formato shapefile mediante el código:

```
var classifiedPolygons = classified.reduceToVectors({
  reducer: ee.Reducer.countEvery(), // Reducir cada conjunto de píxeles
  con el valor más frecuente
  scale: 30, // Resolución espacial
  maxPixels: 1e8,
  tileScale: 16, // Ajustar para imágenes grandes
  geometryType: 'polygon', // Asegurarse de que el tipo de geometría
  sea polígono
  crs: 'EPSG:32718', // Sistema de coordenadas (opcional)
  geometry: Cachi // Limitar la operación a la región de
  interés (ROI)
});
```

- b. Visualizar los resultados

```
Map.centerObject(Cachi, 10); // Centrar el mapa en la región de interés
Map.addLayer(classifiedPolygons, {color: 'blue'}, 'Clasificación como
Polígonos');
```

- c. Re proyectar los polígonos generados a UTM (zona 18 sur)

```
var polygons_utm = classifiedPolygons.map(function(feature) {
  return feature.transform('EPSG:32718', 0.01); // Reemplaza con el EPSG
  correcto
});
```

- d. Exportar el polígono a Google Drive

```
Export.table.toDrive({
  collection: polygons_utm, // Asegúrate de que esto es una
  FeatureCollection
  description: '15_p_2010', // Nombre del archivo exportado
```

```

fileFormat: 'SHP', // Formato del archivo (puede ser 'CSV' o 'Shapefile'
también)
folder: 'GG_EXPORT', // Carpeta de Google Drive donde se almacenará el
archivo
fileNamePrefix: 'polygons_export2010_utm', // Prefijo del archivo
exportado
selectors: ['system:index', 'mode'] // Atributos opcionales que deseas
exportar
});

```

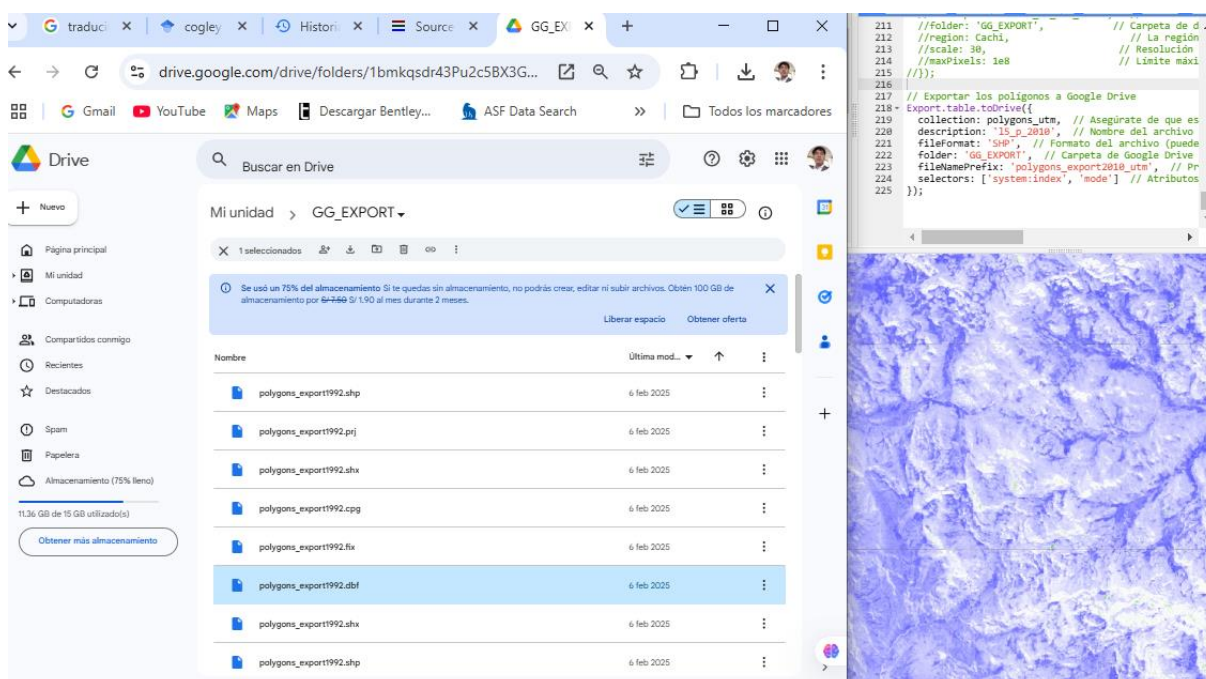


Figura 2-10: Resultado de la exportación de imagen a Google drive

2.2.8.Procedimiento para la obtención del año 2024

1. Solicitud de imágenes a la agencia CONIDA

Se realizó la solicitud Mediante la Facultad de Ciencias Agrarias con OFICIO N°005-2025-UNSCH-FCA al Señor Mayor general FAP Roberto Melgar Sheen jefe de la institución de CONIDA, asunto: Solicitud de colaboración para el suministro de productos derivados de imágenes al bachiller.

2. Obtención de imágenes

La Institución CONIDA proporciono imagen satelital multibandas en formato .TIF georeferencia y ortorectificadas.

La Agencia Espacial del Perú - CONIDA, dentro de su Sistema Satelital cuenta con los satélites PeruSAT-1 y otros por convenios cómo SPOT6, Pleiades, Kompsat3. Las cuales están

disponibles para usuarios registrados (entidades del estado) y para propósitos académicos en temas de investigación).

3. Procesamiento en ArcGIS

Las imágenes satelitales obtenidas serán procesadas mediante procedimientos como visualización, recorte o "clip" según el área de interés. Además, se llevará a cabo la creación de puntos de entrenamiento para realizar la clasificación supervisada en R, utilizando los modelos de Árbol de Decisión (Random Forest) y Máquinas de Soporte Vectorial (SVM).

A. Visualización y Carga de Imágenes:

Se cargan las imágenes satelitales multibanda (formato .TIF) en ArcGIS utilizando la opción de "Agregar ráster" en el menú de ArcMap.

Cargada la imagen se explorará las imágenes para tener una idea general de los datos (por ejemplo, diferentes bandas de espectro, como la visible y la infrarroja). Además, las combinaciones de bandas para la visualización de color natural y falso color.

B. Recorte o Clip de la Imagen:

Se utiliza la herramienta "Clip" en ArcGIS para recortar la imagen satelital. Esta herramienta te permite seleccionar el área exacta que deseas analizar.

Procedimiento: "ArcToolbox" → "Data Management Tools" → "Raster" → "Raster Processing" → "Clip".

En el panel de clip, se tendrá en la casilla "*input raster*" la imagen satelital, "*Output Extent*" el polígono de la cuenca cachi.

C. Creación de Puntos de Entrenamiento:

En ArcGIS, para realizar una clasificación supervisada, se creará puntos de entrenamiento para identificar las clases como: Nieve (1), agua (2), desértico (3), vegetación (4) y nube (5)

Se realizará manualmente, dibujando los puntos de entrenamiento sobre la imagen en color natural utilizando el editor de "Puntos".

Una vez que hayas creado los puntos, se asociará cada punto con una clase (por ejemplo, nieve, agua, etc.).

Finalmente se guardará los puntos en un shapefile o una capa de puntos que se utilizará como entrada para la clasificación.

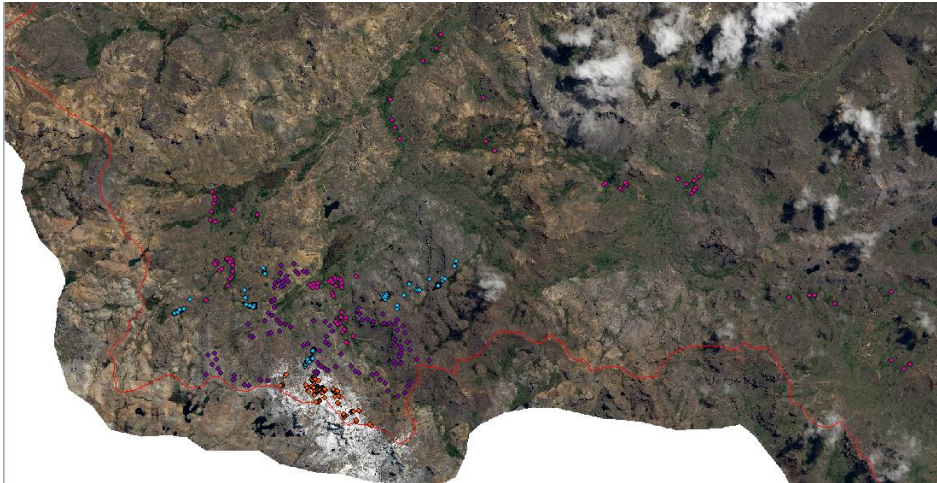


Figura 2-11: puntos en entrenamiento en la imagen satelital

D. Exportación de Datos:

El shapefile, debe de incluir las coordenadas y las clases asociadas con los puntos de entrenamiento.

4. Procesamiento de clasificación supervisado en R

R es ampliamente utilizado para análisis estadístico y aprendizaje automático (machine learning). Librerías como **randomForest** (para Random Forest) y **e1071** (para SVM) están bien desarrolladas, optimizadas y continuamente mejoradas por la comunidad.

R puede manejar grandes volúmenes de datos y realizar análisis estadísticos complejos más eficientemente. Con el uso de paquetes como raster y data.table, es posible trabajar con grandes conjuntos de datos espaciales y rasters sin mayores problemas de memoria o rendimiento.

A continuación, se muestra el procedimiento.

a. Instalación y llamado de librerías para el uso como: “raster” para manejo de archivos raster como es la imagen satelital, randomForest para la clasificación por el método que tiene el mismo nombre, “e1071” para la clasificación de vector support machine y por último “caret” para la clasificación y regresión.

- suppressMessages(library(**raster**))
- suppressMessages(library(**randomForest**))
- suppressMessages(library(**e1071**))
- suppressMessages(library(**caret**))

b. Ubicación del archivo

```
setwd("D:/TESIS IMAGENES/24.spot_2024")
```

setwd dirección a la carpeta donde se encuentra la imagen satelital

```
spot2024<-stack("oSPOT6_20240504_PMS_Clip1.tif")
print(spot2024)
```

c. Cargar puntos de entrenamiento desde un archivo Shapefile

```
puntos_entrenamiento <- readOGR("Pts_ent..shp")
plot(puntos_entrenamiento)
```

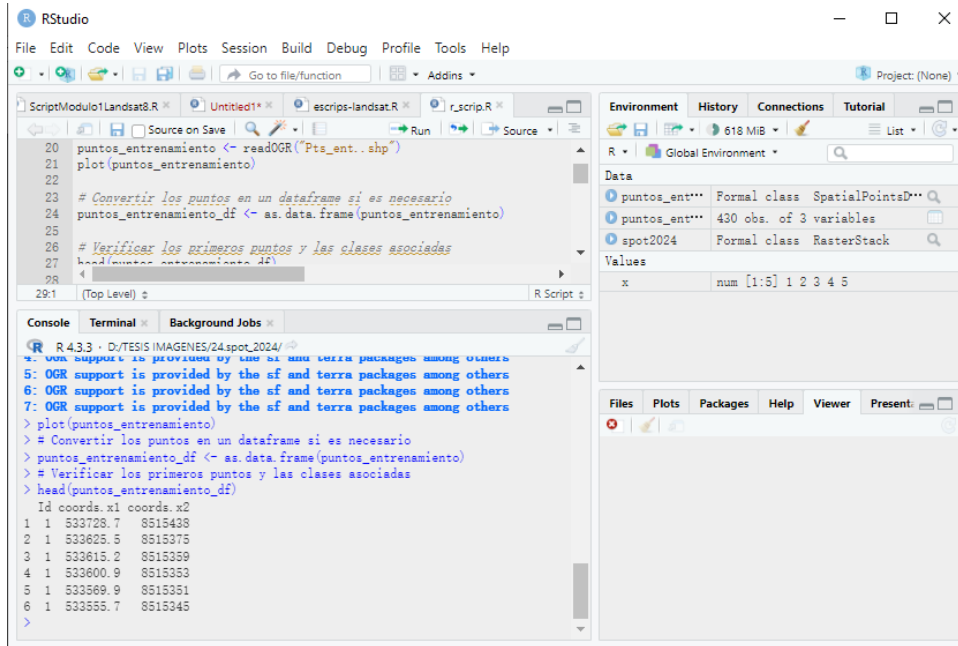


Figura 2-12: Visualización de resultado

d. Convertir los puntos en un dataframe para ver la estructura de los puntos (como clase)

```
puntos_entrenamiento_df <- as.data.frame(puntos_entrenamiento)
```

e. Extracción de los valores de bandas en los puntos de entrenamiento

Utiliza la función `extract()` del paquete `raster` para obtener los valores de las bandas de la imagen en los puntos de entrenamiento. La función toma como entrada el objeto raster y el objeto espacial de los puntos.

```
valores_puntos <- extract(spot2024, cbind(puntos_entrenamiento_df$coords.x1,
puntos_entrenamiento_df$coords.x2))
```

f. Combinar los valores extraídos con las clases

`cbind()` es una función en R que se usa para unir columnas. En este caso, lo que estás haciendo es combinar las columnas de tu data frame de puntos de entrenamiento (`puntos_entrenamiento_df`) con los valores extraídos de las bandas (`valores_puntos`).

```
puntos_entrenamiento_df <- cbind(puntos_entrenamiento_df, valores_puntos)
```

Para el modelo de SUPPORT VECTOR MACHINE (SVM) el procedimiento es la misma que Random Forest. A continuación, se muestra el procedimiento.

Desde “a” hasta “h” el procedimiento es el mismo para las dos modelos.

g. Entrenar el modelo Support Vector Machine (SVM)

```
modelo_svm <- svm(Id ~ oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_1 +
  oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_2 +
  oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_3 +
  oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_4,
  data = puntos_entrenamiento_df,
  kernel = "linear", # Usar un kernel lineal
  cost = 1, # Parámetro de penalización
  scale = TRUE) # Estandarizar las variables
```

Explicación

- **svm():** Función para entrenar el modelo SVM.
- **Id ~ oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_1 + ...:** La variable dependiente es Id (la clase a predecir), y las variables independientes son las bandas espectrales del satélite SPOT6.
- **data = puntos_entrenamiento_df:** Indica que los datos de entrenamiento están en puntos_entrenamiento_df.
- **kernel = "linear":** Se utiliza un kernel lineal para separar las clases.
- **cost = 1:** Parámetro de penalización que controla la flexibilidad del modelo. Un valor de 1 es un buen punto de partida.
- **scale = TRUE:** Las variables se estandarizan antes de entrenar el modelo.

SVM busca un hiperplano que separa las clases, maximizando el margen entre ellas. Utiliza los vectores de soporte (puntos cercanos al hiperplano) para determinar la separación.

h. Predicciones en los puntos de entrenamiento

Utiliza el modelo SVM (modelo_svm) para hacer predicciones sobre los puntos de entrenamiento almacenados en el dataframe puntos_entrenamiento_df.

```
predicciones <- predict(modelo_svm, newdata = puntos_entrenamiento_df)
```

i. Evaluar el modelo con la matriz de confusión

Calcula la matriz de confusión para evaluar el rendimiento del modelo, comparando las predicciones con las etiquetas reales (puntos_entrenamiento_df\$Id).

```
confusionMatrix(predicciones, puntos_entrenamiento_df$Id)
```

j. Aplicar el modelo SVM a todo el raster

Aplica el modelo SVM a un conjunto de datos de tipo raster (en este caso, spot2024), generando un raster de predicción.

```
prediccion_raster <- predict(spot2024, modelo_svm)
```

k. Visualizar la predicción en un mapa

```
plot(prediccion_raster, main = "Mapa de Clasificación - SVM")
```

l. Guardar el raster de predicción en formato .tif

El resultado se guardará en formato ráster para luego hacer los procesamientos en ArcGIS para llegar al objetivo.

```
writeRaster(prediccion_raster, filename = "prediccion_raster_svm.tif", format = "GTiff",  
overwrite = TRUE)
```

5. Procesamiento en el software ArcGIS

Una vez guardado el resultado de clasificación, se abrirá en ArcGIS se realizará los siguientes procedimientos:

a. Clasificación según los resultados de datos.

Este paso probablemente se refiere a la re-clasificación de los valores de los píxeles en el raster de predicción para identificar diferentes clases como (nieve, vegetación, agua, escarpado y nube). Aquí se tiene las herramientas que puedes usar en ArcGIS para clasificar el raster:

Reclassify (Reclasificar raster):

Pasos ArcToolbox > Spatial Analyst Tools > Reclassify.

Selecciona el raster que acabas de guardar (prediccion_raster_svm.tif).

En el campo "Reclassification", se defenira los rangos de valores para cada clase (por ejemplo, 1 = nieve, 2=Agua, 3 = escarpado, 4=vegetación y 5=nube).

Esto te permitirá crear un nuevo raster donde los valores se agrupan según las clases que necesitas.

b. Convertir el formato raster a polígono.

Este paso es importante para obtener una representación vectorial de las áreas clasificadas, para analizar sus formas y áreas con mayor detalle. Para convertir un raster en polígono en ArcGIS, puedes hacer lo siguiente:

Raster to Polygon:

Se ira a ArcToolbox > Conversion Tools > From Raster > Raster to Polygon.

Selecciona tu raster de clasificación (la re-clasificación).

El resultado será un archivo vectorial en formato shapefile que representa las áreas clasificadas (como nieve, por ejemplo).

c. Creación de área total de polígonos que representa la nieve.

Una vez que hayas convertido el raster en polígonos, puedes calcular el área total de las zonas que representan nieve, de la siguiente manera:

En la tabla de atributos del shapefile resultante. Agrega un campo nuevo de tipo "Double" llamado "Area" (si no existe). Haz clic derecho sobre el nuevo campo y selecciona "Field Calculator", para seleccionar el área en km². Luego, puedes usar Summary Statistics en la tabla de atributos (desde Selection > Summary Statistics) para obtener la suma de las áreas seleccionadas.

2.3.Procedimiento para el cálculo de línea de equilibrio

2.3.1.Recopilación de datos climáticos

- **Temperaturas:** Obtener datos de temperaturas anuales o mensuales en las estaciones meteorológicas cercanas a los nevados. La temperatura media anual o la temperatura de los meses más cálidos y fríos son fundamentales.
- **Precipitación:** Recopilar datos de precipitación (anuales o mensuales). Las precipitaciones en forma de nieve son cruciales para la acumulación de nieve.

2.3.2.Preparación de datos

1. Cargar el MDT:

- El Modelo Digital de Terreno (MDT) debe de cubrir el área de estudio.
- Se debe de asegurarse de que el MDT tenga la misma proyección espacial que el shapefile de área de nieve (WGS_1984_UTM_Zone_18S).

2. Cargar el Shapefile de Área de Nieve:

- Se importará el shapefile que contiene el área de nieve (es decir, la capa de nieve detectada en las imágenes).

- Verifica que el shapefile esté en el sistema de coordenadas adecuado (WGS_1984_UTM_Zone_18S)

2.3.3. Cálculo del ELA

1. Cortar el MDT con el Shapefile de Área de Nieve:

Se utiliza la herramienta Extract by Mask para extraer solo los valores de elevación dentro del área de nieve definida por el shapefile.

- Herramienta: **Spatial Analyst Tools > Extraction > Extract by Mask.**
- Esta operación te dará una capa raster que solo contiene valores de elevación dentro de la zona donde hay nieve.

2. Analizar las Altitudes del ELA:

Para determinar el ELA, se identificará la altitud en la que la acumulación de nieve es igual al derretimiento.

Usa la herramienta Zonal Statistics para calcular estadísticas (como la media) de la capa de elevación recortada dentro del área de nieve. Esto te dará un valor de altitud promedio de la nieve en esa área.

Herramienta: Spatial Analyst Tools > Zonal Statistics as Table.

Crea una tabla que te proporcione la altitud promedio de nieve dentro del área seleccionada.

3. Identificación de Variación Temporal:

- Se realizará este cálculo para cada uno de los años en tu periodo de estudio (1990, 2000, 2010 y 2024), repitiendo los pasos anteriores para cada capa de nieve correspondiente a cada año.
- En este se tiene imágenes de nieve de diferentes años, se cortará el MDT usando el shapefile generado para cada año y calcula la altitud del ELA correspondiente a ese año correspondiente.

4. Integración con datos climáticos:

Obtener los datos climáticos (Temperatura, precipitación, etc.).

5. Análisis de correlación entre ELA y Parámetros climáticos:

Se relacionará la altitud ELA con los parámetros climáticos según el año que corresponda, para análisis el comportamiento de los datos vs la variación de ELA.

Esto permitirá identificar si la temperatura más alta o la disminución de precipitación correlacionan con el ascenso del ELA.

6. Análisis temporal

1. Crear una serie temporal del ELA:

- Para cada año (1990-2024), repite el cálculo del ELA y guarda los resultados en tablas o gráficos.
- Puedes crear un gráfico de líneas que muestre el comportamiento del ELA a lo largo del tiempo, con los valores de altitud del ELA en el eje Y y los años en el eje X.

2. Análisis de tendencias:

- Se usará herramientas estadísticas en ArcGIS o software adicional (como Excel o R) para analizar la tendencia de los cambios del ELA.
- Realiza un análisis de regresión para determinar si hay una relación significativa entre el ascenso del ELA y el cambio en los parámetros climáticos (temperatura, precipitación).

7. Visualización y presentación de resultados

1. Visualización de resultados espaciales:

- Mapas de ELA: Genera mapas temáticos del ELA para cada año usando las capas raster de elevación y las áreas de nieve.
- Comparar Mapas de ELA a lo Largo del Tiempo: Usa mapas comparativos para ilustrar cómo el ELA ha ascendido a lo largo de los años.
- Gráficos de Tendencia: Crea gráficos para visualizar el comportamiento temporal del ELA, mostrando las altitudes promedio en cada periodo.

2. Generar un reporte final:

- Elabora un reporte que resuma los cálculos de ELA para cada año, las correlaciones climáticas observadas y las tendencias de cambio del ELA.
- Incluye los mapas y gráficos generados en ArcGIS para ilustrar tus hallazgos.

2.4.Procedimiento para el cálculo de área de acumulación (AA)

2.4.1.Análisis de la evolución de las áreas de nevados

- **Análisis temporal de las áreas de los nevados:** Se examina cómo las áreas cubiertas por nieve han cambiado de 1990 a 2024 mediante las imágenes satelitales de diferentes años para calcular la extensión de nieve y el área cubierta por los nevados.
- **Cálculo del área de acumulación de nieve:** Estima la cantidad de nieve que está acumulada por encima de la línea de equilibrio en cada año, basándote en la información sobre las áreas de los nevados y las condiciones climáticas de esos años.

- **Correlación con las variables climáticas:** Se relacionará los cambios en las áreas de nieve con las variaciones de las temperaturas y precipitaciones.

2.4.2. Validación cruzada con los datos de glaciares en Perú

Es fundamental comparar los resultados obtenidos con los mapas glaciares oficiales proporcionados por el INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña) o la UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos). Al aplicar un proceso de validación cruzada, puedes medir la precisión de tus modelos y confirmar la consistencia de los cambios en la cobertura glacial a lo largo del tiempo.

CAPITULO III

RESULTADO

3.1. Volumen de glaciación en el año 1990.

3.1.1. Imágenes seleccionadas en GEE

En Google earth engine con el filtro de la fecha y la cobertura de nube <10% se tuvo como resultado lo siguiente:

Tabla 3.1: Imágenes filtradas para el año 1990

Nº	Fecha	Hora	Cubre el area
00:	19/06/1990	14:19:09	NO
01:	06/08/1990	14:18:59	NO
02:	02/02/1990	14:27:04	SI
03:	09/05/1990	14:25:23	SI
04:	25/05/1990	14:25:20	SI
05:	28/07/1990	14:25:13	SI
06:	13/08/1990	14:25:08	SI

En la tabla podemos notar que existen 7 imágenes que cubren la zona, pero hay dos imágenes N°0 y 1 que no cubren, por tanto, se hará el promedio de imágenes con los números de imágenes 2,3,4,5 y 6.

Tabla 3.2: Diferencia de trabajar con una imagen y promedio de imagen.

Aspecto	Usar Solo una Imagen Filtrada	Trabajar con el Promedio de Imágenes
Representación de variabilidad	Representa solo un momento específico, sin captar cambios estacionales o interanuales.	Mejora la representación de la variabilidad espacial y temporal.
Condiciones climáticas	Depende de la calidad de la imagen (puede tener nubes, sombras, etc.).	Reduce el impacto de condiciones climáticas atípicas como nubes.
Riesgo de sesgo	Alto riesgo de sesgo si la imagen seleccionada no es adecuada (por ejemplo, mala calidad o nubes).	Menor riesgo de sesgo, ya que se promedian varias imágenes.

En la siguiente imagen se muestra la imagen en el mapa de GEE, cual cubre la zona a analizar, la imagen muestra con la combinación de bandas B4, B3 Y B2, que es la composición de color en falso color.

La nieve refleja fuertemente en las bandas azul y verde, lo que provoca que, en la composición de falso color, las áreas cubiertas por nieve puedan mostrarse con un brillo prominente.

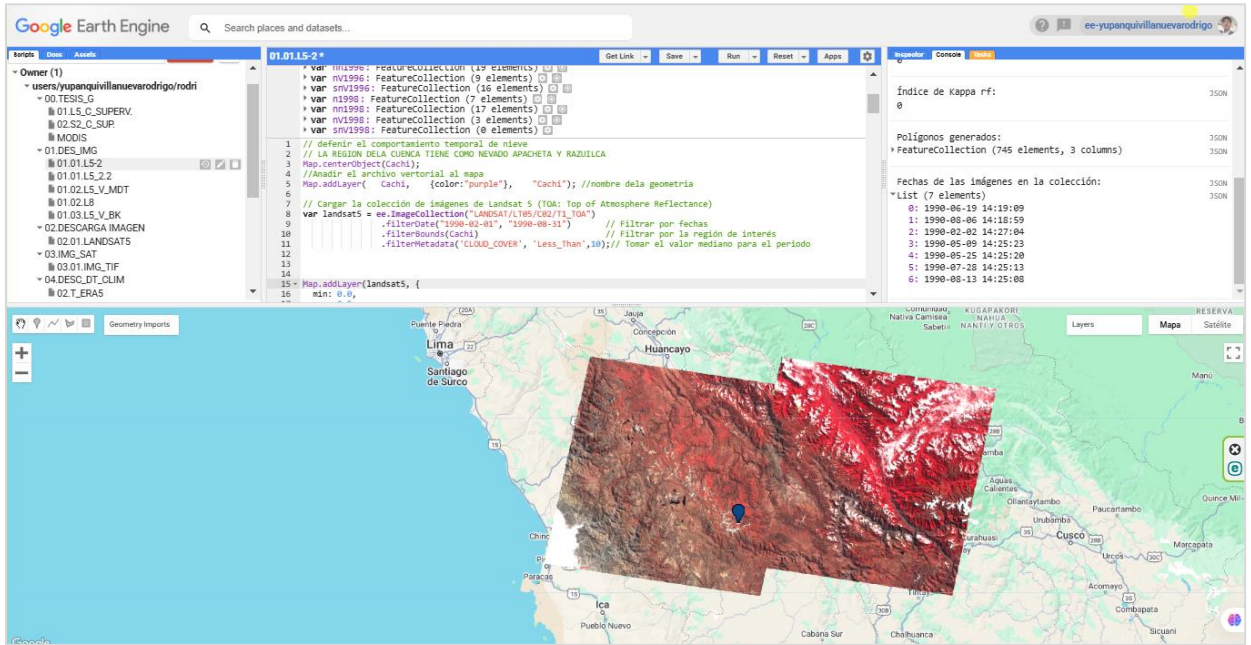


Figura 3-1: Imágenes en el mapa de la plataforma GEE en composición de color de falso color.

A continuación, se muestran todas las imágenes filtradas en falso color que cubren la zona sin presencia de nubes, seguidas por el resultado obtenido al promediar estas imágenes.

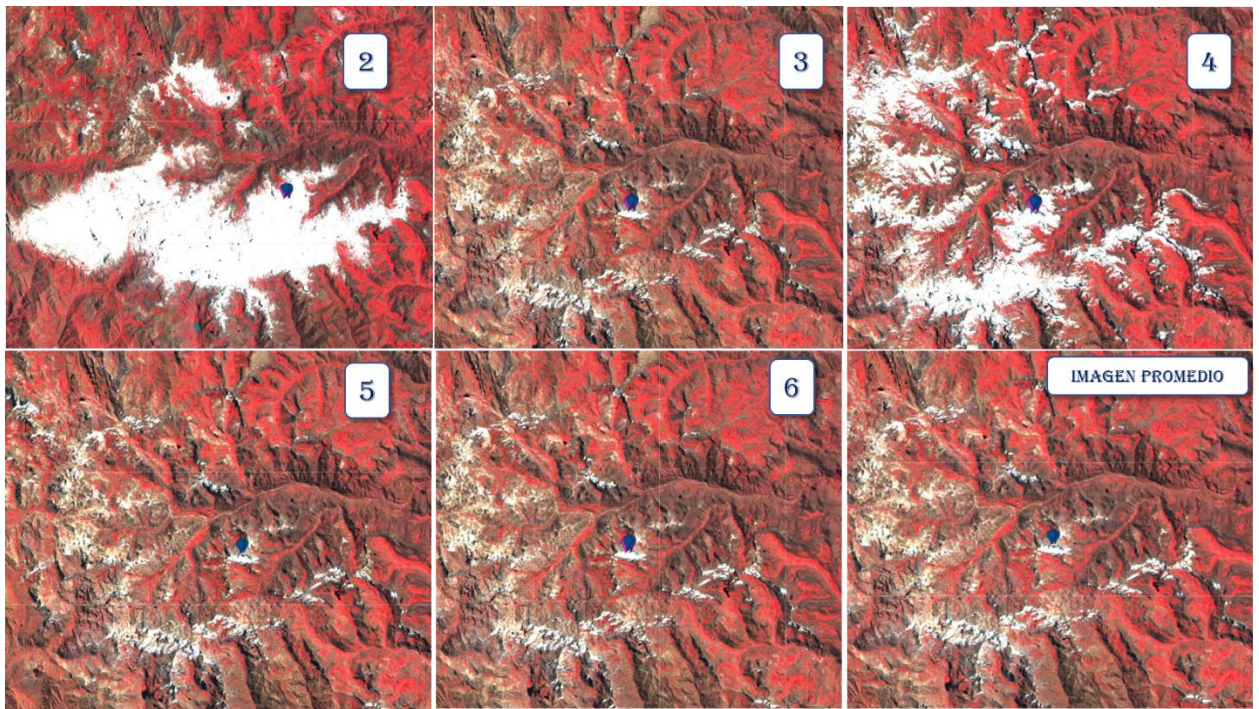


Figura 3-2: Imágenes en falso color (2, 3, 4, 5,6 y el promedio) en falso color.

3.1.2.Resultado de procesamiento de imagen satelital

Una vez obtenidas las imágenes promedio, se procederá a realizar el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) en Google Earth Engine (GEE) para identificar las áreas cubiertas por nieve en la zona.

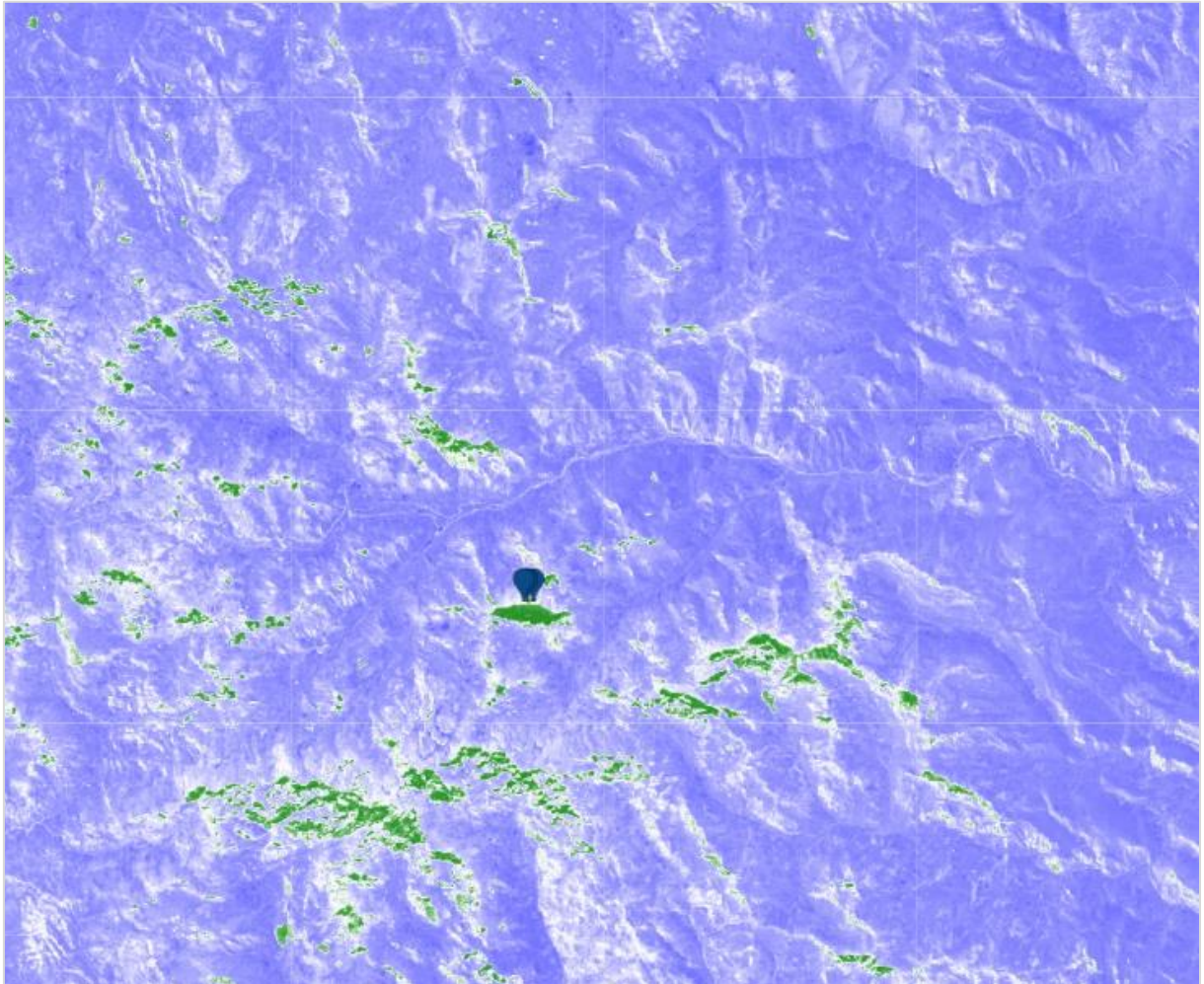


Figura 3-3: Resultado del cálculo de NDSI para el año 1990 para la imagen elegida.

