

“VARIBILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYTAPALLANA Y SU RELACION CON LOS ELEMENTOS CLIMATICOS PRECIPITACION Y TEMPERATURA DURANTE EL PERIODO 1986-2022, JUNIN, PERÚ”

Tesis para optar al título profesional de:

Ingeniera Ambiental

Autora:

Noemi Miriam De la Cruz Chavez

Asesor:

Mg. Leonidas Fernando Contreras Blanco

<https://orcid.org/0000-0002-6459-0412>

Lima - Perú

2023

JURADO EVALUADOR

Jurado 1	Ing. Haniel Josue Torres Joaquin	45772010
Presidente(a)	Nombre y Apellidos	N° DNI

Jurado 2	Ing. Marieta Cervantes Peralta	29425048
	Nombre y Apellidos	N° DNI

Jurado 3	Ing. Irma Horna Hernandez	40317442
	Nombre y Apellidos	N° DNI

INFORME DE SIMILITUD

VARIBILIDAD ESPACIO-TEMPORAL DE LA COBERTURA GLACIAR DEL NEVADO HUAYTAPALLANA Y SU RELACION CON LOS ELEMENTOS CLIMATICOS PRECIPITACION Y TEMPERATURA DURANTE EL PERIODO 1986-2022, JUNIN, PERÚ"

INFORME DE ORIGINALIDAD



FUENTES PRIMARIAS

1	tesis.pucp.edu.pe Fuente de Internet	3%
2	repositorio.ucv.edu.pe Fuente de Internet	1%
3	Kelsey E. Reider, Don J. Larson, Brian M. Barnes, Maureen A. Donnelly. "Thermal adaptations to extreme freeze-thaw cycles in the high tropical Andes", Biotropica, 2020 Publicación	<1%
4	Submitted to University of Durham Trabajo del estudiante	<1%
5	link.springer.com Fuente de Internet	<1%
6	Submitted to University of Canterbury Trabajo del estudiante	<1%
7	zaguan.unizar.es Fuente de Internet	

DEDICATORIA

A mi madre, Solinda Chavez por el ejemplo de fuerza y amor que siempre seguiré.
Asimismo, a mis hermanos(as) quienes siempre confiaron en mí y me brindaron su apoyo.

AGRADECIMIENTO

Agradezco a Dios quien me ha guiado y me ha dado fortaleza para seguir adelante. A mi madre quien día a día estuvo impulsarme en mi formación académica, a mi padre que desde el cielo me ha guiado en todo el proceso universitario y a mis profesores de la universidad quien por sus conocimientos brindados he desarrollado la presente investigación.

INDICE DE CONTENIDO

<i>JURADO EVALUADOR</i>	2
<i>INFORME DE SIMILITUD</i>	3
<i>DEDICATORIA</i>	4
<i>AGRADECIMIENTO</i>	5
<i>INDICE DE CONTENIDO</i>	6
<i>ÍNDICE DE TABLAS</i>	9
<i>ÍNDICE DE FIGURAS</i>	10
<i>ÍNDICE DE ANEXOS</i>	11
<i>RESUMEN</i>	12
<i>CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN</i>	13
1.1. Realidad problemática	13
1.2. Antecedentes	16
1.3. Marco teórico	21
1.3.1. Glaciares y sus características	21
A. Formación y dinámicas de los glaciares	22
B. Impactos del Cambio Climático en Glaciares Tropicales.....	23
C. Consecuencias del retroceso glaciar en los Andes.....	23
1.3.2. Clima en los Andes Tropicales.....	24
A. Variación espacial y temporal de la temperatura.....	24
B. Variación espacial y temporal de la precipitación	24
C. Datos climatológicos Perú-PISCO	25
1.3.3. Teledetección y sus características.....	25
A. Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI).....	27
B. Índice de diferencia normalizada de nieve y hielo (NDSII)	28
1.4. Marco conceptual	29
1.4.1. Análisis estadístico descriptivo	29
1.4.2. Análisis estadístico de Normalidad	30

1.4.3.	Análisis estadístico de correlación	30
1.4.4.	Análisis estadístico de regresión lineal simple	31
1.4.5.	Análisis cartográfico	31
1.5.	Formulación del problema	32
1.5.1.	Problema general.....	32
1.5.2.	Problemas específicos	32
1.6.	Justificación.....	32
1.7.	Objetivos	34
1.7.1.	Objetivo General	34
1.7.2.	Objetivos Específicos.....	34
1.8.	Hipótesis	34
1.8.1.	Hipótesis General	34
1.8.2.	Hipótesis Específicos	35
<i>CAPÍTULO II: METODOLOGÍA</i>		36
2.1.	Tipo de investigación	36
2.2.	Población y muestra.....	36
2.3.	Técnicas e instrumentos de recolección de datos	38
2.4.	Procedimiento.....	38
2.4.1.	Recolección de Imágenes satelitales.....	38
2.4.2.	Preprocesamiento de Imágenes satelitales	41
2.4.3.	Aplicación de los índices de detección de nieve y hielo, NDSI y NDSII	41
A.	Aplicación de NDSI para determinar Nieve y Hielo en conjunto	41
B.	Aplicación de NDSII para determinar Nieve y Hielo de forma independiente	44
2.4.4.	Datos climáticos virtuales de precipitación y temperatura del grillado PISCO	45
2.5.	Análisis de datos	48
2.6.	Aspectos éticos	49
<i>CAPÍTULO III: RESULTADOS</i>		50
3.1.	Variación temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022	50
3.2.	Variación espacial de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022	52

3.3. Variación temporal de la precipitación y la temperatura del nevado	
Huaytapalla	53
3.4. Análisis estadísticos de la Cobertura Glaciar (hielo y nieve), precipitación y temperatura	54
3.4.1. Análisis estadístico descriptivo	54
3.4.2. Análisis inferencial de correlación	55
a. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks	55
b. Prueba de correlación.....	56
3.4.3. Análisis inferencial de regresión lineal para proyección futura de la cobertura glaciar ..	58
a) Proyección para la cobertura de nieve.....	58
b) Proyección para la cobertura de hielo.....	60
C. Proyección para la cobertura de nieve y hielo en conjunto	61
<i>CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES.....</i>	64
4.1. Discusiones	64
4.2. Conclusiones	68
<i>Referencias Bibliográficas.....</i>	69
<i>ANEXOS.....</i>	88

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Datos de imágenes satelitales.....	39
Tabla 2 Imágenes Landsat considerados en el estudio.....	39
Tabla 3 Resultados del análisis descriptivo de las variables.....	55
Tabla 4 Resultados de la prueba de normalidad.....	56
Tabla 5 Prueba de correlación de Pearson.....	58
Tabla 6 Análisis del modelo de regresión lineal.....	59
Tabla 7 Análisis de Varianza del modelo de regresión lineal.....	59
Tabla 8 Coeficientes del modelo de regresión lineal.....	59
Tabla 9 Análisis del modelo de regresión lineal.....	61
Tabla 10 Análisis de Varianza del modelo de regresión lineal.....	61
Tabla 11 Coeficientes del modelo de regresión lineal.....	61
Tabla 12 Análisis del modelo de regresión lineal.....	62
Tabla 13 Análisis de Varianza del modelo de regresión lineal.....	62
Tabla 14 Coeficientes del modelo de regresión lineal.....	62

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Pérdida de cobertura glaciaria del nevado Sullcón.....	15
Figura 2 Zonas de acumulación y ablación divididos por la Línea de Equilibrio.....	22
Figura 3 Elementos de la teledetección de un proceso pasivo.	27
Figura 4 Frecuencia de valores del índice NDSI y punto de quiebre.	28
Figura 5 Frecuencia de valores del índice NDSII y punto de quiebre para nieve y hielo.	29
Figura 6 Mapa de ubicación del nevado en estudio.	37
Figura 7 Imágenes Landsat de la plataforma USGS.	40
Figura 8 Índice NDSI para el área de estudio.	42
Figura 9 Umbral de quiebre para NDSI.	43
Figura 10 Umbral de quiebre para NDSI.	43
Figura 11 Umbral de quiebre para NDSII.	44
Figura 12 Resultado del índice NDSII.	45
Figura 13 Uso del programa R y Rstudio para la extracción superficial climática.	46
Figura 14 Flujograma de los procedimientos desarrollados en la investigación	47
Figura 15 Dinámica temporal de la cobertura glaciaria (nieve y hielo).	50
Figura 16 Tasa de cambio de la superficie glaciaria (hielo y nieve).....	51
Figura 17 Mapa temporal de la cobertura glaciaria (hielo y nieve).	52
Figura 18 Variación temporal de la precipitación.	53
Figura 19 Variación temporal de la temperatura máxima, mínima y promedio.	54

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo N° 1. Ficha de registro de cobertura glaciár.....	88
Anexo N° 2. Registro de precipitación superficial y temperatura superficial.....	89
Anexo N° 3. Matriz de operacionalización de variables.....	90

RESUMEN

Los impactos de la variabilidad climática son notables en los glaciares de montaña, sobre todo por los cambios significativos evidenciados en un territorio. Por ello, el objetivo del presente estudio fue determinar la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con los elementos climáticos, precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022. Para ello se consideró como metodología un análisis descriptivo cuantitativo de diseño no experimental-longitudinal; asimismo, se consideró el uso de la teledetección para cuantificar los cambios de cobertura glaciar (nieve y hielo) mediante los índices NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve) y NDSII (Índice de diferencia normalizada de nieve y hielo). Por otro lado, se consideró el análisis climático obtenido del producto grillado PISCO-SENAMHI. Los resultados evidenciaron que la cobertura de nieve descendió a 0.63 km²/año y la cobertura de hielo a 0.05 km²/año. Las precipitaciones incrementaron de forma ligera a una magnitud de 5.05 mm/km² y la temperatura promedio descendió a 0.056 °C/km². La correlación significativa se evidenció en la temperatura máxima y las coberturas de nieve, hielo y nieve/hielo, con un p-value menor a 0.05 y coeficientes de correlación superiores a 0.5.

PALABRAS CLAVES: Temperatura, precipitación, Cobertura glaciar, teledetección, Landsat.

CAPÍTULO I: INTRODUCCIÓN

1.1. Realidad problemática

A nivel global ya se percibe con claridad los efectos del cambio climático, pues se ve involucradas afectaciones a todos los ecosistemas terrestres y acuáticos, siendo este último el de mayor preocupación, pues el agua es un recurso potencial para el desarrollo de las actividades humanas y para el funcionamiento de los ecosistemas (Lenzano et al., 2018). Dentro del ciclo hidrológico se ha evidenciado que los glaciares son los elementos fundamentales en la preservación de agua en las montañas, y su descenso provoca una pérdida inmediata de agua (Millán et al., 2019). El impacto del cambio climático, se ve reflejado en la variabilidad de las precipitaciones y las temperaturas (Órgano de gobierno de áreas protegidas [UNESCO], 2020). Por otro lado, Veettil et al. (2015) proyectan un aumento de la temperatura en torno a 4°C en altitudes superiores a 4000 m.s.n.m. para el siglo XXI. Asimismo, el Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC) ha reconocido a los glaciares de montaña como indicadores principales del cambio climático (Schauwecker et al., 2014)

El derretimiento de las coberturas glaciarias no solo es expresado en pérdidas volumétricas de agua, pues también se ve involucrada la aparición de nuevas lagunas consideradas como proglaciares y esto a la vez ha generado el aumento en la superficie y el volumen de muchas lagunas ya existentes (Jacinto et al., 2015). Asimismo, una deglaciación alta provoca la generación de avalanchas y derrumbes de glaciares de las zonas de acumulación (Abraham et al., 2021). Ello provocaría afectaciones catastróficas en poblaciones rurales que se localizan en zonas bajas, (Olvera, 2019), un claro ejemplo es el desastre ocurrido en el Callejón Huaylas en el año 1970, con el derrumbe de 800 m de masa glaciaria, afectando a 25 000 personas (Olvera, 2019).

Investigaciones de glaciares tropicales de Sudamérica confirman un proceso de desglaciación acelerada en los últimos 20 años (Vuille et al., 2012). Pues en Perú, se concentra el 78% de los glaciares tropicales, con tendencia descenso temporal (Thompson et al., 2011). El investigador Pablo Fusch ha demostrado que los países andinos como Bolivia, Perú, Ecuador y Colombia, que se encuentran en la región tropical, han perdido más del 40% del área que tenían hace menos de 30 años (Sergio et al., 2022). Estos glaciares de montaña tienen el beneficio ecosistémico de preservar el agua, para luego dejar fluir lentamente en épocas de sequía (Gil Mora, 2012).

El efecto más notable de la variabilidad climática en el Perú se evidencia en la pérdida de masas glaciares, pues en los últimos 30 años el territorio peruano ha presenciado una reducción del 22% en cobertura glaciar (Bernex et al., 2010). Rabatel et al. (2013) asocian la pérdida acelerada de glaciares, al incremento de la temperatura del aire. Estas interferencias climáticas generan la inestabilidad de los procesos de solidificación de las masas de nieve (Viana et al., 2016). Cabe resaltar que los glaciares del Perú cumplen un papel fundamental como provisión y abastecimiento hídricos para la población rural y urbana (Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña [INAIGEM], 2018). Asimismo, el Perú se encuentra en el ranking de los diez países más vulnerables ante eventos del cambio climático, junto a Honduras, Bangladesh y Venezuela (Pontificia Universidad Católica del Perú [PUCP], 2022). En la figura 1, podemos observar como ejemplo la pérdida de masa glaciar del nevado Sullcon, ubicado en la cordillera central.

Figura 1

Pérdida de cobertura glaciaria del nevado Sullcón.



Nota. La figura representa la evolución del glaciar Sullcón en el tiempo, desde 2002 al 2016. Tomado del Ministerio del ambiente, 2016.

Las coberturas glaciares del nevado Huaytapallana no son ajenas a los problemas mencionados, pues un estudio demostró una pérdida de 22% en masa glaciaria en el año 2005 con referencia al año 1956 (Salinger et al., 2021). Asimismo, su localización por encima de los 5000 msnm ya permite la vulnerabilidad frente a la variabilidad climática (Barrientos et al., 2020). La cobertura glaciaria del Huaytapallana tiene importancia ambiental, porque regulan los procesos climáticos, tienen importancia económica y social porque proveen de agua a las poblaciones (Jonaitis et al., 2021).

Por ello es fundamental conocer los cambios temporales ocurridos en el nevado Huaytapallana, para tener una perspectiva de la magnitud de los procesos de pérdida glaciaria y las zonas afectadas (Xiao et al., 2022). Por lo tanto, se recurre al uso de la teledetección como medio informático temporal de los cambios ocurridos en la cobertura glaciaria (Wang et al., 2021), pues la teledetección ha crecido a lo largo de los años en variedad y sofisticación para el monitoreo de la superficie terrestre (Sagredo et al., 2014). Asimismo, es el único método disponible para estudiar los glaciares, más aún si no se tiene acceso sobre ella (Sagredo et al., 2019).

1.2. Antecedentes

Tarazona (2012), en su trabajo de investigación titulada “Aplicación de la Teledetección como una herramienta para conocer el retroceso glaciario en el Nevado Pastoría influenciado por el Cambio Climático”, tuvo como fin determinar la magnitud de pérdida de cobertura glaciaria durante los periodos 1988 – 1999 y 1999 – 2011. La investigación es de tipo descriptivo longitudinal. Para ello, se aplicó la técnica de teledetección de imágenes satelitales, para determinar las superficies de cobertura glaciaria, asimismo se aplicó el Índice Diferencial Normalizado de Nieve NDSI. Los resultados demostraron un retroceso glaciario con una magnitud anual de 8,5% en el primer periodo (1988-1999) y 12% en el segundo periodo (1999-2011). Asimismo, se evidenció que la precipitación incremento en 0.012°C por año y una disminución ligera de la precipitación (2 mm/año). Finalmente, la investigación concluye que la variable climática se relaciona con los cambios de la cobertura glaciaria sobre todo la temperatura, con una r de Pearson de 0,65.

Arévalo (2015), en la investigación titulada “Análisis temporal de glaciares y lagunas en la Cordillera Blanca”, tuvo como objetivo la identificación de coberturas glaciarias y cuerpos lagunares, el análisis se desarrolló en los años 2004, 2009 y 2014. La investigación es de tipo descriptivo longitudinal, de carácter no experimental. Para la determinación de las coberturas glaciarias y lagunares utilizaron las imágenes satelitales y con ello el procesamiento de imágenes en el programa ENVI y QGIS, herramientas que permitieron identificar las coberturas mediante el índice de nieve NDSI “Índice Diferencial Normalizado de Nieve” y el índice de agua NDWI “Índice De Agua De Diferencia Normalizada”. Los resultados demostraron que la cobertura glaciaria se redujo de 515,4 km² del año 2004 hasta 484,4 km² del año 2014, esto indica una reducción del 6% en tan solo 10 años. Asimismo, se evidenció un incremento de las coberturas lagunares en 3% de superficie en el espejo de agua.

Páez et al. (2016), en la investigación titulada “Análisis multitemporal del retroceso glaciario del nevado Santa Marta – Colombia durante el periodo 1986, 1996, 2007 y 2014”, tuvieron como objetivo los cambios superficiales de la cobertura glaciaria durante las épocas planteadas. Para ello, dieron uso a las imágenes satelitales Landsat 5, 7 y 8, para cumplir con la temporalidad de estudio. Asimismo, para la determinación de la pérdida de cobertura glaciaria y su identificación, se aplicó el índice de nieve NDSI. Los resultados demostraron un retroceso glaciario a un ritmo de 12 ha/año, asimismo, identificaron que la temperatura ambiental es el elemento climático de mayor relación en dicho cambio, con un p-value menor a 0,05 y una R de Spearman de 0,7.

Diaz et al. (2017), desarrollaron un estudio con el fin de conocer los cambios multitemporales de la cobertura glaciaria de los nevados Allin Capac y Chichi Capac durante el periodo 1975 al 2015. La unidad de estudio se encuentra localizada en la cordillera de Carabaya, Cusco. Para tal propósito se dio uso de las imágenes satelitales Landsat, el índice de nieve NDSI (Normalized Difference Snow Index) y para la identificación de cobertura glaciaria de forma controlada se utilizó la técnica de clasificación supervisada. Asimismo, para la determinación de la influencia climática sobre los cambios glaciares, se utilizó los registros de la estación meteorológica de Macusani, el cual presenta información de precipitación y temperatura mensual. Los resultados demostraron una pérdida de cobertura glaciaria de 35,6 km² durante el periodo 1975-2015, esto representa una pérdida del 9%. Por otro lado, la influencia de la precipitación y la temperatura sobre los cambios de la cobertura glaciaria son de 0,68 a 0,73, según el análisis correlacional de Pearson.

Ramos (2018), realizó un estudio con el fin de conocer la evolución temporal de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna y su relación con los elementos climáticos (precipitación y temperatura), la unidad de estudio se encuentra ubicada en la región de Arequipa. Para el desarrollo del estudio se analizó la temperatura y precipitación de 47 estaciones climáticas involucradas en el nevado, asimismo, el periodo de análisis abarca desde 1965 al 2014. Para la determinación de la cobertura glaciaria se dio de las imágenes satelitales del sensor Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI, asimismo se aplicó el método Normalized Difference Snow Index (NDSI), para la visualización de cubierta glaciaria. Los resultados demostraron una pérdida superficial del 19,4% (10,39 km²) en tan solo 28 años, en volumen se redujo aproximadamente 0.73 km³. Sobre el análisis estadístico de correlación

de Pearson, la temperatura es el elemento de mayor influencia sobre la variabilidad espacial de la cobertura glaciar, con una magnitud de 0.78.

Castillo (2017), en la investigación desarrollada sobre la evaluación de la dinámica de la cobertura glaciar de la cordillera blanca Pastoruri y su relación con los factores climáticos, temperatura y precipitación, en Ancash. Para dicho propósito se dio uso las imágenes satelitales Landsat de los años 1997, 2002, 2007, 2012, y 2016. La información climática fue extraída de 3 estaciones meteorológicas próximas al nevado. Los resultados demostraron una reducción de la cobertura glaciar desde 237 ha del año 1997 hacia 185 ha del año 2016. Por otro lado, la dinámica de la tendencia de la temperatura es ascendente y la precipitación una dinámica en descenso, y la influencia de estos elementos sobre los cambios glaciares resultó débilmente significativo con una relación de 0,42.

Diaz et al. (2017), realizaron un estudio con el fin de conocer el comportamiento temporal de la cobertura glaciar del nevado Cotopaxi durante el periodo 1998 – 2016. Para ello aplicaron el uso de la teledetección de imágenes satelitales Landsat, el método de índice glaciar NDSI, y la clasificación supervisada para el control adecuado de la superficie, estos procesos se llevaron a cabo en el programa ArcGIS. Los resultados demostraron una reducción de la cobertura glaciar de 12 km² entre los periodos 1998 a 2007 y una reducción de 3 km² en el periodo 2007 a 2016. Ello evidencia que en la primera la reducción de cobertura glaciar fue acelerada.

Leiva (2018), quien realizó un estudio con el fin de conocer el comportamiento temporal de los nevados de Colombia, el cual abarca 8 unidades. Para ello se aplicó el sistema de información geográfica, complementado con la teledetección de las imágenes satelitales Landsat. Asimismo, el periodo de estudio abarcó una temporalidad de 29 años. En base a ello, se obtuvo como resultados una reducción del 82% para el nevado Ruiz, 81%

de reducción para el nevado Tolima, 61% para el nevado Santa Isabel, siendo este el nevado de menor dimensión; 49% de reducción para el nevado Santa Marta y 55% para el nevado Huila. Basándose en estos resultados la investigación concluye que el descenso glaciar es acelerado, esto repercute en la preocupación territorial.

Según Dioses (2017), quien realizó un estudio con el fin de conocer la dinámica del nevado Huascarán y las lagunas glaciares adyacentes. Para ello se aplicó el índice de cobertura digital NDSI (El Índice Diferencial Normalizado de Nieve) y NDWI (Índice de agua de diferencia normalizada) en las bandas espectrales de las imágenes landsat, estos índices permiten identificar los elementos glaciares del territorio y los elementos superficiales lagunares, asimismo, el periodo de estudio abarca desde 1990 hasta 2017. Los resultados demostraron una pérdida de 12,9 km² de cobertura glaciar que equivale aproximadamente a una reducción de 12,68% en relación a la cobertura inicial. Del mismo modo Meier et al. (2018), utilizaron imágenes satelitales Landsat para identificar las coberturas glaciares, el análisis se llevó a cabo en los períodos 1986, 2005 y 2016. El resultado del artículo evidencia una pérdida superficial de 1,2 %. Silva et al. (2020), realizaron un análisis multitemporal de las coberturas glaciares de la Península Antártida. El estudio se llevó a cabo entre los años 1991 y 2015; para ello, utilizaron imágenes satelitales Landsat y la aplicación del método de clasificación supervisada sobre el raster de NDSI (índice de nieve). Como resultado se obtuvieron una reducción y cobertura glaciar de 39%, lo que equivale a una magnitud de 91,4 km².

Bulege et al. (2020), realizaron un estudio sobre la influencia de la variabilidad climática sobre los cambios de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana. La información de las variables climáticas temperatura fue obtenida del registro virtual del SENAMHI y los datos de superficie glaciar del nevado Huaytapallana fueron adquiridos del

Instituto Geofísico del Perú "IGP". El análisis se desarrolló en los períodos 1986 y 2016, basándose en ello, se observó que la temperatura promedio incrementó de 3,4 °C a 5,2 °C, y el retroceso glaciar fue de 11,9 km². Se concluye que la temperatura muestra relación significativa con la variabilidad superficie de la cobertura glaciar. Del mismo modo, Calizaya & Mejía (2018), realizaron un modelamiento para visualizar la deglaciación de los nevados ubicados en la cuenca del río Santa. Para ello usaron las imágenes Landsat y el programa ArcGIS. El resultado demostró una reducción de 116,7 km² durante el periodo 2000-2017. Este proceso de disminución se debe a la influencia de la temperatura, pues este elemento se encontró en constante incremento.

1.3. Marco teórico

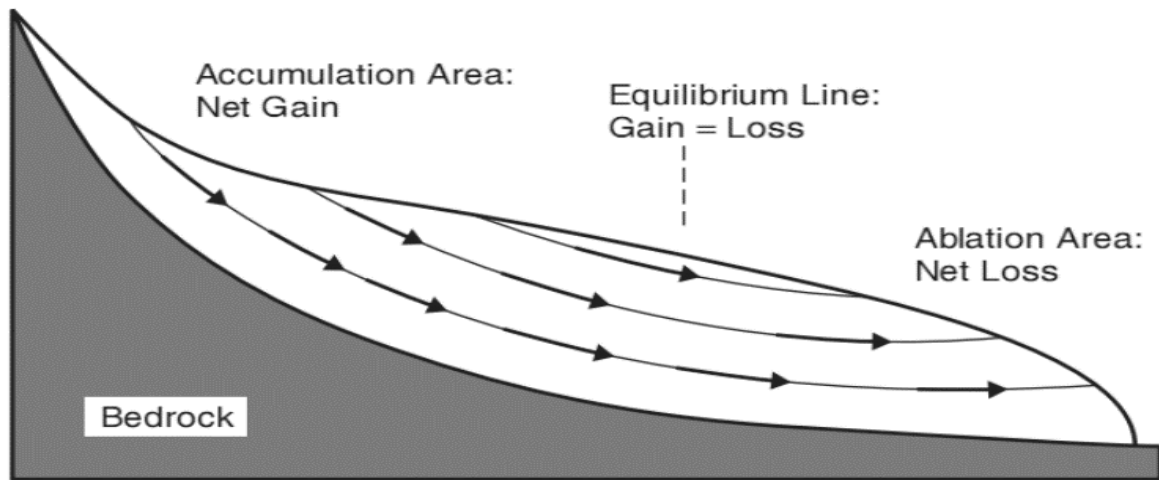
1.3.1. Glaciares y sus características

Un glaciar es una masa de hielo que transforma agua sólida (nieve, granizo o escarcha) en hielo (Huddart y Stott 2010). La formación de glaciares se da por procesos de acumulación, compactación y recristalización de la nieve (Tarbuck y Lutgens, 2009). Los factores más influyentes en los cambios de cobertura glaciar son los elementos climáticos o mecánicos, pues los elementos climáticos provocan un descenso en la inestabilidad del glaciar y provocando avalanchas o a través de desprendimientos de bloques en contacto con una laguna (Huddart y Stott, 2010).

Otros procesos involucrados en la ablación son el derretimiento, la sublimación y la erosión del viento. De todos ellos el derretimiento es el más preocupante y ocurre cuando el hielo y la nieve se encuentran sometidos al incremento de calor (Knight 1999). La acumulación es el proceso de incremento de nieve gracias a las precipitaciones para su posterior formación de hielo glaciar (Knight 1999; Huddart y Stott 2010).

Figura 2

Zonas de acumulación y ablación divididos por la Línea de Equilibrio.



Nota. El grafico representa las zonas de equilibrio y ablación dividido por la línea de equilibrio. Tomado de Huddart, D. & Stott, T. (2010).

A. Formación y dinámicas de los glaciares

La formación es mediante 3 procesos secuenciales acumulación, compactación y recristalización de nieve (Stahr & Langenscheidt, 2015; Tarbuck & Lutgens, 2005), la nieve también viene con elementos secundarios como aire y sedimentos que fluyen por acción de la gravedad (Jain, 2014). Los procesos mencionados ocurren gracias a periodos horarios o diarios con meteorología fría, y la topografía favorable para acumulación (Muñoz, 2000). En la dinámica de un ciclo hidrológico, los glaciares son ecosistemas que almacenan la precipitación por décadas (Jain, 2014).

Por tanto, en la cobertura glaciar hay dos zonas relevantes, la zona de acumulación (o de nieves perpetuas) donde ocurre la formación del hielo e incremento volumétrico; y la zona de ablación donde ocurre la fusión líquida (Stahr et al., 2015). El límite entre ambas zonas es la Línea de Equilibrio que está relaciona directamente con el balance de masa glaciar (Rabatel et al., 2012). Esta línea depende de las condiciones atmosféricas

(INAIGEM, 2018). La temperatura y la precipitación son las variables físicas que determinan principalmente el cambio de estado y la movilización de la línea de equilibrio (Schauwecker et al., 2014; Seehaus et al., 2019; Zemp et al., 2015).

B. Impactos del Cambio Climático en Glaciares Tropicales

El cambio climático de forma significativa se viene percibiendo desde 1950, debido a la evolución descontrolada de la era industrial, estos sucesos climáticos provocan el calentamiento de la superficie de los océanos, la pérdida de hielo, el aumento del nivel del mar, entre otros (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [IPCC], 2013).

Según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2013) las masas glaciares del mundo se encuentran en constante descenso, así se demuestra mediante registros e inventarios insitu y registros de teledetección. Los glaciares tropicales han mostrado una gran sensibilidad a las variaciones climáticas. La consecuencia más resaltante en el déficit a suministro de agua de origen glaciar (Vaughan et al., 2013; Drenkhan et al., 2015).}

C. Consecuencias del retroceso glaciar en los Andes

Las consecuencias que se han podido percibir del retroceso glaciar en los Andes son la escasez de suministro de agua para consumo humano; disminución de oferta hídrica para la agricultura, industria, hidroenergía; y generación de desastres naturales por lagunas glaciares, pues estas podrían drenar repentinamente y crear inundaciones (UGRH, 2014; Schauwecker et al., 2014).

Entre las amenazas relacionadas al retroceso glaciar están las avalanchas, flujos de glaciares, aluviones, GLOFs “inundaciones repentinas de lagos glaciares”, entre otros, que pueden causar daños ecosistémicos y poblacionales (Richardson et al., 2000). Estos

movimientos en masa poseen una gran capacidad de transporte de detritos generando impactos geomorfológicos (Adam et al., 2014).

1.3.2. Clima en los Andes Tropicales

A. Variación espacial y temporal de la temperatura

Estudios muestran una tendencia de incremento de la temperatura a lo largo de los Andes tropicales que oscila desde $+0,1$ °C/década hasta $+0,42$ °C/década, rango que varía en función a la altitud (Vuille et al., 2008). Vicente-Serrano et al. (2017) identificaron un incremento de la temperatura máxima con alcance de $0,4$ °C/década a una altitud de 5000 msnm. Por otro lado, a una altitud de 3000 y 4100 msnm, Racoviteanu et al. (2008) demostraron un incremento de precipitación de magnitud de $+0,92$ °C/década a una altitud 3000 msnm y $+0,34$ °C/década a una altitud de 4100 msnm.

B. Variación espacial y temporal de la precipitación

A diferencia de la temperatura cuya variación ha mostrado una tendencia significativa al aumento, estudios indican una incertidumbre en cuanto a la variación de la precipitación (Rabatel et al., 2013). Del mismo modo, Schauwecker et al. (2014), señalan que no hay un patrón definido con relación a futuras variaciones en los Andes tropicales.

En las zonas del trópico exterior, se han distinguido dos periodos en el año: la temporada húmeda que se desarrolla en el periodo octubre-marzo se da el 80% de las precipitaciones (Baraer et al., 2014) y en la época seca que se desarrolla entre mayo-septiembre se generan bajas precipitaciones (Georg Kaser et al., 1990; Rabatel et al., 2012). Los meses de transición son abril, septiembre y octubre (Gurgiser et al., 2016). En el periodo húmedo, se identificó que la acumulación ocurre en mayor medida, sobre todo en zonas altas de los glaciares (Baraer et al., 2012).

Racoviteanu et al. (2008) notaron una disminución en la precipitación a una altitud de 4100 msnm con magnitud de -11,6 mm/década; en cambio, Schauwecker et al. (2014) evidenciaron un aumento de 60 mm/década a una altitud de 3444 msnm. Ello evidencia la variabilidad de las precipitaciones en los Andes.

C. Datos climatológicos Perú-PISCO

Los datos climatológicos Peruvian Interpolated data of SENAMHI's Climatological and Hydrological Observations (siglas PISCO), es la primera base de datos espacio temporales interpolados generada por el SENAMHI, la cual contiene información de elementos temperatura, evapotranspiración y precipitación para él todo el territorio peruano. Su resolución espacial está entre $0,1^\circ$ (10 km) – $0,05^\circ$ (5 km). Abarcan un periodo desde enero de 1981 hasta diciembre de 2016 para la temperatura y hasta la actualidad la variable precipitación, estas se encuentran en una frecuencia diaria y mensual (Díaz et al., 2015).

Este producto es resultado de los registros temporales de las estaciones meteorológicas (in situ), y datos interpolados con técnicas de deriva externa (Kriging) con datos satelitales "Climate Hazards Group Infrared Precipitation with Stations data" (CHIRPS) (Aybar et al., 2017, 2019;). Los últimos productos de datos construidos para la variable temperatura máxima y mínima a nivel mensual son PISCO versión 1.1, mientras que para la precipitación son PISCO versión 2.1. Estas bases de datos se encuentran en formato NetCDF.

1.3.3. Teledetección y sus características

La Teledetección o Percepción Remota es la técnica para obtener información espacial del territorio, esto mediante la interacción energética entre la superficie terrestre y

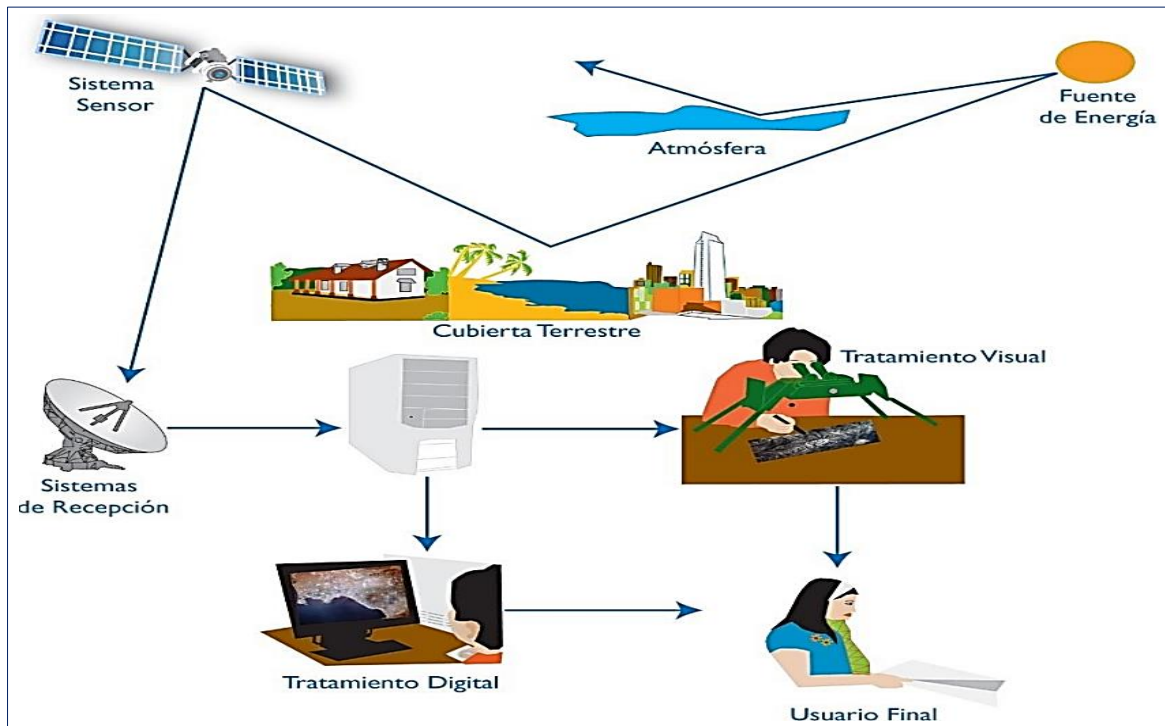
el sensor espacial satelital que capta los niveles de reflectancia terrestre (Sobrino et al., 2000; Chuvieco, 2010). Los sensores en la teledetección son clasificados en pasivos y activos.