Interpretación:

- Nieve: Los valores de NDSI cercanos a 1 (que corresponden a áreas de nieve) se muestran en verde.
- Vegetación: Las áreas vegetadas, que tienen un valor de NDSI positivo, se representan en azul.
- Agua o suelos no nevados: Las áreas de agua o suelos no cubiertos por nieve (con valores de NDSI cercanos a -1) se representan en blanco.

Desventajas del NDSI en la Identificación de Nieve

- Confusión entre nieve y agua:

Nieve y agua tienen un comportamiento espectral similar en las bandas que se utilizan para calcular el NDSI:

- Nieve: Tiene una alta reflectancia en la banda azul (B2) y una baja reflectancia en la banda SWIR (B5).
- Agua: Tiene una alta reflectancia en la banda SWIR (B5) y una baja reflectancia en la banda azul (B2).

Esta similitud en las bandas puede hacer que algunas áreas de agua se identifiquen erróneamente como nieve, especialmente si el agua está en zonas de alta latitud o en áreas donde la radiación solar es baja y la reflectancia en la banda azul es débil.

3.1.3.Resultado de la clasificación SVM

Para mejorar la clasificación de zonas de nieve, se empleó el método de Support Vector Machine (SVM), que es un algoritmo de aprendizaje supervisado muy efectivo para la clasificación de imágenes satelitales. Este método permite una clasificación más precisa de las zonas de nieve, especialmente en áreas donde el cálculo de NDSI podría no ser suficiente para diferenciar entre nieve y otras superficies, como agua o suelo.

3.1.3.1.Los puntos de entrenamiento.

La imagen muestra los puntos de entrenamiento utilizados en el software ArcGIS 10.8, los cuales se basan en una imagen del año 1990 capturada en falso color. Esta imagen proporciona una representación visual detallada de distintas categorías geográficas, cada una clasificada con un identificador único. Los puntos de entrenamiento se distribuyen según las siguientes categorías: id=1 (nieve), que representa las áreas cubiertas por nieve, id=2 (agua), que corresponde a las zonas de agua visible, id=3 (zona con cobertura), que incluye las áreas donde la vegetación o alguna cobertura terrestre es predominante, id=4 (zona desnuda), que se refiere a las zonas sin cobertura vegetal o estructural, y id=5 (vías de acceso), que marca las rutas de comunicación o transporte presentes en el área de interés. En total, se han registrado 750 puntos de entrenamiento distribuidos a lo largo del área de estudio, lo que permite realizar un análisis detallado y preciso de las diferentes coberturas y características geográficas del territorio en cuestión.

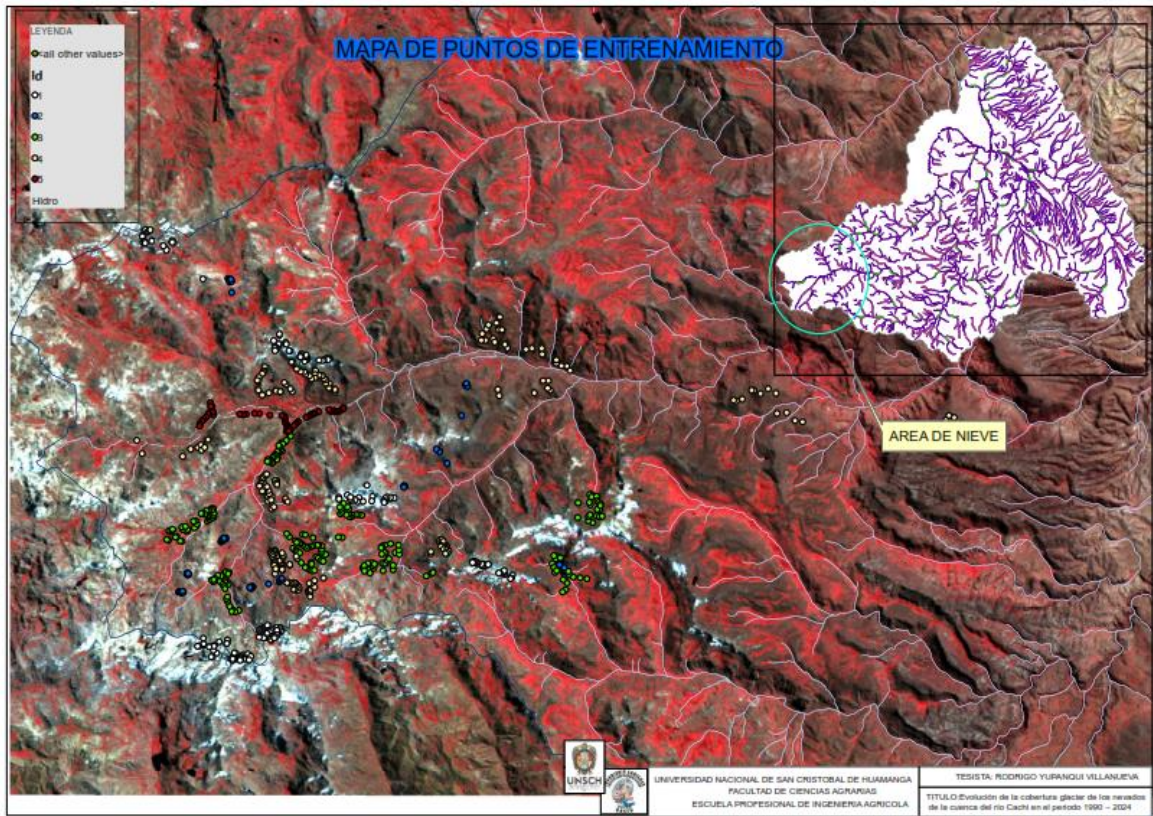


Figura 3-4: Puntos de entrenamiento en la imagen.

3.1.3.2. Bandas de las imágenes satelitales

De igual forma en la imagen siguiente se muestra las bandas de la imagen landsat5 de las 8 bandas correspondientes que fueron descargados de GGE.

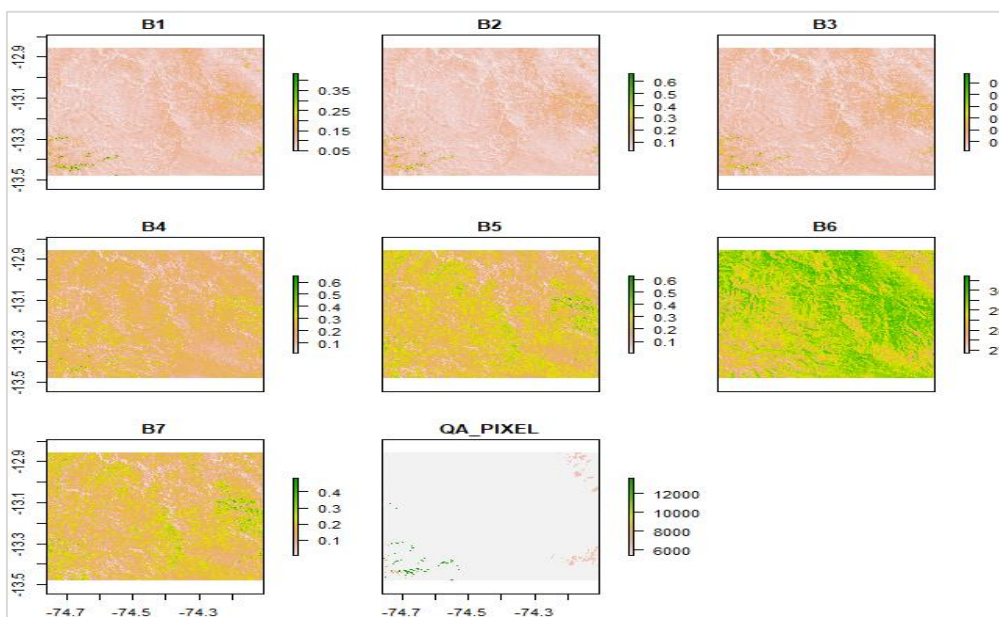


Figura 3-5: Bandas de la imagen satelital Landsat 5

3.1.3.3. Matriz de confusión

La matriz de confusión se utiliza para evaluar la precisión del modelo de clasificación, comparando las predicciones (presentadas en las filas) con los valores reales (que se encuentran en las columnas) dentro de un conjunto de datos de prueba. Cada valor en la matriz representa el número de veces que el modelo hizo una predicción para una categoría específica, permitiendo identificar tanto los aciertos como los errores de clasificación. A continuación, se muestra el resultado de la matriz de confusión.

Tabla 3.3: Matriz de confusión de la clasificación SVM del año 1990

Predicciones	referencias				
	1	2	3	4	5
1	188	0	0	0	0
2	0	76	0	1	0
3	0	0	222	0	0
4	0	1	0	207	0
5	0	0	0	4	51

- Predicción 1: De todas las veces que el modelo predijo la clase 1, 188 eran realmente clase 1. No hubo predicciones incorrectas en otras clases para la clase 1.
- Predicción 2: De todas las veces que el modelo predijo la clase 2, 76 eran realmente clase 2, y hubo 1 error al predecir la clase 4 (es decir, el modelo confundió clase 2 con clase 4).
- Predicción 3: De todas las veces que el modelo predijo la clase 3, 222 eran realmente clase 3. No hubo errores en las otras clases.
- Predicción 4: De todas las veces que el modelo predijo la clase 4, 207 eran realmente clase 4, y hubo 1 error en la clase 2.
- Predicción 5: De todas las veces que el modelo predijo la clase 5, 51 eran realmente clase 5, y hubo 4 errores en la clase 4.

La estadística muestra que el modelo acertó en el 99.2% de las predicciones. Indicando que el modelo tiene un alto rendimiento.

El intervalo de confianza indica que, con un 95% de certeza, la exactitud del modelo se encuentra entre 98.27% y 99.71%. Este intervalo muestra que la exactitud es muy confiable y consistente.

El valor de Kappa mide la concordancia entre las predicciones del modelo y los valores reales, corrigiendo por la coincidencia aleatoria. Un valor de Kappa cercano a 1 (en este caso, 0.9894)

indica una excelente concordancia entre las predicciones y las etiquetas reales, lo que refuerza que el modelo tiene un rendimiento sobresaliente.

3.1.3.4.Métricas por clase

Tabla 3.4: Matriz de clase del SVM en la clasificación para imagen satelital landsat5

	clase1	clase2	clase3	clase4	clase5
Sensitivity	1	0.987	1	0.9764	1
Specificity	1	0.9985	1	0.9981	0.99428
Pos Pred Value	1	0.987	1	0.9952	0.92727
Neg Pred Value	1	0.9985	1	0.9908	1
Prevalence	0.2507	0.1027	0.296	0.2827	0.068
Detection Rate	0.2507	0.1013	0.296	0.276	0.068
Detection					
Prevalence	0.2507	0.1027	0.296	0.2773	0.07333
Balanced Accuracy	1	0.9928	1	0.9873	0.99714

- El modelo muestra muy buenos resultados en términos de sensibilidad, especificidad y precisión para la mayoría de las clases.
- Clase 1, 3 y 5 tienen un rendimiento sobresaliente con sensibilidad y especificidad perfectas.
- Clase 2 tiene una ligera disminución en la sensibilidad, pero sigue siendo muy alta (98.7%).
- Clase 4 tiene una sensibilidad ligeramente más baja (97.64%) y una excelente especificidad (99.81%).

3.1.3.5.Finalmente, el resultado final de la clasificación SVM

La grafica muestra el resultado de clasificación, en donde el color blanco es la nieve, verde es el área verde o bofedales, Azul es el agua y amarillo zonas desnudas.

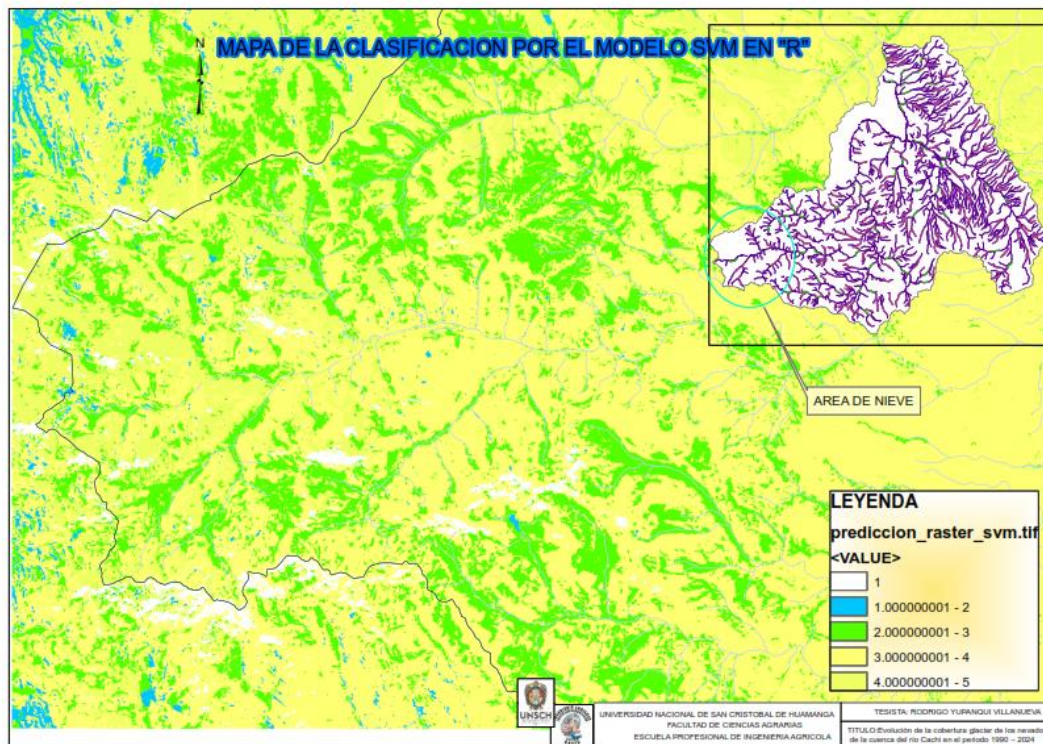


Figura 3-6: Resultado de la clasificación supervisada por support vector machine

3.1.4. Comparación de la clasificación por SVM y cálculo de NDSI

Según los resultados obtenidos de ambos métodos, cada uno presenta ciertas limitaciones que afectan su desempeño en situaciones específicas. En el caso del cálculo del NDSI, se observó que hubo una confusión notable entre las áreas de agua y sombra al compararlo con una imagen de alta resolución. Este problema surgió debido a la similitud en las reflectancias espectrales entre estas dos clases en las bandas utilizadas para calcular el índice, lo que hizo difícil distinguirlas de manera precisa.

Por otro lado, el modelo de clasificación SVM demostró ser más eficaz en la diferenciación de clases, ya que, al ser un método supervisado, permitió ajustar mejor el modelo a las características espectrales de cada clase, logrando una mayor precisión en la clasificación. A través de un proceso de entrenamiento adecuado con datos representativos, el modelo SVM alcanzó un resultado superior en comparación con el NDSI, especialmente en áreas con características complejas como agua y sombra.

Debido a la mejor precisión y confiabilidad del modelo SVM, se decidió continuar con su uso para el análisis de la clasificación del año 1990, ya que se ajusta mejor a las necesidades de diferenciación y precisión en este tipo de estudios. En resumen, mientras que el NDSI es útil

para tareas rápidas y específicas, el modelo SVM ofrece una mayor flexibilidad y exactitud, especialmente cuando se trata de clasificar áreas con condiciones espectrales complejas.

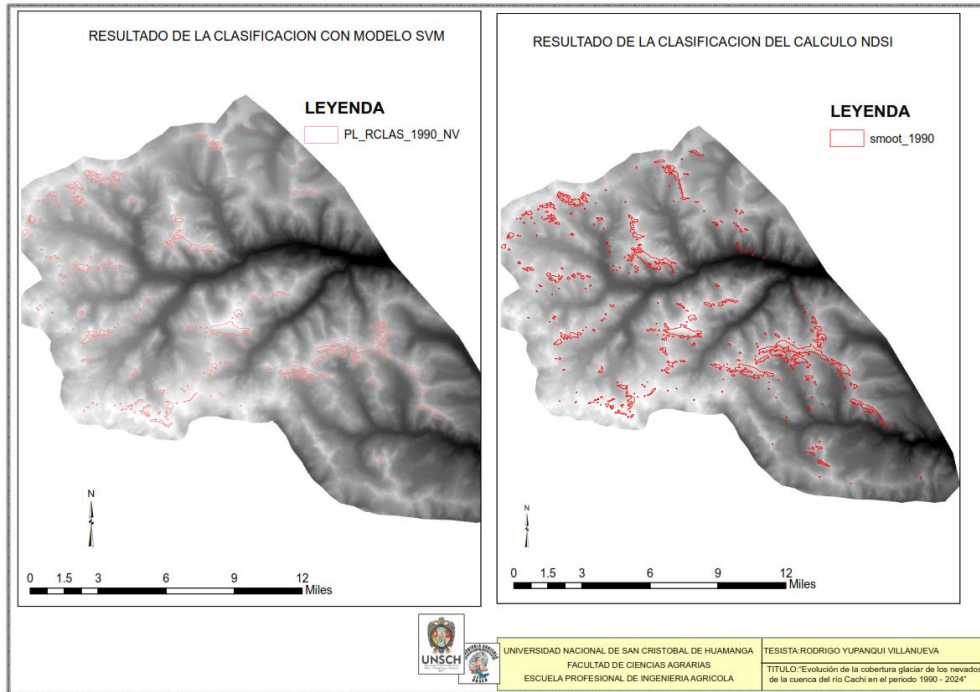


Figura 3-7: Comparación del resultado del área de nieve

3.1.5. Cálculo de área glaciar del año 1990 con la clasificación SVM.

El cálculo del área glaciar para el año 1990 es de 11.99 km². Este valor representa la extensión total de la masa de hielo o glaciares en esa zona específica en ese período, basado en el análisis realizado utilizando las imágenes y métodos de clasificación correspondientes.

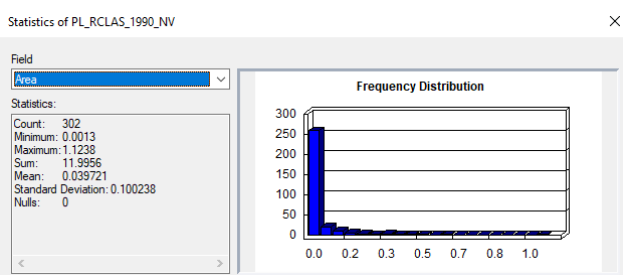


Figura 3-8: Datos estadísticos del área de glaciar año 1990

3.1.6. Volumen del glaciar

El volumen de glaciar se calculará con la ecuac. 01.

$$V = CxS^Y$$

Datos:

- S (area_1990) = 11.99 km²
- C = de la **tabla 1.3.** (0.138408x10³)
- γ =1.38 constante

Como se está trabajando con glaciares que se encuentran en retroceso en regiones tropicales, como los glaciares de montaña en la Sierra de Perú o en otras áreas tropicales de los Andes, la constante C a utilizar sería 138408 m³/km²

Este valor se aplica debido a que estos glaciares han estado experimentando una pérdida significativa de masa y volumen debido al cambio climático y al aumento de las temperaturas, lo que afecta su comportamiento geométrico y su volumen.

Por lo tanto, el volumen de glaciar para el año 1990 es:

$$V = 138408 \times 11.99^{1.38}$$

$$V = 4265124.038 \text{ m}^3$$

3.2. Volumen de glaciar en el año 2000

3.2.1. Selección de imágenes satelitales

Se utilizarán dos imágenes satelitales correspondientes a las fechas indicadas en la tabla, las cuales cubren la zona glaciar. Se aplicó un filtro a la imagen del año 2000, seleccionando aquellas con un porcentaje de nubes menor al 10%, con el fin de obtener una imagen clara que permita identificar de manera precisa las áreas cubiertas por el glaciar.

Tabla 3.5: Resultado de las imágenes filtradas para el año 2000 en GEE

N°	Fecha	Hora	Cubre el área
0:	17/08/2000	14:36:39	NO
1:	04/05/2000	14:40:42	SI
2:	21/06/2000	14:41:40	SI

3.2.2. Resultado de procesamiento de imagen satelital

Una vez obtenidas las imágenes promedio, se procederá a realizar el cálculo del Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) en Google Earth Engine (GEE) para identificar las áreas cubiertas por nieve en la zona.

3.2.3. Resultado mediante la clasificación SVM

Para mejorar la clasificación de zonas de nieve, se empleó el método de Support Vector Machine (SVM), que es un algoritmo de aprendizaje supervisado muy efectivo para la clasificación de imágenes satelitales. Este método permite una clasificación más precisa de las

zonas de nieve, especialmente en áreas donde el cálculo de NDSI podría no ser suficiente para diferenciar entre nieve y otras superficies, como agua o suelo.

3.2.3.1. Puntos de entrenamiento

Se emplearon un total de 610 puntos de entrenamiento distribuidos en el área de estudio, los cuales fueron seleccionados a partir de la imagen de Landsat 5 en falso color. Esta imagen permitió distinguir con mayor claridad las diferentes coberturas del terreno, especialmente las correspondientes a las áreas glaciares. Los puntos de entrenamiento se utilizaron para entrenar un modelo de clasificación, asegurando la precisión en la identificación de las zonas glaciares. A continuación, se presenta un desglose detallado de los procedimientos y características de la selección de estos puntos de entrenamiento.

Tabla 3.6: Cantidad de puntos de entrenamiento para cada clase (Año 2000)

	clase 1 Nieve	clase 2 Agua	clase 3 Veg	clase 4 Desnudo	clase 5 nube
N° de puntos	218	55	117	199	21

3.2.3.2. Matriz de confusión

La matriz de confusión es una herramienta utilizada para medir la precisión del modelo de clasificación, al comparar las predicciones (que aparecen en las filas) con los valores reales (ubicados en las columnas) de un conjunto de datos. Cada valor dentro de la matriz indica cuántas veces el modelo clasificó correctamente o incorrectamente una muestra en una categoría específica. A continuación, se presentan los resultados obtenidos de la matriz de confusión

Tabla 3.7: Resultado de matriz de confusión año (2000)

Predicciones	Referencias				
	1	2	3	4	5
1	218	0	0	0	0
2	0	55	0	1	0
3	0	0	117	0	0
4	0	0	0	198	0
5	0	0	0	0	21

Interpretación

- **Clase 1 (Nieve):**

El modelo ha clasificado correctamente 218 píxeles como nieve, lo que muestra una precisión excelente para esta clase.

No hay confusión con otras clases, lo que indica que el modelo es muy bueno para identificar áreas de nieve.

- **Clase 2 (Agua):**

El modelo ha clasificado correctamente 55 píxeles como agua.

Hay 1 error de clasificación donde el modelo ha confundido el agua con suelo desnudo (clase 4), pero en general, el rendimiento en esta clase es bueno.

- **Clase 3 (Vegetación):**

El modelo ha clasificado correctamente 117 píxeles como vegetación, sin errores con otras clases.

Esto sugiere que el modelo puede diferenciar bien entre vegetación y otras clases.

- **Clase 4 (Suelo desnudo):**

El modelo ha clasificado correctamente 198 píxeles como suelo desnudo.

No hay errores, lo que indica que el modelo tiene un buen rendimiento al identificar suelo desnudo, diferenciándolo bien de otras clases.

- **Clase 5 (Nubes):**

El modelo ha clasificado 21 píxeles como nubes, con una precisión excelente.

Precisión

- **0.9984:** Significa que el modelo tiene una precisión del 99.84% en general, lo que indica que la mayoría de las predicciones realizadas por el modelo son correctas.

Es un resultado excelente, ya que un valor tan alto sugiere que el modelo funcionó muy bien.

Kappa:

- **0.9977:** El índice Kappa mide la concordancia entre las predicciones del modelo y las verdaderas etiquetas, ajustando por el azar. Un valor cercano a **1** significa una excelente concordancia. En este caso, **0.9977** es un valor excelente, lo que indica que el modelo tiene una precisión muy alta en comparación con lo que se esperaría por azar.

3.2.3.3. Métricas por clase

Tabla 3.8: Valores del resultado de clasificación SVM año 2000

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Sensitivity	1	1	1	0.995	1
Specificity	1	0.9982	1	1	1
Pos Pred Value	1	0.98214	1	1	1
Neg Pred Value	1	1	1	0.9976	1
Prevalence	0.3574	0.09016	0.1918	0.3262	0.03443
Detection Rate	0.3574	0.09016	0.1918	0.3246	0.03443
Detection					
Prevalence	0.3574	0.0918	0.1918	0.3246	0.03443
Balanced Accuracy	1	0.9991	1	0.9975	1

Interpretación

Clase 1 (Nieve):

- Sensibilidad (Recall): 1.0000

El modelo tiene una sensibilidad perfecta en la clase 1, es decir, identifica todas las instancias de nieve sin omisiones.

- Especificidad: 1.0000

El modelo tiene una especificidad perfecta, lo que significa que cuando no predice nieve, está prediciendo correctamente que no es nieve.

- Valor Predictivo Positivo (Pos Pred Value): 1.0000

Cuando el modelo predice nieve, lo hace correctamente en el 100% de los casos.

- Valor Predictivo Negativo (Neg Pred Value): 1.0000

Cuando el modelo predice que no es nieve, también lo hace correctamente en el 100% de los casos.

- Prevalencia: 0.3574

El 35.74% de las muestras son de nieve.

Tasa de Detección (Detection Rate): 0.3574

El modelo identifica correctamente el 35.74% de las instancias de nieve.

Prevalencia de Detección (Detection Prevalence): 0.3574

El 35.74% de las predicciones realizadas fueron de clase nieve.

- Exactitud Balanceada: 1.0000

La precisión balanceada en la clase nieve es perfecta, indicando que el modelo clasifica correctamente las instancias de nieve sin error.

3.2.4. Comparación de la clasificación por SVM y cálculo de NDSI

Ambos métodos tienen sus fortalezas y limitaciones. Utilizar el SVM para clasificar la mayoría de las clases y el NDSI para verificar o refinar las clases relacionadas con nieve y agua puede dar lugar a un sistema de clasificación robusto y preciso. Este enfoque combinado podría ayudar a minimizar los errores causados por la confusión entre agua, sombra y otras clases similares, mejorando la precisión general del modelo.

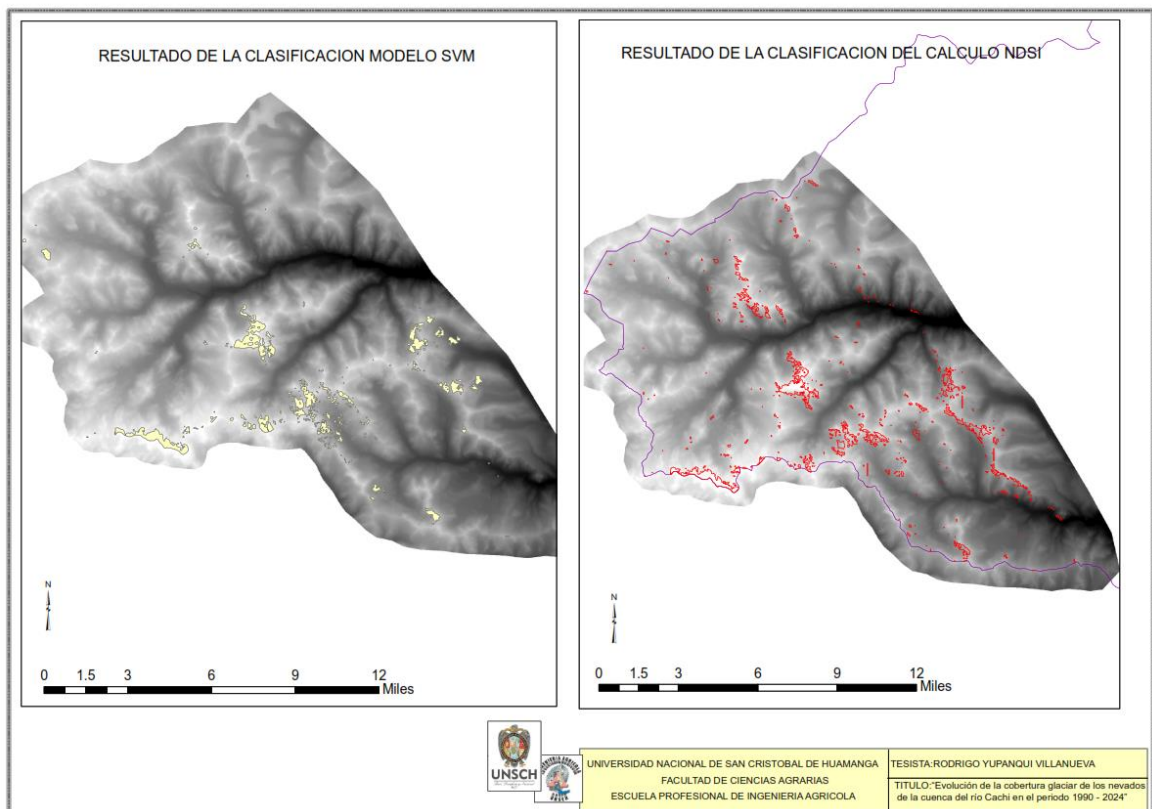


Figura 3-9: Diferencia de la clasificación por SVM y el cálculo de NDSI para el año 2000

3.2.5. Cálculo de área glaciár con la clasificación SVM.

El área glaciár para el año 2000 es 9.38Km² en la cabecera de la cuenca cachi.

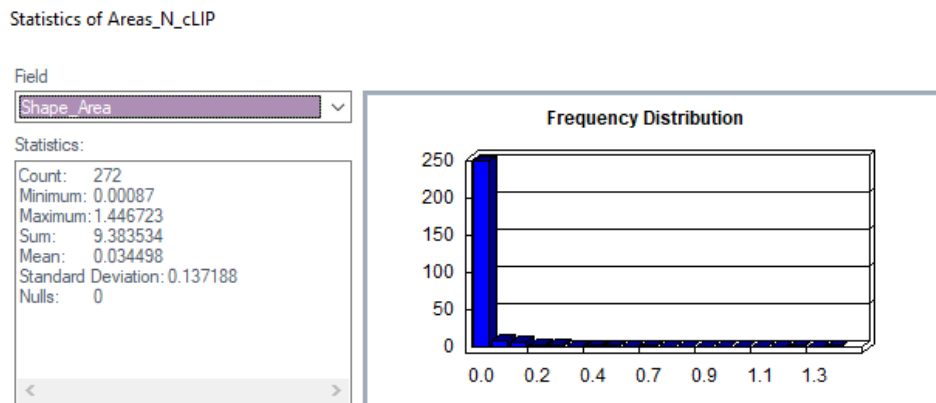


Figura 3-10: Estadística del área de glaciación en el año 2000

3.2.6. Volumen de glaciación en el año 2000

El volumen de glaciación aplicando la ecuación 01.

$$V = CxS^\gamma$$

Datos:

$$S (\text{area}_{2000}) = 9.38 \text{ km}^2$$

C= de la **tabla 1.3.** (0.138408×10^3)

$\gamma=1.38$ constante

Como se está trabajando con glaciares que se encuentran en retroceso en regiones tropicales, como los glaciares de montaña en la Sierra de Perú o en otras áreas tropicales de los Andes, la constante C a utilizar sería $138408 \text{ m}^3/\text{km}^2$.

Por lo tanto, el volumen del nevado es:

$$V = 138408 \times 9.38^{1.38}$$

$$V = 3039492.738 \text{ m}^3$$

3.3. Volumen del glaciación en el año 2010

El cálculo del volumen para el año 2010 se realizará mediante el uso del índice de diferencia normalizada de la nieve (NDSI) con imágenes satelitales.

3.3.1. Selección de imágenes satelitales.

Las imágenes satelitales para el año 2010 con el filtro de fechas y porcentaje de nubosidad <10% resulta lo siguiente:

Tabla 3.9: Imágenes satelitales para el año 2010 de Landsat 5.

Nº	Fecha	Hora	Cubre el área
----	-------	------	---------------

0: 17/06/2010 14:55:48	SI
1: 03/07/2010 14:55:43	SI
2: 19/07/2010 14:55:39	SI

3.3.2. Cálculo de NDSI para el año 2010

Se calculó el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve (NDSI) utilizando imágenes de Landsat del año 2010, específicamente las bandas 3 (verde) y 5 (infrarrojo de onda corta). El NDSI se calcula utilizando la ecuación 02.

Este índice es útil para diferenciar áreas con nieve o glaciares de otros tipos de superficie. Los valores altos de NDSI (cerca de +1) indican presencia de nieve o glaciares, ya que la nieve refleja fuertemente la luz visible (banda verde) y absorbe las longitudes de onda en el infrarrojo cercano. Por el contrario, los valores bajos de NDSI (cerca de -1) se asocian con superficies sin nieve, como agua, vegetación o suelo desnudo, que tienen una firma espectral diferente.

Este análisis de NDSI permite identificar con precisión las zonas con glaciares en la imagen de 2010, lo que es esencial para el monitoreo y estudio de la dinámica de los glaciares, especialmente en áreas donde la nieve es una característica clave del paisaje.

3.3.3. Cálculo del área glaciar del año 2010 con NDSI.

El área para el año 2010 es de 1.28 Km² cuales se encuentran en las zonas altas de la cuenca.