- **Los sensores pasivos** captan la distribución energética que se encuentra en el medio que fue originada de forma natural irradiadas por el sol. Estos sensores pueden detectar la reflectancia de clase luz visible, la emisión del infrarrojo y el infrarrojo térmico, y porciones de microondas. El producto de estos sensores son imágenes pancromáticas, RGB, infrarrojas, hiperespectrales y multiespectrales (Chang et al., 2018). Las misiones más referentes y usadas en los sensores pasivos son las imágenes de Landsat, Sentinel, CBRS-4, entre otras.
- **Los sensores activos** emiten su propia energía sobre la superficie terrestre. La radiación reflejada del elemento territorial es detectada y medida por el sensor. Un sensor activo puede ser un radar, un láser o un LiDAR (del inglés, Light Detection and Ranging o Laser Imaging Detection and Ranging) (Chang et al., 2018).

Los elementos involucrados en la teledetección son los siguientes: **Fuente de energía**, elemento que da origen a las radiaciones electromagnéticas; **Cubierta terrestre**, elemento que hace referencia al territorio en análisis; **Sistema sensor**, equipo espacial que recolecta la información espacial; **Sistema de recepción**, elemento receptor ubicado en la tierra; **Interprete**, los elementos que convierten los datos en información de uso.

Figura 3

Elementos de la teledetección de un proceso pasivo.



Nota: La figura representa los elementos pasivos de la teledetección. Tomado de Chuvieco (1990).

Para la medición de la cobertura glaciaria de un nevado, dando uso de la teledetección, tenemos a los siguientes índices glaciológicos:

A. Índice Diferencial Normalizado de Nieve (NDSI)

La propiedad óptica más importante del hielo, nieve y del agua, que causa una variación espectral en la reflectancia son las longitudes de onda del infrarrojo medio y el visible (Sharma et al., 2016). Estas cualidades de las bandas espectrales permiten discriminar las superficies glaciares. Por lo general para separar las coberturas hielo/nieve de otras superficies, el umbral de frecuencia se encuentra en 0.4 aproximadamente, punto de quiebre de las frecuencias (ver figura 4). La ecuación matemática que define al NDSI es el siguiente:

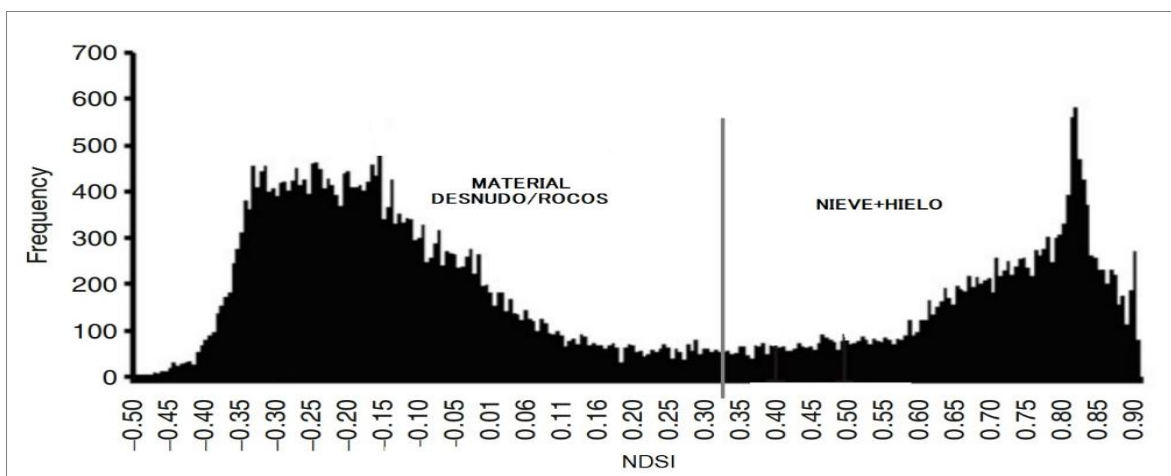
Ecuación 1. Operación matemática del índice NDSI.

$$NDSI = \frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$$

Donde: Green, banda espectral verde del rango visible; y SWIR, banda espectral de infrarrojo de onda corta (Gupta et al., 2005).

Figura 4

Frecuencia de valores del índice NDSI y punto de quiebre.



Nota. El grafico representa los valores de material desnudo y nieve + hielo. Tomado de Arora et al., (2011).

B. Índice de diferencia normalizada de nieve y hielo (NDSII)

Este índice permite discriminar dos clases de superficie en la cobertura glaciara, las cuales son nieve y hielo, para ello se da uso las bandas espectrales verde del rango visible (GREEN) y la banda Infrarrojo Cercano (NIR) (Keshri et al., 2009). La expresión algebraica del NDSII es el siguiente:

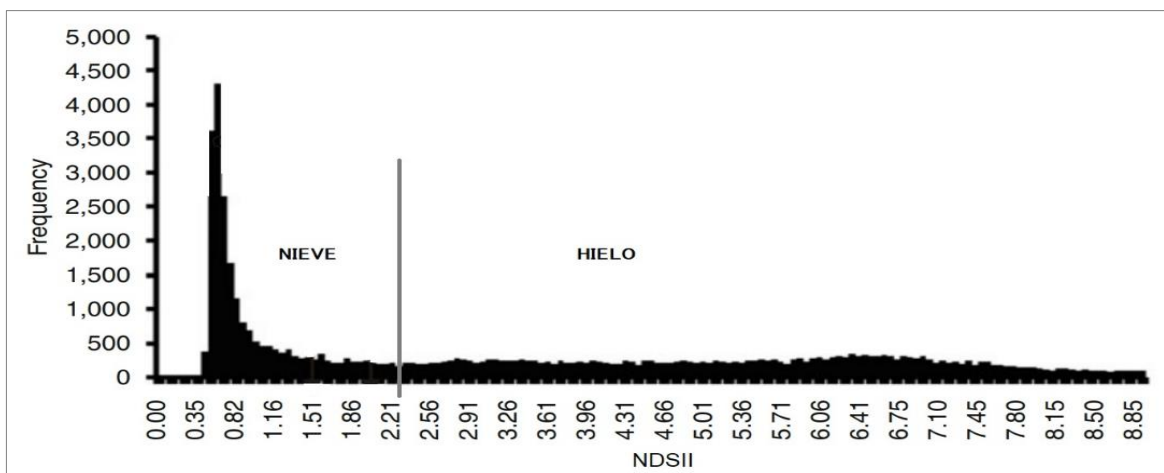
Ecuación 2. Operación matemática del índice NDSII.

$$NDSII = \frac{GREEN - NIR}{GREEN + NIR}$$

Donde: Green, banda espectral verde del rango visible; y NIR, banda espectral de infrarrojo cercano (Xiao et al., 2001)

Figura 5

Frecuencia de valores del índice NDSII y punto de quiebre para nieve y hielo.



Nota. El grafico representa nieve y hielo. Tomado de Arora et al. (2011).

1.4. Marco conceptual

1.4.1. Análisis estadístico descriptivo

El análisis estadístico descriptivo permite conocer características de los datos. Una forma de realizar expresar estas características es el uso de gráficos sencillos y con adecuada interpretación. También es recomendada para resumir información en cuadros o tablas, gráficas o figuras, de forma sintética (Rendón-Macías et al., 2016). Asimismo, los estadísticos descriptivos más reconocidos para conocer a las variables son las medidas de tendencia central, permiten comprender el comportamiento de las variables numéricas y su

distribución, en ello tenemos a la media, mediana y moda. También se tiene a las medidas de dispersión, las cuales nos indican el comportamiento de las variables, ante ello contamos con el valor máximo y mínimo y qué tan alejados o cercanos se encuentran estos valores del punto central, así como el rango, la desviación estándar y la variancia (Sperandei et al., 2014).

1.4.2. Análisis estadístico de Normalidad

La prueba de normalidad, tiene por objetivo analizar la distribución de los valores observados respecto a valores esperados de una o más variables en estudio (Dominguez-Lara et al., 2018). Los resultados de la prueba de normalidad permiten conocer que estadísticos inferenciales se deben aplicar, sean paramétricos y no paramétricos (Cabrera et al., 2017). Dentro de las pruebas de normalidad tenemos al Kolmogorov-Smirnov, el cual es aplicado para muestras superiores a 50 unidades. Para tamaños muestrales inferiores a 50 se considera la prueba de normalidad Shapiro-Wilk (Pedrosa, 2015).

1.4.3. Análisis estadístico de correlación

El análisis de correlación es un estadístico que permite conocer el grado de asociación lineal entre dos variables cuantitativas (Roy-García et al., 2019). La asociación se describe mediante una medida sin unidades llamada coeficiente de correlación "R", donde el valor oscila de -1 a +1. Entre más cercano es a 1 la correlación será alta, entre más cercano a 0 la relación será de débil a nula, los valores negativos indican relación inversa y valores positivos indican relación directa. Asimismo, la significancia estadística se indica mediante un valor p-value. (Chaves et al., 2008). El valor p-value aporta evidencia que hay relación significativa entre dos variables (Martínez et al., 2016).

1.4.4. Análisis estadístico de regresión lineal simple

El análisis de la regresión lineal simple permite predecir el comportamiento de la variable dependiente en función a la variable independiente. El análisis de estimación se da mediante la ecuación lineal (Carrasquilla-Batista et al., 2016). En los resultados en el análisis de regresión viene dado por el coeficiente de determinación (r^2), este coeficiente es la proporción de variabilidad de Y (dependiente) que es explicada por X (independiente).

El coeficiente de determinación toma valores entre 0 y 1, y cuanto más se aproxime a 1 mayor será la fiabilidad de las predicciones (Astorga, 2014). Si el valor de R-cuadrado es de 0,8; significa que el 80% del movimiento de la variable dependiente viene a ser explicada por una variable independiente probada. Otro resultado en el análisis de regresión es la significancia de ANOVA, pues un valor de p-value inferior a 0,05, indica que el modelo de regresión es aceptable (Brenes, 2017).

1.4.5. Análisis cartográfico

El análisis cartográfico consiste en la aplicación de mapas para la proyección de un fenómeno en estudio, asimismo se busca evidenciar las características espaciales de dicha unidad territorial en estudio (Instituto Geográfico Agustín Codazzi [IGAC], 1997). El análisis cartográfico viene definido por:

- Análisis visual: identificación de cambios temporales en un mapa cartográfico (Salishev, 1990).
- Análisis cartométrico: consiste en las mediciones y cálculos de las características cuantitativas de la unidad territorial, como son las superficies, longitudes y otras mediciones paramétricas (Lizмова, 2007)

1.5. Formulación del problema

1.5.1. Problema general

- ¿Como es la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú?

1.5.2. Problemas específicos

- ¿Cómo es la variación espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú?
- ¿Cuál es la variabilidad temporal del elemento climático precipitación durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú?
- ¿Cuál es la variabilidad temporal del elemento climático temperatura durante el periodo 1986-2016, Junín, Perú?
- ¿Cuál es la correlación de la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y el elemento climático precipitación durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú?
- ¿Cuál es la correlación de la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y el elemento climático temperatura durante el periodo 1986-2016, Junín, Perú?

1.6. Justificación

Se justifica por la preocupación que genera en la actualidad la pérdida acelerada de cobertura glaciar de los andes del Perú en los últimos años, por ello se planteó este tema de investigación para cuantificar el retroceso glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022 utilizando el análisis espacio-multitemporal. Estos resultados permitirán

abordar decisiones con relación a la disponibilidad de agua provenientes de la deglaciación y tomar medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

La investigación dará aporte social, ya que, brindará un conocimiento claro sobre el comportamiento temporal de las precipitaciones y la temperatura en los últimos 30 años. Así como también la incidencia de estas sobre los cambios de la cobertura glaciaria. Pues el conocimiento del elemento más influyente en la pérdida de cobertura glaciaria será una realidad latente para la sociedad, y ello permitirá abordar medidas de adaptación.

Por otro lado, el conocimiento del retroceso glaciario del nevado en estudio, también permitirá abordar medidas de prevención de riesgos, frente a posibles amenazas como avalanchas e inundaciones por rotura de lagunas. Asimismo, la realidad del retroceso expresado en los resultados consentirá a que las poblaciones aledañas tomen un valor ambiental, y su consideración en el manejo de recursos hídricos.

Como justificación teórica, se realizó este estudio con el fin de aportar conocimientos sobre uso y manejo de la teledetección de imágenes satelitales, ello permitirá aplicar la metodología presente en otros territorios con cambios temporales en cobertura glaciaria. Por otro lado, la investigación permitirá la apertura de aplicar nuevos procesos en la identificación y caracterización de glaciares, mediante uso de sensores de mayor resolución o la aplicación de sensores activos.

Finalmente, la información generada será de utilidad para las instituciones involucradas en su gestión y conservación de los recursos hídricos de montaña, como la Autoridad Nacional del Agua y el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM), quienes juegan un papel importante en las medidas de adaptación y mitigación frente al cambio climático.

1.7. Objetivos

1.7.1. Objetivo General

- Determinar la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú.

1.7.2. Objetivos Específicos

- Conocer la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú.
- Identificar la variabilidad temporal del elemento climático precipitación del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú
- Identificar la variabilidad temporal del elemento climático temperatura del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2016, Junín, Perú
- Determinar la correlación de la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y el elemento climático precipitación durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú.
- Determinar la correlación de la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y el elemento climático temperatura durante el periodo 1986-2016, Junín, Perú.

1.8. Hipótesis

1.8.1. Hipótesis General

- Se determina que la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana es significativa a igual que su relación con los elementos climáticos precipitación y temperatura durante el periodo 1986-2022.

1.8.2. Hipótesis Específicos

- Se reconoce que la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciaria del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022 es decadente en el transcurso del tiempo, Junín, Perú.
- Se identifica que la variabilidad temporal del elemento climático precipitación durante el periodo 1986-2022 es decadente en el transcurso del tiempo, Junín, Perú
- Se identifica que la variabilidad temporal del elemento climático temperatura durante el periodo 1986-2016 es decadente en el transcurso del tiempo, Junín, Perú
- Se determina una correlación significativa alta entre la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciaria del nevado Huaytapallana y el elemento climático precipitación durante el periodo 1986-2022, Junín, Perú.
- Se determina una correlación significativa alta entre la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciaria del nevado Huaytapallana y el elemento climático temperatura durante el periodo 1986-2016, Junín, Perú.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA

2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación del estudio es de enfoque cuantitativo, ya que se recolectará información numérica de las variables climáticas precipitación y temperatura, y los cambios temporales de la cobertura glaciaria para realizar un análisis estadístico (Hernández et al., 2016). El nivel de la investigación es descriptivo, pues se da a conocer las características temporales y espaciales de la cobertura glaciaria (nieve y hielo) del nevado Huaytapallana (Hernández et al., 2016). Asimismo, es correlacional-causal porque describen la relación temporal entre variables climáticas y la cobertura glaciaria (Hernández et al., 2016).

El diseño es de tipo no experimental y longitudinal de evolución. Pues las variables no tuvieron manipulación dentro de su medición, solo se tomó registro mediante imágenes satelitales y registros climáticos del producto PISCO-SENAMHI, sujetas únicamente a la observación y descripción del comportamiento (Hernández et al., 2016). Es longitudinal, pues el periodo de estudio tiene un abarcamiento de 36 años (1986-2022).

En la investigación la **variable dependiente** es la cobertura glaciaria (nieve y hielo) del nevado Huaytapallana y las **variables independientes** son los elementos climáticos, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura promedio.

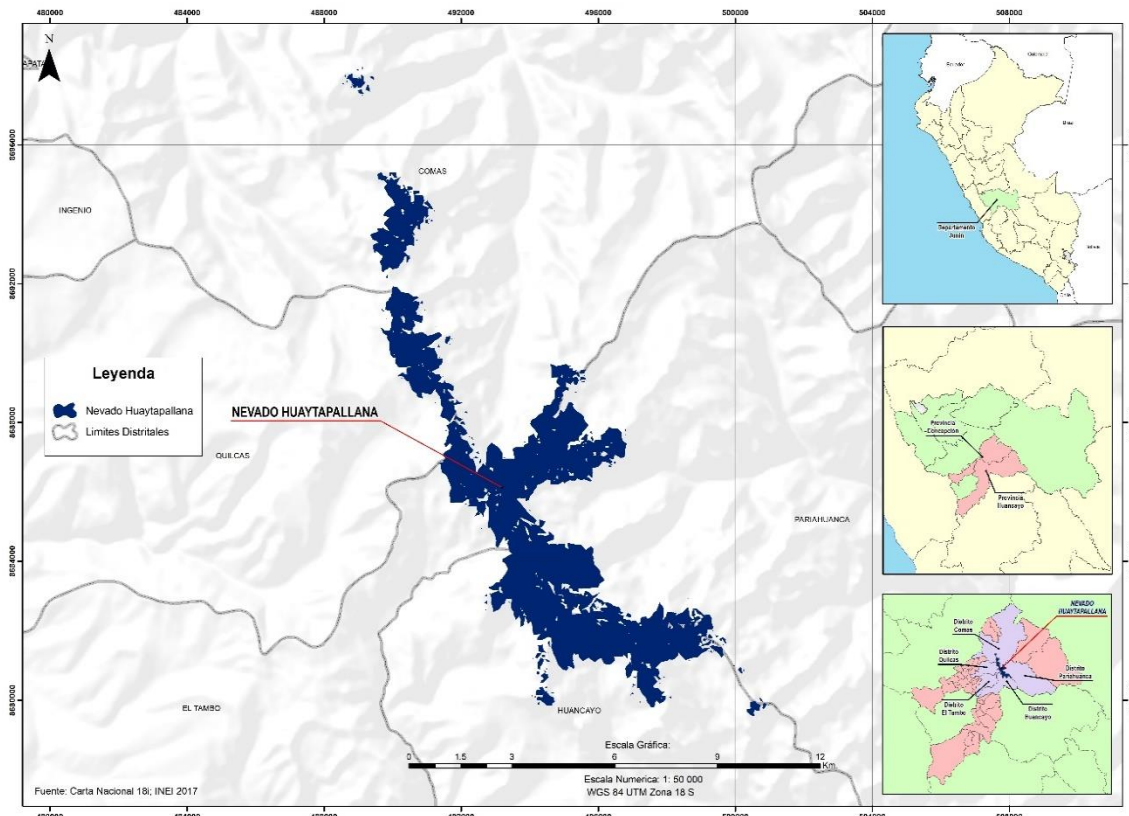
2.2. Población y muestra

La población en el estudio son todos los nevados altoandinos tropicales del Perú. El tipo de **muestreo** del estudio fue no probabilístico por conveniencia, donde la muestra resulta ser a decisión del investigador sin aplicar probabilidad alguna, sino más bien consideración de las características de la unidad de estudio. Por tanto, la **muestra** resulta ser toda la superficie del nevado Huaytapallana, que se ubica en la zona altoandina de Junín a una altitud promedio de 5557 msnm.

- Inclusión y exclusión:** La temporalidad del estudio marcada por el periodo 1986-2022, esto se debe a que las imágenes Landsat 5, 7 y 8; se encuentran disponibles para el nevado en estudio a partir del año 1986 hasta la actualidad. No obstante, los elementos climáticos de precipitación y temperatura que fueron adquiridos del producto grillado PISCO “*Peruvian Interpolated data of the SENAMHI’s Climatological and hydrological Observations*”, están disponibles desde el año 1981 hasta el 2016 para la temperatura en su versión 1.0 y desde el año 1981 hasta 2022 para la precipitación en su versión 2.1. En resumen, la temperatura aún no muestra una actualización de data en el grillado PISCO.

Figura 6

Mapa de ubicación del nevado en estudio.



Nota. Mapa cartográfico elaborado en ArcGIS 10.8

2.3. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Las técnicas aplicadas en el estudio son la **observación directa no experimental**, que consiste en el registro de elementos mediante la percepción visual (Caballero, 2013). En el estudio se aplicó la **observación (fotointerpretación)** para obtener la información de cobertura glaciar y los elementos climáticos.

Los **instrumentos** fueron una ficha de observación para el registro temporal de la cobertura glaciar (nieve y hielo) expresado en kilómetros cuadrados (Ver anexo 1). Y una segunda ficha de observación para almacenar datos de precipitación superficial (mm/km²) y temperatura superficial (°C/km²) del periodo de estudio planteado (ver anexo 2).

2.4. Procedimiento

En los procedimientos se refleja los procesos de adquisición de información para determinar la cobertura glaciar y los elementos climáticos a nivel de superficie. Además, se incluye los procedimientos referentes a la manipulación de los datos espaciales y finalmente los análisis estadísticos correspondientes.

2.4.1. Recolección de Imágenes satelitales

Para la selección de imágenes satelitales del área de estudio se recurrió a la base de datos de las misiones Landsat 5/7 TM y 8 OLI que posee el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS). Se encuentran disponibles de forma gratuita y poseen una resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal aceptable para el estudio. Se seleccionaron escenas teniendo en cuenta el periodo, siendo los meses entre junio y septiembre los más adecuados, debido a la baja cobertura de nubosidad como interferencia. El segundo criterio que se tomó en cuenta fue el uso de **(Level 2 reflectancia superficial corregida atmosféricamente)**, esto indica que las imágenes tienen corrección geométrica, atmosférica y radiométrica.

En la tabla 1, se evidencias las imágenes Landsat y las características primordiales como la resolución espacial. En la tabla 2, se muestra las imágenes satelitales considerados en el estudio, en ello se observa que a pesar que la escena completa de cada imagen tiene nubosidad de interferencia, se manifiesta que el área de estudio en específico no muestra nubosidad.

Tabla 1

Datos de imágenes satelitales.

Fuente	Tipo de misión	Periodo	Fecha de obtención	Resolución
USGS	Landsat 4-5 TM	1986 - 2011	21 Julio	30 m
	Landsat 7 ETM	2012	19 Julio	30 m
	Landsat 8 OLI/TIRS	2013 - 2022	22 Julio	30 m

Tabla 2

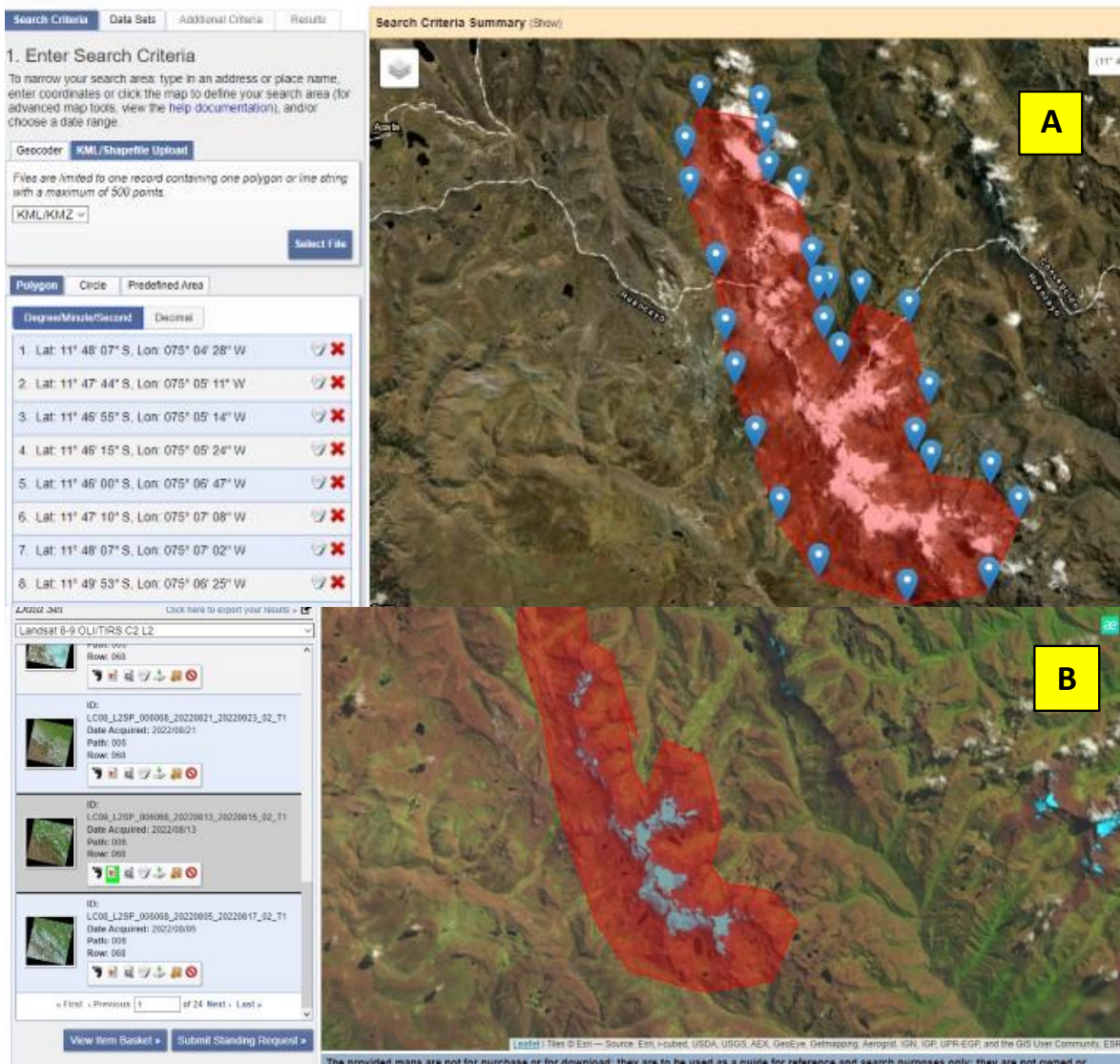
Imágenes Landsat considerados en el estudio.

Año	Código Landsat	% nubosidad total	% nubosidad área de estudio
1986	LT05_L2SP_003070_19860612_20200823_02_T2	10	0
1988	LT05_L2SP_003070_19880606_20200829_02_T2	7	0
1990	LT05_L2SP_003070_19900719_20200831_02_T2	15	0
1992	LT05_L2SP_003070_19920611_20200903_02_T2	12	0
1994	LT05_L2SP_003070_19940718_20200906_02_T2	10	0
1996	LT05_L2SP_003070_19960729_20200909_02_T2	10	0
1998	LT05_L2SP_003070_19980723_20200911_02_T2	15	0
2000	LT05_L2SP_003070_20000718_20200913_02_T2	18	0
2002	LT05_L2SP_003070_20020610_20200914_02_T2	5	0
2004	LT05_L2SP_003070_20040707_20200916_02_T2	7	0
2006	LT05_L2SP_003070_20060611_20200903_02_T2	8	0
2008	LT05_L2SP_003070_20080718_20200906_02_T2	10	0
2010	LT05_L2SP_003070_20100718_20200906_02_T2	12	0
2012	LE07_L2SP_003070_20120711_20200908_02_T2	15	0
2014	LC08_L2SP_003070_20140906_20200831_02_T2	18	0
2016	LC08_L2SP_003070_20160607_20200911_02_T2	15	0
2018	LC08_L2SP_003070_20180906_20200831_02_T2	7	0
2020	LC08_L2SP_003070_20200607_20200911_02_T2	10	0
2022	LC08_L2SP_003070_20220906_20200831_02_T2	10	0

En la figura 6, se observa la plataforma USGS Explorer, el cual se encuentran almacenadas las imágenes Landsat 5, 7 y 8.

Figura 7

Imágenes Landsat de la plataforma USGS.



Nota. (A), localización del área de estudio mediante polígono cerrado, (B) escena de imagen Landsat sin nubosidad dentro del área de estudio y para su descarga inmediata.

2.4.2. Preprocesamiento de Imágenes satelitales

Debido a que las imágenes descargadas ya contienen correcciones atmosféricas y radiométricas, esto quiere decir que el equipo técnico del USGS ya brinda imágenes satelitales con corrección de reflectancia a nivel de superficie, esto indica que no está involucrado las reflectancias de interferencias como lo generado por los aerosoles y las nubes, solo se tiene información de reflectancia de la superficie en estudio (USGS, 2013).

Por ello, se consideró la única corrección de imágenes relacionadas al datum UTM, pues las imágenes vienen georreferenciadas en norte y el área de estudio se ubica en el sur, por tanto, se re-proyector las imágenes Landsat de WGS 1984 19 norte a WGS 1984 19 sur, todo ello mediante la herramienta *Project* del programa ArcGIS10.8.

2.4.3. Aplicación de los índices de detección de nieve y hielo, NDSI y NDSII

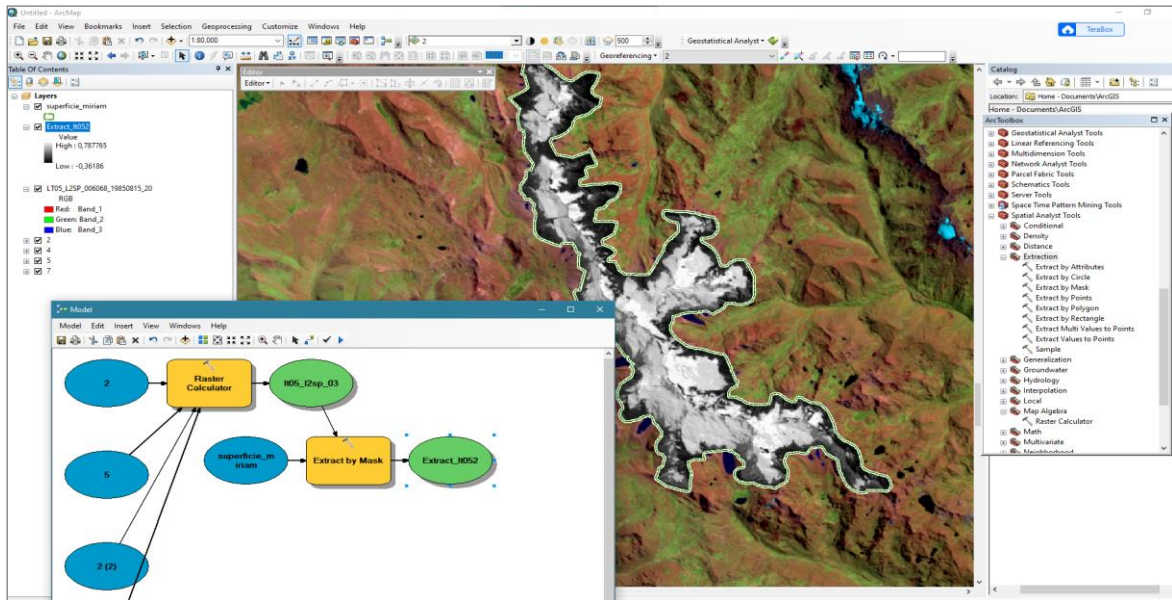
Para determinar en primera instancia nieve y hielo en conjunto se aplica el índice NDSI (Índice Diferencial Normalizado de Nieve), luego para la determinación de nieve y hielo de forma independiente se aplica el índice NDSII (Índice de diferencia normalizada de nieve y hielo).

A. Aplicación de NDSI para determinar Nieve y Hielo en conjunto

Para la identificación de cobertura glaciar en conjunto nieve y hielo, se aplicó el índice NDSI con el fin de diferenciar cobertura glaciar de otras unidades como rocas. Este índice se desarrolló en el programa Arcgis 10.8 teniendo como uso a la banda verde (Green) y la banda infrarrojo cercano de onda corta (SWIR). El umbral de quiebre en las barras de frecuencias es un valor próximo al 0,16. Este proceso se desarrolló de forma repetitiva para todos los años de estudio. En la figura 7, se visualiza la obtención del índice NDSI para el área de estudio.

Figura 8

Índice NDSI para el área de estudio.

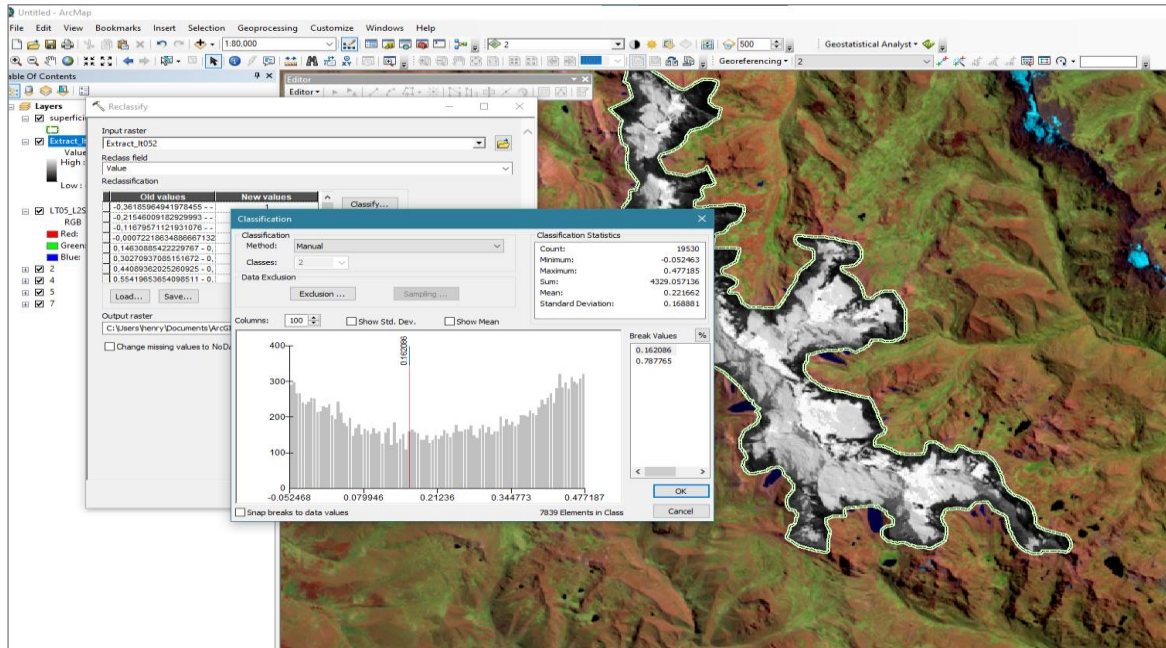


Nota. El índice fue determinado mediante la herramienta *map algebra* de ArcGIS 10.8, y el recorte fue mediante extracción de máscara. Asimismo, se aplicó un *model builder* para maximizar el proceso repetitivo.