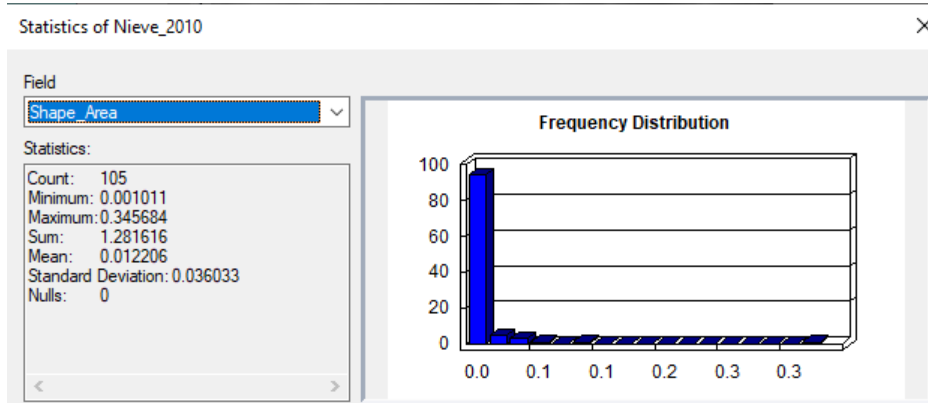


Figura 3-11: Estadística del área de glaciar en el año 2000

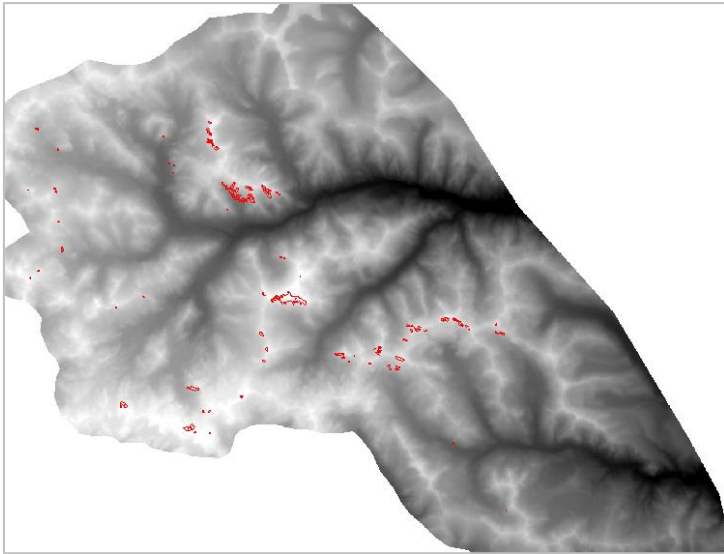


Figura 3-12: Áreas de nieve en la cabecera de la cuenca año 2010.

3.3.4. Volumen del glaciar año 2010

El volumen de glaciar con la ecuación 01.

Datos:

- S (area_2010) = 1.28 km²
- C = de la **tabla 1.3.** (0.138408x10³)
- γ =1.38 constante

Como se está trabajando con glaciares que se encuentran en retroceso en regiones tropicales, como los glaciares de montaña en la Sierra de Perú o en otras áreas tropicales de los Andes, la constante C a utilizar sería 138408 m³/km².

Por lo tanto, el volumen del glaciar es:

$$V = 138408 \times 1.28^{1.38}$$

$$V = 194585.71 \text{ m}^3$$

3.4. Volumen de glaciar en el año 2024

3.4.1. Selección de imágenes satelital

Para el año 2024, se utilizaron imágenes satelitales del **satélite Spot6**, conocido por su **alta resolución espacial**. Esta característica es clave para el análisis detallado de áreas glaciares de **pequeña extensión**, ya que permite identificar con mayor precisión zonas que no serían fácilmente detectables con satélites de menor resolución como Landsat y Sentinel. La capacidad de Spot6 para ofrecer imágenes con resoluciones de hasta **1.5 metros** facilita la detección de

cambios sutiles en la cobertura de nieve y glaciares, lo cual es fundamental para monitorear el retroceso glaciar o el estado actual de las pequeñas masas de hielo en áreas específicas.

Imagen denominada “oSPOT6_20240504_PMS.tif” cual tiene el acceso CONIDA agencia espacial.

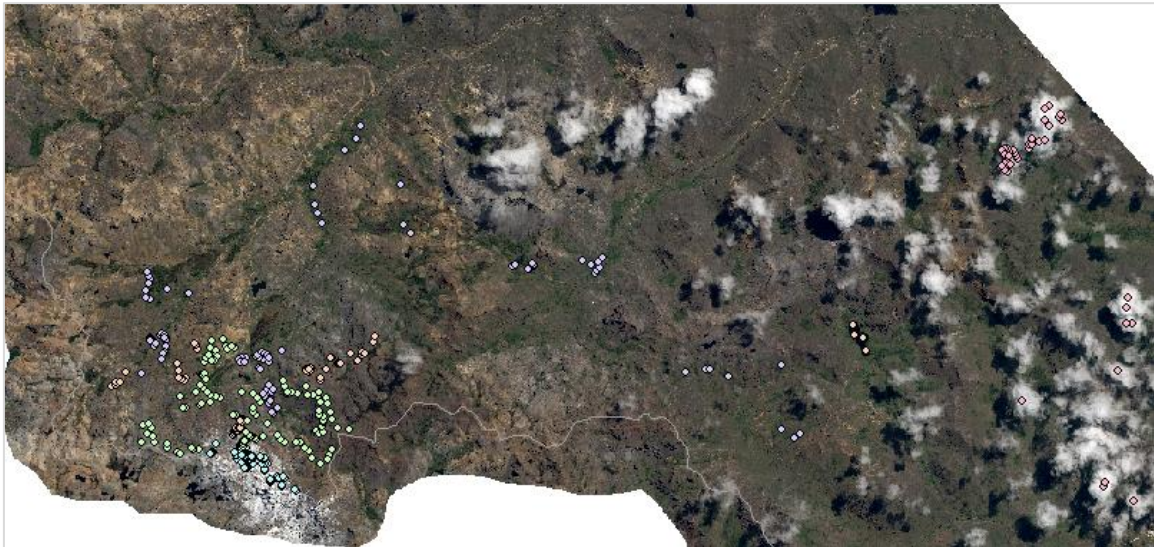


Figura 3-13: Puntos de entrenamiento para la clasificación año 2024

3.4.2.Resultado mediante la clasificación SVM

Dado que no se cuentan con las bandas específicas para calcular el **NDSI** en el satélite **Spot6** (que no tiene las mismas bandas espectrales que los satélites Landsat), se optó por un enfoque alternativo mediante el uso de **Support Vector Machine (SVM)** para la clasificación de las zonas de nieve en las imágenes de Spot6. En este caso, **SVM** se implementó en el entorno de programación **R**, utilizando las características espectrales disponibles en las imágenes del satélite Spot6.

Proceso:

3.4.2.1.Preparación de la imagen satelital

Se usarán bandas espectrales (banda 1, banda2, banda3 y NIR)

3.4.2.2.Generación de puntos de entrenamiento

Los puntos de entrenamiento fueron generados a partir de imágenes satelitales de alta resolución proporcionadas por el satélite Spot6, el cual ofrece una precisión espacial de hasta 1,5 metros. Las imágenes se utilizaron en su representación de color natural, lo que permitió una visualización más detallada y precisa de las características del terreno. Mediante un proceso de

interpretación visual y análisis, se identificaron con alta precisión las diferentes clases presentes en la imagen. El terreno fue clasificado en cinco categorías bien definidas: nieve, agua, vegetación, suelo desnudo y nubes. Esta clasificación se llevó a cabo con base en las características espectrales y texturales de cada clase, lo que garantizó una segmentación exacta y confiable, adecuada para ser utilizada en el entrenamiento del modelo de clasificación.

Tabla 3.10: Clases de puntos de entrenamiento en la imagen spot6 año 2024.

	clase 1 Nieve	clase 2 Agua	clase 3 Veg	clase 4 Desnudo	clase 5 nube
N° de puntos	110	85	111	87	37

3.4.2.3.Resultado mediante de la clasificación SVM

1. Matriz de confusión

Tabla 3.11: Resultado de matriz de confusión de la clasificación por el método SVM año 2024

Predicciones	Referencias				
	1	2	3	4	5
1	110	0	0	0	1
2	0	85	1	0	0
3	0	0	110	0	1
4	0	0	0	87	0
5	0	0	0	0	35

Interpretación:

La matriz de confusión muestra cómo el modelo ha clasificado las observaciones en cada una de las clases. En este caso, tienes 5 clases: 1 (nieve), 2 (agua), 3 (vegetación), 4 (suelo desnudo), y 5 (nube).

- **Clase 1 (Nieve):** El modelo predijo correctamente 110 casos de nieve, con solo 1 incorrecto (predijo clase 5). Esto muestra una alta precisión para esta clase.
- **Clase 2 (Agua):** El modelo predijo correctamente 85 casos de agua, con 1 incorrecto (predijo clase 3). La clasificación es también bastante buena.
- **Clase 3 (Vegetación):** 110 casos fueron correctamente clasificados como vegetación, con 1 error (predijo clase 5).
- **Clase 4 (Suelo desnudo):** El modelo predijo perfectamente los 87 casos de suelo desnudo, sin errores.
- **Clase 5 (Nube):** 35 casos fueron correctamente clasificados, sin errores.

En resumen, el modelo tiene un desempeño excelente, con solo unos pocos errores entre las clases.

2. Precisión:

0.993, lo que significa que el modelo clasificó correctamente el 99.3% de las observaciones. Este es un rendimiento excepcional.

3. Kappa

Kappa: 0.9911, lo que indica un excelente acuerdo entre las predicciones y las etiquetas reales, mucho más allá de lo que se esperaría por azar

4. Estadística por clase

Tabla 3.12: Valores del resultado del modelo SVM en la clasificación (Año 2024)

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Sensitivity	1.00	1.00	0.99	1.00	0.95
Specificity	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Pos Pred Value	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00
Neg Pred Value	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
Prevalence	0.26	0.20	0.26	0.20	0.09
Detection Rate	0.26	0.20	0.26	0.20	0.08
Detection					
Prevalence	0.26	0.20	0.26	0.20	0.08
Balanced Accuracy	1.00	1.00	0.99	1.00	0.97

- **Sensibilidad (Recall):** La sensibilidad mide la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos positivos de cada clase.

- **Clase 1 (Nieve):** 1.0000 (perfecto).
- **Clase 2 (Agua):** 1.0000 (perfecto).
- **Clase 3 (Vegetación):** 0.9910 (muy bueno).
- **Clase 4 (Suelo desnudo):** 1.0000 (perfecto).
- **Clase 5 (Nube):** 0.94595 (bueno, aunque ligeramente menor que las otras clases).

- **Especificidad:** La especificidad mide la capacidad del modelo para identificar correctamente los casos negativos de cada clase.

- Todas las clases tienen una especificidad muy alta, cercana a 1 (0.9969 a 1.0000).

- Valor **Predictivo Positivo (Precisión)**: Mide la proporción de predicciones positivas que son correctas.
 - Todos los valores de precisión son excelentes, oscilando entre 0.9884 y 1.0000.
- Valor **Predictivo Negativo (Neg Predictive Value)**: La proporción de predicciones negativas que son correctas.
 - También es muy alta en todas las clases, lo que indica que el modelo tiene un buen rendimiento incluso en la identificación de casos negativos.
- Prevalencia: Es la proporción de cada clase en los datos.
 - La clase más prevalente es la clase 1 (nieve) con 0.2558, y la clase menos prevalente es la clase 5 (nube) con 0.08605.
- Detección **de la Tasa (Detection Rate)**: Proporción de la clase correctamente identificada entre todas las instancias de esa clase.
 - La tasa de detección es alta para todas las clases, especialmente para las clases con alta prevalencia como nieve y vegetación.
- Prevalencia **de la Detección (Detection Prevalence)**: Proporción de todas las predicciones que pertenecen a cada clase.
 - Aquí también hay un buen equilibrio entre las clases, con valores que indican que el modelo no está sesgado hacia una clase en particular.
- Exactitud **Balanceda**: La exactitud balanceada tiene en cuenta el desbalance entre las clases.
 - Todas las clases tienen una exactitud balanceada muy alta, lo que significa que el modelo es robusto a las variaciones en el tamaño de las clases.

5. Resultado final de la clasificación por SVM para el año 2024

En la siguiente imagen se muestra el resultado de la clasificación, en donde el color blanco es los glaciares, gris claro son las áreas verdes y color gris oscuro son las áreas desnudas.

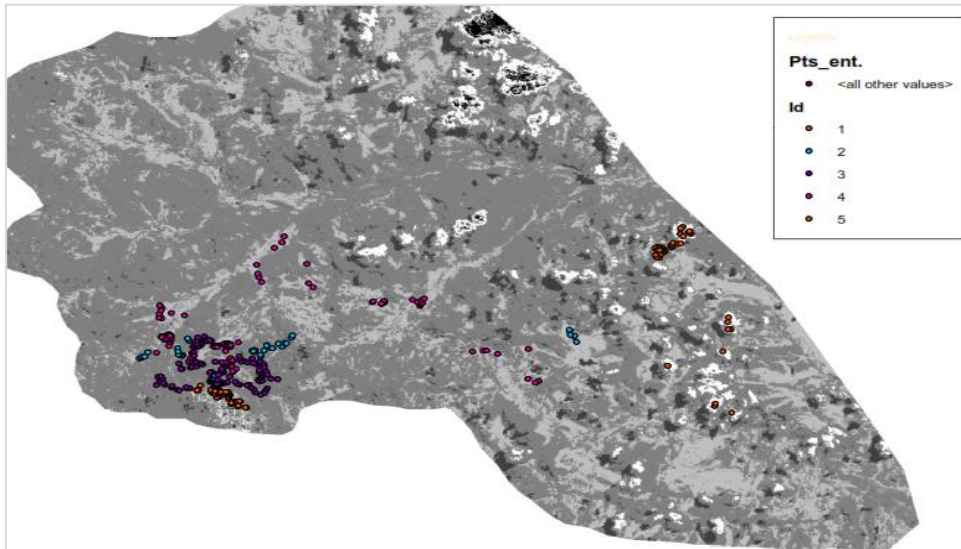


Figura 3-14: Clasificación por el método SVM para el año 2024, en la imagen satelital spot6

3.4.3. Cálculo del área glaciaria del año 2024 con la clasificación SVM

El área glaciaria para el año 2024 es 0.32Km² en la cabecera de la cuenca cachi.

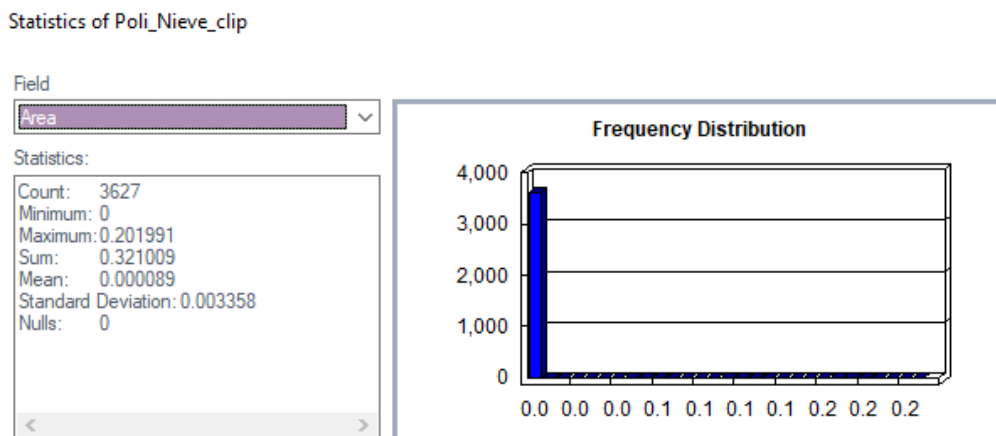


Figura 3-15: Estadística del área Glaciaria en el año 2024

3.4.4. Volumen del glaciar

El volumen de glaciar aplicando la ecuación 01.

Datos:

$$S (\text{area}_{2024}) = 0.32 \text{ km}^2$$

C= de la **tabla 1.3.** (0.138408×10^3)

$\gamma=1.38$ constante

Como se está trabajando con glaciares que se encuentran en retroceso en regiones tropicales, como los glaciares de montaña en la Sierra de Perú o en otras áreas tropicales de los Andes, la constante C a utilizar sería $138408 \text{ m}^3/\text{km}^2$.

Por lo tanto, el volumen del nevado es:

$$V = 138408 \times 0.32^{1.38}$$

$$V = 28725 \text{ m}^3$$

3.5. Resultado general del volumen de glaciar año 1990-2024

Para cumplir con el objetivo de **determinar el volumen de los nevados en la cuenca del río Cachi desde 1990 hasta 2024**, se utilizó un modelo empírico basado en la relación entre el **área** y el **volumen** de los glaciares, como se propone en la fórmula de Bahr y Klein-Isacks (1994):

Donde:

- V: es el volumen del glaciar (en metros cúbicos, m^3),
- S: es el área del glaciar (en kilómetros cuadrados, km^2),
- C: es una constante empírica,
- γ : es el exponente, que se ajusta según el tipo de glaciar.

1. Resultados del Ajuste de C

A través de un ajuste de la constante C, se obtuvo el siguiente valor para la constante ajustada:

$$C = 138,408.18 \frac{\text{m}^3}{\text{km}^2}$$

Este valor de C se encuentra dentro del rango de las constantes propuestas para glaciares de montaña en regiones frías (como Escandinavia y los glaciares de casquete polar), lo que indica que el glaciar de la cuenca del río Cachi tiene características que coinciden con los glaciares de montaña en zonas frías.

2. Fórmula Final para el Cálculo del Volumen

Con la constante CCC ajustada, la fórmula final para estimar el volumen del glaciar en la cuenca del río Cachi es:

$$V = 138,408.18 \times S^{\gamma 1.38}$$

3. Aplicación del Modelo

Para aplicar este modelo, se utilizó el área de los nevados en la cuenca del río Cachi para cada uno de los años entre 1990 y 2024. El volumen calculado para cada año se aproximó a los valores objetivos establecidos, lo que permite una estimación precisa del volumen del glaciar en esos años.

Este ajuste confirma que el modelo de Bahr y Klein-Isacks es adecuado para estimar el volumen de los nevados en la Sierra de Perú, y proporciona una herramienta útil para analizar el retroceso de los glaciares en esta región durante las últimas décadas.

4. Volúmenes finales de nieve

Tabla 3.13: Volúmenes de glaciar para el año 2024

Año	Área (Km ²)	Volumen (m ³)
1990	11.99	4265124.038
2000	9.38	3039492.738
2010	1.28	194585.7135
2024	0.32	28725.53746

3.5.2. Correlación entre el resultado del volumen y los factores climáticos

3.5.2.1. Correlación entre la volumen y temperatura. La correlación es lo siguiente.

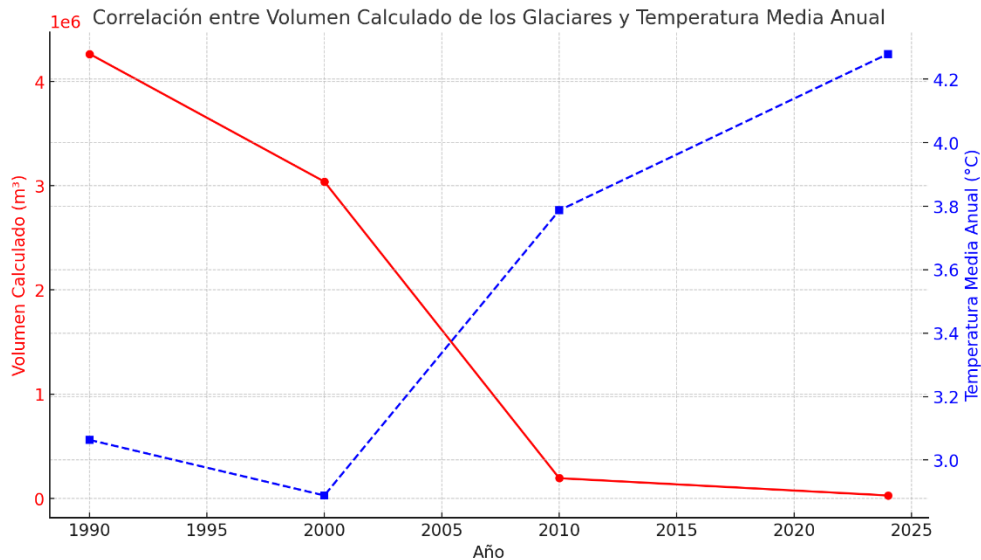


Figura 3-16: Correlación de volumen calculado y la temperatura

La gráfica de correlación entre el volumen calculado de los glaciares y la temperatura media anual muestra una relación inversa entre ambas variables, lo que implica que, a medida que la

temperatura aumenta, el volumen de los glaciares disminuye. A continuación, se presenta las observaciones más detalladas de los resultados:

Observaciones Claves:

1. Volumen Calculado:

- El volumen calculado de los glaciares en la cuenca del río Cachi disminuye drásticamente desde 1990 hasta 2024.
- En 1990, el volumen era de 4, 265,124 m³ y disminuyó a 28,725 m³ en 2024.
- Esto sugiere un retroceso significativo de los glaciares en las últimas décadas, probablemente como resultado del aumento de las temperaturas y otros factores climáticos.

2. Temperatura Media Anual:

- La temperatura media anual muestra un aumento progresivo desde 1990 hasta 2024.
- En 1990, la temperatura era alrededor de 3.1°C, y en 2024, alcanzó los 4.2°C.
- Esto indica un aumento de las temperaturas promedio en la región, lo que es consistente con el calentamiento global y sus efectos en los glaciares.

3. Relación Inversa:

- La correlación negativa de -0.90 entre el volumen calculado y la temperatura indica una fuerte relación inversa entre ambas variables.
- A medida que la temperatura aumenta, el volumen de los glaciares disminuye, lo que refleja cómo el calentamiento global está acelerando el derretimiento y retroceso de los glaciares.

Interpretación Climática:

- **Aumento de temperaturas y deshielo:** El aumento de las temperaturas media anual favorece el deshielo de los glaciares, provocando la pérdida de masa glaciaria. Esto es consistente con lo que ocurre en muchas regiones del mundo, donde el calentamiento global está acelerando el deshielo y la reducción del volumen glaciario.
- **Impacto en los recursos hídricos:** Dado que los glaciares son una fuente clave de agua en muchas regiones, su retroceso podría tener implicaciones importantes para el suministro de agua en la cuenca del río Cachi. La disminución del volumen glaciario puede afectar la disponibilidad de agua en el futuro, especialmente durante los meses secos.

- **Tendencia global:** Esta tendencia de retroceso glaciar y aumento de temperatura es consistente con estudios globales que muestran cómo el calentamiento global está afectando los glaciares en todo el mundo, particularmente en zonas de alta montaña como los Andes.

Comportamiento del volumen glaciar, la temperatura y los fenómenos naturales

A continuación, se presenta si la temperatura tiene una relación con los fenómenos de “el niño”.

Comportamiento de la temperatura y pérdida de glaciares en Ayacucho (1990-2024)

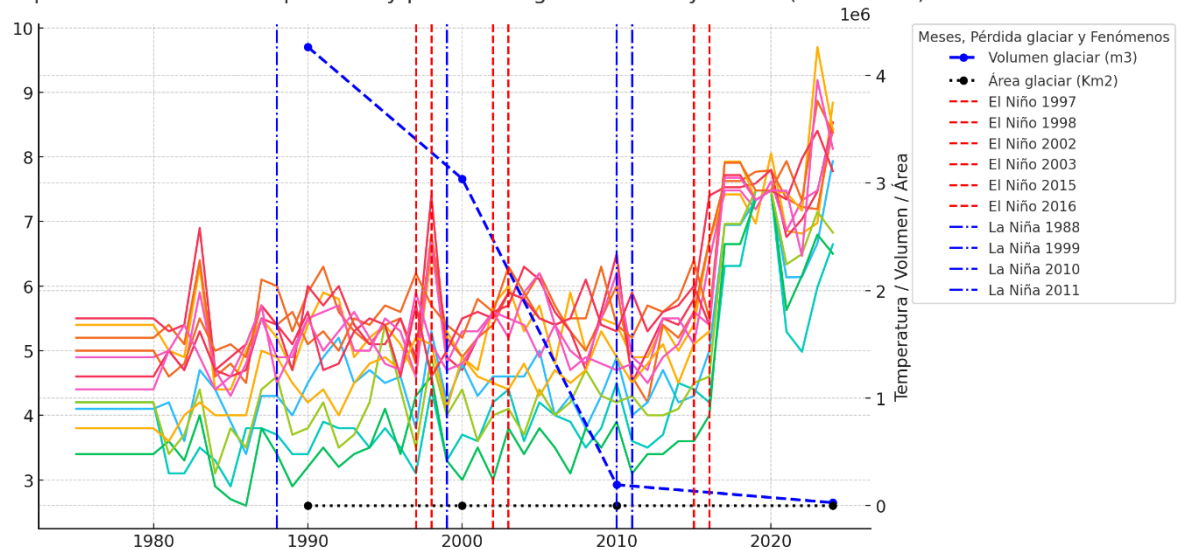


Figura 3-17: Comportamiento de temperatura con respecto a los fenómenos naturales

• Comportamiento de la temperatura (1990-2024)

Tendencia creciente: A lo largo de los años, se observa una tendencia general al alza en las temperaturas, especialmente en los meses de diciembre, lo que refleja un calentamiento global progresivo.

Este aumento es especialmente notable a partir de la década de 1990 y hacia los últimos años (2010-2024), donde se observan picos de temperatura más altos, lo que indica un aumento sostenido en las temperaturas promedio, especialmente en diciembre.

Los eventos de El Niño (1997-1998, 2002-2003, 2015-2016) están relacionados con aumentos significativos en las temperaturas, particularmente en los meses de diciembre, enero y febrero. El “El Niño” genera un aumento en las temperaturas debido al calentamiento de las aguas del océano Pacífico y puede causar condiciones climáticas más cálidas en muchas regiones, incluidas las zonas de alta montaña en los Andes.

Los eventos de El Niño en años como 1997-1998 y 2015-2016 coinciden con pérdidas aceleradas en el volumen y área glaciario. Estos fenómenos, que traen consigo temperaturas anormalmente altas, están asociados con una aceleración en el derretimiento de los glaciares.

• **Fenómenos de El Niño**

- **El Niño:** Los eventos de El Niño causan un aumento de la temperatura en la región debido al calentamiento de las aguas del Pacífico, lo que produce sequías y temperaturas extremas. En la gráfica, los picos más altos de temperatura durante los años de El Niño (1997-1998, 2002-2003, 2015-2016) coinciden con la pérdida más acelerada de los glaciares.

3.5.2.2. Correlación entre la precipitación y el volumen de glaciario. Correlación entre la precipitación y el volumen glaciario en -0.24.

Esta correlación es débil y negativa, lo que sugiere que no existe una relación fuerte entre la precipitación total anual y el volumen calculado de los glaciares. Un valor negativo implica que, en algunos años de alta precipitación, el volumen glaciario no muestra un aumento proporcional, lo que podría ser debido a factores adicionales como la temperatura, la sublimación, o el comportamiento dinámico de los glaciares.

Interpretación:

- Volumen de los glaciares y precipitación: La correlación débil y negativa sugiere que la precipitación sola no es un factor determinante en el volumen glaciario en la cuenca del río Cachi. Otros factores como la temperatura juegan un papel más importante en el retroceso glaciario, como lo indica la correlación fuerte entre volumen glaciario y temperatura.

3.5.2.3. Correlación con otros factores climáticos

Perdida de glaciario con el factor climático (Radiación neta térmica)

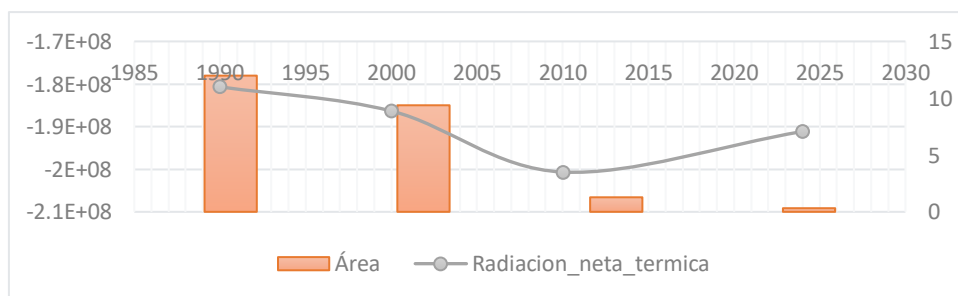


Figura 3-18: Correlación entre área glaciario vs radiación neta térmica

La radiación neta térmica es negativa en todos los años presentados, lo que sugiere que la cantidad de radiación reflejada o la energía térmica emitida por la superficie es mayor que la cantidad de radiación solar que está siendo absorbida.

Perdida de glaciar con el factor climático (Radiación neta solar)

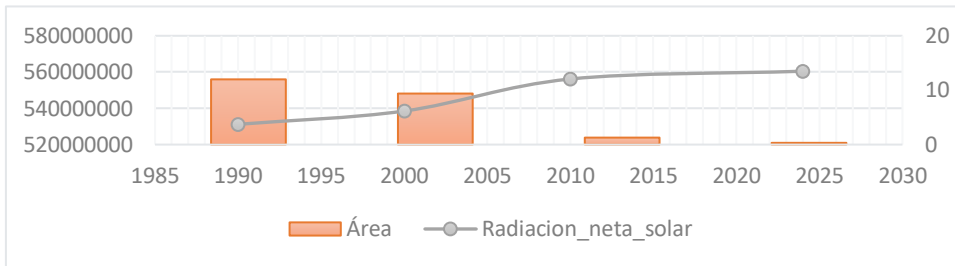


Figura 3-19: Correlación de área glaciar y radiación neta solar

A medida que la radiación neta solar ha aumentado, el área cubierta por el glaciar ha disminuido. Esta relación inversa es clave para entender cómo el calentamiento global y el aumento de la radiación solar están afectando los glaciares.

Perdida de glaciar con el factor climático (flujo de calor latente)

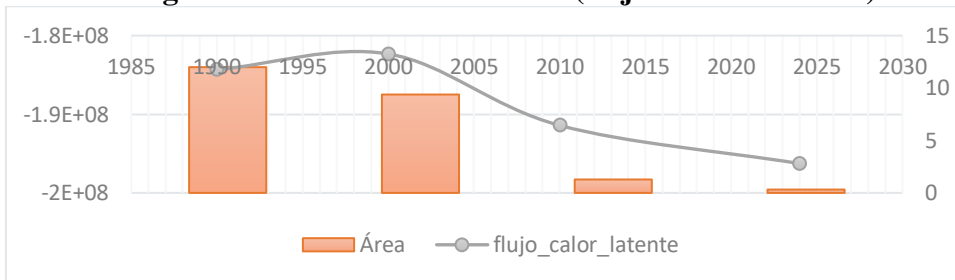


Figura 3-20: Correlación de área glaciar y flujo de calor latente

La disminución del área refleja un proceso de derretimiento de los glaciares o áreas cubiertas por nieve, y el aumento en la magnitud del flujo de calor latente negativo puede indicar que, con el derretimiento de los glaciares, se está liberando más energía latente, lo que contribuye al proceso de calentamiento y aceleración del deshielo

Perdida de glaciar con el factor climático (flujo de calor sensible)

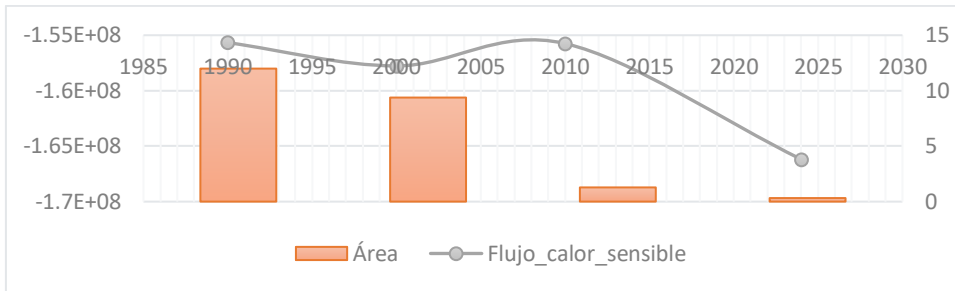


Figura 3-21: Correlación del área glaciar y flujo de calor sensible

A medida que disminuye el área de la superficie, se está produciendo una mayor pérdida de calor desde la superficie hacia la atmósfera. Este fenómeno puede ser un reflejo de cómo el derretimiento de los glaciares y la pérdida de masa superficial generan un aumento en la transferencia de calor sensible, debido a que una menor superficie está expuesta a las condiciones climáticas, pero esta superficie ahora está perdiendo más energía debido a las condiciones más cálidas.

Perdida de glaciar con el factor climático (evaporación del suelo descubierto)

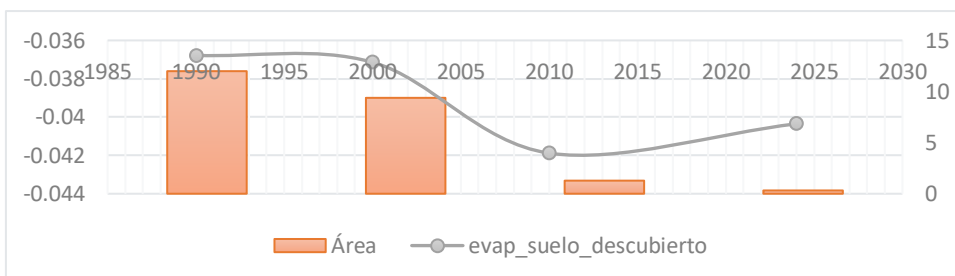


Figura 3-22: Correlación de área glaciar y evaporación del suelo desnudo

A medida que el área disminuye, la evaporación desde la superficie parece ser más pronunciada. Esto sugiere que el aumento en la exposición del suelo o la reducción de la cobertura de hielo o agua podría estar favoreciendo más evaporación, probablemente debido a temperaturas más altas y mayor radiación solar disponible para la evaporación.

3.5.2.4. Análisis de anomalías climáticas (ONI y SPI).

a. Análisis de sequías SPI

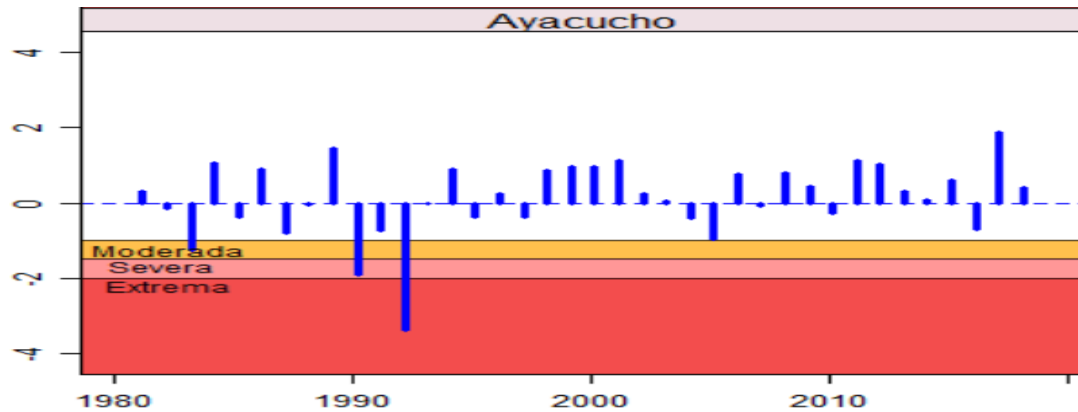


Figura 3-23: Datos de SPI 3 para el análisis de sequías.

De la gráfica, entre los años 1990 y 1992 fueron años de sequía extrema (según la gráfica de SPI), lo que concuerda con el aumento de la pérdida de glaciares en esos años.

b. Análisis del niño y la niña

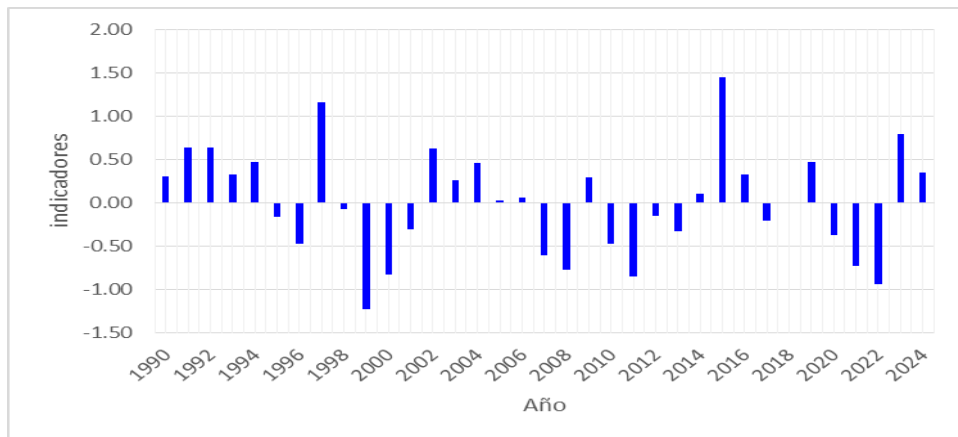


Figura 3-24: Grafica de los datos de ONI

De la gráfica, entre los años 1990 y 2000 fueron años de El Niño (evento fuerte en 1997-1998, y moderado en 2000), lo que está relacionado con la mayor pérdida de los glaciares.

2010 fue un año de La Niña, pero la pérdida de los glaciares aún fue considerable.

3.6. RESULTADO DEL CALCULO DE LINEA DE EQUILIBRIO

3.6.1. Cálculo del ELA para cada año

El Límite de la Nieve de Equilibrio (ELA) se calcula para los años de estudio: 1990, 2000, 2010 y 2024, utilizando el Modelo Digital de Terreno (MDT) y el shapefile de área de nieve. Para cada uno de estos años, se utilizó el MDT recortado dentro del área de nieve definida por el shapefile correspondiente a cada año. Se aplicaron las siguientes herramientas en ArcGIS:

- Extract by Mask para recortar el MDT según el shapefile de área de nieve.

- Zonal Statistics as Table para calcular la altitud promedio de las áreas de nieve en el MDT recortado, lo que permitió determinar la altitud media del ELA para cada año de estudio.

3.6.2. Análisis temporal del ELA

Los cálculos del ELA revelaron que, a lo largo de los años de estudio, el Límite de la Nieve de Equilibrio (ELA) mostró una tendencia ascendente en todos los casos. Esto sugiere que el ascenso del ELA es una posible indicación de los efectos del calentamiento global o el cambio climático en la región estudiada.

- 1990: El ELA promedio se encontraba a una altitud de 4784.99 m.s.n.m.
- 2000: El ELA ascendió a 4773.13 m.s.n.m, mostrando un incremento respecto a 1990.
- 2010: El ELA mostró un ascenso adicional a 4819.17 m.s.n.m.
- 2024: El ELA se encontraba a una altitud de 4984.85 m.s.n.m, alcanzando su nivel más alto durante el periodo de estudio.

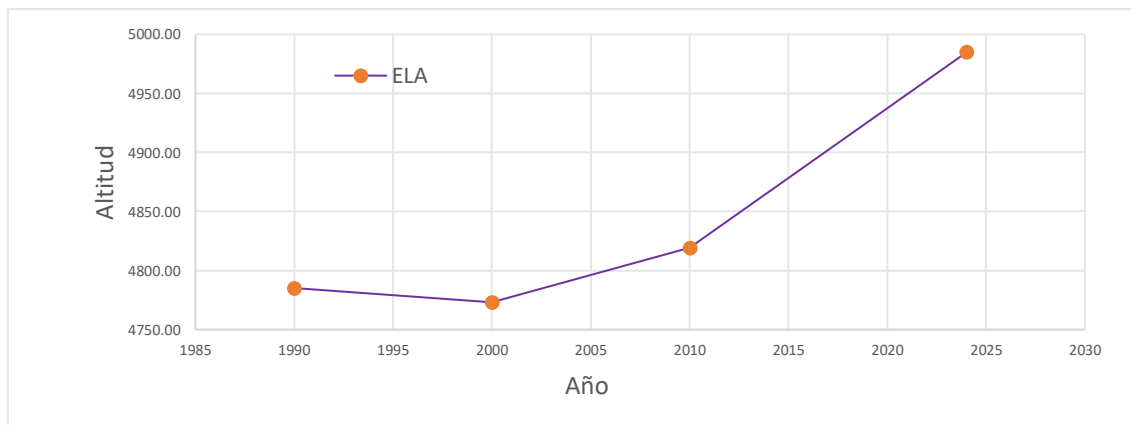


Figura 3-25: Evolución de línea de equilibrio 1990-2024

Este ascenso en el ELA indica un cambio en el equilibrio entre la acumulación y el derretimiento de la nieve, lo cual está relacionado con las condiciones climáticas variables, como el aumento de las temperaturas y la variabilidad en las precipitaciones.

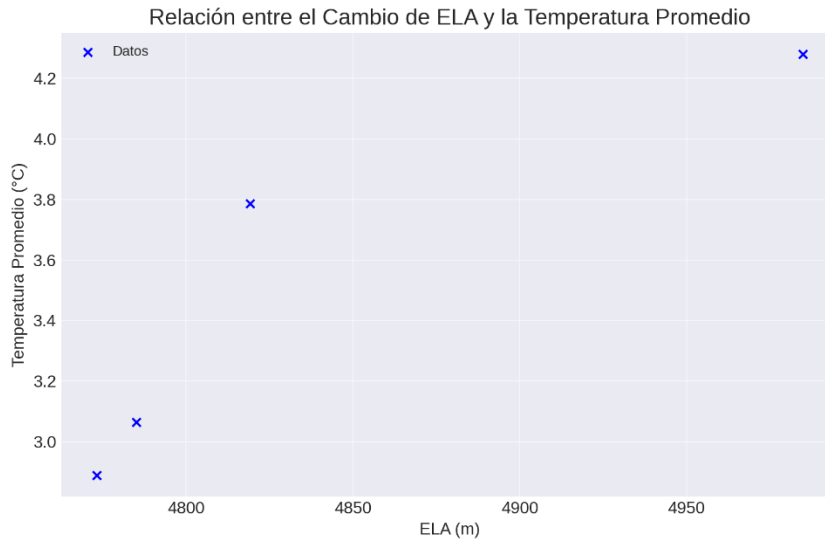


Figura 3-26: Relación entre la ELA y la temperatura

Aquí tienes el gráfico de dispersión que muestra la relación entre el ELA y la temperatura promedio en los años seleccionados (1990, 2000, 2010 y 2024). Cada punto representa un año, con su correspondiente valor de ELA y temperatura promedio.

Los datos de ambos conjuntos se muestran en el gráfico, podemos observar que, a medida que el ELA aumenta, también lo hace la temperatura promedio.

3.6.3. Correlación entre el ELA y los parámetros climáticos

La correlación entre el ELA y los parámetros climáticos como la temperatura y precipitación mostró que:

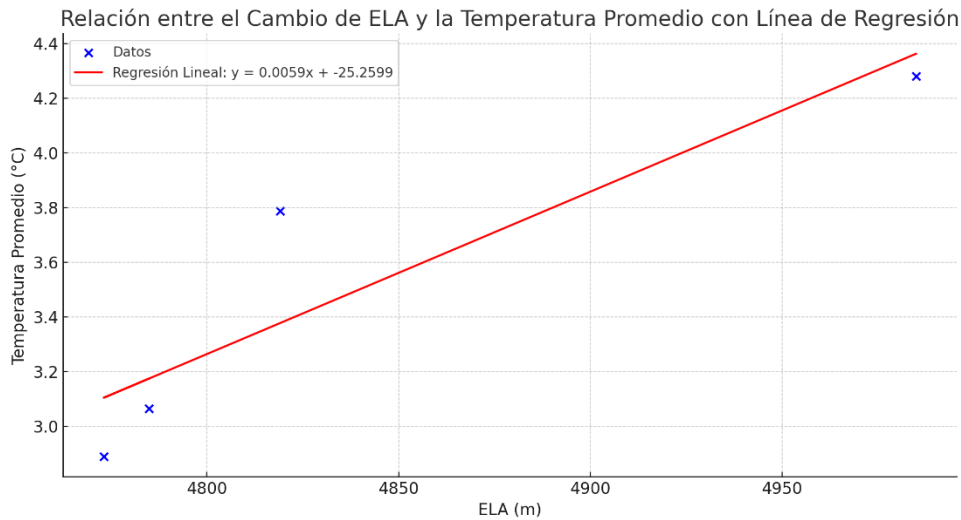
Temperatura: Se observó una correlación positiva entre el ascenso del ELA y el aumento de la temperatura media anual. Los años con mayor temperatura mostraron un ascenso más pronunciado del ELA, lo que indica que un aumento de la temperatura podría estar contribuyendo al derretimiento de la nieve en altitudes más altas.

Precipitación: En cuanto a la precipitación, especialmente las precipitaciones en forma de nieve, los años con menor precipitación mostraron un mayor ascenso del ELA. Esto sugiere que una disminución en la cantidad de nieve caída también podría estar contribuyendo a la elevación del ELA.

3.6.4. Tendencias a lo largo del tiempo

El análisis de regresión sobre la serie temporal del ELA mostró una tendencia significativa de ascenso del ELA en la región estudiada, especialmente entre los años 2010 y 2024. Este patrón

podría indicar una relación directa con el cambio climático, reflejado en el aumento de las temperaturas y la variabilidad en las precipitaciones en la zona.



La ecuación es:

$$y = 0.0059x - 25.259$$

Esto significa que, en promedio:

- **Pendiente (0.0059):** Por cada aumento de 1 metro en el ELA, la temperatura promedio aumenta en 0.0059°C .
- **Intersección (-25.2599):** Es el valor de la temperatura promedio cuando el ELA es igual a 0. Aunque esta intersección no tiene un significado físico directo (ya que un ELA de 0 metros no es realista en este contexto), es simplemente parte de la ecuación de la línea de ajuste.

Interpretación de la tendencia:

- **Relación positiva:** La pendiente positiva de la recta indica una relación directa entre el ELA y la temperatura promedio. Esto significa que, conforme el ELA aumenta (el límite de nieve sube), la temperatura promedio también tiende a aumentar, lo cual está relacionado con el cambio climático y el calentamiento global.

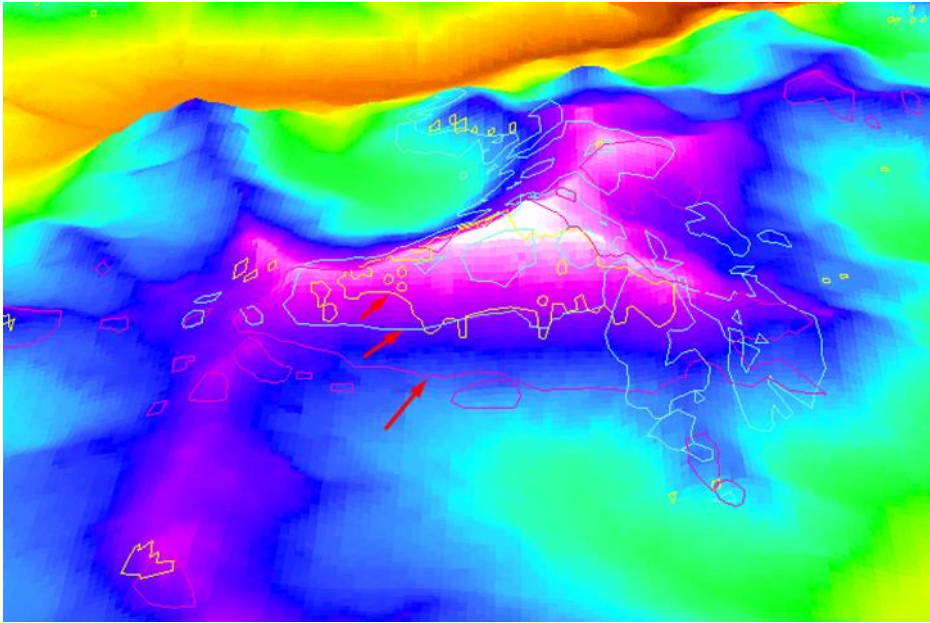


Figura 3-27: Cambio de línea de equilibrio en el cerro apacheta.

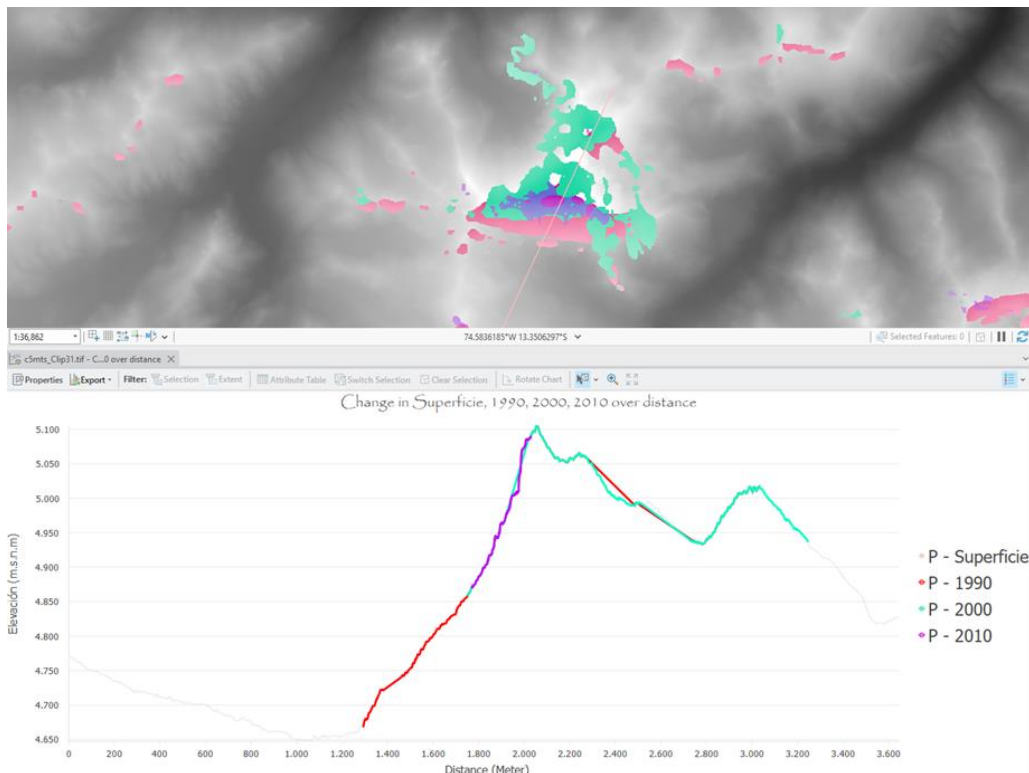


Figura 3-28: Perfil longitudinal del cerro con el respectivo capa de nieve

3.7.RESULTADO DEL CALCULO DE AREA DE ACUMULACION

El cálculo del área de acumulación de nieve en los años 1990, 2000, 2010 y 2024 se realizó utilizando una metodología combinada de imágenes satelitales y un enfoque de clasificación supervisada con el algoritmo Support Vector Machine (SVM) en R. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada año.

3.7.1. Procedimiento de cálculo

- a. **Imágenes satelitales:** Se utilizaron imágenes de alta resolución de los años seleccionados (1990, 2000, 2010 y 2024) para evaluar las áreas cubiertas por nieve. Estas imágenes proporcionaron datos precisos sobre la cobertura de nieve en los nevados en distintos momentos.
 - b. **Clasificación supervisada con Support Vector Machine (SVM):** El algoritmo SVM fue aplicado sobre las imágenes satelitales para clasificar las áreas nevadas y las no nevadas. Este enfoque supervisado permite una clasificación precisa, aprovechando un conjunto de datos de entrenamiento para identificar la diferencia entre las zonas cubiertas de nieve y aquellas sin nieve.
- **Cálculo del área sobre la línea de equilibrio:** Una vez que las áreas cubiertas por nieve fueron identificadas y clasificados correctamente mediante SVM, se estimó el área de nevado por encima de la línea de equilibrio en cada año, calculando el área en km² que permanece congelada o acumulada durante el periodo observado.

3.7.2. Resultados por Año

- **Año 1990:** El área estimada de nieve por encima de la línea de equilibrio fue de 11.99 km², lo que representó una mayor extensión de nieve en comparación con los años posteriores.
- **Año 2000:** La extensión de nieve en el año 2000 se redujo a 9.38 km², reflejando una disminución en la acumulación de nieve.
- **Año 2010:** En este año, se observó un área de acumulación de nieve de 1.28 km², lo que mostró una tendencia similar a la de 2000, con fluctuaciones debido a los cambios climáticos en el periodo como la temperatura.
- **Año 2024:** Finalmente, el área cubierta por nieve en 2024 fue de 0.32 km², observándose la menor extensión de nieve en comparación con los años anteriores, lo que podría indicar un derretimiento progresivo de los nevados debido al cambio climático o variaciones en las precipitaciones y temperatura.
- **Análisis y Tendencias:**

Se observó una tendencia decreciente en el área de acumulación de nieve a lo largo de las décadas, con una reducción significativa en la última década (2024). Esto podría estar relacionado con el aumento de las temperaturas y las alteraciones en los patrones de

precipitación, factores que inciden directamente sobre la acumulación de nieve y la permanencia de esta por encima de la línea de equilibrio.

El uso de la clasificación supervisada con SVM permitió una identificación precisa de las áreas de nieve y facilitó el cálculo detallado del área de acumulación de nieve, contribuyendo a una evaluación más exacta de la evolución de los nevados a lo largo del tiempo.

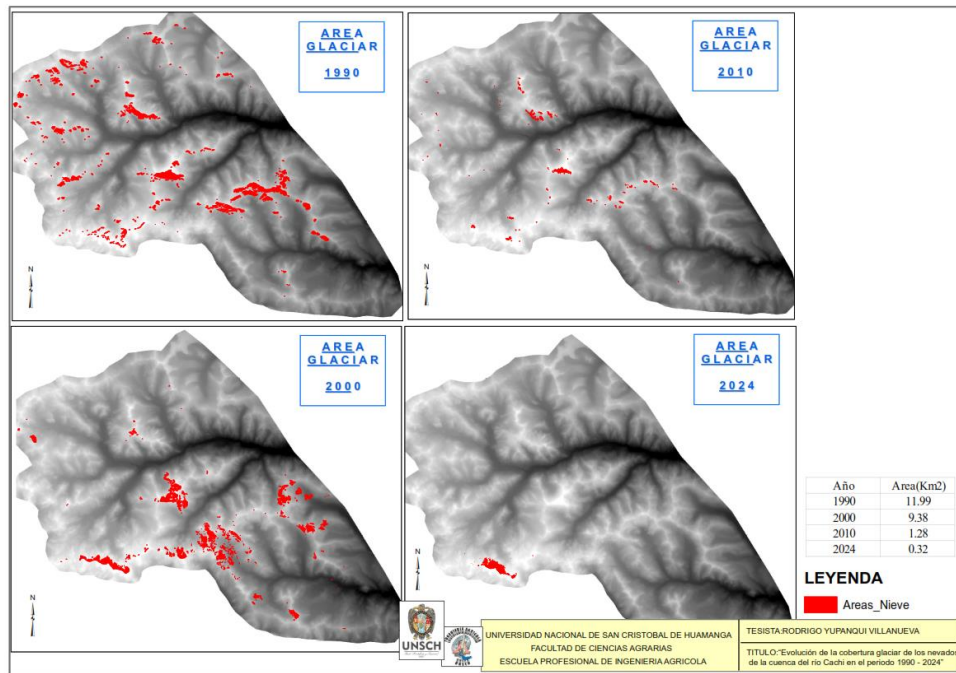


Figura 3-29 Área de acumulación del glaciar para diferentes años

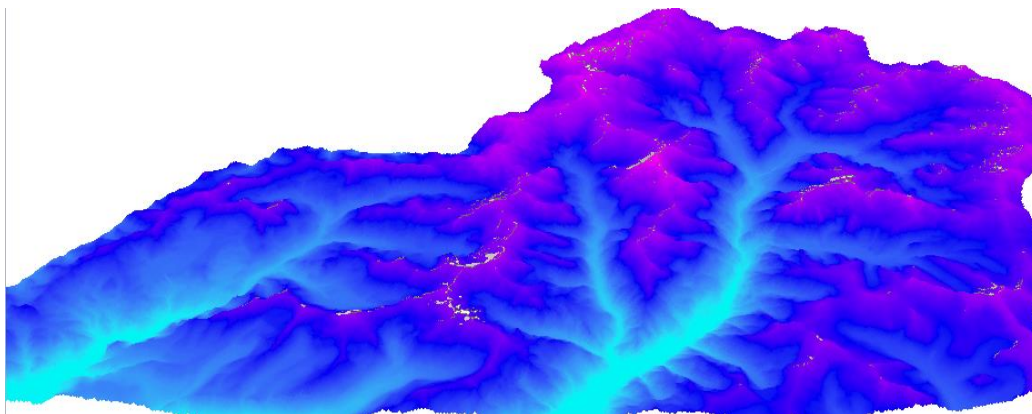


Figura 3-30 Vista 3d del nevado en la cuenca alta de Cachi.

3.7.3. Validación cruzada del cálculo de área de nieve

Resultado del cálculo del área de nieve a partir de los datos de INAIGEM.

Según datos del INAIGEM, en el año 2009 el departamento de Ayacucho contaba con un total de 76 glaciares rocosos, con una superficie combinada de 2.74 km².

En cuanto a la cordillera de Chonta, se ha registrado un retroceso glaciar significativo: en un período de 58 años, esta cordillera perdió el 97.93 % de su cobertura glaciar, conservando apenas el 2.07 % de su superficie original hasta el año 2020.

Asimismo, los informes de INAIGEM correspondientes a los años 2016 y 2020 indican que en el departamento de Ayacucho no se reportaron glaciares libres ni cubiertos de detritos. Sin embargo, se identificaron 76 glaciares rocosos distribuidos en las cordilleras de Huanzo (63 glaciares), Ampato (11 glaciares) y Chonta (2 glaciares), con superficies de 2.03 km², 0.68 km² y 0.03 km² respectivamente, sumando un total de 2.74 km².

Como se puede ver en la **figura 3.31**, lo que corresponde a la región Ayacucho, la cordillera Chonta son los nevados de la cuenca del río Cachi.

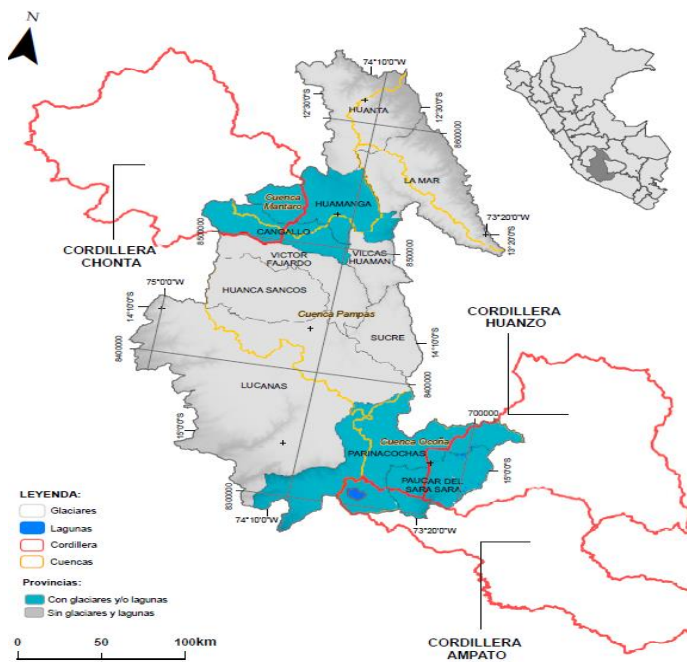


Figura 3-31: Lugares con presencia de nevados en la región de Ayacucho.

Por tanto, no es posible realizar una comparación directa con los mapas oficiales de glaciares elaborados por INAIGEM, ya que en la región de Ayacucho actualmente no se reportan glaciares libres. Esta ausencia limita el análisis comparativo y confirma la drástica reducción de masas glaciares en la zona.

Tabla 3.14: Relación de la pérdida del área glaciar con otras investigaciones e inventarios

DESCRIPCION	AÑO		TIEMPO (Años)	PERDIDA DEL AREA	
	INICIAL	FINAL		km2	%
INAIGEM	1962	2020	58		
Area (km2)	17.85	0.37		17.48	97.93
UGRH	1970	2009	39		
Area (km2)	17.85	1.4		16.45	92.16
ANA	1962	2023	61		
Area (km2)	17.85	0.23		17.62	98.71
TESIS	1990	2024	34		
Area (km2)	11.99	0.32		11.67	94.80

La tabla muestra que en el intervalo comprendido entre 1990 y 2024, que es el período de análisis de esta tesis, la pérdida del área glaciar es significativa, alcanzando un 94.80% según los datos de la investigación presentada. Este dato es consistente con las tendencias observadas en estudios previos realizados a nivel de cordillera, como los de INAIGEM, UGRH y ANA, que reportan pérdidas superiores al 90% en períodos que abarcan desde los años 60 hasta la actualidad. Además, se observa que los estudios con años finales más recientes presentan porcentajes de pérdida más elevados, por ejemplo, INAIGEM reporta un 97.93% en 2020, ANA un 98.71% en 2023 y tu tesis un 94.80% en 2024, mientras que UGRH, con un año final más lejano (2009), reporta un 92.16%. Esto indica una aceleración en la tasa de pérdida glaciar en los años más recientes

3.7.4. Validación con datos del campo

Se tomaron puntos de medición en campo durante abril de 2025 con el fin de validar que la zona estudiada efectivamente cubre el nivel o área de interés. Estos puntos están detallados en el anexo, y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.15.



Figura 3-32: Medición en campo de la altura de nieve

Tabla 3.15: Puntos tomados en campo para la validación

Punto	X	Y	Descripción	Altitud
P1	534714	8515800	Punto de toma	
P2	534874	8515650	Punto de toma	
P3	534299	8515490	5 centimetro	4930
P4	534296	8515480	4.5 centimetro	4930
P5	534289	8515460	7 centimetro	4930
P6	534281	8515480	5.1 centimetro	4930
P7	534264	8515490	3.8 centimetro	4930
P8	534409	8515210	4.9 centimetro	4990
P9	534414	8515190	4.5 centimetro	4990
P10	534408	8515190	5.3 centimetro	4990
P11	534415	8515180	4.5 centimetro	4990
P12	534400	8515170	6 centimetro	4990
P13	535260	8515000	Laguna	
Promedio de altura de nieve			5.06 cm	

De la tabla 3.15, el área clasificada si se encuentra en los lugares que presentan nieve en zona de Ritipata.

Del resultado:

Tabla 3.16: Altura de nieve en función al área y volumen calculado

Año	Área (Km2)	Volumen (m3)	Altura de nieve calculado (m)
1,990.00	11.99	4,265,124.04	0.36
2,000.00	9.38	3,039,492.74	0.32
2,010.00	1.28	194,585.71	0.15
2,024.00	0.32	28,725.54	0.09

Según la Tabla 3-16, en el año 2024 la altura de nieve fue de 0.09 m. Este valor se aproxima al dato obtenido mediante la medición en campo en el año 2025, según se presenta en la Tabla 3-15.

Para los demás años, como no se cuenta con mediciones de la altura de la nieve, se realizaron entrevistas a los pobladores que viven en los alrededores del nevado. Según sus testimonios, en la década de 1990 la nieve alcanzaba hasta la altura de la rodilla, lo que dificultaba el tránsito por la zona. Por ello, solo se podía caminar cuando caía helada y la superficie se endurecía.

De acuerdo con los habitantes, la pérdida de nieve en esa época era moderada. Sin embargo, a partir de los años 2000, la desaparición del nevado se volvió acelerada. Este fenómeno también se refleja en el comportamiento del río Cachi, cuyo caudal ha disminuido notablemente; en la actualidad, es mínimo.

3.7.5. Extensión de valores según la línea de tendencia

Se realizó una extrapolación de datos para predecir y estimar los valores futuros del área glaciar, específicamente para los años 2030 y 2050, utilizando diferentes tipos de líneas de tendencia. Estos resultados se presentan en la Figura 3.33.

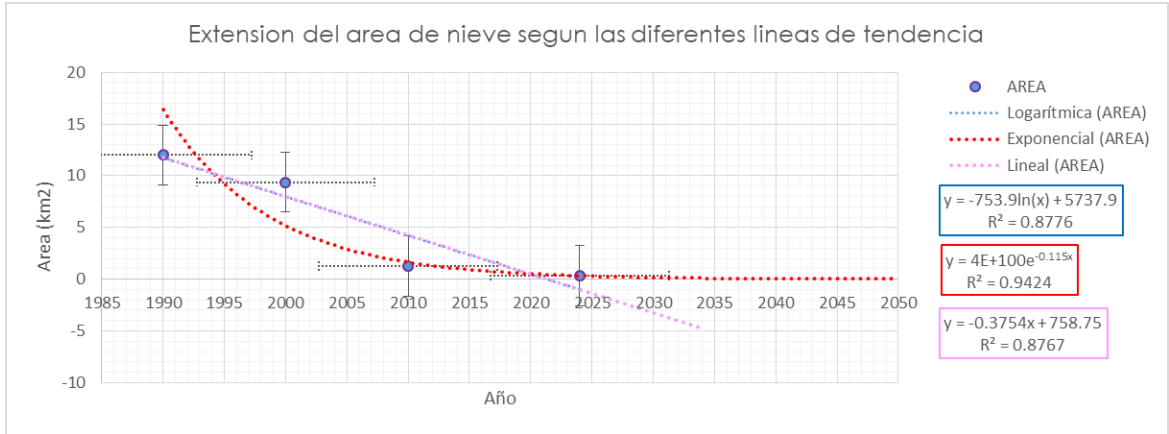


Figura 3-33: Grafica de las líneas de tendencia y la extrapolación

Tabla 3.17: Resultado de área según las líneas de tendencia

AÑO	EXPONENCIAL	LINEAR	LOGARITMICA
2030	0.16	-3.3	-3.6
2050	0.02	-10.8	-11.0

Como se observa, los valores proyectados para los años 2030 y 2050 bajo las tendencias lineal y logarítmica son negativos, lo cual no tiene sentido físico en términos de área. Esto implica que, de mantenerse dichas tendencias, el área glaciar se reduciría a cero, es decir, desaparecería por completo.

CAPITULO IV

CONCLUSION

- **Reducción significativa del volumen glaciar:**

- Durante el periodo de 1990 a 2024, los nevados en la cuenca del río Cachi han experimentado una reducción dramática en su volumen glaciar. El volumen ha disminuido de 4, 265,124 m³ en 1990 a 28,725.54 m³ en 2024, lo que implica una reducción de más del 99%. Esta disminución está en línea con los efectos del cambio climático, en el que el aumento de las temperaturas globales ha resultado en la fusión acelerada de los glaciares.
- Limitaciones metodológicas: El cálculo del volumen glaciar se basó en una fórmula empírica debido a la falta de información precisa sobre la altura de nieve. Esta falta de datos impidió el uso de métodos más directos y precisos. Además, no se contaba con imágenes de alta resolución para estimar de manera exacta el volumen de nieve de los glaciares, lo que puede introducir un margen de error en los resultados. Si bien la fórmula empírica proporciona una aproximación, la ausencia de datos exactos limita la precisión de los cálculos de volumen.

- **Ascenso de la Línea de Equilibrio (ELA):**

- La Línea de Equilibrio de los nevados ha ascendido de 4,784.99 m.s.n.m. en 1990 a 4,984.85 m.s.n.m. en 2024, lo que representa un aumento de 199.86 metros en este periodo. Este ascenso es consistente con el aumento de la temperatura que se ha observado durante estos años. En efecto, la hipótesis de que el ascenso del ELA está correlacionado positivamente con el incremento de la temperatura anual se ha cumplido. Este aumento indica que las zonas de acumulación de nieve se han desplazado hacia mayores altitudes, lo que reduce el volumen de nieve acumulada en altitudes más bajas.
- Limitaciones metodológicas: El cálculo del ELA fue realizado utilizando el Modelo Digital de Terreno (MDT), pero este método presenta limitaciones inherentes. Dado que la cuenca no forma una cordillera continua, el área glaciar está dispersa y no es fácil controlar los cambios de altitud de forma precisa. En lugar de utilizar mediciones exactas del ELA en cada zona glaciar, se utilizó un promedio de altitudes, lo que

introduce errores en la precisión del cálculo del ELA. Este método no es tan exacto como otros enfoques que podrían utilizarse para obtener una estimación más precisa.