En la figura 8, se observa el umbral de quiebre de NDSI que separa la cobertura glaciara de otras unidades territoriales, como cobertura vegetal, escombros, roquedales, suelos desnudos, etc.

Figura 9

Umbral de quiebre para NDSI.

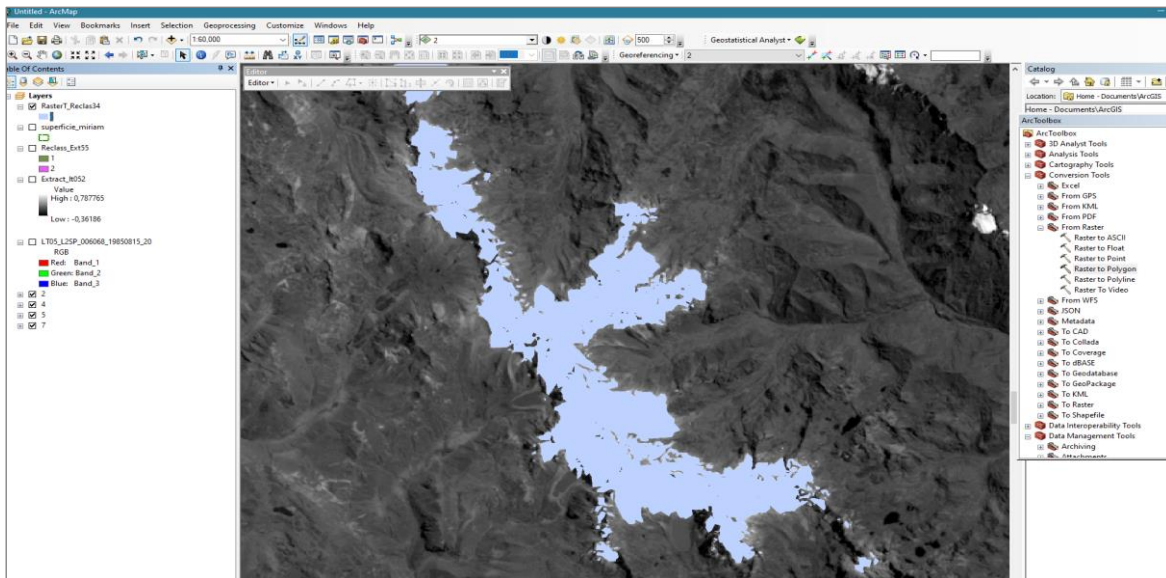


Nota. Umbral de corte determinado por la herramienta *Reclassify*

En la figura 9, se observa el resultado de la cobertura glaciar compuesto por nieve y hielo.

Figura 10

Umbral de quiebre para NDSI.



Nota. Resultado de superficie de cobertura glaciar obtenido por vectorización de raster.

B. Aplicación de NDSII para determinar Nieve y Hielo de forma independiente

Seguido a la determinación de la superficie general de cobertura glaciar obtenido del NDSI, se aplicó el índice NDSII, con el fin de discriminar nieve y hielo de forma independiente, para ello se aplicó las bandas Green y NIR en el programa Arcgis 10.8. El umbral de corte para este estudio oscilaba entre 0,12. En la figura 10 se visualiza el corte en el índice NDSII. En la figura 11, se observa el resultado de separación de nieve y hielo.

Figura 11

Umbral de quiebre para NDSII.

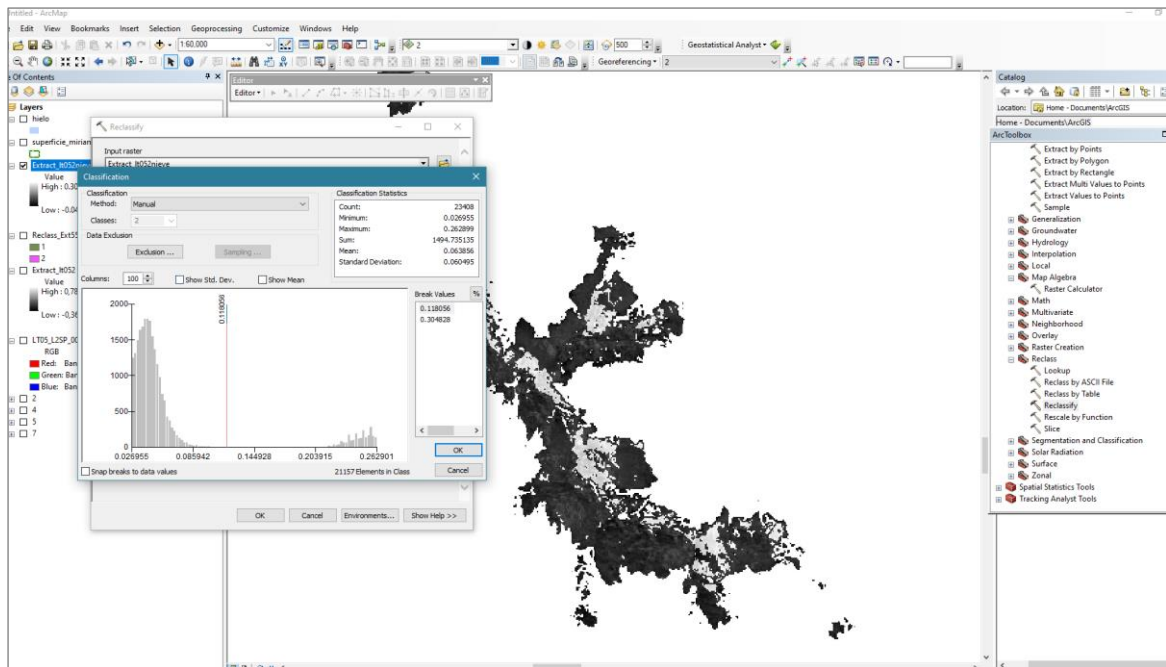
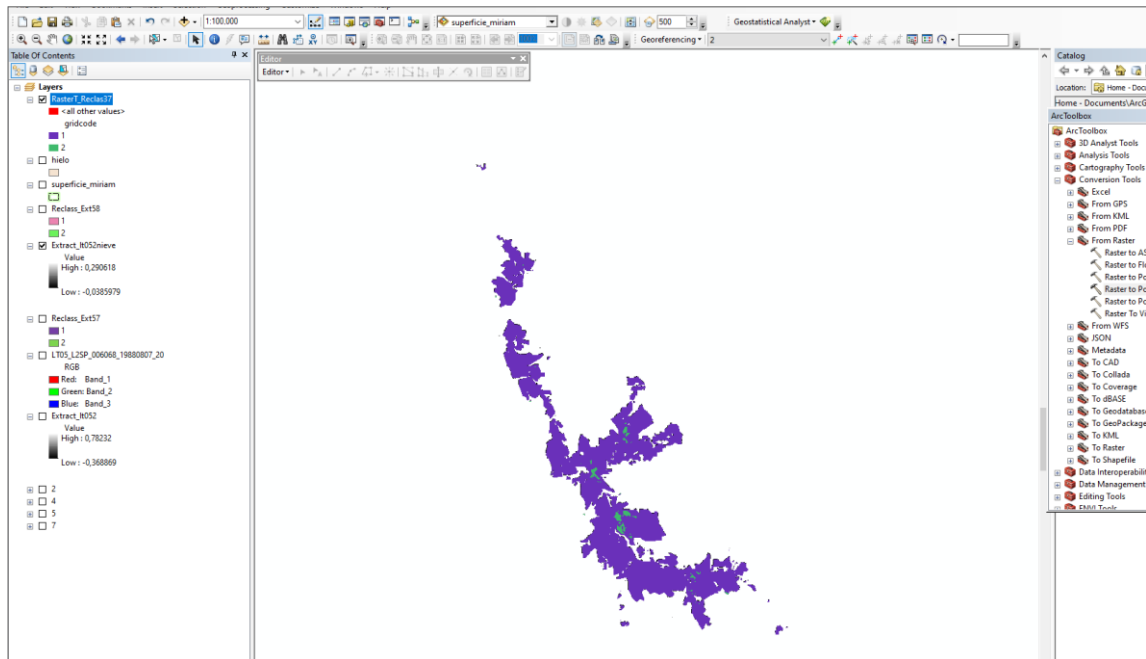


Figura 12

Resultado del índice NDSII.



Los resultados de superficie de nieve y hielo de los años planteados, fueron almacenados en los registros de Excel para su posterior análisis estadístico y cartográfico.

2.4.4. Datos climáticos virtuales de precipitación y temperatura del grillado PISCO

Los elementos climáticos en estudio fueron adquiridos del producto grillado PISCO que se encuentra disponible en el IRI data Library (Hijmans et al., 2020). Seguido a ello, se dio uso de un script para obtener precipitación y temperatura a nivel de superficie del nevado Huaytapallana, estos procesos se llevaron a cabo en el lenguaje de programación R y Rstudio. En siguientes líneas se muestra el script usado para la obtención de información climática en superficie. En la figura 12, se visualiza el uso del programa y el resultado areal.

Script de programación:

```

setwd("d:/leer:pisco/shp")
library(ncdf4)
library(raster)
pisco.preci <- brick("piscopm.nc")
library(rgdal)
glaciar <- readOgr(layer = "glaciar_Huaytapallana")
plot(glaciar)
prec.glaciar.men <- extract(pisco.precip, glaciar, fun = mean)
range(prec.glaciar.men)
plot(prec.glaciar.men[1,], type = "l", col = "blue", y lim = c(0,256), ylab = "precipitación mm",
xlab = "meses", main = "precipitación areal")
write.csv(t(prec.glaciar.men), "precipitación_glaciar_csv")

```

Figura 13

Uso del programa R y Rstudio para la extracción superficial climática.

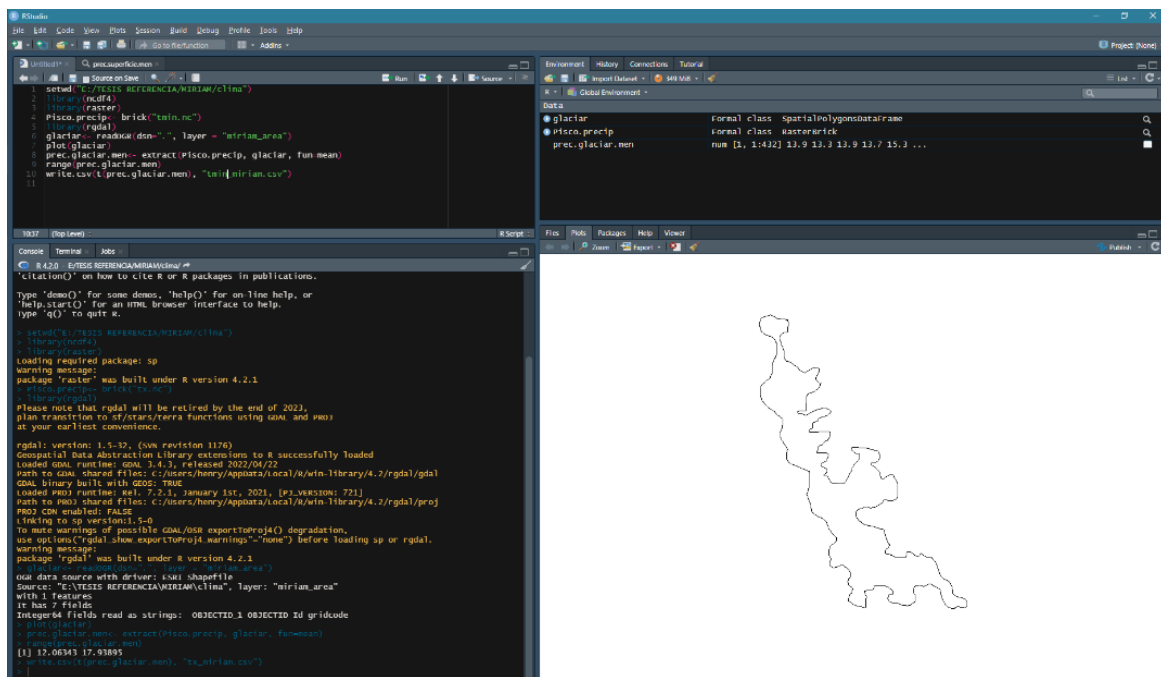
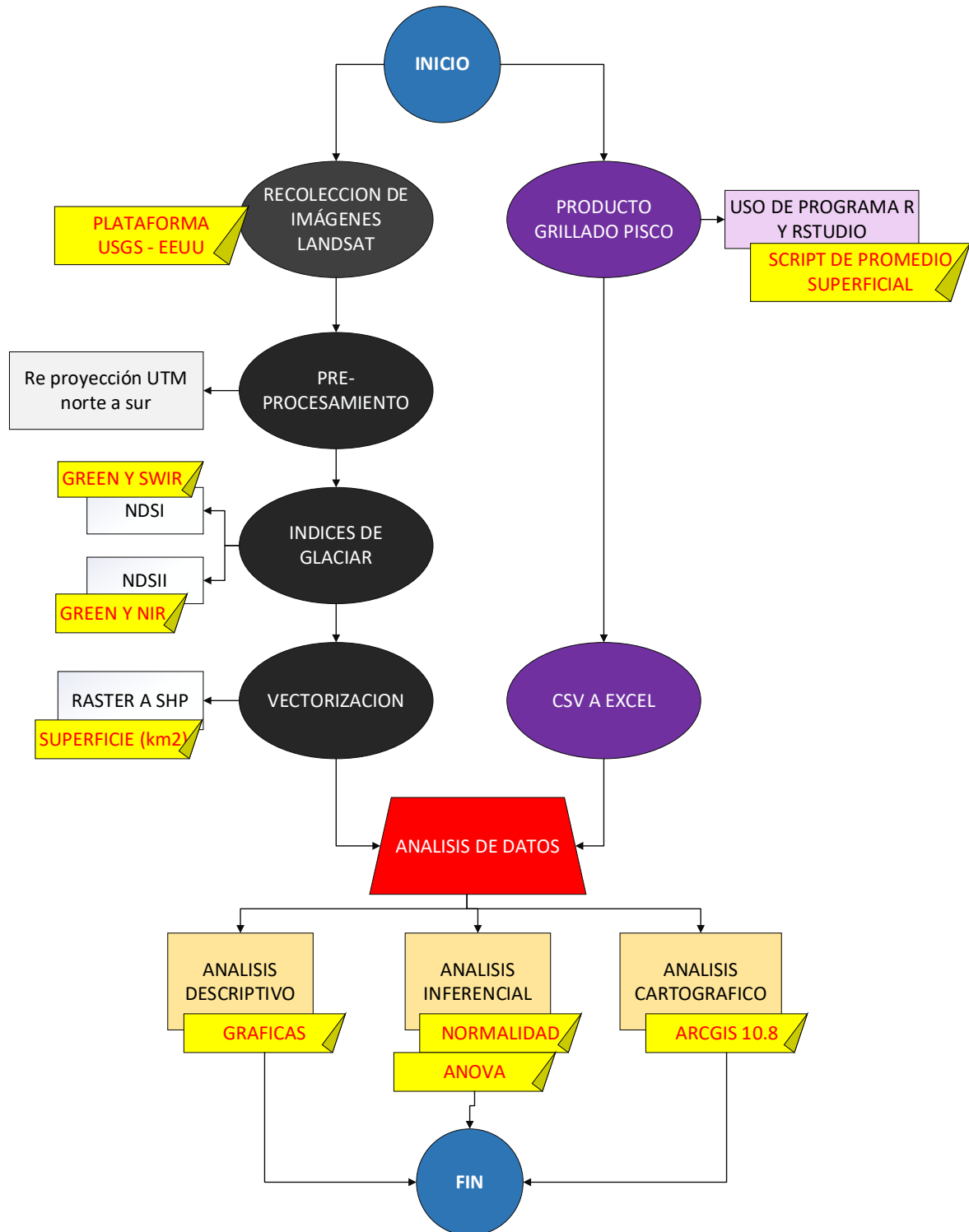


Figura 14

Flujograma de los procedimientos desarrollados en la investigación



2.5. Análisis de datos

Los datos temporales de las variables cobertura glaciar (nieve y hielo), precipitación y temperatura, tuvieron los siguientes análisis estadísticos:

- En primera instancia se determinó el análisis estadístico descriptivo, el cual involucra conocer la media, moda, mediana, rango, máximo y mínimo de los datos temporales de las variables de estudio. Asimismo, como análisis descriptivo se dio uso de gráfico lineales y de barras temporales
- Seguido se determinó la prueba de normalidad de Shapiro Willks, el cual es aplicable para muestras temporales menor a 50 unidades, este resultado expresa la distribución normal o no normal de cada variable, ello permitirá el uso adecuado de estadísticos inferenciales.
- Luego se aplicó el análisis de correlación sea Pearson para variables paramétricas (distribución normal) y Spearman para variables no paramétricas (distribución no normal). Este análisis permite conocer la incidencia de los elementos climáticos sobre los cambios de la cobertura glaciar de Huaytapallana.
- Después se aplicó el análisis de regresión lineal para conocer la prospección de la cobertura glaciar en los años 2030, 2035 y 2040. Para dicho análisis se da por uso la información del 1986-2022. Todos estos análisis estadísticos se llevaron a cabo en los programas SPSS v.26 y Microsft Excel.

2.6. Aspectos éticos

Las informaciones para el cumplimiento del estudio fueron adquiridas de instituciones gubernamentales como SENAMHI-Perú y USGS-EE.UU.; por tanto, se respeta los derechos de autor. Por otra parte, se conserva una ética profesional para el manejo de información secundaria y para el uso de los distintos programas de información geográfica y estadística. Asimismo, por la consideración de información secundaria a distintos autores que refuerzan la teoría del estudio, se considera las citas y referencias de autores tomados en cuenta en la investigación.

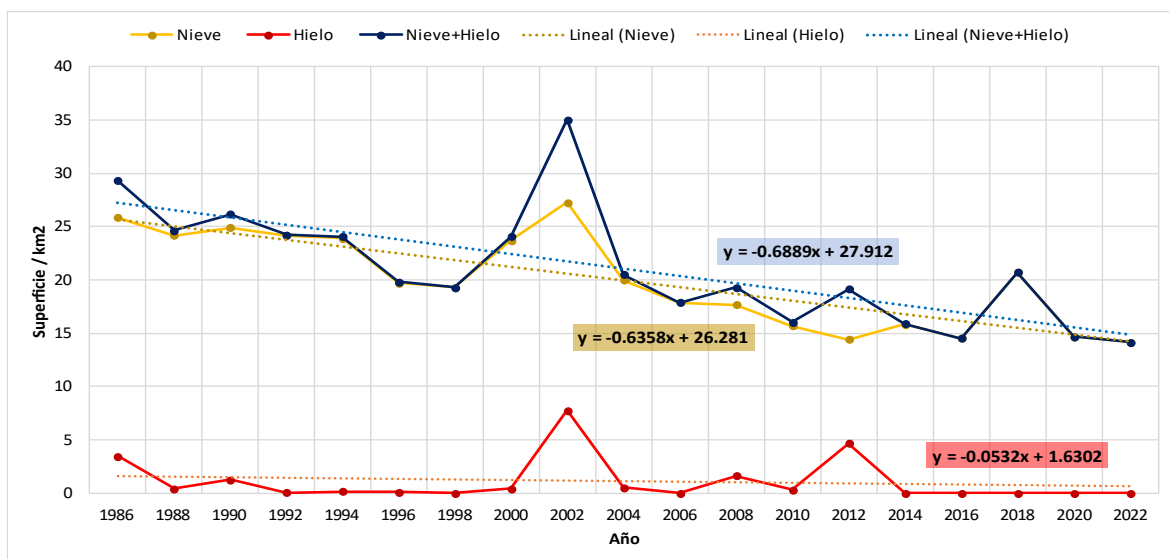
CAPÍTULO III: RESULTADOS

3.1. Variación temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022

En la **figura 15**, se observa la dinámica temporal de la cobertura de nieve, hielo y nieve/hielo, en ello se percibe que la cobertura de nieve descendió a una razón de 0,63 km²/año, la cobertura de hielo descendió a 0,05 km²/año y la cobertura de nieve/hielo en conjunto descendió a 0,69 km²/año. Asimismo, en el año 2002 se evidencian incrementos significativos de cobertura de nieve y hielo. Por otro lado, en la **figura 16**, se visualiza la tasa de cambio superficial (%), el cual expresa la comparación de cambio entre dos tiempos. De ello se aprecia que la cobertura de nieve tuvo incremento significativo en el año 2018, y las frecuencias de descensos son superiores a los de incremento (A). En la cobertura de hielo se observa un incremento significativo en el año 2008 y su frecuencia de descenso e incremento son similares (B), en la cobertura nieve/hielo el incremento significativo se presentó en el año 2002 y descenso significativo en el año 2004 (C).

Figura 15

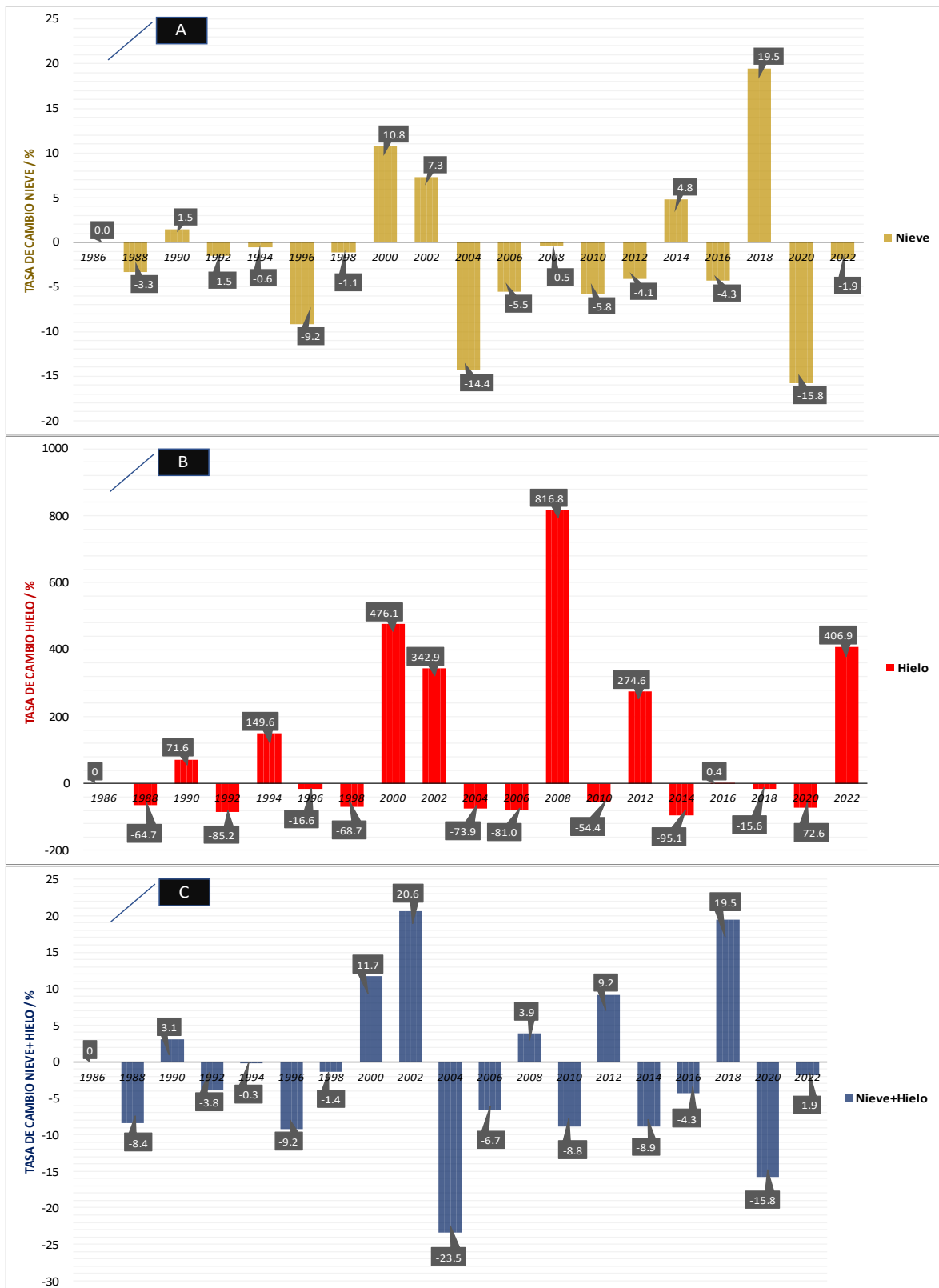
Dinámica temporal de la cobertura glaciar (nieve y hielo).



Nota. Diagrama lineal superficie vs tiempo

Figura 16

Tasa de cambio de la superficie glaciar (hielo y nieve).



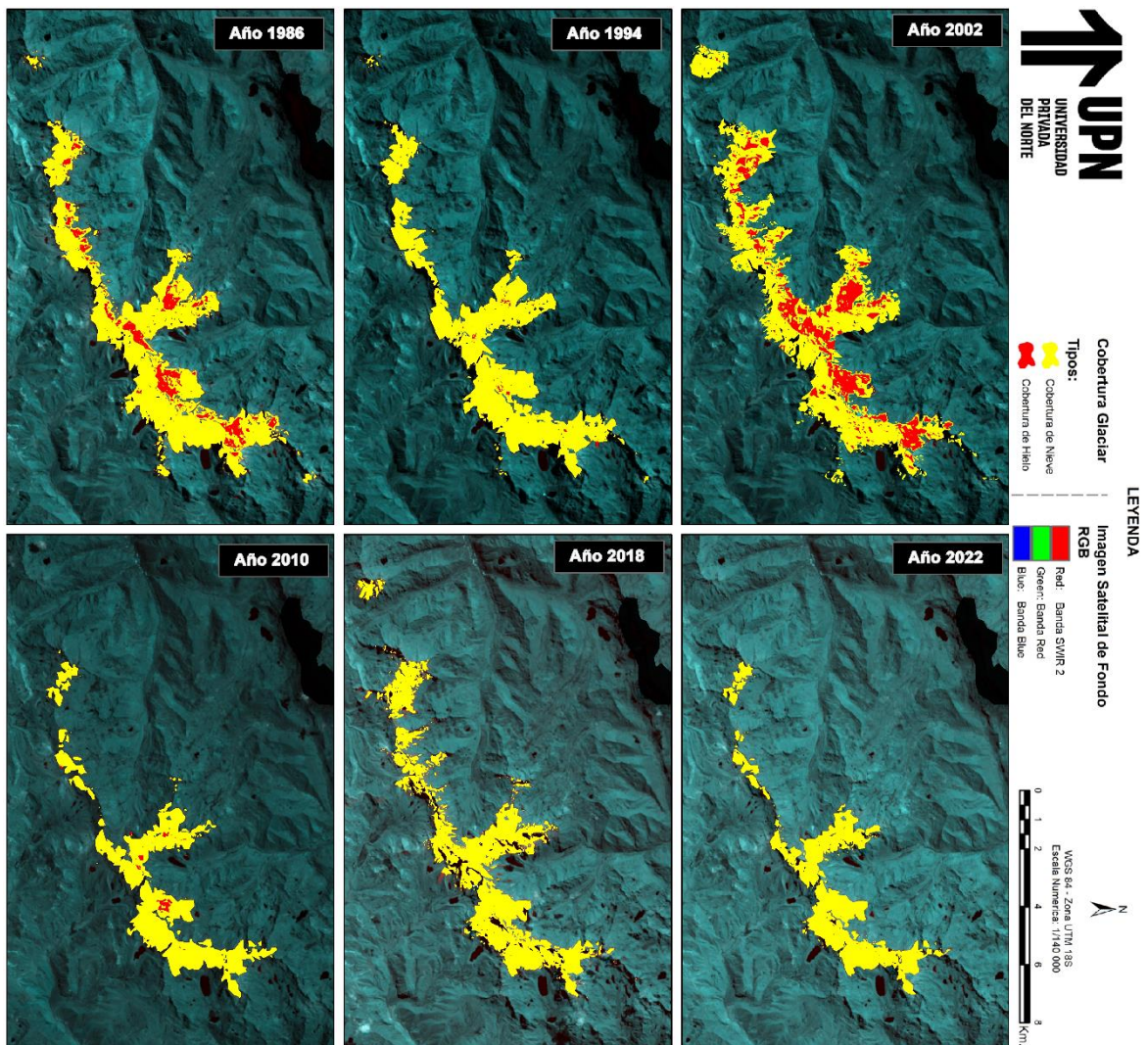
Nota. Diagrama de barras con eje positivo y negativo en la magnitud tasa vs tiempo.

3.2. Variación espacial de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022

En la figura 17, se observa los cambios espaciales de la cobertura de nieve y hielo, se observa evidentemente la pérdida de cobertura de nieve en toda la periferia del nevado Huaytapallana. En cuanto a la cobertura de hielo se evidencia que va descendiendo a excepción del año 2002, en donde se revela incremento de nieve y hielo significativo.

Figura 17

Mapa temporal de la cobertura glaciar (hielo y nieve).



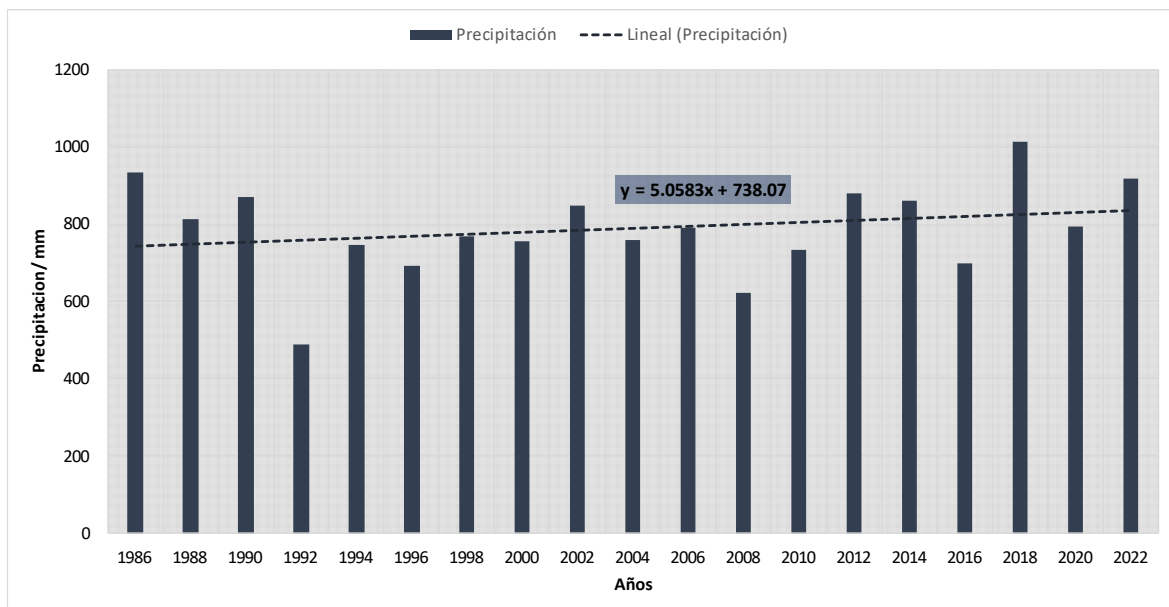
3.3. Variación temporal de la precipitación y la temperatura del nevado Huaytapalla

En este apartado se proyecta la variación temporal de la precipitación y la temperatura, mediante graficas de barras temporales, la expresión de cambio promedio se viene dada por la pendiente (m) de la ecuación lineal " $y=c+mx$ ", el cual expresa el cambio del eje Y sobre el cambio del eje X. Es así que en la **figura 18**, se muestra la variación temporal de la precipitación, en donde se evidencia un incremento de 5.05 mm/año.

En la **figura 19**, se observa las variaciones temporales de la temperatura máxima, mínima y promedio, en donde se evidencia incrementos de 0,072 °C/año; 0,039 °C/año y 0,056 °C/año, respectivamente. Se puede aclarar que la mayor tendencia se refleja en la temperatura máxima.

Figura 18

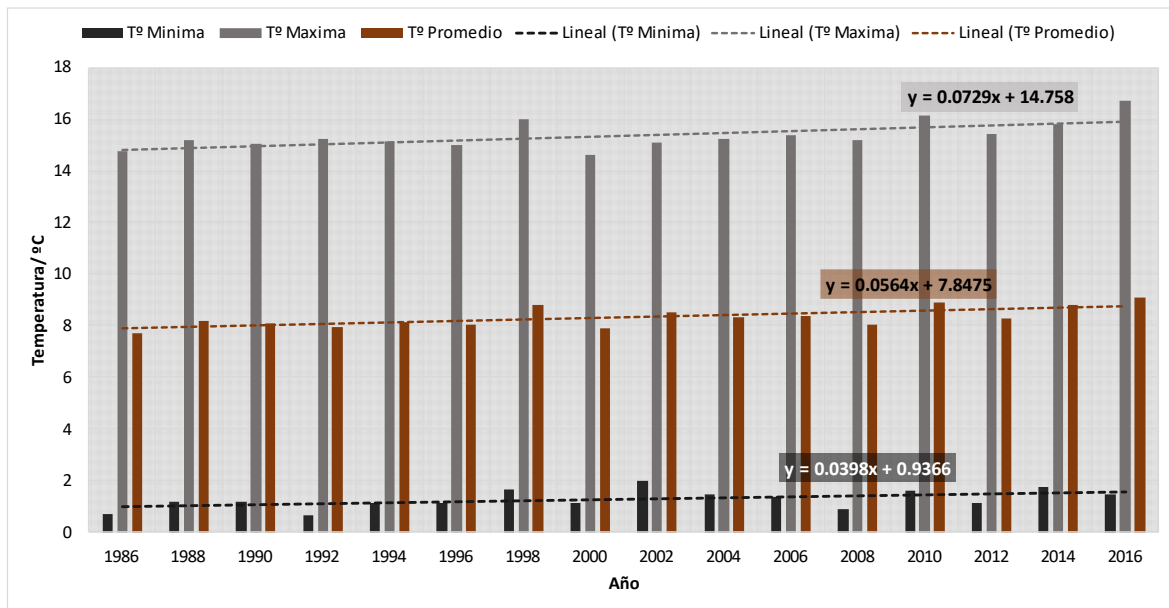
Variación temporal de la precipitación.



Nota. Gráfico lineal de precipitación vs tiempo.

Figura 19

Variación temporal de la temperatura máxima, mínima y promedio.



Nota. Gráfico lineal de temperatura vs tiempo.