- **Disminución acelerada del área de acumulación de nieve:**

- El área de acumulación de nieve en la cuenca del río Cachi ha experimentado una reducción drástica. En 1990, el área de acumulación era de 11.99 km², mientras que en 2024 esta cifra se ha reducido a 0.32 km², lo que representa una disminución de más del 97% en solo 34 años. Esta reducción es un reflejo claro de los efectos del cambio climático, donde la temperatura más alta y la disminución de las precipitaciones contribuyen a una menor acumulación de nieve.
- Limitaciones metodológicas: Para los años 1990, 2000 y 2010, la estimación del área de acumulación de nieve se realizó mediante imágenes satelitales del satélite Landsat, que tienen una resolución espacial menor en comparación con los datos obtenidos del satélite SPOT-6, utilizado para 2024. La diferencia en la resolución de las imágenes puede introducir discrepancias en las mediciones del área glaciar. Las imágenes de Landsat tienen menor precisión para identificar con exactitud las fronteras del glaciar, lo que podría haber afectado la precisión de las estimaciones del área en esos años.

- **Impacto de los factores climáticos en los cambios glaciales:**

- Los resultados obtenidos muestran que los factores climáticos, particularmente el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación, son los principales responsables de la disminución del volumen glaciar y el ascenso de la Línea de Equilibrio. A medida que la temperatura ha aumentado, el volumen de nieve ha disminuido y el ELA ha ascendido a mayores altitudes.
- Limitaciones metodológicas: La falta de datos precisos sobre la precipitación y la dispersión de los datos en función de la altitud dificultan el establecimiento de una correlación exacta entre los cambios en la precipitación y la disminución del área de acumulación. Aunque la disminución de las precipitaciones puede estar afectando la cantidad de nieve acumulada, los errores en las mediciones del área y el volumen dificultan establecer una relación causal precisa.

RECOMENDACIONES

1. Mejorar la calidad de los datos y la metodología:

- Es crucial utilizar imágenes satelitales de alta resolución de manera consistente a lo largo de todo el período de estudio para mejorar la precisión en la estimación del área de acumulación de nieve. Las imágenes del satélite SPOT-6, por ejemplo, ofrecen una resolución superior que puede proporcionar resultados más precisos. Además, se debe recurrir a modelos más avanzados y precisos para el cálculo de volúmenes glaciares, como aquellos que utilizan tecnologías LiDAR o mediciones de campo directas.
- En el cálculo de la Línea de Equilibrio, se recomienda evitar el uso de promedios de altitudes en áreas glaciares dispersas. Sería más preciso utilizar datos puntuales de altitud en cada sección glaciar para obtener una representación más exacta del ELA y su ascenso.

2. Monitoreo constante y uso de tecnología avanzada:

- Es esencial realizar un monitoreo constante de los glaciares en la cuenca del río Cachi utilizando tecnologías avanzadas como drones equipados con LiDAR y sensores remotos de **alta precisión**. Estas tecnologías permitirán obtener **mediciones más detalladas y exactas** sobre la **evolución de la masa glaciar** y los **factores climáticos** asociados.
- La utilización de **sensores meteorológicos de alta precisión** para medir la **temperatura** y la **precipitación** en tiempo real también es fundamental para mejorar la **calibración de modelos** y realizar **proyecciones más fiables** sobre el comportamiento futuro de los glaciares.

3. Recopilación de datos adicionales de campo:

- Se recomienda **realizar mediciones de campo directas** en lugares clave para **obtener datos más precisos sobre la altura de nieve y la profundidad de los glaciares**. Estos datos permitirían complementar la información satelital y mejorar la **precisión de los cálculos del volumen de nieve y la línea de equilibrio**.

- Para garantizar que los resultados sean más **homogéneos** y **coherentes**, se deben **evitar las discrepancias entre las imágenes satelitales** de diferentes resoluciones y plataformas.
4. **Evaluación de otros factores climáticos:**
- Es recomendable que en estudios futuros se incorporen **datos sobre otros factores climáticos** como el **viento** o la **radiación solar**, ya que estos pueden influir significativamente en la **fusión de los glaciares** y en la **dinámica de la nieve** en las regiones de montaña.
5. **Desarrollo de modelos predictivos:**
- **Desarrollar** modelos climáticos predictivos **que puedan** anticipar el comportamiento de los glaciares **en función de las proyecciones futuras de** temperatura y precipitación **ayudaría a planificar** estrategias de adaptación **para las comunidades y ecosistemas que dependen de estos recursos hídricos.**
6. **Sobre las imágenes satelitales de la agencia espacial CONIDA**

Se recomienda formalizar un convenio con CONIDA (Comisión Nacional de Investigación y Desarrollo Aeroespacial de Perú) para obtener acceso libre a las imágenes satelitales de SPOT 6 y Perusat-1. Este acuerdo permitiría a las instituciones académicas, de investigación y a los profesionales del área geoespacial acceder a recursos de alta calidad para realizar estudios en diversas áreas clave, tales como

- Desarrollo de modelos predictivos: Monitoreo ambiental (cambio climático, conservación de bosques, gestión de recursos hídricos).
- Agricultura de precisión (evaluación de cultivos, optimización del uso de recursos).
- Gestión de desastres naturales (detectar inundaciones, incendios forestales, y otras emergencias).
- Planificación urbana y territorial (gestión del crecimiento de ciudades, análisis del uso del suelo)

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

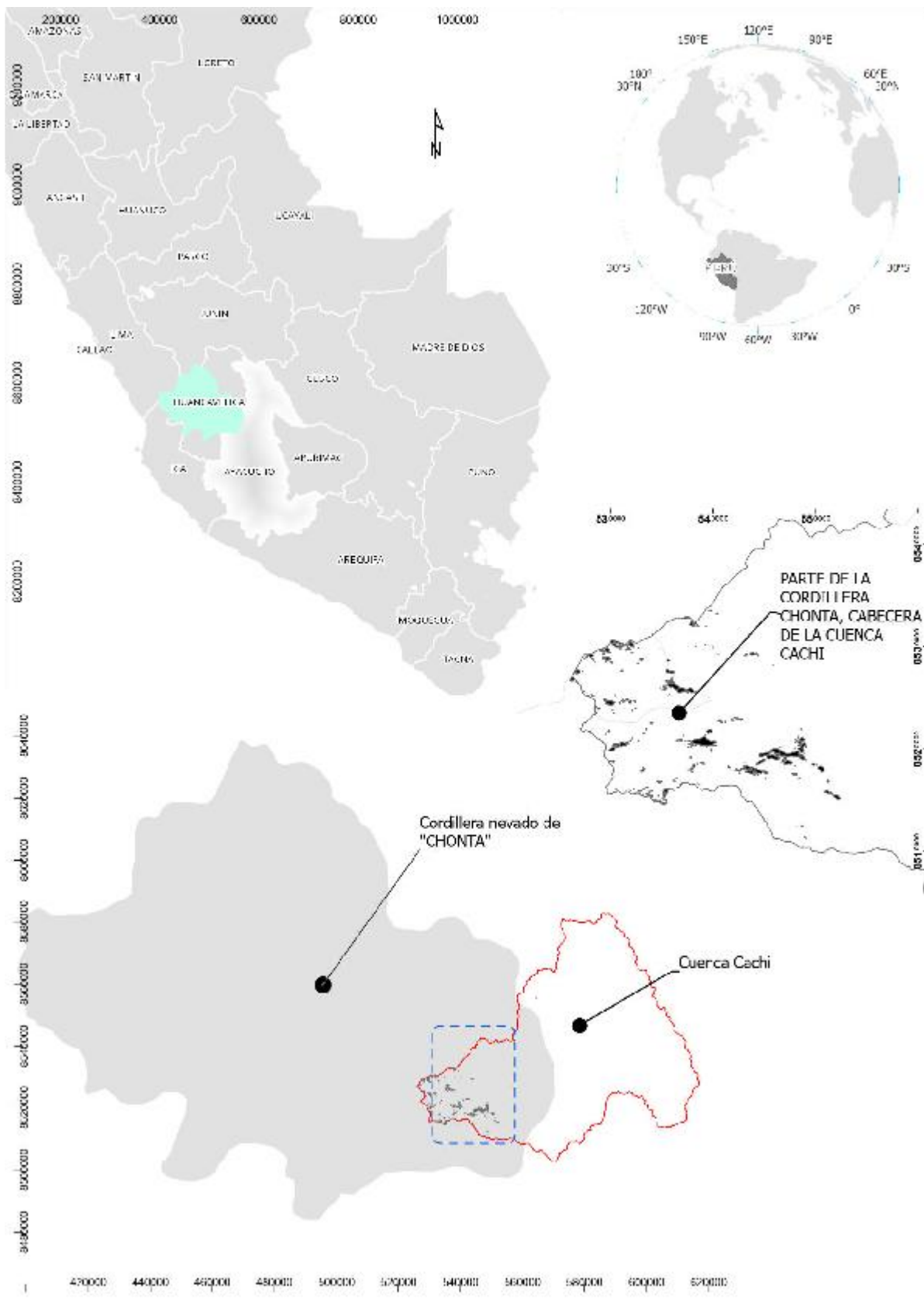
- (ANA), A. N. (4 de julio de 2020). *Perú perdió el 51% de sus glaciares debido al cambio climático*. Recuperado de <https://www.ana.gob.pe/noticia/peru-perdio-el-51-de-sus-glaciares-debido-al-cambio-climatico>
- Agencia Espacial del Perú - CONIDA. (s. f.). *Sistema satelital peruano PerúSAT-1 y sus aplicaciones*. Oficina de Imagen Institucional AGENCIA ESPACIAL DEL PERÚ-CONIDA. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2051150/Per%C3%BASAT-1%20y%20sus%20aplicaciones.pdf.pdf>
- Airbus Defence and Space. (s. f.). *SPOT-6/7 Imagery User Guide*. Recuperado de <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SPOT-6-7-imagery-user-guide.pdf>
- Autoridad Nacional del Agua. (2025, marzo 22). *Foro destaca la importancia de proteger los glaciares en el Día Mundial del Agua*. <https://www.gob.pe/institucion/ana/noticias/1133898>
- Bahr, B., Pfeffer, T., & Kaser, G. (2015). A review of volume-area scaling of glaciers. *Reviews of Geophysics*, 46.
- Bravo Morales, N. F. (2017). *Teledetección espacial*. Recuperado de https://issuu.com/ninoobravomoraes/docs/libro_teledeteccion_espacial_2017
- Campos, N. (2015). *Equilibrium line altitude fluctuation on the south west slope of Nevado Coropuna since the last glacial maximum (Cordillera Ampato, Perú)*. *Pirineos*, 14.
- Campos, N. (2020). *Revisión de procedimientos metodológicos para la reconstrucción glaciaria y el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio*. *SciELO*, 30.
- Casado, A., & Melón, P. (2024). GEOLODÍA 24. ¿Qué es un glaciar y cómo funciona? Los glaciares de montaña. *Geología desde Ávila*. [https://geolodiaavila.com/2024/05/03/geolodia-24-que-es-un-glaciar-y-como-funciona-los-glaciares-de-montana/#:~:text=GEOLOD%C3%8DA%2024.-%20BFQu%C3%A9%20es%20un%20glaciar%20y%20c%C3%B3mo%20funciona,Los%20glaciares%20de%20monta%C3%B1a&text=Un%20glaciar%20\(del%20franc%C3%A9s%20glacier,a%C3%B1os%20para%20que%20esto%20suceda](https://geolodiaavila.com/2024/05/03/geolodia-24-que-es-un-glaciar-y-como-funciona-los-glaciares-de-montana/#:~:text=GEOLOD%C3%8DA%2024.-%20BFQu%C3%A9%20es%20un%20glaciar%20y%20c%C3%B3mo%20funciona,Los%20glaciares%20de%20monta%C3%B1a&text=Un%20glaciar%20(del%20franc%C3%A9s%20glacier,a%C3%B1os%20para%20que%20esto%20suceda)

- CEPLAN. (2023). *Análisis del proceso de pérdida y retroceso glaciar a nivel nacional y el impacto a nivel regional*. Dirección Nacional de Prospectiva y Estudios Estratégicos.
https://geo.ceplan.gob.pe/uploads/Analisis_proceso_perdida_retroceso_glaciar.pdf
- Chereque, W. (1989). *Hidrología para estudiantes de ingeniería civil*. Lima, Perú.
- Chow, V., Maidment, D., & Mays, L. (1994). *Hidrología aplicada*. Santa Fe de Bogotá: McGraw-Hill Interamericana S.A.
- Cuellar y Quispe. (2024). *Dinámica glaciar y su influencia en el balance de la masa glaciar de dos nevados: Nevado Ausangate y nevado Verónica*. Repositorio UCV.
<https://hdl.handle.net/20.500.12692/142837>
- Cunsa Robles, D. (2024). *Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del nevado Ausangate mediante el análisis multitemporal años 1985-2020, Cusco*. Repositorio de la universidad Continental - Cusco.
- Demuestran que es posible recuperar nevados en Ayacucho – Inforegión. (2011, junio 29).
<https://archivo.inforegion.pe/demuestran-que-es-posible-recuperar-nevados-en-ayacucho/>
- Estrella, D. (2016). *Determinación de curvas de frecuencia y zonificación de intensidades en la cuenca media alta del río Paute* [Tesis de maestría, Universidad de Cuenca]. Ecuador.
- García, A. (2013). *Análisis de distribuciones estadísticas alternativas a las tradicionales para la optimización de los caudales de cálculo empleados en los estudios hidrológicos* [Tesis doctoral, Universidad de Extremadura]. España.
- Giraldo, R. (2005). *Introducción a la geostatística*. Departamento de Estadística, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá, Colombia.
- GRIDA-ARENDAL. (2019). *Distribución de los glaciares, superficie y altitud en los Andes*. Recuperado de <https://www.grida.no/resources/12851>
- Huñuq Mayu. (2020). *Protección y conservación de cuenca y agricultura familiar en un contexto de cambio climático* [PDF]. <https://www.cepes.org.pe/wp-content/uploads/2020/01/final-para-visita.pdf>
- INAIGEM. (2017). *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares*. Huaraz.
- INRENA & PNUD. (1994). *Estudio de caso: cuenca del río Cachi, Huancavelica Perú*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Recuperado el 28 de agosto de 2024 de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1608>

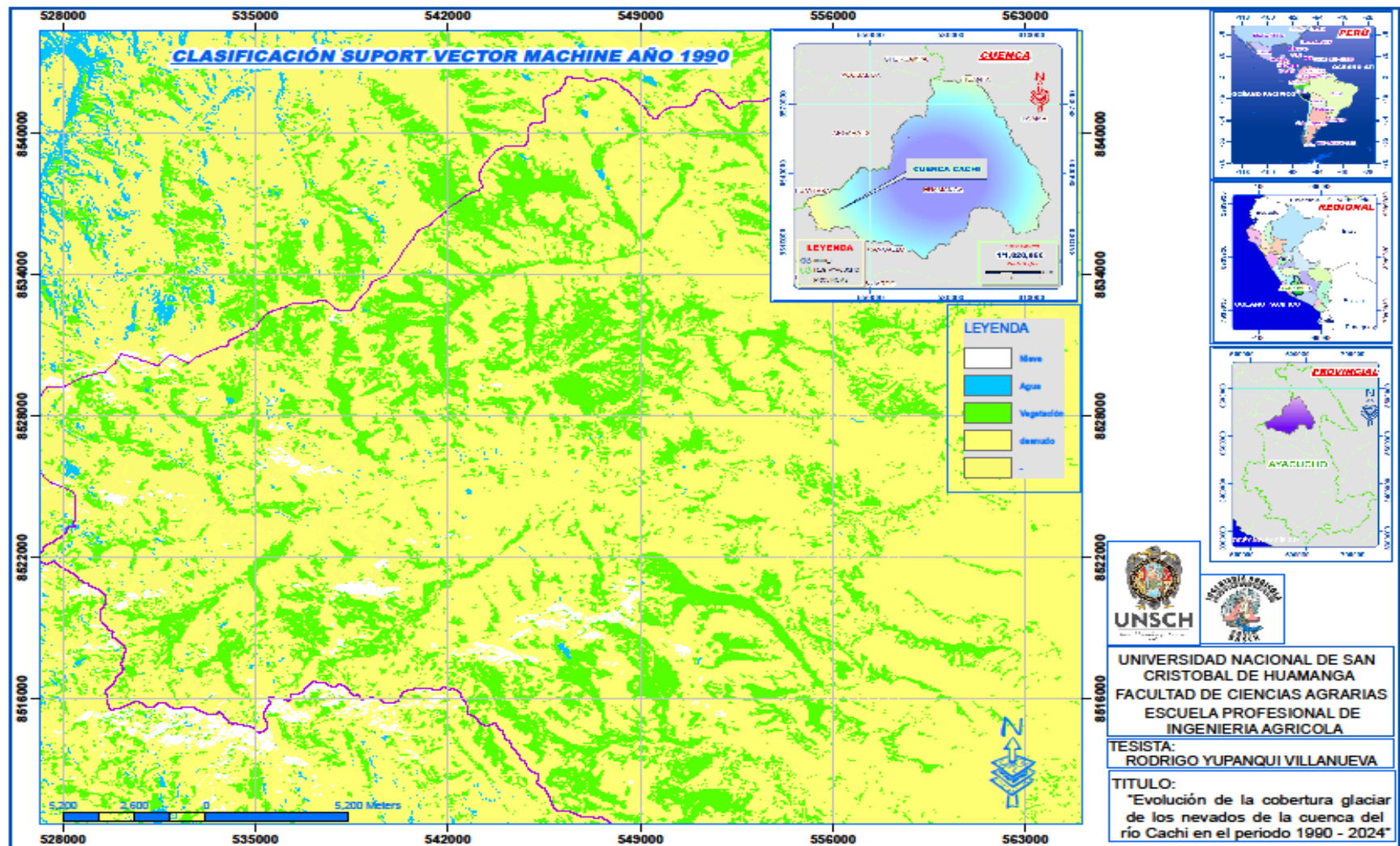
- INRENA & PNUD. (1994). *Estudio de caso: cuenca del río Cachi, Huancavelica Perú*. Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego. Recuperado el 28 de agosto de 2024 de <https://hdl.handle.net/20.500.12543/1608>
- Johansen Synnove, K., Alfthan, B., Baker, E., Hesplng, M., Schoolmeester, T., & Verblst, K. (2018). *ATLAS DE GLACIARES Y AGUAS ANDINOS, El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. París: UNESCO y GRID-Arendal.
- Johansen Synnove, K., Alfthan, B., Baker, E., Hesplng, M., Schoolmeester, T., & Verblst, K. (2018). *ATLAS DE GLACIARES Y AGUAS ANDINOS, El impacto del retroceso de los glaciares sobre los recursos hídricos*. PARIS: UNESCO y GRID-Arendal.
- Lechón, F. (2016). *PerúSAT-1, el primer satélite de observación del Perú*. Airbus Defence and Space. https://www.airbus.com/sites/g/files/jlcbta136/files/80a2d010b4800f9c4c2ee4b0d02f6da8_news-release-perusat-1-first-image-es.pdf
- Li, Z., & Chen, L. (2017). "Machine learning for remote sensing data analysis: A review." *Journal of Remote Sensing*. <https://arxiv.org/abs/1710.03959>
- Lillesand, T. M., & Kiefer, R. W. (2015). *Remote sensing and image interpretation* (7th ed.). Wiley.
- Mather, P. M., & Koch, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: An introduction*. Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470666517>
- Maturana, R. (2015). *Análisis del retroceso glaciar y su influencia en la disponibilidad de recursos hídricos en la cuenca del río Olivares, provincia Cordillera, Chile*. Repositorio Académico Universidad de Chile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/135360>
- Monge, et al. (2022). *Percepción del deshielo glaciar y el cambio climático en pobladores andinos de Perú: abordaje interdisciplinario*. SciELO Brasil. <https://doi.org/10.1590/1809-4422asoc20200227r2vu2022L3AO>
- Pal, M., & Mather, P. M. (2005). "Support vector machines for classification in remote sensing." *International Journal of Remote Sensing*. <https://doi.org/10.1080/01431160512331314083>
- Pérez Gutiérrez, C., & Muñoz Nieto, Á. (2006). *Teledetección Nociones y Aplicaciones*. España: Universidad de Salamanca.

- Perú 21. (23 de agosto de 2019). Perú SAT-1: Así fue el lanzamiento del primer satélite peruano de observación de la Tierra. *Perú 21*. <https://peru21.pe/lima/peru-sat-1-lanzamiento-primer-satelite-peruano-observacion-tierra-fotos-228335-noticia>
- Proyecto Especial Río Cachi | PDF | Clima | Reservorio. (s. f.). Recuperado 13 de noviembre de 2024, de <https://es.scribd.com/document/479246689/363855576-Proyecto-Especial-Rio-Cachi-1>
- Puertas, O. y otros. (2011). *Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta - media del río Cauca, Colombia*. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/34126>
- R Core Team. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Rojas. (s. f.). "Uso de imágenes Sentinel-2 en la evaluación de glaciares." *International Journal of Remote Sensing. SciELO Colombia*. <http://www.scielo.org.co/pdf/inco/v25n3/2027-8284-inco-25-03-e-30612708.pdf>
- Sánchez, E. (s. f.). *Análisis multitemporal del retroceso glaciar Quelccaya, Ancash-Perú, 1990-2021, Cuzco-Puno, Perú*. MASTERGIS. <https://mastergis.com/proyecto/analisis-multitemporal-del-retroceso-glaciar-quelccaya-ancash-peru-1990-2021-cuzco-punoperu>
- Tejada, M., & Bernex, N. (2010). *Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos*. Global Water Partnership. <https://keneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas-Montanas/4.pdf>
- Vásquez, A., Mejía, A., Manco, J. F., Terán, R., Vásquez, I., Díaz, J., Vásquez, C., Castro, A., Tapia, M., & Alcántara, J. (2023). *Manejo y gestión de cuencas hidrográficas*. Universidad Nacional Agraria La Molina. https://academia.edu/45664011/MANEJO_Y_GESTI%C3%93N_DE_CUENCAS_HIDROGR%C3%81FICAS_Universidad_Nacional_Agraria_La_Molina
- Vásquez, et al. (2021). *Ensayo de métodos para reconstruir el volumen de los glaciares, en 2016, 1962 y la Pequeña Edad del Hielo, en el valle Suiricocha, Cordillera Pariacaca, Perú*. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/4247>
- Villón Béjar, M. (2002). *Hidrología*. Costa Rica: MaxSoft.

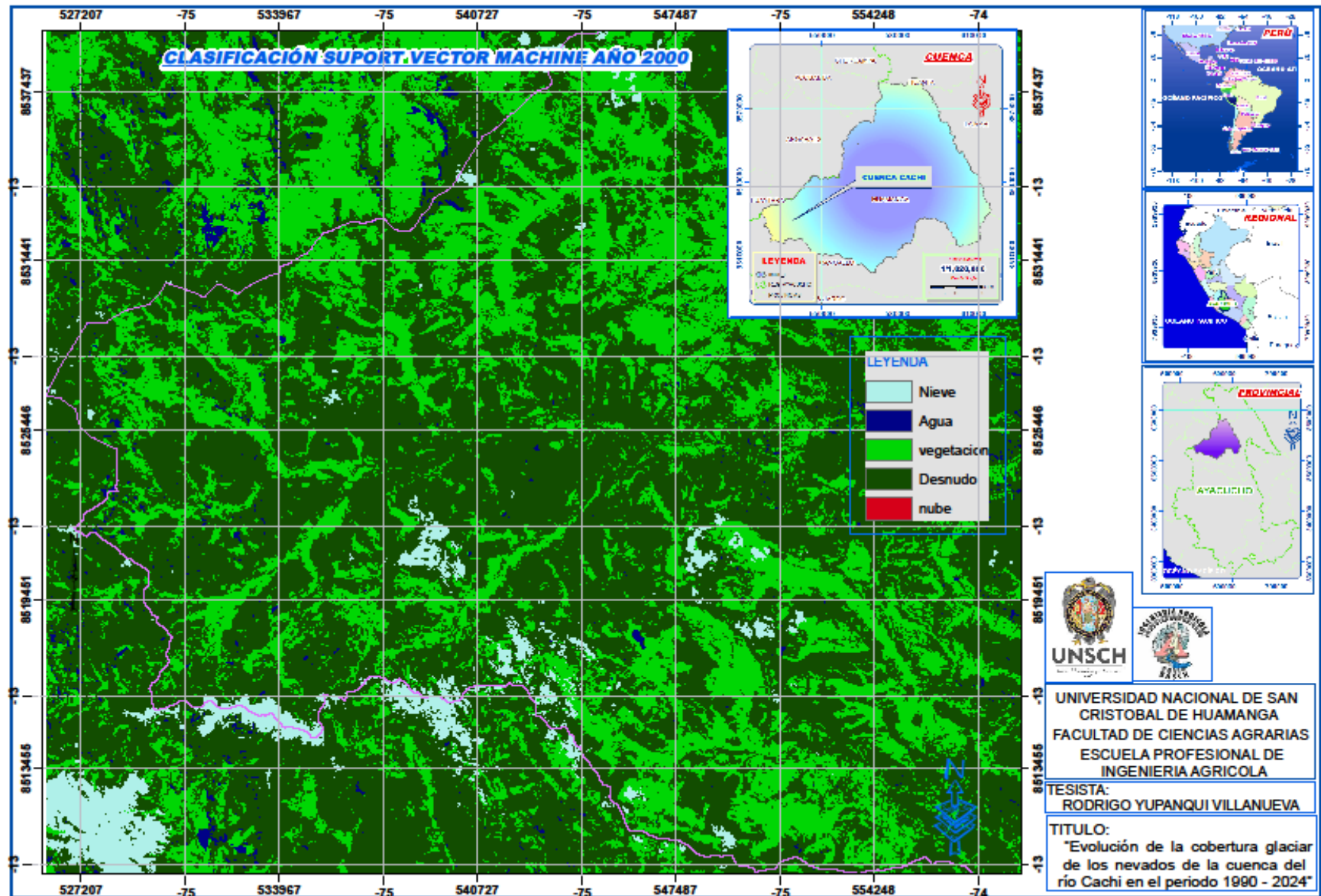
ANEXOS



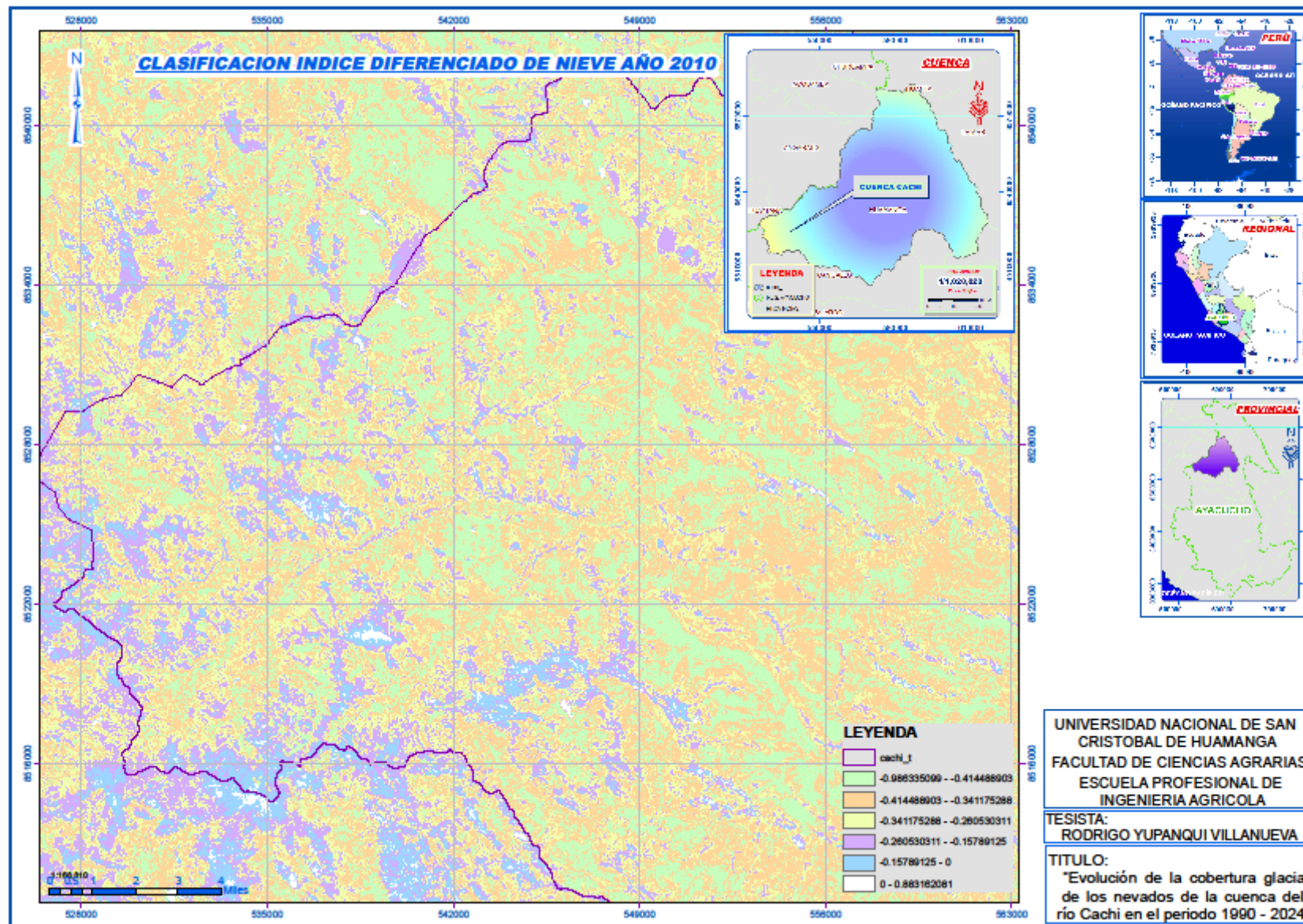
Anexo 7.1: mapa de ubicación de la zona



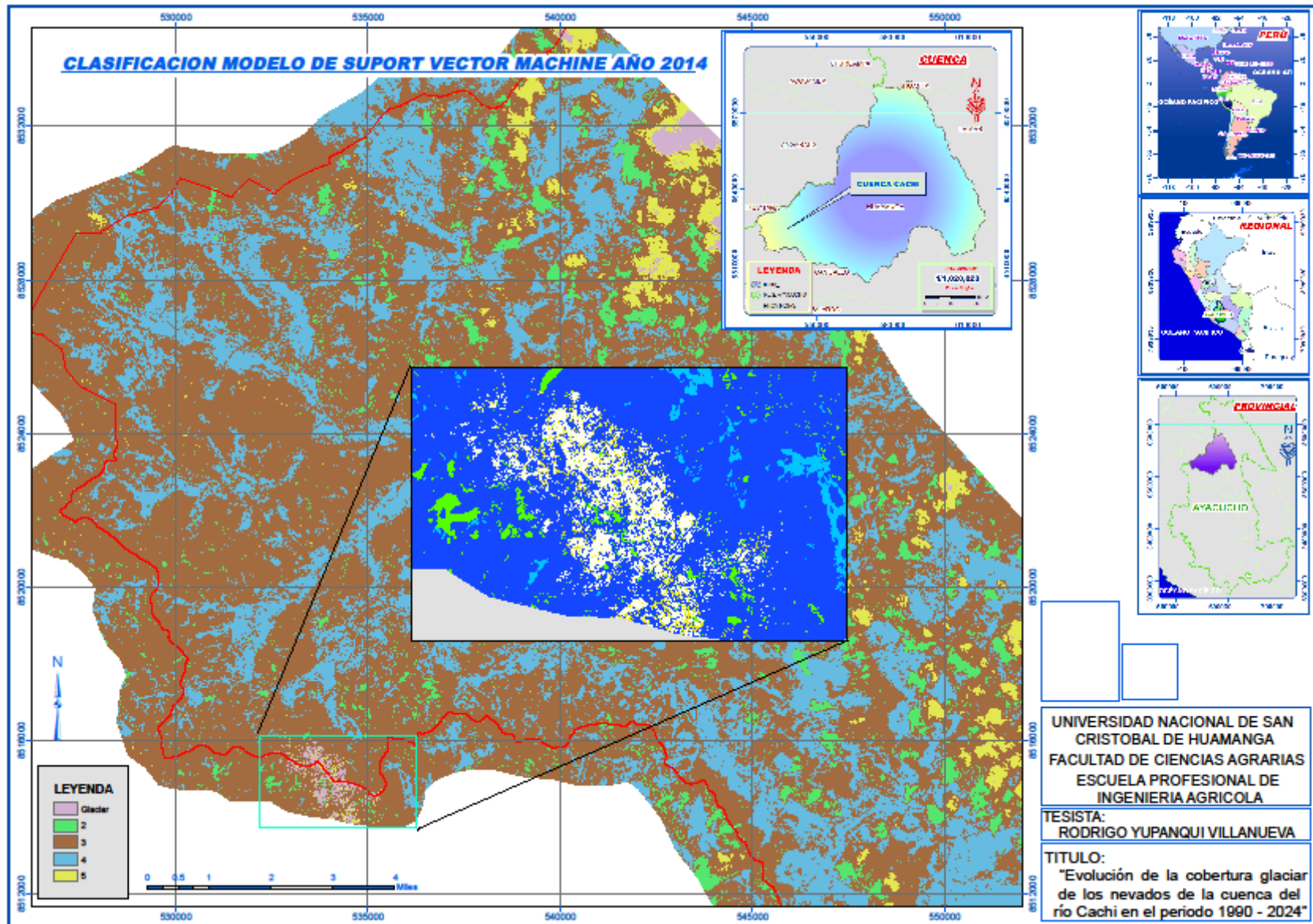
Anexo 7.2: clasificación supervisada por vector support machine año 1990