3.4. Análisis estadísticos de la Cobertura Glaciar (hielo y nieve), precipitación y temperatura

3.4.1. Análisis estadístico descriptivo

En este apartado se proyecta los estadísticos descriptivos de las variables en estudio. En la tabla 3, se revela que la media de la cobertura de nieve es superior a la cobertura de hielo. Por otro lado, la media de las precipitaciones alcanza un valor de 788,65 mm/km², la media de la temperatura media alcanzo 1,27°C, la temperatura máxima alcanzo una media de 15,37°C.

En cuanto a los valores de máximo y mínimo, se puede evidenciar que la cobertura de hielo llega a un mínimo de 0 km². Por otro lado, se observa que el rango de la cobertura de nieve es superior a la cobertura de hielo, esto explica que la cobertura de nieve tuvo mayor cambio en el tiempo. Asimismo, se ve expresado en la comparación de temperatura mínima

y máxima, donde la temperatura máxima tiene mayor rango el cual expresa mayor cambio en el tiempo.

Tabla 3

Resultados del análisis descriptivo de las variables.

	NIEVE Km ²	HIELO Km ²	NIEVE+HIELO Km ²	PRECIPITACION mm/Km ²	T. MINIMA °C/Km ²	T. MAXIMA °C/Km ²	T. PROMEDIO °C/Km ²
Media	19,9	1,09	21,02	788,65	1,27	15,37	8,32
Mediana	19,7	0,17	19,84	790,63	1,17	15,22	8,24
Moda	14,13	0,01	14,15	489,21	1,15	14,62	7,73
Desv. Desviación	4,38	2,05	5,45	119,14	0,36	0,54	0,39
Rango	13,13	7,76	20,88	525,28	1,33	2,08	1,35
Mínimo	14,13	0,00	14,15	489,21	0,65	14,62	7,73
Máximo	27,26	7,76	35,03	1014,49	1,98	16,70	9,08

Nota. Tabla con datos de promedio, desviación estándar, máximos y mínimos.

3.4.2. Análisis inferencial de correlación

Para determinar el análisis de correlación, previamente se tiene que dar a conocer que prueba paramétrica usar, sea una correlación de Pearson y/o Spearman, para ello se aplica la prueba de normalidad, en esta ocasión Shapiro Wilks para muestra temporales inferiores a 50 unidades

a. Prueba de normalidad de Shapiro-Wilks

En la tabla 2, se visualiza los resultados de la prueba de normalidad, en ella se evidencia que las variables cobertura de nieve, nieve+hielo, precipitación, temperatura máxima, temperatura mínima y temperatura promedio, presentan una distribución normal, así lo explica la sig. bilateral con valores superiores a 0,05. Por otro lado, la única variable que no cumple la distribución normal es la cobertura de hielo, pues presenta una sig. bilateral inferior a 0,05.

Tabla 4

Resultados de la prueba de normalidad.

Pruebas de normalidad Shapiro-Wilk			
	gl	Sig.	Distribución
Nieve	16	0,172	Normal
Hielo	16	0,000	No Normal
Nieve + Hielo	16	0,260	Normal
Precipitación	16	0,392	Normal
Temperatura Mínima	16	0,791	Normal
Temperatura Máxima	16	0,087	Normal
Temperatura Promedio	16	0,456	Normal

Nota. Tabla con evidencia de la significancia e interpretación de la distribución.

b. Prueba de correlación

El análisis de correlación expresa el grado de asociación lineal entre dos variables numéricas. Es así que en la tabla 5, se visualiza los resultados de correlación de la prueba correlacional.

- Se encontró una asociación lineal estadísticamente significativa, moderada e inversamente proporcional ($R = -0,706$; $p < 0,01$), entre la cobertura de nieve y la temperatura máxima, a un nivel de confianza del 99%. Esto indica a medida que incrementa la temperatura máxima se presenciara una disminución de la cobertura de nieve y viceversa.
- Se encontró una asociación lineal estadísticamente significativa, moderada e inversamente proporcional ($R = -0,602$; $p < 0,05$), entre la cobertura de nieve y la temperatura promedio, a un nivel de confianza del 95%. Esto indica a medida que incrementa la temperatura promedio se presenciara una disminución de la cobertura de nieve, y viceversa.
- Se encontró una asociación lineal estadísticamente significativa, media e inversamente proporcional ($R = -0,534$; $p < 0,05$), entre la cobertura de hielo y la

temperatura máxima, a un nivel de confianza del 95%. Esto indica a medida que incrementa la temperatura máxima se presenciara una disminucion de la cobertura de hielo, y viceversa.

- Se encontró una asociación lineal estadísticamente significativa, moderada e inversamente proporcional ($R = -0,68$; $p < 0,01$), entre la cobertura de nieve/hielo y la temperatura máxima, a un nivel de confianza del 99%. Esto indica a medida que incrementa la temperatura máxima se presenciara una disminucion de la cobertura de nieve/hielo, y viceversa.
- Se encontró una asociación lineal estadísticamente significativa, media e inversamente proporcional ($R = -0,525$; $p < 0,05$), entre la cobertura de nieve/hielo y la temperatura promedio, a un nivel de confianza del 95%. Esto indica a medida que incrementa la temperatura promedio se presenciara una disminucion de la cobertura de nieve/hielo, y viceversa.
- Se puede ver claramente que no hay relación significativa entre la cobertura de nieve, hielo, nieve/hielo y la precipitación. Pues los valores de p-values son superiores a 0,05.

En resumen, aquellas relaciones con significancia alta con p-value menor a 0,01, es más significativo a las significancias inferiores a 0,05. Pues el nivel de confianza difiere en 4% (99% a 95%).

Tabla 5

Prueba de correlación de Pearson.

		Precipitación	Temperatura Mínima	Temperatura Máxima	Temperatura Promedio
Nieve	Coeficiente R de Pearson	-0,004	-0,255	-0,706**	-0,602*
	p-value	0,987	0,340	0,002	0,014
	N	19	16	16	16
Hielo	Coeficiente Rho de Spearman	0,084	-0,210	-0,534*	-0,410
	p-value	0,733	0,435	0,033	0,115
	N	19	16	16	16
Nieve + Hielo	Coeficiente R de Pearson	0,097	-0,129	-0,680**	-0,525*
	p-value	0,692	0,634	0,004	0,037
	N	19	16	16	16

Nota. **, La correlación es significativa en el nivel 0,01 (bilateral). *, La correlación es significativa en el nivel 0,05 (bilateral).

3.4.3. Análisis inferencial de regresión lineal para proyección futura de la cobertura glaciar

El análisis de regresión se aplicó para la cobertura de nieve, cobertura de hielo, y cobertura de nieve + hielo, en conjunto. Este proceso se determinó el programa SPSS v.26.

a) Proyección para la cobertura de nieve

Para la estimación futura en la regresión lineal, se tiene como información de entrada la cobertura de nieve temporal. Es así que los resultados de regresión indican un coeficiente de determinación R^2 de 0,648 (**ver tabla 6**), con una significancia de cambio de 0,00 que resulta ser menor a 0,05; indicando que la regresión obtenida es significativa para la estimación. Asimismo, el resultado de varianza de Anova indica que el modelo de regresión lineal es aceptable (sig. de $0,00 < 0,05$) para la estimación futura de cobertura de nieve (**ver tabla 7**). Los coeficientes para la ecuación del modelo lineal son: valor 656,97 para la “constante” y

valor de -0,32 para la variable de cambio "tiempo" (**ver tabla 8**), por tanto, la ecuación resulta ser:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 656,97 - 0,32 * X_{\text{Tiempo-año}}$$

Tabla 6

Análisis del modelo de regresión lineal.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio		
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	Sig. Cambio en F
1	0,817	0,667	0,648	0,93	0,667	34,07	0,00

Tabla 7

Análisis de Varianza del modelo de regresión lineal.

ANOVA						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	230,40	1,00	230,40	34,08	0,00
	Residuo	114,94	17,00	6,76		
	Total	345,34	18,00			

Tabla 8

Coefficientes del modelo de regresión lineal.

Coefficientes						
Modelo		Coefficientes no estandarizados B	Desv. Error	Coefficientes estandarizados Beta	t	Sig.
1	(Constante)	656,97	109,13		6,02	0,00
	Tiempo	-0,32	0,05	-0,82	-5,84	0,00

Nota. Las tablas determinadas de regresión lineal, varianza y coeficiente de modelo; permiten aclarar si la ecuación es aceptable para determinar la proyección futura.

Por tanto, se estimó la cobertura de nieve para el año 2030, 2035 y 2040:

- Cobertura de nieve para el año 2030:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 656,97 - 0,32 \times 2030$$

$$Y_{C. Nieve, 2030} = 11,65 \text{ km}^2$$

- Cobertura de nieve para el año 2035:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 656,97 - 0,32 \times 2035$$

$$Y_{C. Nieve, 2035} = 10,07 \text{ km}^2$$

- Cobertura de nieve para el año 2040:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve}} = 656,97 - 0,32 \times 2040$$

$$Y_{C. Nieve, 2040} = 8,48 \text{ km}^2$$

b) Proyección para la cobertura de hielo

Para la estimación futura en la regresión lineal, se tiene como información de entrada la cobertura de hielo temporal. Es así que los resultados de regresión indican un coeficiente de determinación R^2 de -0,036, un valor muy bajo y no significativo (**ver tabla 9**), pues así lo demuestra la significancia de cambio con un valor por encima de 0,05; indicando que la regresión obtenida no es significativa para la estimación futura. Del mismo modo, lo demuestra el resultado de varianza de Anova indicando que el modelo de regresión es inaceptable (sig. de 0,553 > 0,05) para la estimación futura de cobertura de hielo (**ver tabla 10**). De la misma manera, los coeficientes para la ecuación del modelo lineal no son aceptables, porque la sig. de los coeficientes fueron superiores a 0,05 (**ver tabla 11**); por tanto, **no aplica la estimación para la cobertura de hielo**.

Tabla 9

Análisis del modelo de regresión lineal.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio		
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	Sig. Cambio en F
1	0,145	0,021	-0,036	2,09	0,021	0,367	0,553

Tabla 10

Análisis de Varianza del modelo de regresión lineal.

ANOVA						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	1,609	1	1,609	0,367	0,553
	Residuo	74,534	17	4,384		
	Total	76,143	18			

Tabla 11

Coefficientes del modelo de regresión lineal.

Coefficientes						
Modelo		Coefficientes no estandarizados B	Desv. Error	Coefficientes estandarizados Beta	t	Sig.
1	(Constante)	54,33	87,88		0,62	0,54
	Tiempo	-0,03	0,04	-0,15	-0,61	0,55

Nota. Las tablas determinadas de regresión lineal, varianza y coeficiente de modelo; permiten aclarar si la ecuación es aceptable para determinar la proyección futura.

C. Proyección para la cobertura de nieve y hielo en conjunto

Para la estimación futura en la regresión lineal, se tiene como información de entrada la cobertura de nieve + hielo temporal. Es así que los resultados de regresión indican un coeficiente de determinación R^2 de 0,476 (ver **tabla 12**), con una significancia de cambio de 0,001 que resulta ser menor a 0,05, indicando que la regresión obtenida es significativa para la estimación. Asimismo, el resultado de varianza de Anova indica que el modelo de

regresión lineal es aceptable (sig. de $0,0 < 0,05$) para la estimación futura de cobertura de nieve+hielo (**ver tabla 13**). Los coeficientes para la ecuación del modelo lineal son: valor 711,12 para la "constante" y valor de -0,34 para la variable de cambio "tiempo" (**ver tabla 14**), por tanto, la ecuación resulta ser:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve+hielo}} = 711,12 - 0,34 * X_{\text{Tiempo-año}}$$

Tabla 12

Análisis del modelo de regresión lineal.

Modelo	R	R cuadrado	R cuadrado ajustado	Error estándar de la estimación	Estadísticos de cambio		
					Cambio en R cuadrado	Cambio en F	Sig. Cambio en F
1	0,711	0,505	0,476	3,94	0,505	17,33	0,001

Tabla 13

Análisis de Varianza del modelo de regresión lineal.

ANOVA						
Modelo		Suma de cuadrados	gl	Media cuadrática	F	Sig.
1	Regresión	270,4	1,0	270,4	17,3	0,0
	Residuo	265,2	17,0	15,6		
	Total	535,5	18,0			

Tabla 14

Coefficientes del modelo de regresión lineal.

Coefficientes					
Modelo	Coefficientes no estandarizados B	Desv. Error	Coefficientes estandarizados Beta	t	Sig.
1	(Constante)	711,12	165,75	4,29	0,00
	Tiempo	-0,34	0,08	-0,71	-4,16

Nota. Las tablas determinadas de regresión lineal, varianza y coeficiente de modelo; permiten aclarar si la ecuación es aceptable para determinar la proyección futura.

Por tanto, se estimó la cobertura de nieve/hielo para el año 2030, 2035 y 2040:

- Cobertura de nieve/hielo para el año 2030:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve+hielo}} = 711,12 - 0,34 x 2030$$
$$Y_{C. \text{ Nieve+hielo}, 2030} = 12,07 \text{ km}^2$$

- Cobertura de nieve/hielo para el año 2035:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve+hielo}} = 711,12 - 0,34 x 2035$$
$$Y_{C. \text{ Nieve+hielo}, 2035} = 10,35 \text{ km}^2$$

- Cobertura de nieve/hielo para el año 2040:

$$Y_{\text{Cobertura de nieve+hielo}} = 711,12 - 0,34 x 2040$$
$$Y_{C. \text{ Nieve+hielo}, 2040} = 8,62 \text{ km}^2$$

CAPÍTULO IV: DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

4.1. Discusiones

Respecto a la **variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022**, se pudo demostrar que la cobertura de nieve se redujo a 0,63 km²/año, la cobertura de hielo a 0,05 km²/año y la cobertura general nieve/hielo se redujo a 0,69 km²/año, como se evidencia la cobertura de nieve es la superficie con mayor proceso de derretimiento. Se pudo evidenciar que los cambios temporales del presente estudio fueron mayores a los evidenciados por Aedo & Quispe (2021), el cual alcanzó ritmo de descenso de 0,17 km²/año, para el estudio de Karen (2020) y Cardenas (2017), se evidenció de igual modo un ritmo de descenso menor de 0,45 km²/año y 0,47 km²/año, respectivamente. Pues al respecto Monterroso-Tobar et al. (2018) mencionan que el descenso de los nevados es notable en todos los territorios, debido al impacto del cambio climático, el cual se encuentra en constante incremento de la temperatura planetaria. Del mismo modo, Campos et al. (2020) mencionan que la línea de equilibrio que separa las zonas de acumulación y de ablación, cada vez incrementa en la altitud, y su medición o proyección es variable en el tiempo. Por otro lado, el rápido descenso de la cobertura de nieve en comparación a la cobertura de hielo, se debe a su estado de formación, pues la cobertura de nieve es más sensible y vulnerables a ser fusionado, debido a que requiere menor calor latente para pasar a estado líquido en comparación a un estado cristalino del hielo (Lozano-Povis et al., 2021).

Se evidencian incremento significativo de la cobertura de nieve y hielo en el año 2002; de igual modo en el año 2018 se presencié un incremento significativo de la cobertura de nieve. Esto se debió a que se presencié bajas temperaturas desde el año 2000 y año 2002. Por otro lado, la respuesta del incremento de cobertura de nieve en el año 2018, se debió a

la presencia del fenómeno del Niño de clase moderada en el año 2016-2017 (Intituto Geofisico del Peru [IGP], 2019). A pesar de los incrementos que hubo en determinados años, estos no han llegado al área inicial, por lo que se observa una pérdida progresiva del glaciar con el tiempo.

Respecto a la **estimación de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana para los años 2030, 2035 y 2040**, se pudo demostrar que la cobertura de nieve alcanzará una superficie de 11,65 km^2 para el año 2030; 10,07 km^2 para el 2035 y 8,48 km^2 para el año 2040. En cuanto a la cobertura de hielo, no se pudo obtener proyecciones futuras, puesto que, la regresión lineal no resultó aceptable. El estudio realizado por Molero & Alejandro (2020), indican que para el año 2040 la cobertura glaciar del nevado Salkantay se desaparecerá, así lo demostró mediante proyecciones de datos temporales (1990-2020). Cabe precisar que la regresión aplicada en el estudio fue aceptable, pero no es perfecta para su estimación futura, por lo que hay un margen de error en la estimación.

Respecto a la **variabilidad temporal del elemento climático precipitación del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2022**, se pudo demostrar que la variabilidad de la precipitación mostró un incremento de 5,05 mm/km^2 . Misma situación se evidenció en el nevado Pastoruri, el cual mostrarón un incremento ligero durante el periodo 1997-2016 (Palma, 2017). Estas variabilidades de las precipitaciones se deben a los efectos del cambio climático (Diaz, 2012), sin embargo, la situación de incremento no es homogéneo y único para todo territorio, pues el impacto climático es variable según características orográficas, por tanto, otros territorios presentan descensos de precipitaciones, con futura formación de sequías (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2014). Asimismo, se puede dar efecto de causa primordial al cambio climático en la variabilidad de las precipitaciones de este estudio, puesto que, el periodo de análisis abarca una temporalidad mayor a 30 años, y

las características o cambios referidos a las magnitudes de las precipitaciones y otros elementos climáticos, se ven causadas por el cambio climático (Manrique et al., 2015; Choque, 2014).