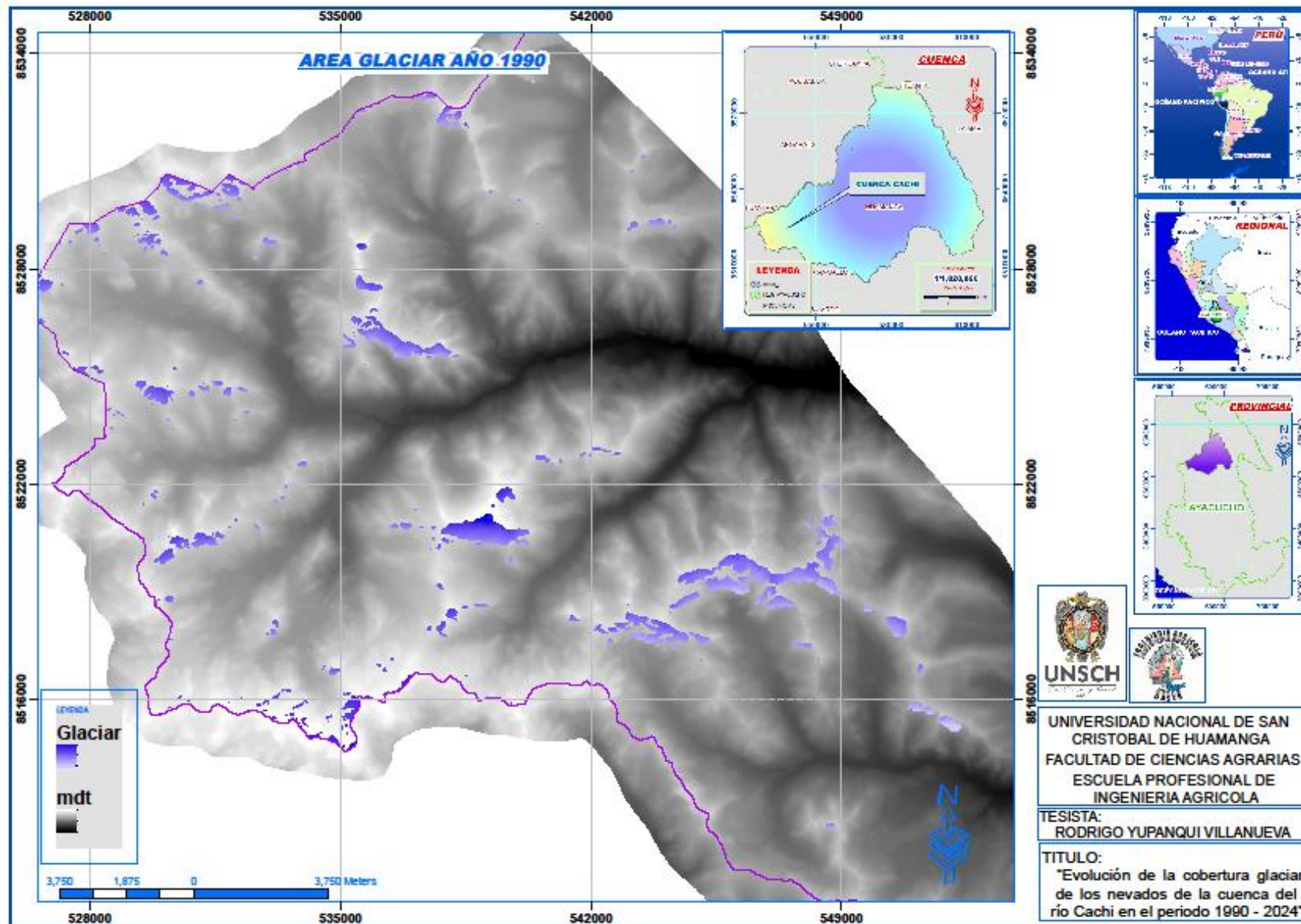
Anexo 7.3: clasificación supervisada por vector suport machine año 2000



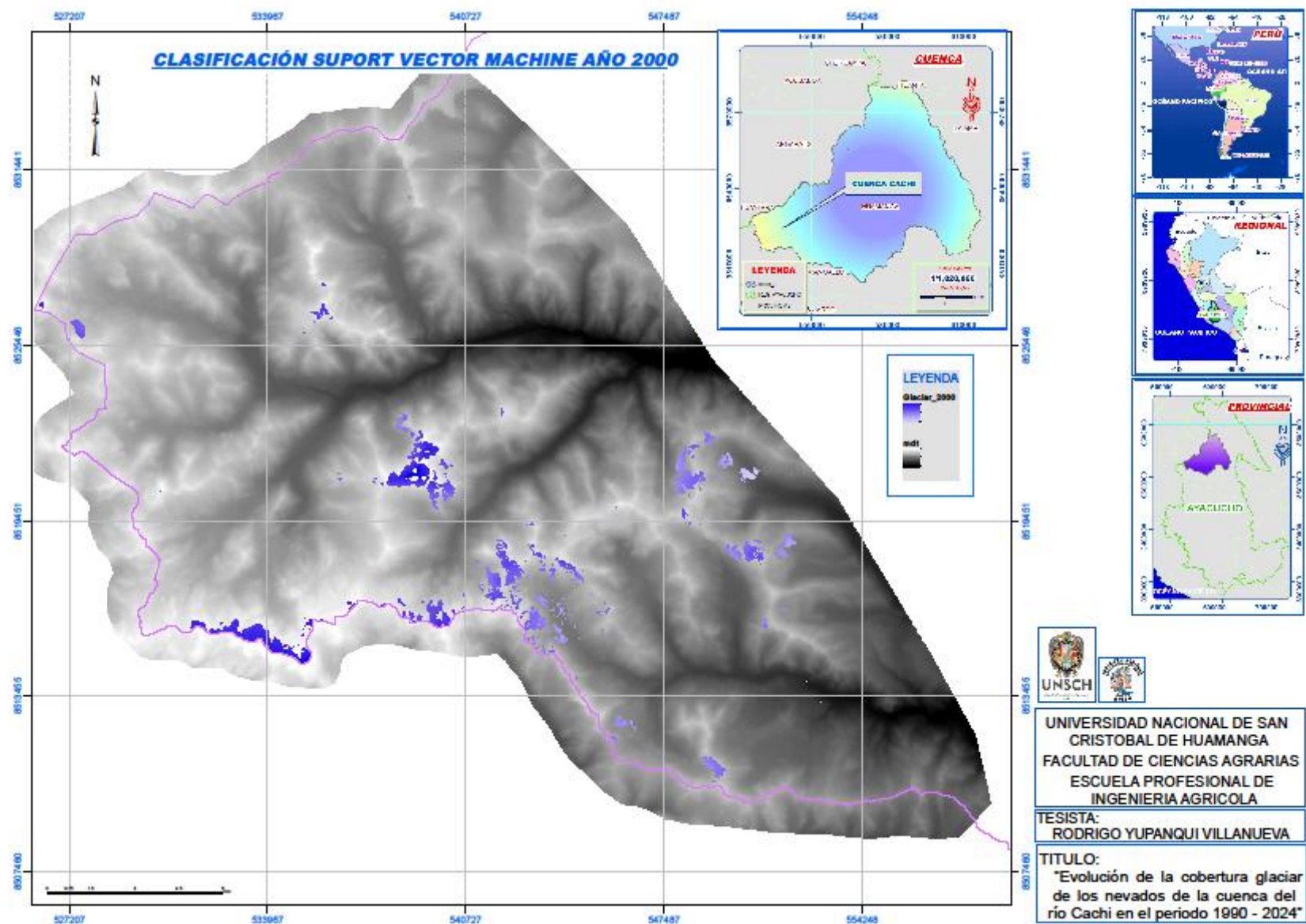
Anexo 7.4 cálculo de área de nieve mediante el índice diferenciado de nieve año 2010.



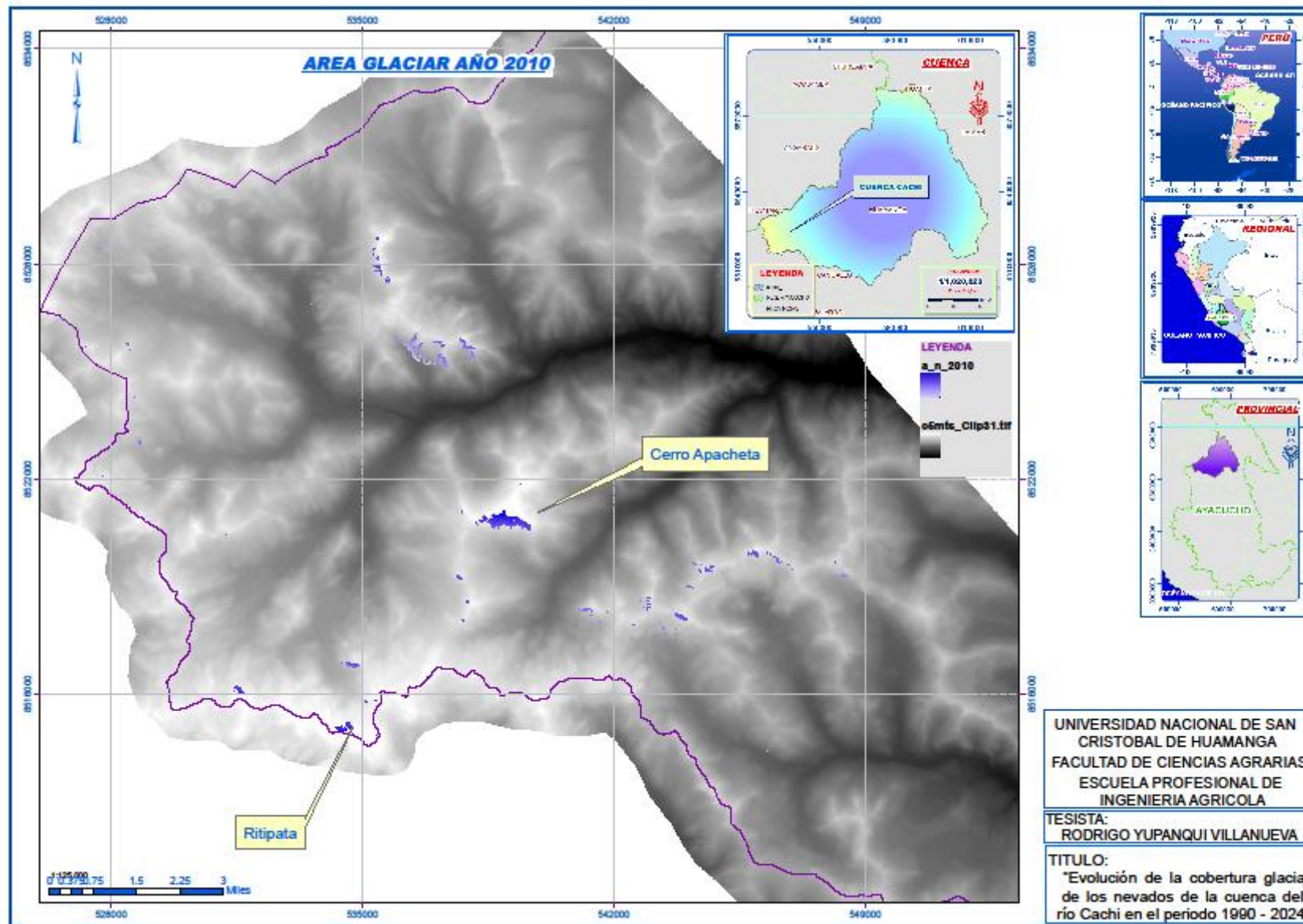
Anexo 7.5 clasificación supervisada por vector suport machine año 2024.



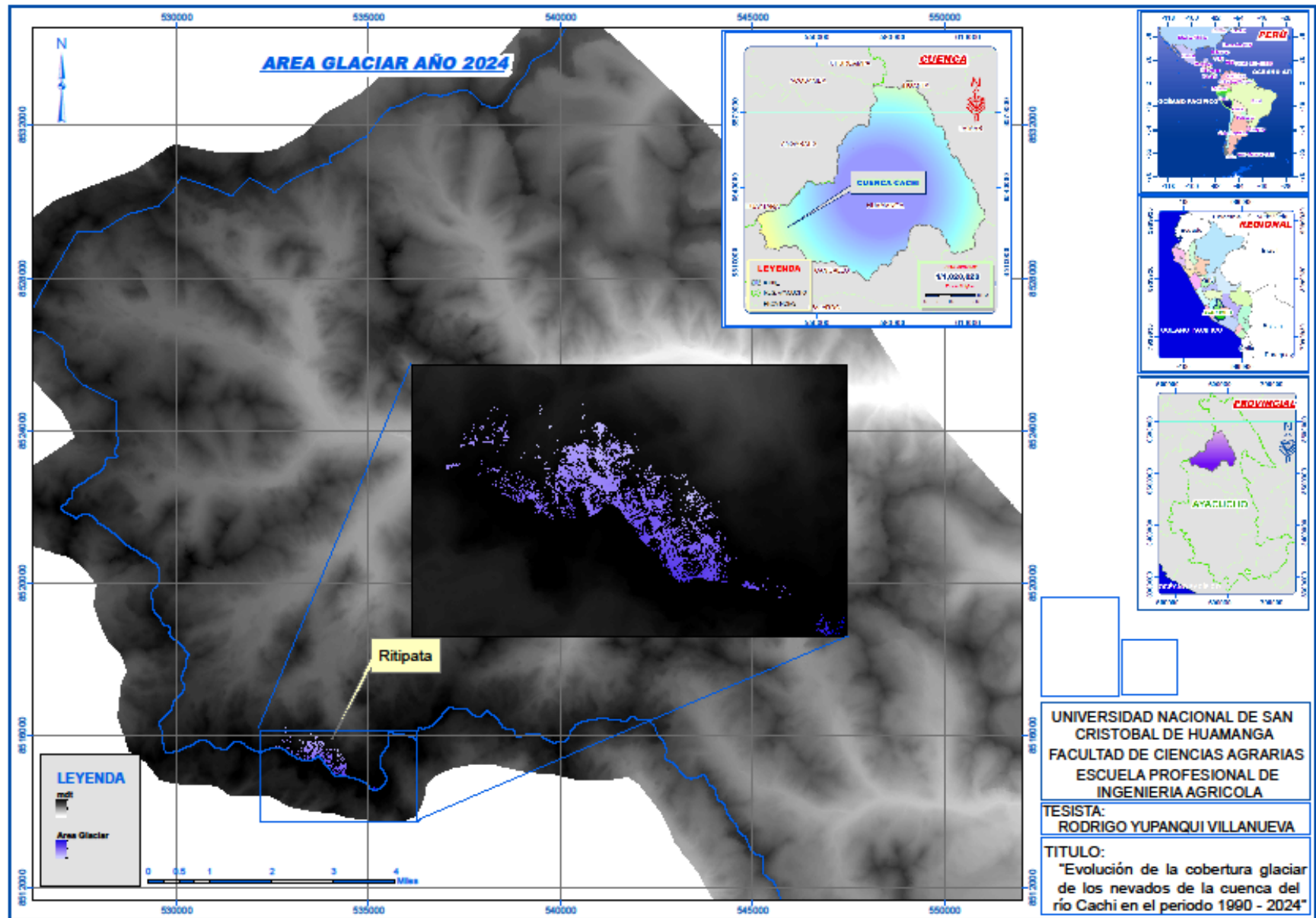
Anexo 7.6: Área de glaciar en la cabecera de la cuenca cachi año 1990.



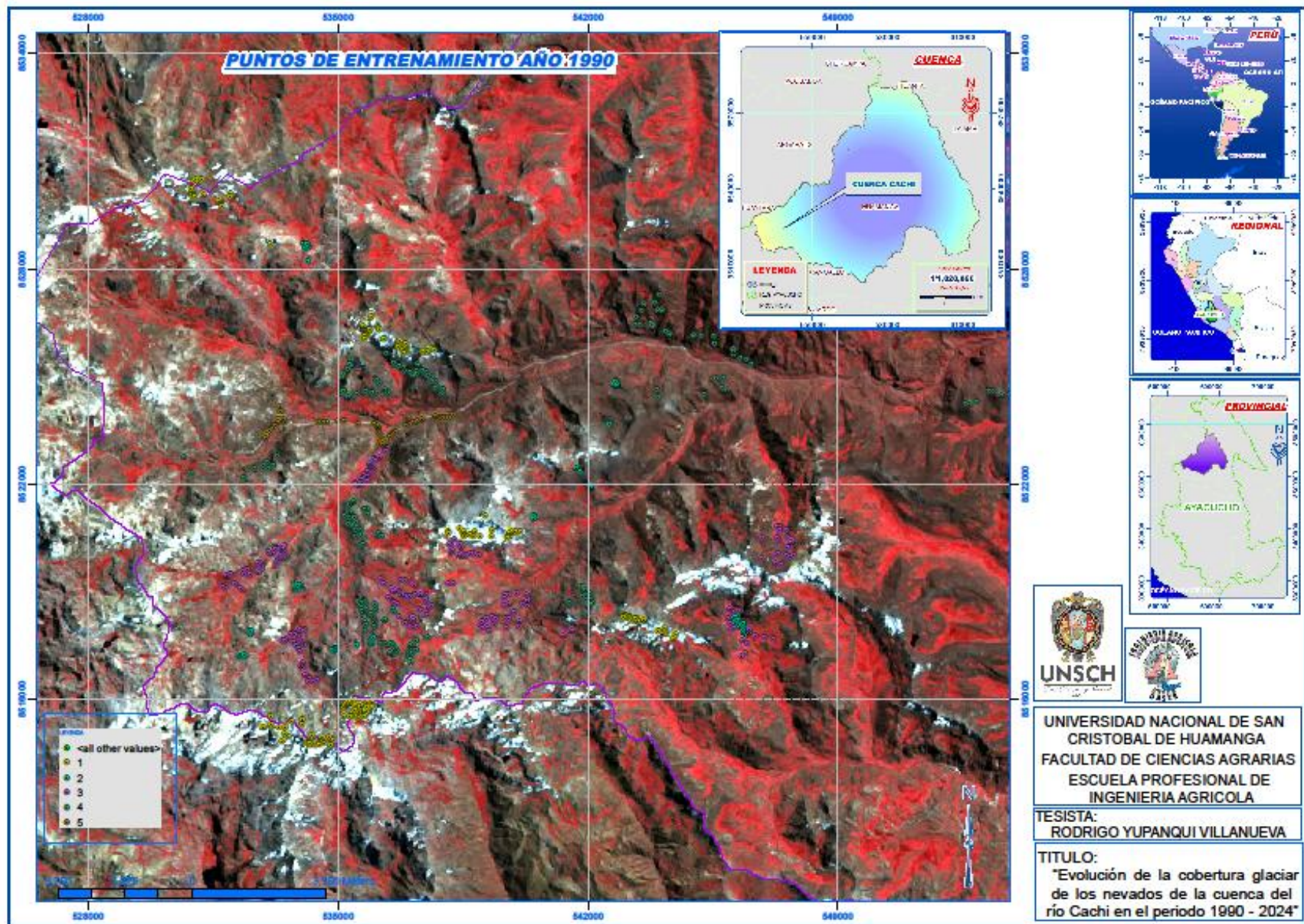
Anexo 7.7 : Área de glaciar en la cabecera de la cuenca cachi año 2000.



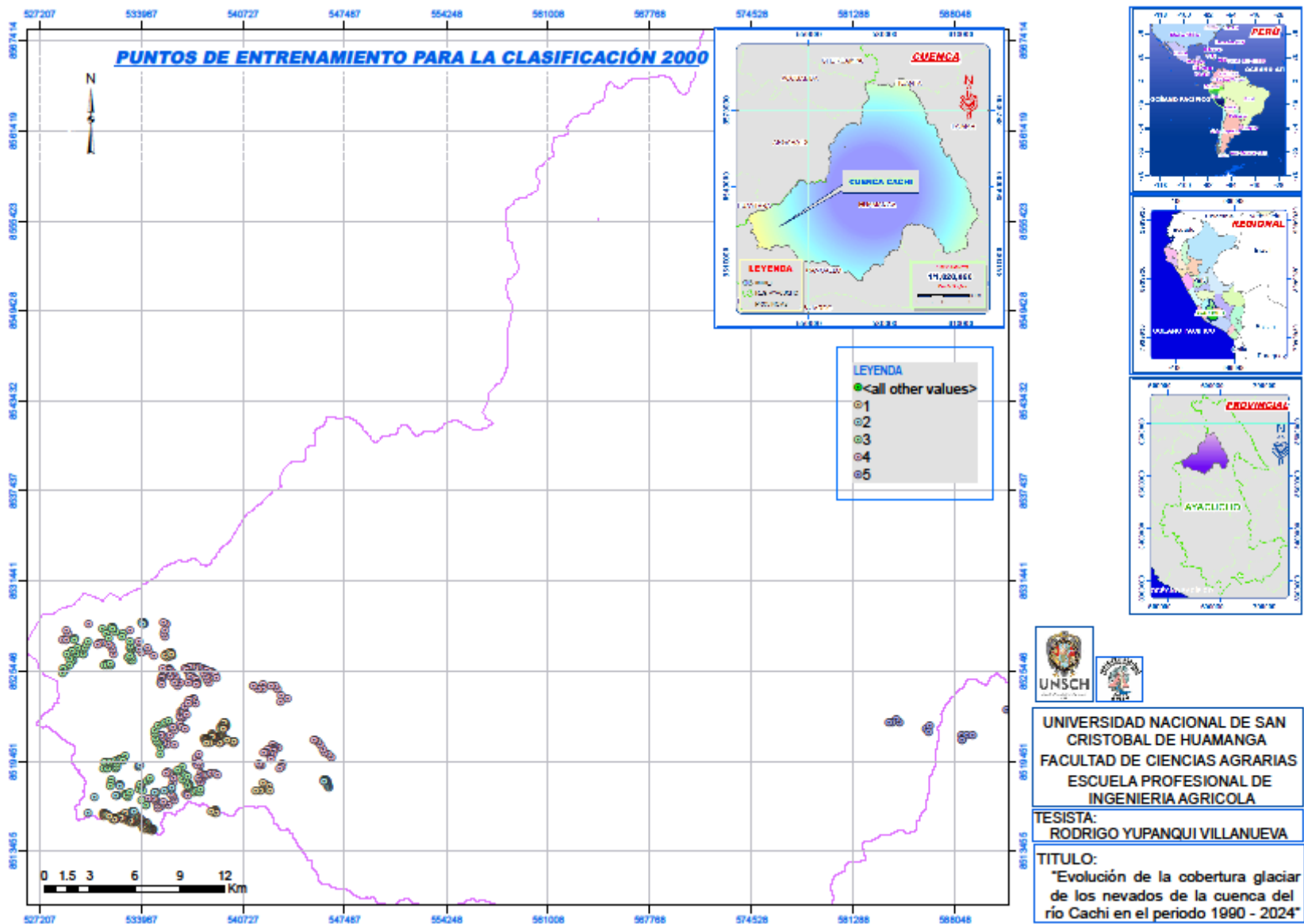
Anexo 7.8: Área de glaciar en la cabecera de la cuenca cachi año 2010.



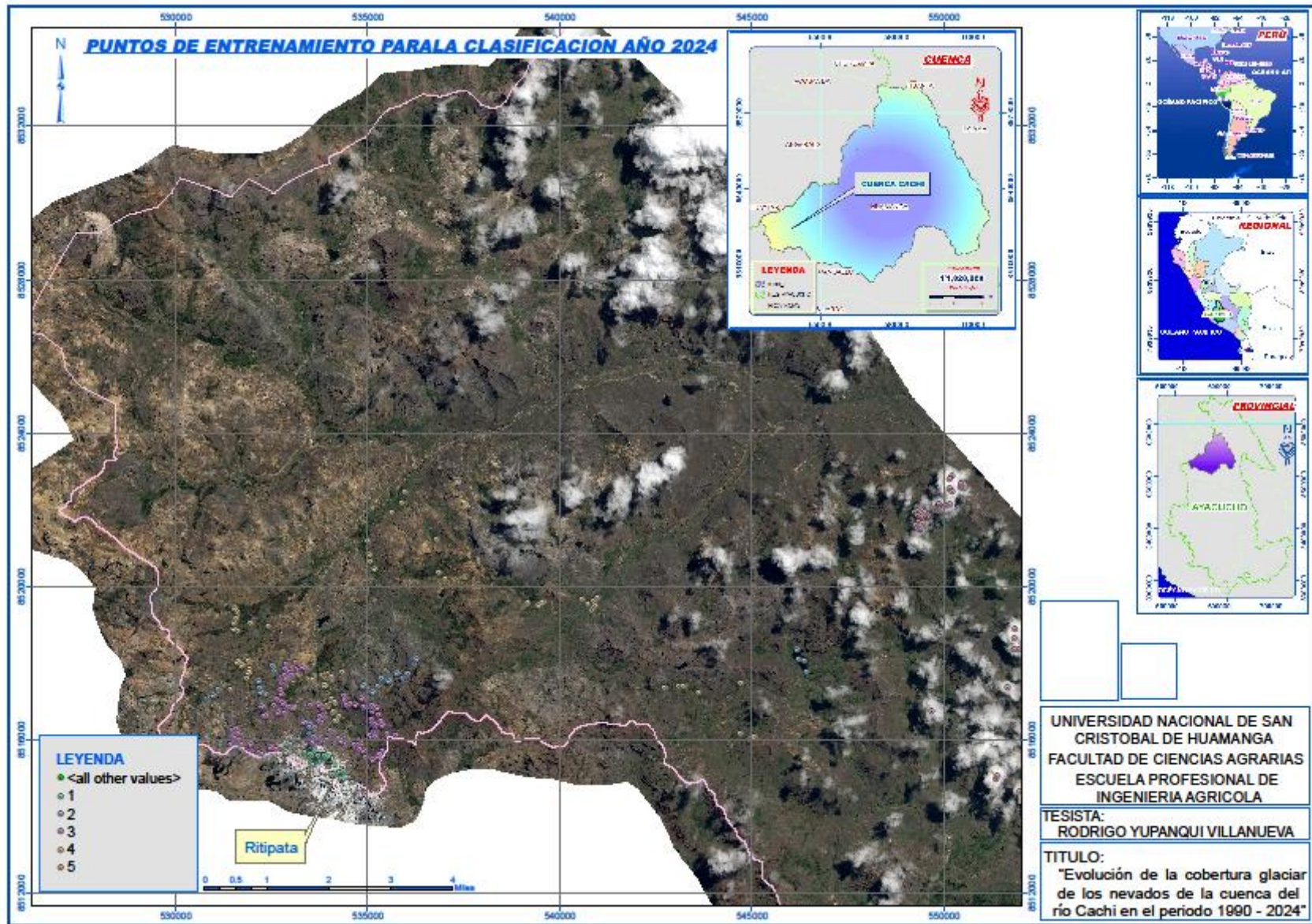
Anexo 7.9: Área de glaciar en la cabecera de la cuenca cachi año 2010



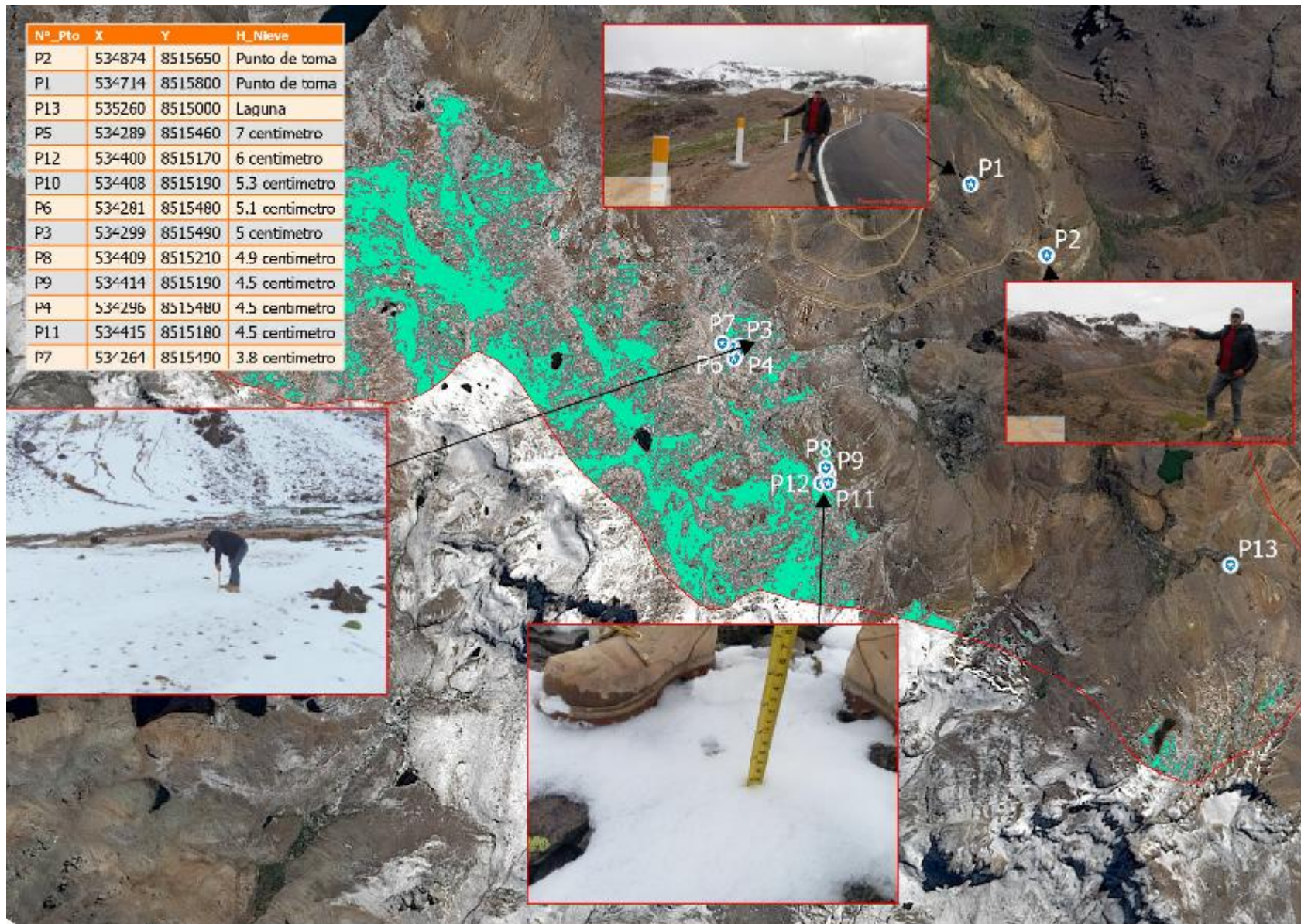
Anexo 7.10: puntos de entrenamiento para la clasificación año 1990



Anexo 7.11 : puntos de entrenamiento para la clasificación año 2000



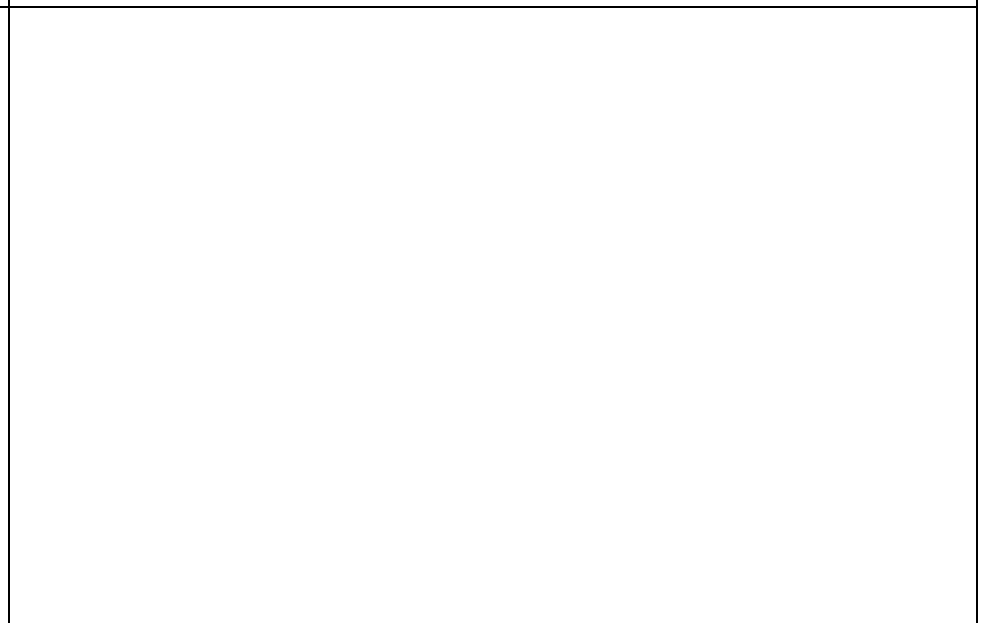
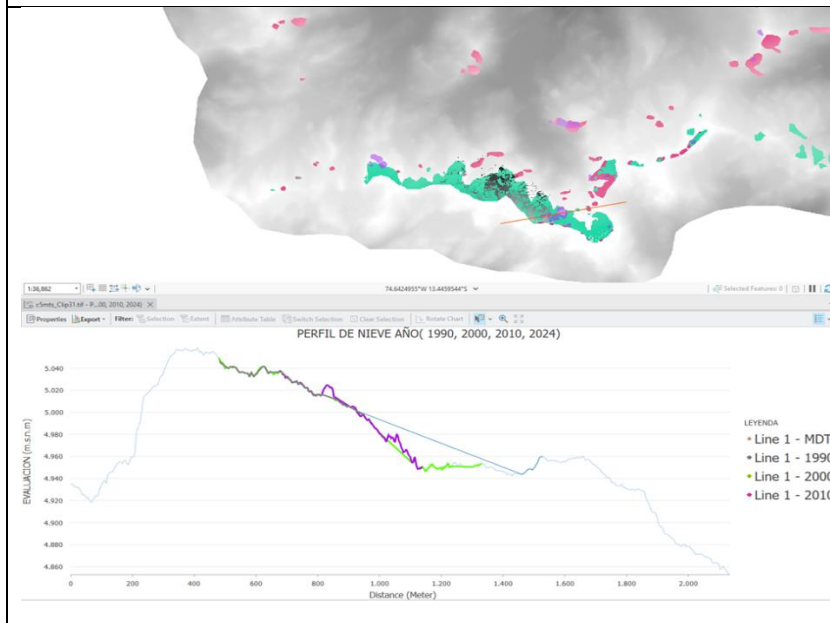
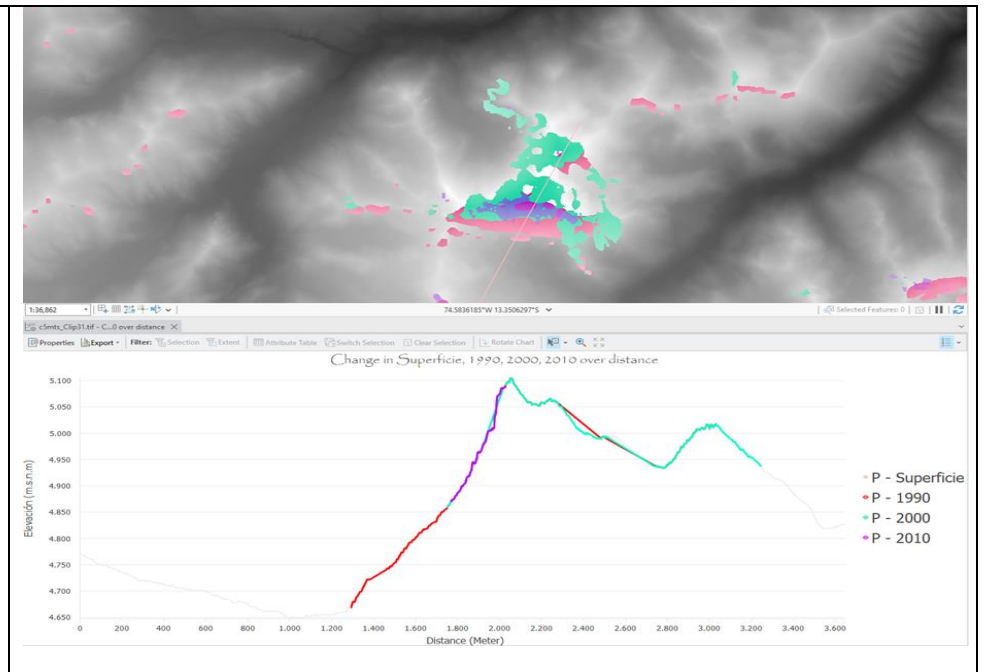
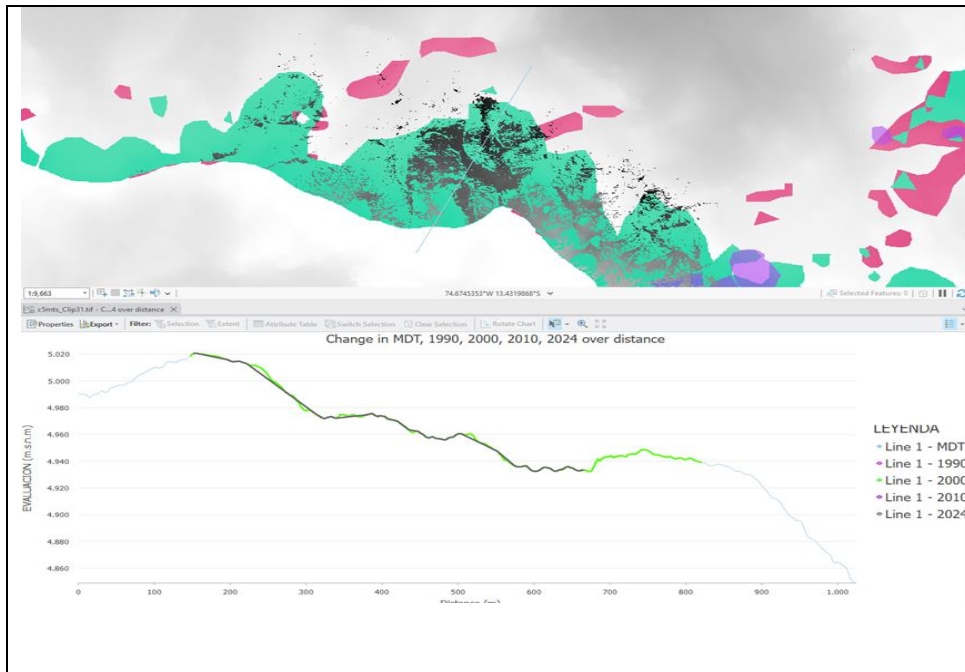
Anexo 7.12: puntos de entrenamiento para la clasificación año 2024



Anexo 7.13: puntos para la validación con datos del campo

Fotografías dela zona de nevado





Imágenes de perfiles de la zona glaciar

Entrevistador n°01

Nombres y Apellidos Lucas Ccorahua Misaraymi
edad 67 Años
lugar Santafé barrio Ritipata

preguntas:

1: En el año de los 90 como era el glaciar en la zona?

El nevado en Ritipata llegaba hasta la altura de las rodillas, y caminar sobre el hielo era difícil; por eso, solo se transitaba cuando hacía mucho frío y la capa de hielo se endurecía.

2: Desde que año empezó a derretirse los glaciares?

La disminución era lenta en esos años, pero hace aproximadamente 20 años comenzó a desaparecer rápidamente.

3: Actualmente hay nieve todavía?

En el año 2025, todavía hay nieve, aunque en poca cantidad. Las capas de hielo varían entre 5 y 20 cm, especialmente entre enero y mayo.

Entrevistador n°02

Nombres y Apellidos Alejandra José Candiote
edad 66 Años
lugar Santafé

preguntas:

1: En el año de los 90 como era el glaciar en la zona?

Cuando tenía entre 10 y 20 años, toda la zona de Ritipata estaba cubierta de nieve constantemente, y no se podía caminar fácilmente por ella.

2: Desde que año empezó a derretirse los glaciares?

El nevado ha disminuido considerablemente; por ejemplo, el cerro Chicllarazo ya no está cubierto de blanco.

3: Actualmente hay nieve todavía?

Hoy en día, prácticamente no hay nieve. En el cerro solo quedan algunas zonas sombreadas y la punta con un poco de blanco.

Entrevistador n°03

Nombres y Apellidos Toribio Tacuri Misaraymi
edad 52 Años
lugar Santafé

preguntas:

1: En el año de los 90 como era el glaciar en la zona?

Cuando era niño, toda la zona estaba cubierta de nieve, donde solíamos jugar. Sin embargo, luego empezó a desaparecer y la cantidad de lluvia también se redujo.

2: Desde que año empezó a derretirse los glaciares?.

La desaparición comenzó hace aproximadamente 20 años, principalmente debido al aumento del calor, que ha sido intenso

3: Actualmente hay en la zona?

Actualmente, no queda nieve desde mayo hasta que comienzan las lluvias; todo está negro. Además, han desaparecido los pequeños riachuelos que antes fluían constantemente.



ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TESIS
Bach. RODRIGO FERNANDO YUPANQUI VILLANUEVA

R.D. N° 091-2025-UNSCH-FCA-D

En la ciudad de Ayacucho a los ocho días del mes de mayo del año dos mil veinticinco, siendo las dieciocho horas, se reunieron en el auditorio de la Facultad de Ciencias Agrarias, bajo la presidencia del Dr. Felipe Escobar Ramírez Decano de la Facultad de Ciencias Agrarias; los miembros del jurado conformado por Dr. Juan Charapaqui Anccasi, Mtro. Ronald Rojas Naccha como asesor, Mtro. Richard Alex Oscco Peceros y el Ing. Eduardo Pacori Quispe; actuando como secretario de actas el Mtro. Rodolfo Alca Mendoza, para recibir la sustentación de la Tesis titulado: **Evolución de la cobertura glaciar de los nevados de la cuenca del río Cachi en el periodo 1990 - 2024**, para obtener el Título Profesional de Ingeniero Agrícola presentado por el Bachiller **RODRIGO FERNANDO YUPANQUI VILLANUEVA**.

El señor Decano previa verificación de los documentos exigidos solicitó se proceda con la sustentación y posterior defensa de la tesis en un periodo de cuarenta y cinco minutos de acuerdo al reglamento de grados y títulos vigente. Terminado la exposición, los miembros del Jurado, formularon sus preguntas, aclaraciones y/o observaciones correspondientes. Luego se invito a los miembros del jurado pasar a otra aula para la deliberación y calificación del trabajo de tesis, teniendo el siguiente resultado:

Jurado evaluador	Exposición	Respuestas a las preguntas	Generación de conocimiento	Promedio
Dr. Juan Charapaqui Anccasi	13	15	14	14
Mtro. Ronald Rojas Naccha	16	14	16	15
Mtro. Richard Alex Oscco Peceros	15	15	15	15
Ing. Eduardo Pacori Quispe	16	16	16	16
PROMEDIO GENERAL				15

Acto seguido se invita al sustentante y publico en general para dar a conocer el resultado final. Firman el acta.

Dr. Juan Charapaqui Anccasi
Presidente

Mtro. Ronald Rojas Naccha
Asesor

Mtro. Richard Alex Oscco Peceros
Jurado

Ing. Eduardo Pacori Quispe
Jurado

Mtro. Rodolfo Alca Mendoza
Secretario Docente



UNSCH

FACULTAD DE CIENCIAS
AGRARIAS

CONSTANCIA DE CONTROL DE ORIGINALIDAD DE TRABAJO DE TESIS

El que suscribe, miembro de la comisión de docentes instructores responsables de operativisar, verificar, garantizar y controlar la originalidad de los trabajos de **TESIS** de la Facultad de Ciencias Agrarias, de la Universidad Nacional de San Cristóbal de Huamanga, autorizado por R.C.F. N° N° 005-2024-UNSCH-FCA-CF; hace constar que el trabajo titulado;

Evolución de la cobertura glaciar de los nevados de la cuenca del río Cachi en el periodo 1990 – 2024

Autor : Rodrigo Fernando Yupanqui Villanueva

Asesor : Ronald Rojas Naccha

Ha sido sometido al control de originalidad mediante el software TURNITIN UNSCH, acorde al Reglamento de originalidad de trabajos de Tesis, aprobado mediante la RCU N° 039-2021-UNSCH-CU, arrojando un resultado de Ocho por ciento (**8 %**) de índice de similitud, realizado con **depósito de trabajos estándar**.

En consecuencia, se otorga la presente Constancia de Originalidad para los fines pertinentes.

Nota: Se adjunta el resultado con Identificador de la entrega: 2688499740

Ayacucho, 30 de mayo de 2025

UNIVERSIDAD NACIONAL DE
SAN CRISTÓBAL DE HUAMANGA
Facultad de Ciencias Agrarias

Ing. Edgar Tenorio Mancilla
Coordinador de Control de originalidad de
trabajo de investigación y tesis - FCA

Evolución de la cobertura glaciar de los nevados de la cuenca del río Cachi en el periodo 1990 – 2024

por Rodrigo Fernando Yupanqui Villanueva

Fecha de entrega: 30-may-2025 10:05a.m. (UTC-0500)

Identificador de la entrega: 2688499740

Nombre del archivo: INFORME_FINAL_DE_TESIS_2025_RFYV_CORREGIDO.txt (196.84K)

Total de palabras: 26689

Total de caracteres: 156622

Evolución de la cobertura glaciar de los nevados de la cuenca del río Cachi en el periodo 1990 – 2024

INFORME DE ORIGINALIDAD

8%

INDICE DE SIMILITUD

8%

FUENTES DE INTERNET

3%

PUBLICACIONES

4%

TRABAJOS DEL ESTUDIANTE

FUENTES PRIMARIAS

1	repositorio.unasam.edu.pe Fuente de Internet	1%
2	hdl.handle.net Fuente de Internet	1%
3	repositorio.unfv.edu.pe Fuente de Internet	<1%
4	repositorio.umsa.bo Fuente de Internet	<1%
5	repositorio.continental.edu.pe Fuente de Internet	<1%
6	repositorio.inaigem.gob.pe Fuente de Internet	<1%
7	repositoriotec.tec.ac.cr Fuente de Internet	<1%
8	repositorio.unsch.edu.pe Fuente de Internet	<1%

developers.google.com

9

Fuente de Internet

<1 %

10

alicia.concytec.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

11

www.conacyt.gov.py

Fuente de Internet

<1 %

12

cdn.www.gob.pe

Fuente de Internet

<1 %

13

Canaza Ortiz, Miler Showil. "Análisis multitemporal de la cobertura glaciar del nevado Ananea (Puno, Perú) y su influencia climática, período 1985 – 2022", Universidad Nacional del Altiplano de Puno (Peru)

Publicación

<1 %

14

CONSORCIO S Y C SOCIEDAD ANONIMA CERRADA. "Informe de Gestión Ambiental del Proyecto Instalación y Mejoramiento del Servicio del Agua del Sistema de Riego Pisccococha, Distrito de Huanta e Iguain - Provincia de Huanta - Ayacucho-IGA0013010", R.D.G. N° 279-14-MINAGRI-DGAA, 2021

Publicación

<1 %

15

JUAN GUILLERMO LOZANO ARANGO. "APLICACIÓN DE LA TELEDETECCIÓN AL ESTUDIO DE LAS NECESIDADES HÍDRICAS DE LOS HUMEDALES. CASO DE ESTUDIO

<1 %

HUMEDALES ESPAÑOLES", Universitat Politecnica de Valencia, 2016

Publicación

16

rstudio-pubs-static.s3.amazonaws.com

Fuente de Internet

<1 %

17

AGROFORESTAL TACNA E.I.R.LTDA.. "Informe de Gestión Ambiental del Proyecto Denominado Mejoramiento de la Infraestructura del Reservorio en el Sector Chihuluna, del Centro Poblado de Muylaque, Distrito de San Cristóbal - Mariscal Nieto - Moquegua-IGA0014253", R.D.G. N° 351-2017-MINAGRI-DVDIAR-DGAAA, 2021

Publicación

<1 %

18

www.slideshare.net

Fuente de Internet

<1 %

19

Submitted to Universidad Nacional Agraria La Molina

Trabajo del estudiante

<1 %

20

Submitted to Universidad Continental

Trabajo del estudiante

<1 %

21

repositorio.ucv.edu.pe

Fuente de Internet

<1 %

22

Submitted to BENEMERITA UNIVERSIDAD AUTONOMA DE PUEBLA BIBLIOTECA

Trabajo del estudiante

<1 %

23 Submitted to Liverpool John Moores University <1 %
Trabajo del estudiante

24 Submitted to unsaac <1 %
Trabajo del estudiante

25 mundocartogeo.files.wordpress.com <1 %
Fuente de Internet

26 ambiental.net <1 %
Fuente de Internet

27 lists.openwall.net <1 %
Fuente de Internet

Excluir citas

Activo

Excluir coincidencias < 30 words

Excluir bibliografía

Activo

Evolución de la cobertura glaciar de los nevados de la cuenca del río Cachi en el periodo 1990 – 2024

Rodrigo Yupanqui Villanueva¹ rodrigo.yupanqui.21@unsch.edu.pe

Ronald Rojas Naccha² ronald.rojas@unsch.edu.pe

Área de investigación: Medio ambiente

Línea de investigación: Hidrología hidráulica, saneamiento, energía y cambio climático. Riego y drenaje.

RESUMEN

El presente trabajo de investigación tiene como objetivo analizar los cambios en la cobertura glaciar de la cuenca del río Cachi de la cordillera del nevado Chonta y los cerros (Ritipata, Sayhuaccasa, Chicllarazo, Hatun Urqu y Choccoro) entre 1990 y 2024, y los factores climáticos que han influido en esos cambios. Este estudio es relevante debido a los efectos del cambio climático sobre los recursos hídricos y los ecosistemas de montaña, con un enfoque en el volumen de los nevados, la Línea de Equilibrio de Nieve (ELA) y el área de acumulación de nieve. El procedimiento metodológico incluyó el uso de imágenes satelitales de Landsat, Sentinel-2, SPOT-6 y PeruSAT-1, junto con herramientas como Google Earth Engine, R y ArcGIS para procesar y analizar los datos. El volumen glaciar fue estimado mediante una fórmula empírica debido a la falta de datos exactos sobre la altura de nieve. La Línea de Equilibrio se calculó utilizando un Modelo Digital de Terreno (MDT), aunque con limitaciones en la precisión debido a la dispersión de las áreas glaciares. Para el cálculo del área de acumulación, se utilizaron imágenes satelitales de baja y alta resolución para los diferentes años. Los resultados muestran una pérdida de más del 99% del volumen glaciar, una ascensión de 199.86 metros en el ELA, y una reducción del área de acumulación en más del 97%. Estos cambios se deben al incremento de las temperaturas y la disminución de las precipitaciones, confirmando el impacto del calentamiento global. Se recomienda el uso de imágenes satelitales de alta resolución y tecnologías avanzadas como LiDAR y drones para obtener mediciones más precisas y mejorar el monitoreo continuo de los glaciares, lo que permitirá prever los efectos del cambio climático y gestionar los recursos hídricos de forma más eficiente.

Palabra clave: Cambio climático, cobertura glaciar e imágenes satelitales.

ABSTRACT

This research aims to analyze the changes in the glacial coverage of the Cachi River basin in the Chonta mountain range and the surrounding hills (Ritipata, Sayhuaccasa, Chicllarazo, Hatun Urqu, and Choccoro) between 1990 and 2024, as well as the climatic factors that have influenced these changes. This study is relevant due to the effects of climate change on water resources and mountain ecosystems, focusing on the volume of the snow-capped mountains, the Snow Line (ELA), and the snow accumulation area. The methodological procedure included the use of satellite images from Landsat, Sentinel-2, SPOT-6, and PeruSAT-1, along with tools such as Google Earth Engine, R, and ArcGIS for data processing and analysis. The glacial volume was estimated using an empirical formula due to the lack of exact snow height data. The Snow Line was calculated using a Digital Terrain Model (DTM), although with limitations in accuracy due to the dispersion of the glacial areas. For the calculation of the accumulation area, both low and high-resolution satellite images from different years were used. The results show a loss of more than 99% of the glacial volume, an elevation of 199.86 meters in the ELA, and a reduction in the accumulation area by more than 97%. These changes are due to the increase in temperatures and the decrease in precipitation, confirming the impact of global warming. It is recommended to use high-resolution satellite images and advanced technologies such as LiDAR and drones to obtain more precise measurements and improve continuous monitoring of glaciers, which will help predict the effects of climate change and manage water resources more efficiently.

Keywords: Climate change, glacial coverage, and satellite images.

1. INTRODUCCIÓN

El cambio climático global ha generado una mayor variabilidad en las temperaturas y las precipitaciones. Mientras las temperaturas han mostrado un aumento claro, los patrones de precipitación no siguen tendencias definidas. Este fenómeno tiene un impacto directo en la disponibilidad y gestión del agua, afectando tanto las prácticas agrícolas como los ecosistemas. La incertidumbre en los patrones de precipitación, junto con el incremento de temperaturas extremas, presenta grandes desafíos de adaptación a nivel local (Puertas O. y otros, 2011). Por ello, comprender estos procesos climáticos es esencial para desarrollar estrategias de manejo y adaptación ante los retos del cambio climático.

En Perú, la cobertura de hielo en los glaciares disminuye a un ritmo alarmante del 1% anual. Mientras que las grandes cordilleras de alta altitud retroceden más lentamente, los glaciares de menor altitud se están derritiendo más rápido. Por ejemplo, la Cordillera La Viuda en la Sierra de Lima ha perdido el 88% de su superficie en las últimas seis décadas (INAIGEM, s.f.). Este retroceso glaciar afecta no solo la disponibilidad de agua dulce, sino que también reduce la capacidad de amortiguación durante las sequías, lo que afecta gravemente la seguridad alimentaria, la calidad del agua, y el potencial turístico de la región (Tejada & Bernex, 2010).

El retroceso de los glaciares tiene implicaciones directas en los ecosistemas socioecológicos de la región, alterando la temperatura local, la cobertura vegetal, el ciclo hidrológico y las poblaciones que dependen de estos frágiles ecosistemas. Dada su importancia, es esencial comprender y gestionar este fenómeno para garantizar el futuro sostenible de las regiones andinas.

La presente investigación se enfoca en analizar cómo se comporta el área glaciar en la cuenca del río Cachi perteneciente a la cordillera del nevado Chonca en los cerros (Ritipata, Sayhuaccasa, Chicllarazo, Hatun Urqu y Choccoro) durante el periodo 1990 a 2024. Este estudio busca identificar el impacto del cambio climático en el retroceso glaciar y cómo estos cambios afectan los recursos hídricos y las actividades dependientes del agua.

2. METODOLOGÍA

2.1. Ubicación de la zona de estudio

El trabajo de investigación se centra en la cuenca cachi, exactamente en la cabecera, donde los nevados desempeñan un papel crucial en el ciclo hidrológico de la región. Los nevados son fundamentalmente para el almacenamiento del agua en forma de nieve y glaciares, los cuales se derriten contribuyendo a los caudales de los ríos que forman la cuenca.

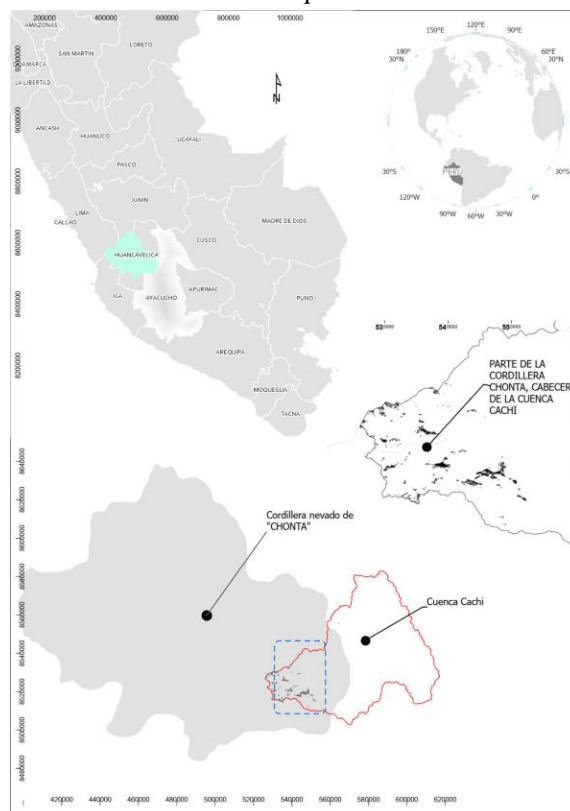


Figura 2.1: Mapa de la ubicación de la zona de estudio

2.2. Procedimiento para el cálculo del volumen glaciar

2.2.1. Selección de imágenes satelitales

El procedimiento de selección de imágenes satelitales se realiza mediante Google Earth Engine, una plataforma poderosa que ofrece acceso a imágenes de satélites como Landsat, Sentinel y MODIS (Perilla & Jean-François, 2020). Proporciona herramientas para procesar, analizar y visualizar datos, y su integración con JavaScript y Python facilita su uso.

2.2.2. Pasos para la selección de imágenes en el entorno de GEE

a. Definir la región

Se define la región mediante la geometría de la cuenca Cachi figura 2.2.



Figura 2.2: GEE, importación de la geometría cuenca Cachi

b. Cargar la colección.

Mediante el código, se carga la colección TOA de Landsat 5 de colección 2, con la fecha filtrada y porcentaje de nubosidad menor a 10%.

```
var landsat5 =
ee.ImageCollection("LANDSAT/LT05/C02/T1_TOA")
.filterDate("1990-02-01", "1990-08-31")
.filterBounds(Cachi)
.filterMetadata('CLOUD_COVER',
'Less_Than', 10);
```



Figura 2.3: Imagen seleccionada de la colección Landsat

2.2.3. Procesamiento de imágenes

Una vez seleccionado las imágenes con los parámetros de entrada, se seleccionará las bandas para el cálculo de índice diferenciado de nieve (NDSI), agua y sombra.

2.2.3.1. Cálculo de NDSI. La propiedad espectral del glaciar es que tiene una alta reflectancia en el espectro visible (verde) y muy baja en el infrarrojo medio o infrarrojo de onda corta (INAIGEM, 2017).

$$NDSI = \frac{B2 - B5}{B2 + B5} \text{-----(ecuación1)}$$

De los valores:

NDSI cercano a 1: *Indica áreas de nieve (por que la nieve tiene una alta reflectancia en B2 y baja en B5).*

NDSI cercano a 0 o negativo: *Indica superficies no nevados (como agua, vegetación, o suelo).*

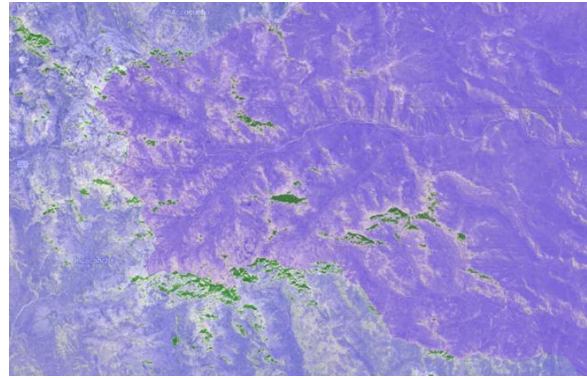


Figura 2.4: Resultado del NDSI

La máscara de nieve se puede confundir con sombra y agua. Por tanto, se calculará el índice de agua y sombra de la siguiente manera en el GEE.

Índice de sombra y agua

```
VarshadowIndex = imagenMediana.normalizedDifference(['B3',
'B4']).rename('ÍNDICE DE SOMBRA');
var ndvi = imagenMediana.normalizedDifference(['B3',
'B5']).rename('ÍNDICE DE AGUA');
```

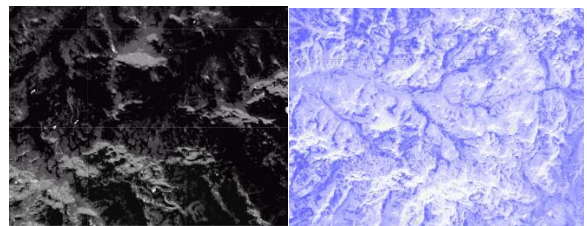


Figura 2.5: Índice de sombra (izquierda) y agua (derecha)

2.2.4. Obtención de imágenes de alta resolución

Para el año 2024, se usará las imágenes de alta resolución proporcionado por la Agencia Espacial del Perú – CONIDA, dentro de su Sistema Satelital cuenta con los satélites PeruSAT-1 y otros por convenios como SPOT6, Pleiades, Kompsat3. Las cuales están disponibles para usuarios registrados (entidades del estado) y para propósitos académicos en temas de investigación).

Los satélites SPOT-6 y SPOT-7 proporcionan una fuente asequible de información para analizar, monitorear, predecir y gestionar los recursos y las actividades humanas en el planeta. Los productos de SPOT son herramientas de soporte para una amplia gama de aplicaciones, como cartografía civil y militar, gestión de desastres naturales y provocados por el hombre, exploración de recursos naturales, planificación territorial, monitoreo agrícola y forestal, protección ambiental y vigilancia marítima (Airbus Defence and Space, s.f.).

2.2.5. Procesamiento en ArcGIS

Las imágenes descargadas de Google Earth Engine (GEE) y las proporcionadas por CONIDA en formato .TIF se someterán a los siguientes procedimientos en ArcGIS:

a. Visualización e importación de imágenes

Se cargan las imágenes satelitales multibanda (formato .TIF), luego se explorará las imágenes para tener una idea general de los datos (por ejemplo, diferentes bandas de espectro, como la visible y la infrarroja). Además, las combinaciones de bandas para la visualización de color natural y falso color.

b. Creación de puntos de entrenamientos

En ArcGIS, para realizar una clasificación supervisada, se creará puntos de entrenamiento para identificar las clases como: Nieve (1), agua (2), desértico (3), vegetación (4) y nube (5).

Se realizará manualmente, dibujando los puntos de entrenamiento sobre la imagen en color natural utilizando el editor de "Puntos".

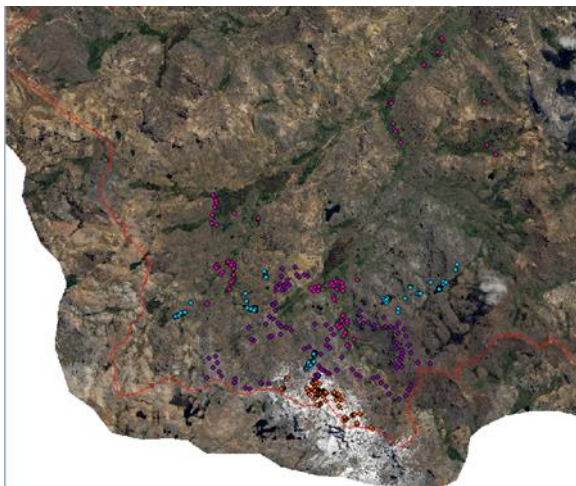


Figura 2.6: Puntos de entrenamiento en la imagen

c. Exportación de datos

El shapefile de puntos, debe de incluir las coordenadas y las clases asociadas con los puntos de entrenamiento.

2.2.6. Procedimiento de clasificación SVM en R

La clasificación Supervisada utiliza muestras de entrenamiento para entrenar un modelo que clasifica los píxeles en categorías predefinidas (glaciar, nieve, roca, vegetación). Este método requiere conocimientos previos sobre las características de cada clase (Mather, P. y otros, 2011).

El modelo predictivo Support Vector Machines (SVM) encuentra un margen óptimo entre clases para

clasificar datos. Efectivo para clasificar datos complejos y no lineales (Li, Z., & Chen, L., 2017).

R es ampliamente utilizado para análisis estadístico y aprendizaje automático (machine learning). Librerías como randomForest (para Random Forest) y e1071 (para SVM) están bien desarrolladas, optimizadas y continuamente mejoradas por la comunidad.

A continuación se muestra el procedimiento:

- o Instalación y llamado de librerías mediante el código `suppressMessages(library(raster,e1071 y caret))`.
- o Ubicación del archivo `setwd("D:/TESIS IMAGENES/24.spot_2024")`.
- o Cargar puntos de entrenamiento desde un archivo shapefile `puntos_entrenamiento <- readOGR("Pts_ent..shp")`.
- o Convertir los puntos en un dataframe `puntos_entrenamiento_df <- as.data.frame(puntos_entrenamiento)`
- o Extracción de las bandas en los puntos de entrenamiento `valores_puntos <- extract(spot2024, cbind(puntos_entrenamiento_df$coords.x1, puntos_entrenamiento_df$coords.x2))`
- o Combinar los valores con las clases `puntos_entrenamiento_df <- cbind(puntos_entrenamiento_df, valores_puntos)`
- o Entrenar el modelo Support Vector Machine (SVM) mediante el código en R.

```
modelo_svm <- svm(Id ~
oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_1 +
  oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_2 +
  oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_3 +
  oSPOT6_20240504_PMS_Clip1_4,
data = puntos_entrenamiento_df,
kernel = "linear", # Usar un kernel lineal
cost = 1, # Parámetro de penalización
scale = TRUE) # Estandarizar las variables
```

- o Predicciones en los puntos de entrenamiento
- o Evaluar el modelo con la matriz de confusión
- o Aplicar el modelo a todo el ráster
- o Visualizar las predicciones en la mapa
- o Guardar las predicciones en formato .tif
- o Finalmente hacer los procediendo en el software ArcGIS.

2.2.7. Calculo de volumen glaciar

El volumen glaciar es una medida que cuantifica la cantidad total de hielo presente en un glaciar, y está estrechamente relacionado con su área superficial.

Para estimar este volumen, se utiliza la fórmula empírica de Bahr y Klein Isacks, que permite calcular el volumen a partir del área glaciaria conocida (B. Bahr, Tad Pfeffer, & Kaser, 2015).

$$V = C * S^\gamma \dots \dots \dots (1)$$

- V=Volumen del glaciar (en m³)
- S: Área de la superficie del glaciar (en Km²).
- C: Una variable aleatoria que varía por glaciar, por región, por tiempo, por pendiente, por parámetros climáticos, por muchos otros factores posibles.
- γ : Es una constante para una clase geométrica que es 1.38.

2.3. Procedimiento para el cálculo de línea de equilibrio (ELA)

La ELA, Línea de Equilibrio de Altitud se describe como una altitud que hay en la cantidad de nieve que se acumula es igual a la cantidad de hielo que se pierde debido al derretimiento y la sublimación (Campos, 2020).

2.3.1. Preparación de datos

2. Cargar el MDT
 - El Modelo Digital de Terreno (MDT) debe de cubrir el área de estudio.
 - Se debe de asegurarse de que el MDT tenga la misma proyección espacial que el shapefile de área de nieve (WGS_1984_UTM_Zone_18S).
3. Cargar el Shapefile de área de Nieve.
 - Se importará el shapefile que contiene el área de nieve (es decir, la capa de nieve detectada en las imágenes).
 - Verifica que el shapefile esté en el sistema de coordenadas adecuado (WGS_1984_UTM_Zone_18S).

2.3.2. Cálculo de ELA

4. Cortar el MDT con el SHP de área de nieve.
5. Analizar las altitudes de ELA.
6. Identificación de la variación temporal.
7. Integración con datos climáticos.
8. Análisis de correlación entre ELA y parámetros climáticos.
9. Análisis temporal
10. Visualización y presentación de resultados.

2.4. Procedimiento para el cálculo de área de acumulación (AA)

El área glaciaria se define como la superficie cubierta por hielo y nieve permanente. Su medición es fundamental para evaluar el estado y la evolución de los glaciares (Cuellar y Quispe, 2024).

2.4.1. Análisis de la evolución de las áreas de nevados

- Análisis temporal de las áreas de los nevados: Se examina cómo las áreas cubiertas por nieve han cambiado de 1990 a 2024 mediante las imágenes satelitales de diferentes años para calcular la extensión de nieve y el área cubierta por los nevados.
- Cálculo del área de acumulación de nieve: Estima la cantidad de nieve que está acumulada por encima de la línea de equilibrio en cada año, basándose en la información sobre las áreas de los nevados y las condiciones climáticas de esos años.
- Correlación con las variables climáticas: Se relacionará los cambios en las áreas de nieve con las variaciones de las temperaturas y precipitaciones.

2.4.2. Validación cruzada con los datos de glaciares en Perú

Es fundamental comparar los resultados obtenidos con los mapas glaciares oficiales proporcionados por el INAIGEM (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña) o la UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos). Al aplicar un proceso de validación cruzada, puedes medir la precisión de tus modelos y confirmar la consistencia de los cambios en la cobertura glaciaria a lo largo del tiempo.

3. RESULTADOS Y DISCUSIONES

3.1. Volumen del glaciar en el año 1990

3.1.1. Imágenes seleccionadas en GEE

A continuación, se muestran todas las imágenes filtradas en falso color que cubren la zona sin presencia de nubes, seguidas por el resultado obtenido al promediar estas imágenes.

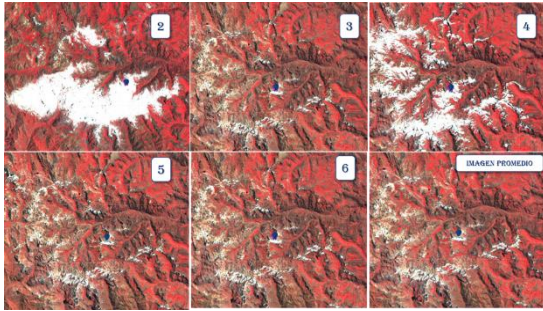


Figura 3.1: Imágenes para el año 1990

Tabla 3.1: Fechas de las imágenes filtradas para año 1990

N°	Fecha	Hora	Cubre el area
00:19/06/1990	14:19:09		NO
01:06/08/1990	14:18:59		NO
02:02/02/1990	14:27:04		SI
03:09/05/1990	14:25:23		SI
04:25/05/1990	14:25:20		SI
05:28/07/1990	14:25:13		SI
06:13/08/1990	14:25:08		SI

3.1.2. Clasificación supervisada

3.1.2.1. Matriz de confusión. La matriz de confusión se utiliza para evaluar la precisión del modelo de clasificación, comparando las predicciones (presentadas en las filas) con los valores reales (que se encuentran en las columnas) dentro de un conjunto de datos de prueba.

Tabla 3.2: Matriz de confusión de la clasificación SVM, año 1990

Predicciones	referencias				
	1	2	3	4	5
1	188	0	0	0	0
2	0	76	0	1	0
3	0	0	222	0	0
4	0	1	0	207	0
5	0	0	0	4	51

3.1.2.2. Métricas de clase año 1990

Tabla 3.3: Matriz de clase del SVM año 1990

	clase1	clase2	clase3	clase4	clase5
Sensitivity	1	0.987	1	0.9764	1
Specificity	1	0.9985	1	0.9981	0.99428
Pos Pred Value	1	0.987	1	0.9952	0.92727
Neg Pred Value	1	0.9985	1	0.9908	1

Prevalence	0.2507	0.1027	0.296	0.2827	0.068
Detection Rate	0.2507	0.1013	0.296	0.276	0.068
Detection Prevalence	0.2507	0.1027	0.296	0.2773	0.07333
Balanced Accuracy	1	0.9928	1	0.9873	0.99714

- El modelo muestra muy buenos resultados en términos de sensibilidad, especificidad y precisión para la mayoría de las clases.
- Clase 1, 3 y 5 tienen un rendimiento sobresaliente con sensibilidad y especificidad perfectas.
- Clase 2 tiene una ligera disminución en la sensibilidad, pero sigue siendo muy alta (98.7%).
- Clase 4 tiene una sensibilidad ligeramente más baja (97.64%) y una excelente especificidad (99.81%).

3.1.3. Comparación de la clasificación SVM y NDSI

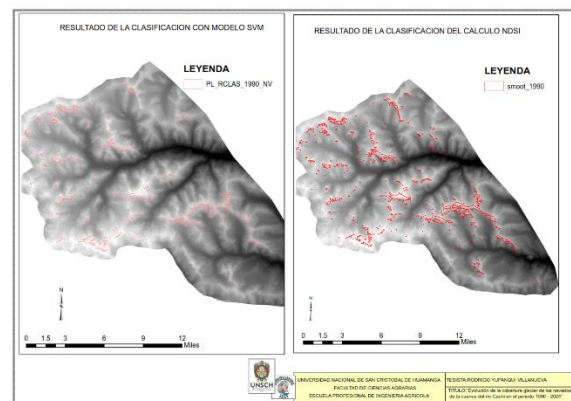


Figura 3.2: Comparación del resultado del área por SVM Y NDSI

3.1.4. Cálculo de área glaciar del año 1990 con la clasificación SVM

El cálculo del área glaciar para el año 1990 es de 11.99 km². Este valor representa la extensión total de la masa de hielo o glaciares en esa zona específica en ese período.

3.1.5. Volumen del glaciar

Volumen de glaciar con la ecuación 1.

$$V = CxS^{\gamma}$$

- S (area_1990) = 11.99 km²
- C = de la tabla 1.3. (0.138408x10³)
- γ = 1.38 constante

Por lo tanto:

$$V = 138408x11.99^{1.38}$$

$$V = 4265124.038m^3$$

3.2. Volumen del glaciar en el año 2000

3.2.1. Selección de imágenes satelitales

Tabla 3.4: Resultado de las imágenes filtradas para el año 2000

Nº	Fecha	Hora	Cubre el área
0:	17/08/2000	14:36:39	NO
1:	04/05/2000	14:40:42	SI
2:	21/06/2000	14:41:40	SI

3.2.2. Clasificación supervisada

3.2.2.1. Puntos de entrenamientos

Tabla 3.5: Cantidad de puntos de entrenamiento para cada clase (2000)

	clase 1 Nieve	clase 2 Agua	clase 3 Veg	clase 4 Desnudo	clase 5 nube
Nº de puntos	218	55	117	199	21

3.2.2.2. Matriz de confusión

Tabla 3.6: Resultado de matriz de confusión año 2000

Predicciones	Referencias				
	1	2	3	4	5
1	218	0	0	0	0
2	0	55	0	1	0
3	0	0	117	0	0
4	0	0	0	198	0
5	0	0	0	0	21

3.2.2.3. Precisión y kappa

0.9984: Significa que el modelo tiene una precisión del 99.84% en general, lo que indica que la mayoría de las predicciones realizadas por el modelo son correctas

0.9977: El índice Kappa mide la concordancia entre las predicciones del modelo y las verdaderas etiquetas, ajustando por el azar. Un valor cercano a 1 significa una excelente concordancia.

11. Matriz por clase

Tabla 3.7: valores del resultado de clasificación SVM año 2000

	Clase 1		Clase 2		Clase 3		Clase 4		Clase 5	
	1	Clase 2	3	4	Clase 5	1	Clase 2	3	4	Clase 5
Sensitivity	1	1	1	0.995	1					
Specificity	1	0.9982	1	1	1					
Pos Pred Value	1	0.9821	1	1	1					
Neg Pred Value	1	4	1	1	1					
				0.997						
	1	1	1	6	1					

Prevalence	0.357	0.0901	0.191	0.326	0.0344
Detection	4	6	8	2	3
Rate	0.357	0.0901	0.191	0.324	0.0344
Detection	4	6	8	6	3
Prevalence	0.357	0.0918	0.191	0.324	0.0344
Balanced Accuracy	4	0.0918	8	6	3
				0.997	
	1	0.9991	1	5	1

3.2.3. Comparación de la clasificación por SVM y NDSI

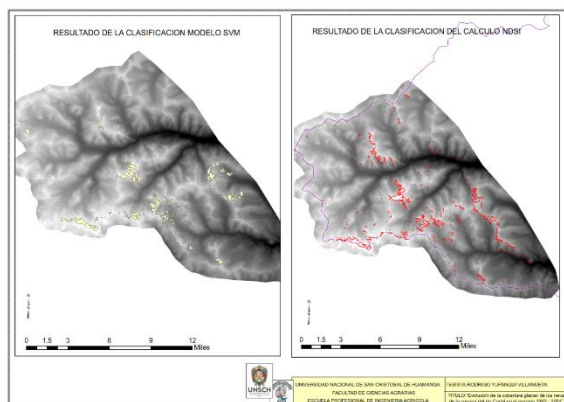


Figura 3.3: Diferencia de la clasificación por SVM y el cálculo de NDSI para el año 2000

3.2.4. Cálculo de área glaciar del año 2000 con la clasificación SVM

El área glaciar para el año 2000 es 9.38Km2 en la cabecera de la cuenca cachi.

3.2.5. Volumen del glaciar

El volumen de glaciar aplicando la ecuación 01.

$$V = 138408 \times 9.38^{1.38}$$

$$V = 3039492.738m^3$$

3.3. Volumen del glaciar en el año 2010

3.3.1. Selección de imágenes satelitales

Las imágenes satelitales para el año 2010 con el filtro de fechas y porcentaje de nubosidad <10% resulta lo siguiente:

Tabla 3.8: Imágenes satelitales filtrados para el año 2010

Nº	Fecha	Hora	Cubre el área
0:	17/06/2010	14:55:48	SI
1:	03/07/2010	14:55:43	SI
2:	19/07/2010	14:55:39	SI

3.3.2. Cálculo de NDSI en GEE

El índice diferenciado de nieve se calculará con la siguiente ecuación.

$$NDSI = \frac{Banda3 - Banda5}{Banda3 + Banda5}$$

3.3.3. Cálculo del área glaciar con NDSI

El área para el año 2010 es de 1.28 Km² cuales se encuentran en las zonas altas de la cuenca.

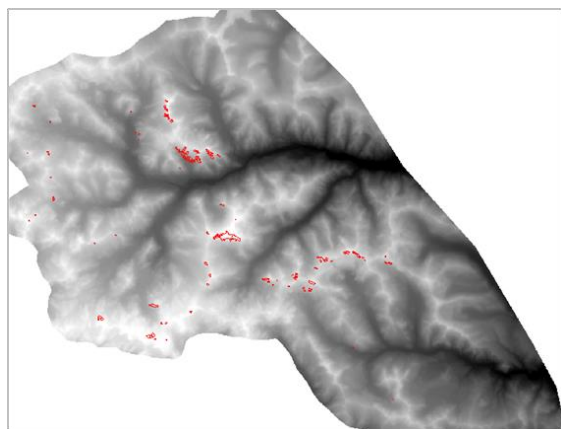


Figura 3.4: Área del glaciar en la cabecera de la cuenca año 2010

3.3.4. Volumen del glaciar

Como se está trabajando con glaciares que se encuentran en retroceso en regiones tropicales, como los glaciares de montaña en la Sierra de Perú o en otras áreas tropicales de los Andes, la constante C a utilizar sería 138408 m³/km²

Por lo tanto, el volumen del glaciar es:

$$V = 138408 \times 1.28^{1.38}$$

$$V = 194585.71 \text{ m}^3$$

3.4. Volumen del glaciar en el año 2024

Para el año 2024, se utilizaron imágenes satelitales del satélite Spot6, conocido por su alta resolución espacial.

3.4.1. Resultado de la clasificación supervisada por el método de Vector Support Machine

3.4.1.1. Puntos de entrenamiento

Tabla 3.9: puntos de entrenamiento por clase

	clase 1 Nieve	clase 2 Agua	clase 3 Veg	clase 4 Desnudo	clase 5 nube
Nº de puntos	110	85	111	87	37

3.4.1.2. Resultado de clasificación SVM (matriz de confusión).

Tabla 3.10: Matriz de confusión de la clasificación SVM

Predicciones	Referencias				
	1	2	3	4	5
1	110	0	0	0	1
2	0	85	1	0	0

3	0	0	110	0	1
4	0	0	0	87	0
5	0	0	0	0	35

3.4.1.3. Resultado de clasificación SVM (Estadística por clase).

Tabla 3.11: Valores de resultado del modelo SVM año 2024

	Clase 1	Clase 2	Clase 3	Clase 4	Clase 5
Sensitivity	1.00	1.00	0.99	1.00	0.95
Specificity	1.00	1.00	1.00	1.00	1.00
Pos Pred Value	0.99	0.99	0.99	1.00	1.00
Neg Pred Value	1.00	1.00	1.00	1.00	0.99
Prevalence	0.26	0.20	0.26	0.20	0.09
Detection Rate	0.26	0.20	0.26	0.20	0.08
Detection Prevalence	0.26	0.20	0.26	0.20	0.08
Balanced Accuracy	1.00	1.00	0.99	1.00	0.97

3.4.2. Cálculo del área glaciar con SVM

El área glaciar para el año 2024 es 0.32 Km² en la cabecera de la cuenca cachi.

3.4.3. Volumen del glaciar

El volumen de glaciar aplicando la ecuación 01.

$$V = 138408 \times 0.32^{1.38}$$

$$V = 28725 \text{ m}^3$$

3.5. Resumen de volumen del glaciar desde 1990 – 2024.

Tabla 3.12: Volúmenes del glaciar desde el año 1990-2024.

Año	Área (Km ²)	Volumen (m ³)
1990	11.99	4265124.038
2000	9.38	3039492.738
2010	1.28	194585.7135
2024	0.32	28725.53746

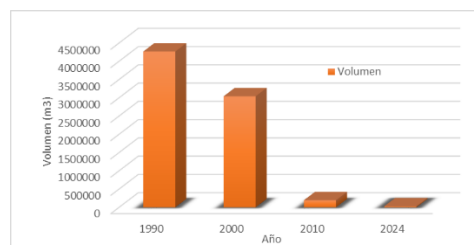


Figura 3.5: Gráfico de la variación temporal del glaciar desde el año 1990-2024

3.6. Correlación con los factores climáticos

3.6.1. Volumen y la temperatura

La gráfica de correlación entre el volumen calculado de los glaciares y la temperatura media anual muestra

una relación inversa entre ambas variables, lo que implica que, a medida que la temperatura aumenta, el volumen de los glaciares disminuye.

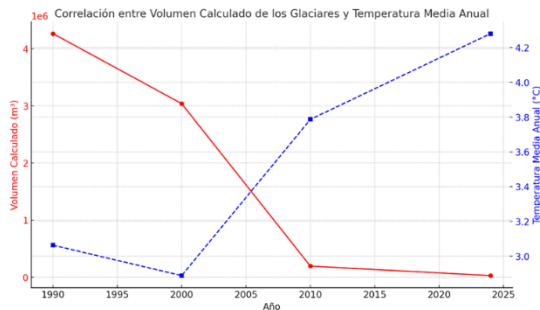


Figura 3.6: correlación del volumen y la temperatura

3.6.2. Área y radiación neta solar

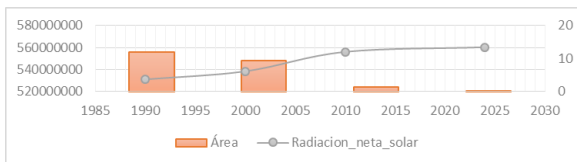


Figura 3.7: Correlación del área y radiación neta solar

A medida que la radiación neta solar ha aumentado, el área cubierta por el glaciar ha disminuido. Esta relación inversa es clave para entender cómo el calentamiento global y el aumento de la radiación solar están afectando los glaciares.

3.7.Resultado de la línea de equilibrio

El Límite de la Nieve de Equilibrio (ELA) se calcula para los años de estudio: 1990, 2000, 2010 y 2024, utilizando el Modelo Digital de Terreno (MDT) y el shapefile de área de nieve. Para cada uno de estos años, se utilizó el MDT recortado dentro del área de nieve definida por el shapefile correspondiente a cada año.

3.7.1.Análisis temporal del ELA

Los cálculos del ELA revelaron que, a lo largo de los años de estudio, el Límite de la Nieve de Equilibrio (ELA) mostró una tendencia ascendente en todos los casos. A continuación se muestra:

- 1990: El ELA promedio se encontraba a una altitud de 4784.99 m.s.n.m.
- 2000: El ELA ascendió a 4773.13 m.s.n.m, mostrando un incremento respecto a 1990.
- 2010: El ELA mostró un ascenso adicional a 4819.17 m.s.n.m.

- 2024: El ELA se encontraba a una altitud de 4984.85 m.s.n.m, alcanzando su nivel más alto durante el periodo de estudio.



Figura 3.8: Evolución de línea de equilibrio 1990-2024

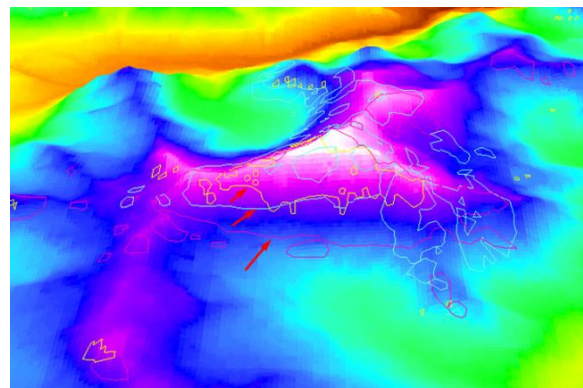


Figura 3.9: Cambio de la línea de equilibrio en el cerro apacheta

3.8.Resultado del cálculo de área de acumulación (AA)

El cálculo del área de acumulación de nieve en los años 1990, 2000, 2010 y 2024 se realizó utilizando una metodología combinada de imágenes satelitales y un enfoque de clasificación supervisada con el algoritmo Support Vector Machine (SVM) en R. A continuación, se describen los resultados obtenidos para cada año.

- Año 1990: El área estimada de nieve por encima de la línea de equilibrio fue de 11.99 km², lo que representó una mayor extensión de nieve en comparación con los años posteriores.
- Año 2000: La extensión de nieve en el año 2000 se redujo a 9.38 km², reflejando una disminución en la acumulación de nieve.
- Año 2010: En este año, se observó un área de acumulación de nieve de 1.28 km², lo que mostró una tendencia similar a la de 2000, con fluctuaciones debido a los cambios climáticos en el periodo como la temperatura.
- Año 2024: Finalmente, el área cubierta por nieve en 2024 fue de 0.32 km², observándose la menor extensión de nieve en comparación con los años anteriores, lo que podría indicar un derretimiento

progresivo de los nevados debido al cambio climático o variaciones en las precipitaciones y temperatura.

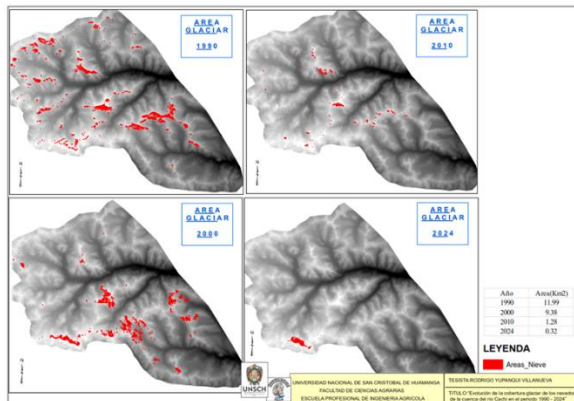


Figura 3.10: Área de acumulación del glaciar para diferentes años

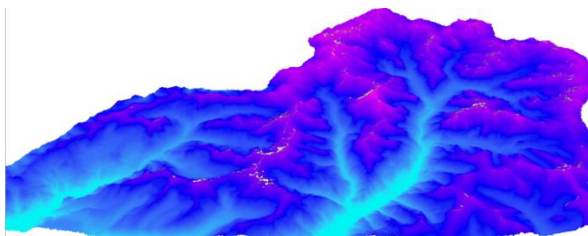


Figura 3.11: Vista 3d del nevado en la cuenca alta de Cachi

3.8.1. Validación cruzada del cálculo de área de nieve

Según datos del INAIGEM, en el año 2009 el departamento de Ayacucho contaba con un total de 76 glaciares rocosos, con una superficie combinada de 2.74 km².

En cuanto a la cordillera de Chonta, se ha registrado un retroceso glaciar significativo: en un período de 58 años, esta cordillera perdió el 97.93 % de su cobertura glaciar, conservando apenas el 2.07 % de su superficie original hasta el año 2020.

Asimismo, los informes de INAIGEM correspondientes a los años 2016 y 2020 indican que en el departamento de Ayacucho no se reportaron glaciares libres ni cubiertos de detritos. Sin embargo, se identificaron 76 glaciares rocosos distribuidos en las cordilleras de Huanzo (63 glaciares), Ampato (11 glaciares) y Chonta (2 glaciares), con superficies de 2.03 km², 0.68 km² y 0.03 km² respectivamente, sumando un total de 2.74 km².

Como se puede ver en la **figura 3.31**, lo que corresponde a la región Ayacucho, la cordillera Chonta son los nevados de la cuenca del río Cachi.

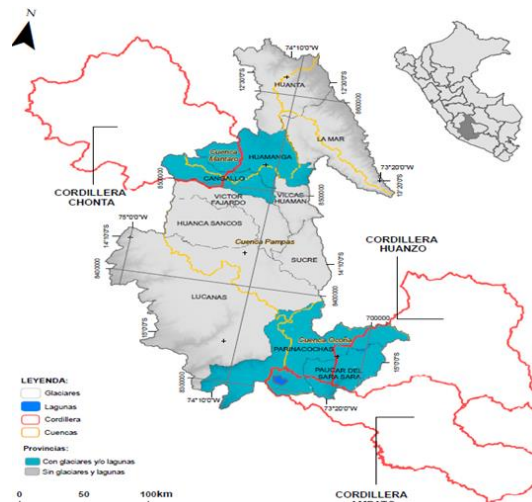


Figura 3.12: lugares con presencia de nevados en la región de Ayacucho

Fuente: INAIGEM (2023)

3.8.2. Validación con datos de campo

Se tomaron puntos de medición en campo durante abril de 2025 con el fin de validar que la zona estudiada efectivamente cubre el nivel o área de interés. Estos puntos están detallados en el anexo, y los resultados obtenidos se presentan en la tabla 3.15

Tabla 3.13: Puntos tomados en campo para la validación

Punto	X	Y	Descripción	Altitud
P1	534714	8515800	Punto de toma	
P2	534874	8515650	Punto de toma	
P3	534299	8515490	5 centimetro	4930
P4	534296	8515480	4.5 centimetro	4930
P5	534289	8515460	7 centimetro	4930
P6	534281	8515480	5.1 centimetro	4930
P7	534264	8515490	3.8 centimetro	4930
P8	534409	8515210	4.9 centimetro	4990
P9	534414	8515190	4.5 centimetro	4990
P10	534408	8515190	5.3 centimetro	4990
P11	534415	8515180	4.5 centimetro	4990
P12	534400	8515170	6 centimetro	4990
P13	535260	8515000	Laguna	
Promedio de altura de nieve			5.06 cm	

Tabla 3.14: Altura de nieve en función al área y volumen calculado

Año	Área (Km2)	Volumen (m3)	Altura de nieve calculado (m)
1,990.00	11.99	4,265,124.04	0.36
2,000.00	9.38	3,039,492.74	0.32

2,010.00	1.28	194,585.71	0.15
2,024.00	0.32	28,725.54	0.09

Según la Tabla 3-14, en el año 2024 la altura de nieve fue de 0.09 m. Este valor se aproxima al dato obtenido mediante la medición en campo en el año 2025, según se presenta en la Tabla 3-13.

3.8.3. Extensión del área según la línea de tendencia

Se realizó una extrapolación de datos para predecir y estimar los valores futuros del área glaciar, específicamente para los años 2030 y 2050, utilizando diferentes tipos de líneas de tendencia. Estos resultados se presentan en la Figura 3.33.



Figura 3.13: grafica de las líneas de tendencia y la extrapolación

Tabla 3.15: Resultado del área glaciar según las líneas de tendencia

Año	Exponencial	Lineal	Logarítmica
2030	0.16	-3.3	-3.6
2050	0.02	-10.8	-11.0

Como se observa, los valores proyectados para los años 2030 y 2050 bajo las tendencias lineal y logarítmica son negativos, lo cual no tiene sentido físico en términos de área. Esto implica que, de mantenerse dichas tendencias, el área glaciar se reduciría a cero, es decir, desaparecería por completo.

4. CONCLUSIONES

Reducción significativa del volumen glaciar:

Durante el periodo de 1990 a 2024, los nevados en la cuenca del río Cachi han experimentado una reducción dramática en su volumen glaciar. El volumen ha disminuido de 4, 265,124 m³ en 1990 a 28,725.54 m³ en 2024, lo que implica una reducción de más del 99%. Esta disminución está en línea con los efectos del cambio climático, en el que el aumento de las temperaturas globales ha resultado en la fusión acelerada de los glaciares.

Limitaciones metodológicas: El cálculo del volumen glaciar se basó en una fórmula empírica debido a la falta de información precisa sobre la altura de nieve.

Esta falta de datos impidió el uso de métodos más directos y precisos. Además, no se contaba con imágenes de alta resolución para estimar de manera exacta el volumen de nieve de los glaciares, lo que puede introducir un margen de error en los resultados. Si bien la fórmula empírica proporciona una aproximación, la ausencia de datos exactos limita la precisión de los cálculos de volumen.

• Ascenso de la Línea de Equilibrio (ELA):

La Línea de Equilibrio de los nevados ha ascendido de 4,784.99 m.s.n.m. en 1990 a 4,984.85 m.s.n.m. en 2024, lo que representa un aumento de 199.86 metros en este periodo. Este ascenso es consistente con el aumento de la temperatura que se ha observado durante estos años. En efecto, la hipótesis de que el ascenso del ELA está correlacionado positivamente con el incremento de la temperatura anual se ha cumplido. Este aumento indica que las zonas de acumulación de nieve se han desplazado hacia mayores altitudes, lo que reduce el volumen de nieve acumulada en altitudes más bajas.

Limitaciones metodológicas: El cálculo del ELA fue realizado utilizando el Modelo Digital de Terreno (MDT), pero este método presenta limitaciones inherentes. Dado que la cuenca no forma una cordillera continua, el área glaciar está dispersa y no es fácil controlar los cambios de altitud de forma precisa. En lugar de utilizar mediciones exactas del ELA en cada zona glaciar, se utilizó un promedio de altitudes, lo que introduce errores en la precisión del cálculo del ELA. Este método no es tan exacto como otros enfoques que podrían utilizarse para obtener una estimación más precisa.

• Disminución acelerada del área de acumulación de nieve:

El área de acumulación de nieve en la cuenca del río Cachi ha experimentado una reducción drástica. En 1990, el área de acumulación era de 11.99 km², mientras que en 2024 esta cifra se ha reducido a 0.32 km², lo que representa una disminución de más del 97% en solo 34 años. Esta reducción es un reflejo claro de los efectos del cambio climático, donde la temperatura más alta y la disminución de las precipitaciones contribuyen a una menor acumulación de nieve.

Limitaciones metodológicas: Para los años 1990, 2000 y 2010, la estimación del área de acumulación de nieve

se realizó mediante imágenes satelitales del satélite Landsat, que tienen una resolución espacial menor en comparación con los datos obtenidos del satélite SPOT-6, utilizado para 2024. La diferencia en la resolución de las imágenes puede introducir discrepancias en las mediciones del área glaciar. Las imágenes de Landsat tienen menor precisión para identificar con exactitud las fronteras del glaciar, lo que podría haber afectado la precisión de las estimaciones del área en esos años.

• **Impacto de los factores climáticos en los cambios glaciales:**

Los resultados obtenidos muestran que los factores climáticos, particularmente el aumento de la temperatura y la disminución de la precipitación, son los principales responsables de la disminución del volumen glaciar y el ascenso de la Línea de Equilibrio. A medida que la temperatura ha aumentado, el volumen de nieve ha disminuido y el ELA ha ascendido a mayores altitudes.

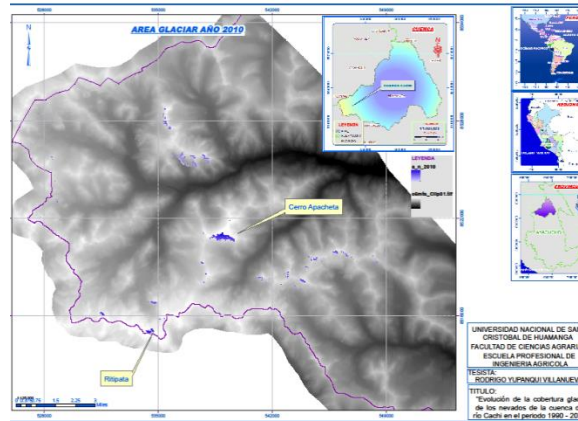
Limitaciones metodológicas: La falta de datos precisos sobre la precipitación y la dispersión de los datos en función de la altitud dificultan el establecimiento de una correlación exacta entre los cambios en la precipitación y la disminución del área de acumulación. Aunque la disminución de las precipitaciones puede estar afectando la cantidad de nieve acumulada, los errores en las mediciones del área y el volumen dificultan establecer una relación causal precisa.

5. REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

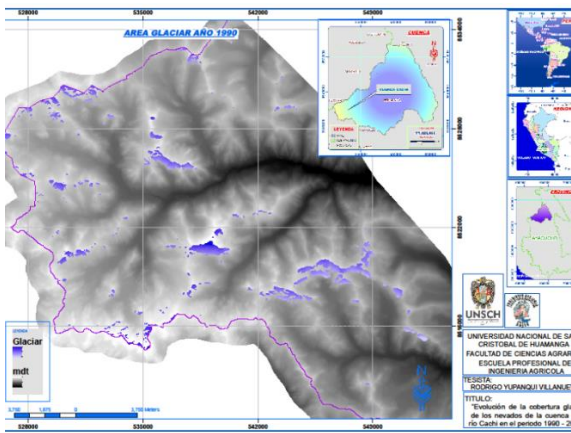
- Agencia Espacial del Perú - CONIDA. (s. f.). *Sistema satelital peruano PerúSAT-1 y sus aplicaciones*. Oficina de Imagen Institucional AGENCIA ESPACIAL DEL PERÚ-CONIDA. Recuperado de <https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/2051150/Per%C3%BASAT-1%20y%20sus%20aplicaciones.pdf.pdf>
- Airbus Defence and Space. (s. f.). *SPOT-6/7 Imagery User Guide*. Recuperado de <https://earth.esa.int/eogateway/documents/20142/37627/SPOT-6-7-imagery-user-guide.pdf>
- Bahr, B., Pfeffer, T., & Kaser, G. (2015). A review of volume-area scaling of glaciers. *Reviews of Geophysics*, 46.
- Campos, N. (2015). *Equilibrium line altitude fluctuation on the south west slope of Nevado Coropuna since the last glacial maximum (Cordillera Ampato, Perú)*. *Pirineos*, 14.
- Campos, N. (2020). *Revisión de procedimientos metodológicos para la reconstrucción glaciar y el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio*. *SciELO*, 30.
- Cuellar y Quispe. (2024). *Dinámica glaciar y su influencia en el balance de la masa glaciar de dos nevados: Nevado Ausangate y nevado Verónica*. Repositorio UCV. <https://hdl.handle.net/20.500.12692/142837>
- INAIGEM. (2017). *Manual Metodológico de Inventario Nacional de Glaciares*. Huaraz.
- Li, Z., & Chen, L. (2017). "Machine learning for remote sensing data analysis: A review." *Journal of Remote Sensing*. <https://arxiv.org/abs/1710.03959>
- Mather, P. M., & Koch, M. (2011). *Computer processing of remotely-sensed images: An introduction*. Wiley Online Library. <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/book/10.1002/9780470666517>
- Puertas, O. y otros. (2011). *Estudio de tendencias de la precipitación mensual en la cuenca alta - media del río Cauca, Colombia*. Repositorio Institucional UNAL. <https://repositorio.unal.edu.co/handle/unal/34126>
- R Core Team. (2020). *R: A Language and Environment for Statistical Computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. <https://www.r-project.org/>
- Tejada, M., & Bernex, N. (2010). *Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos*. Global Water Partnership. <https://kneamazon.net/Documents/Publications/Virtual-Library/Ecosistemas-Montanas/4.pdf>
- Ministerio del Ambiente (MINAM) e Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM). (2023). *Memoria descriptiva del inventario nacional de glaciares y*

lagunas de origen glaciar 2023 [Informe]. Gobierno del Perú
 Autoridad Nacional del Agua (ANA). (2014).
 Inventario de glaciares del Perú (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, UGRH–Huaraz). Ministerio de Agricultura y Riego, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos.

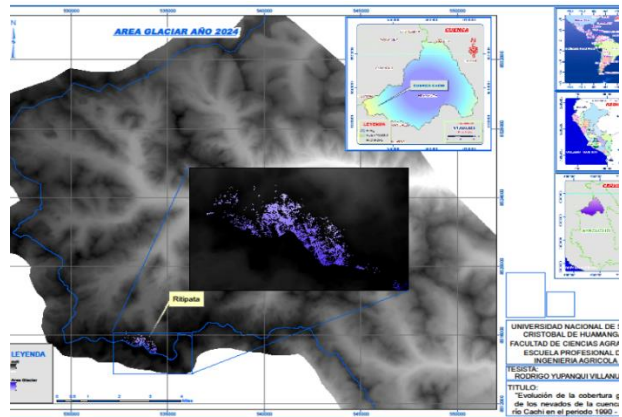
6. ANEXOS



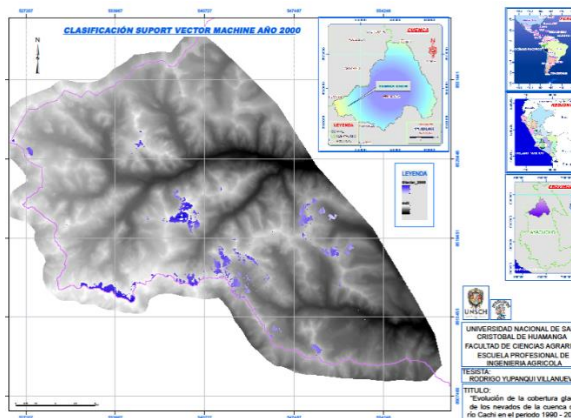
Anexo 6-3: Área glaciar 2010



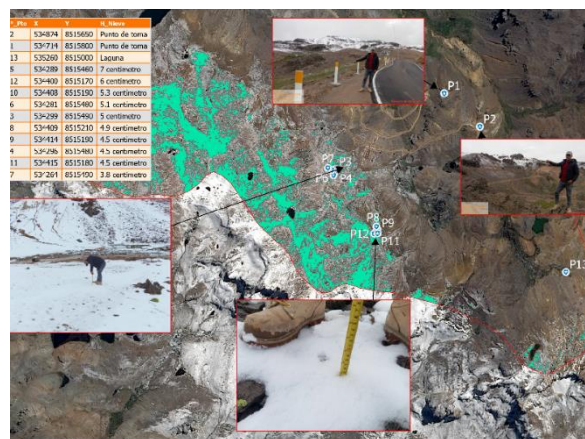
Anexo 6-1: Área glaciar 1990



Anexo 6-4: Área glaciar 2024



Anexo 6-2: Área glaciar 2000



Anexo 6-5: Puntos de validación en campo