Respecto a la **variabilidad temporal del elemento climático temperatura del nevado Huaytapallana durante el periodo 1986-2016**, se pudo demostrar que la variabilidad de la temperatura máxima ($0,072\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$) fue mayor a la temperatura mínima ($0,039\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$). Mismo resultado se evidenció en el nevado Salluyo que se ubica en la frontera de Perú-Ecuador; sin embargo, las tendencias de incremento de temperatura máxima y mínima fueron inferiores al presente estudio, pues mostraron valores de $0,0065\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$ y $0,0028\text{ }^{\circ}\text{C}/\text{km}^2$, respectivamente. Pero también se evidencia que el mayor incremento se refleja en la temperatura máxima. Pues según el quinto informe del grupo intergubernamental de expertos sobre cambio climático IPCC, indican que, en los últimos 30 años, la superficie de la tierra es más cálida en comparación a decenios precedentes al año 1850 (IPCC, 2014; Ramos, 2018). Por consiguiente, se coincide que el comportamiento de las variables climáticas obedece al calentamiento global de la tierra, esto aclara que el cambio climático viene incidiendo significativamente en las últimas décadas (Rojas, 2018)

Respecto a la **correlación de la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y el elemento climático precipitación durante el periodo 1986- 2022**, se pudo demostrar estadísticamente que no hay relación significativa entre la precipitación y las coberturas glaciares (nieve, hielo). Este mismo resultado fue homogéneo al estudio de Karen (2020), el cual no obtuvo una relación significativa entre la precipitación y la cobertura glaciar del nevado Salluyo. Esto se debe a que las precipitaciones en zonas de montañas son casi nulas o poco significativas, y su incremento de forma líquida en montañas provocaría un intercambio de energía entre la nieve solida (Pilato et al., 2021).

Asimismo, Olivo-Garrido et al. (2012) mencionan que los glaciares de montaña presentan pocas zonas de acumulación, por tanto, gran parte de las precipitaciones entrantes se pierden por escorrentía, o son alojadas en las zonas de ablación, zonas que son más vulnerables a ser fusionadas y evaporadas (Arroyo et al., 2012).

Respecto a la **correlación de la variabilidad espacio-temporal de la cobertura glaciar del nevado Huaytapallana y el elemento climático temperatura durante el periodo 1986- 2016**, se pudo demostrar que la temperatura máxima se relaciona de forma significativa en la cobertura de nieve, hielo y nieve/hielo, con una asociación de -0,70, -0,53 y -0,68, respectivamente. Y la temperatura mínima no tuvo una relación significativa con los cambios temporales de la cobertura glaciar. Del mismo modo, los estudios de Karen (2020) y Diaz-Aguilar (2017), evidenciaron que la temperatura mínima es significativa en los cambios de la cobertura glaciar. Efectivamente, la temperatura máxima es la variable más relacionada, puesto que es la temperatura reflejada en el periodo diurno, y tiene impacto directo en las zonas de ablación de un glaciar, e impidiendo la cristalización de las nieves (Rosa, 2017). Asimismo, la temperatura máxima también tiene efecto en la cobertura de hielo, puesto que su incidencia provoca una en primera instancia la pérdida de calor sensible para generar nieve y seguido el estado líquido por pérdida de calor latente (Mojica et al., 2021). Los procesos involucrados por el impacto de la temperatura en la cobertura glaciar, son la fusión y la evaporación, este último cuando la incidencia de temperatura es alta (Petsch et al., 2020)

Las **limitaciones** marcadas en el proceso de desarrollo de la investigación, fueron de forma técnica el uso de imágenes satelitales, pues la resolución espacial de 30m una resolución media alta. Por otro lado, no se consideró la visita de campo para corroboración de resultados espaciales.

4.2. Conclusiones

- Se concluye que la cobertura de nieve descendió a una razón de $0,63 \text{ km}^2/\text{año}$, la cobertura de hielo a $0,05 \text{ km}^2/\text{año}$ y la cobertura de nieve/hielo en conjunto descendió a $0,69 \text{ km}^2/\text{año}$, durante el periodo 1986-2022, donde la cobertura de nieve fue el descenso más alto. Asimismo, la superficie de hielo presento menor dimensión promedio en comparación a la cobertura de nieve. En cuanto a los cambios espaciales se evidencio pérdidas perimétricas significativas.
- En la estimación de la cobertura glaciaria, se evidencio que fue aceptable la proyección futura de nieve, mas no la estimación de cobertura de hielo. En cuando a la proyección de cobertura de nieve se evidencio magnitudes de $11,65 \text{ km}^2$ de nieve para el año 2030; $10,07 \text{ km}^2$ para el año 2035 y $8,48 \text{ km}^2$ para el año 2040.
- La variabilidad temporal del elemento climático precipitación del nevado Huaytapallana incremento a una razón promedio de $5,05 \text{ mm}/\text{km}^2$ durante el periodo 1986-2022. Estos cambios están asociados al cambio climático.
- La variabilidad temporal de los elementos climáticos temperatura máxima, mínima y promedio del nevado Huaytapallana incrementaron a una razón promedio de $0,072 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}^2$; $0,039 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}^2$ y $0,056 \text{ }^\circ\text{C}/\text{km}^2$ durante el periodo 1986-2022. Estos cambios están asociados al cambio climático.
- La correlación de la cobertura glaciaria del nevado Huaytapallana y el elemento climático precipitación, resulto no significativo con un p-value superior a 0,05. Por tanto, no hay una asociación estadísticamente significativa.
- La correlación del elemento climático temperatura máxima resulto significativo (p-value < 0,05) sobre los cambios de la cobertura de nieve, hielo y nieve/hielo, con coeficientes de correlación (R) superiores a 0,5. Sin embargo, la temperatura mínima no mostro asociación significativa sobre la cobertura glaciaria.

Referencias Bibliográficas

- Abraham, B. N., Cullen, N. J., & Conway, J. P. (2021). A decade of surface meteorology and radiation fluxes at Brewster Glacier in the Southern Alps of New Zealand. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1612–1631. <https://doi.org/10.1002/joc.7323>
- USGS. (2013). Landsat Collection 2 Level-2 Science Products -U.S. *Geological Survey*. Usgs.gov. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2-level-2-science-products>
- Adam, E., Vít, V., Klimeš, J. & Cochachin, A., (2014). Glacier Retreat, Lakes Development and Associated Natural Hazards in Cordillera Blanca, Peru. *Springer International Publishing Switzerland* .pp. 231-252.
- Aedo, & Quispe Curasco, Wilson. (2021). Estimación del retroceso y predicción del tiempo de permanencia del Nevado Chicón mediante el análisis multitemporal entre los años 1985-2021, Cusco. Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/91586>
- Aparicio, J. (2003). Fundamentos de Hidrología de superficie, *editorial Limusa*. México.239-241.
- Arevalo, Aderly. (2015). Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GLOFs. *Especialidad De Geografía Y Medio Ambiente*. Universidad la Catolica.
- Arora, M., Shukla, A., & Gupta, R. P. (2011). Digital Image Information Extraction Techniques for Snow Cover Mapping from Remote Sensing Data. *ResearchGate*;

unknown.

<https://www.researchgate.net/publication/278698141> Digital Image Information Extraction Techniques for Snow Cover Mapping from Remote Sensing Data

Arroyo, J., Schulz, N., & Gurmendi, P. (2012). Impactos de las actividades antrópicas en el nevado Huaytapallana. *Apuntes de Ciencia & Sociedad*, 02(01), 3–14.
<https://doi.org/10.18259/acs.2012002>

Arroyo, Jacinto y GURMENDI, Pedro.(2011). Cambios en el régimen hídrico de la laguna Lasuntay y Chuspicocha por variaciones en el Nevado Huaytapallana. *Revista IGP*, (2):141-150.ISSN: 2225-5141

Autoridad Nacional Del Agua. (2014). Inventario de Glaciares en el Perú.2014. Huaraz: s.n.
http://ponce.sdsu.edu/INVENTARIO_GLACIARES_ANA.pdf.

Aybar, C., Fernández, C., Huerta, A., Lavado, W., Vega, F., & Felipe-Obando, O. (2019). Construction of a high-resolution gridded rainfall dataset for Peru from 1981 to the presentday. *Hydrological Sciences Journal*, 1–16.
<https://doi.org/10.1080/02626667.2019.1649411>

Aybar, C., Lavado, W., Huerta, A., Fernández, C., Vega, F., Sabino, E., & Felipe, O. (2017). Uso delProducto Grillado “PISCO” de precipitación en Estudios, Investigaciones y Sistemas Operacionales de Monitoreo y Pronóstico Hidrometeorológico. Nota Técnica 001 SENAMHIDHI-2017, 1–22.
<https://www.senamhi.gob.pe/load/file/01402SENA-8.pdf>

Baraer, M., McKenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., Gomez, J., Knox, S., &Fortner, S. K. (2014). Contribution of groundwater to the outflow from

ungauged glacierized catchments: a multi-site study in the tropical Cordillera Blanca,
Peru. *Hydrological Processes*, 29(11), 2561–2581.
<https://doi.org/10.1002/hyp.10386>

Bernex, Nicole y Tejada Manuel. (2010). Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos. *Proyecto de Investigación*. Pontificia Universidad Católica del Perú

Bulege, Wilfredo. (2020). Cambio climático y retroceso glaciar en la Cordillera Huaytapallana, Perú / Climate change and glacier retreat in the Huaytapallana Mountain Range, Peru. DOI: <https://doi.org/10.24850/j-tyca-2020-02-06>

Campos, N. (2020). Revisión de procedimientos metodológicos para la reconstrucción glaciar y el cálculo de la altitud de la línea de equilibrio. *Revista de Geografía Norte Grande*, 76, 321–350. <https://doi.org/10.4067/s0718-34022020000200321>

Cardenas, D. (2017). Dinámica de la cobertura glaciar del nevado Huascarán y de las lagunas glaciares adyacentes entre 1990 y el 2017 mediante la teledetección. Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/35309>

Castillo, Eloy. (2017). Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri. Tesis (Titulación en Ingeniería Ambiental). Lima. Universidad Cesar Vallejo. Disponible en: <http://repositorio.ucv.edu.pe/handle/UCV/3507>

Ccallata Taype, Isabel Karen. (2021). Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba y la influencia de los elementos climáticos, en el período 1985-2020. Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/60169>

Chang y K. Bai. (2018). *Multisensor Data Fusion and Machine Learning for Environmental Remote Sensing*. Taylor & Francis.
https://www.researchgate.net/publication/325347741_Multisensor_data_fusion_and_machine_learning_for_environmental_remote_sensing

Choque, C. (2014). Efectos del cambio climático en la producción y rendimiento de la quinua en el distrito de Juli, periodo 1997 - 2014. *Comunicación*, 7(2), 38–47.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S2219-71682016000200004

Chuvieco, E. (1990). *Fundamentos de Teledetección Espacial*. Madrid: RIALP S.A.

Chuvieco, E. (2010). *Teledetección Ambiental*. Barcelona: Planeta S.A.

Chuvieco, E. (1995). Cartografía y evaluación superficial de grandes incendios a partir de imágenes de satélite. *Boletín de la Asociación de Geógrafos Españoles*, ISSN 0212-9426, ISSN-e 2605-3322, . 21-22

DAMONTE, Gerardo, CABRERA, Andrea y MIRANDA, Fabio. (2017). Problemas vinculados al cambio y variabilidad climáticos y modelos ejemplares de adaptación por regiones en el Perú.
<http://repositorio.grade.org.pe/handle/GRADE/372>

De Araújo, G. R. G., Frassoni, A., Sapucci, L. F., Bitencourt, D., & de Brito Neto, F. A. (2022). Climatology of heatwaves in South America identified through ERA5 reanalysis data. *International Journal of Climatology*.
<https://doi.org/10.1002/joc.7831>

- Díaz Aguilar y otros. (2017). Analisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobrecambios de la cobertura glaciara en los nevados Allin Capac y Chichi Capac,Peru. *Scielo*. págs. 1-7.
- Díaz Aguilar, R. D., Sanchez Larico, S. V., Lujano Laura, E., & Lujano Laura, A. (2017). Análisis multi-temporal entre 1975 y 2015 sobre cambios de la cobertura glaciara en los nevados Allin Capac y Chichi Capac, Perú. *Revista De Investigaciones Altoandinas*, 19(3), 264–274. <https://doi.org/10.18271/ria.2017.291>
- DIAZ AGUILAR, R., LARICO, SÁNCHEZ, V., LAURA, E.L. y LAURA, A.L., (2017). Multitemporal analysis between 1975 and 2015 on changes in glacier coverage in thesnowy. *Journal of Hygh Andean Research*, vol. 19, pp. 265-274.
- Díaz Aguilar, R., Larico, Sánchez, V., Laura, E.L. Y Laura, A.L., (2017). Multitemporal analysis between 1975 and 2015 on changes in glacier coverage in thesnowy. *Journal of Hygh Andean Research*, vol. 19, pp. 265-274.
- Díaz Cordero, G., (2012). El Cambio Climático. *Ciencia y Sociedad*. ISSN: 0378-7680. <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=87024179004>
- Díaz, A., Villegas, E., Lavado, W., Felipe, O., & Fernández, C. (2015). Generación de base de datos de precipitación mensual grillada de alta resolución a nivel nacional 1981-2013.
- Dioses Cardenas, Alexander. (2017). “Dinámica de la cobertura glaciara del nevado Huascarán y de las lagunas glaciara adyacentes entre 1990 y el 2017 mediante la teledetección”. http://repositorio.ucv.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12692/35309/Dioses_CA.pdf?sequence=1.

- Drenkhan, F. y otros, 2015. The Changing Water Cycle: Climatic and Socioeconomic Drivers of Water-related Changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2(6), pp. 715-733.
- Flückiger, B., Kloog, I., Ragetti, M. S., Eeftens, M., Rössli, M., & de Hoogh, K. (2022). Modelling daily air temperature at a fine spatial resolution dealing with challenging meteorological phenomena and topography in Switzerland. *International Journal of Climatology*, 42(12), 6413–6428. <https://doi.org/10.1002/joc.7597>
- Georges, C. (2004). 20th-Century Glacier Fluctuations in the Tropical Cordillera Blanca, Perú. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, 36(1), 100–107. [https://doi.org/doi.org/10.1657/1523-0430\(2004\)036\[0100:TGFITT\]2.0.CO;2](https://doi.org/doi.org/10.1657/1523-0430(2004)036[0100:TGFITT]2.0.CO;2)
- Gil Mora. (2012). Retroceso glaciar y cambio climático en los andes peruanos, principales impactos.
- Gupta, R.P.; Haritashya, U.K.; Singh, P. (2005). Mapping dry/wet snow cover in the Indian Himalayas using IRS multispectral imagery. *Remote Sens. Environ.* 97, 458–469
- Gurgiser, W., Juen, I., Singer, K., Neuburger, M., Schauwecker, S., Hofer, M., & Kaser, G. (2016). Comparing peasants' perceptions of precipitation change with precipitation records in the tropical Callejón de Huaylas, Peru. *Earth Syst. Dynam.* 7, 499–515. <https://doi.org/10.5194/esd-7-499-2016>
- Gustavo, & Huillca, C. (2016). Diagnóstico de lagunas glaciares con potencial GLOF a causa del retroceso glaciar en el nevado Chicón-Pumahuanca, cordillera Urubamba, Cusco, 2016 – 2021. Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/91597>

Hernandez, Roberto, Fernandez, Carlos Y Baptista, Pilar. (2016). Metodología de la investigación. 6a. ed. México: McGRAW-HILL

Huddart, D. & Stott, T. (2010). Earth Environments. Past, present and future. John Wiley & Sons. 912 pp.

INAIGEM. (2016). Manual metodológico de inventario nacional de glaciares. Ancash. <http://www.inaigem.gob.pe/biblioteca/publicaciones/compilado> ISSN: 2017-12673

INAIGEM. (2018). El inventario nacional de glaciares: las cordilleras glaciares del Perú. *INAIGEM*. <http://repositorio.ana.gob.pe/handle/20.500.12543/2623>

INAIGEM. (2019). Equipo científico del Inaigem realizará investigaciones sobre impactos del retroceso glaciario en la Antártida. <https://www.inaigem.gob.pe/tag/glaciares/>

Instituto Nacional De Investigación En Glaciares Y Ecosistemas Demontaña. (2018). Inventario nacional de glaciares. S.l.: s.n. ISBN9788578110796. www.inaigem.gob.pe.

Instituto Geofísico del Perú - IGP. (2019). El Niño/La Niña Costeros - IGP.gob.pe. http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html

IPCC. (2013). Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press

IPCC. (2013). Observations: Cryosphere. En: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, p. 1535.

- IPCC. (2013). Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment. United Kingdom y Nueva York: Cambridge University Press.
- Ives B. Mool K. (2010). Formation of Glacial Lakes in the Hindu Kush-Himalayas and GLOF Risk Assessment International Centre for Integrated Mountain Development, Kathmandu, p. 1-56.
- Jacinto Arroyo Aliaga, & Lourdes Artica Cosme. (2015). Retroceso glaciar del Nevado Huaytapallana como consecuencia del calentamiento global. *Naturaleza Y Sociedad*, 1(1). <https://journals.continental.edu.pe/index.php/natsoc/article/view/429>.
- Jain, S. (2014). Fundamentals of Physical Geology. In Fundamentals of Physical Geology. *Springer India*. <https://doi.org/10.1007/978-81-322-1539-4>
- Jonaitis, J. A., Perry, L. B., Soulé, P. T., Thaxton, C., Andrade-Flores, M. F., Vargas, T. I., & Ticona, L. (2021). Spatiotemporal patterns of ENSO-precipitation relationships in the tropical Andes of southern Peru and Bolivia. *International Journal of Climatology*, 41(8), 4061–4076. <https://doi.org/10.1002/joc.7058>
- Karen, I. (2020). Retroceso de la cobertura glaciar del nevado Salluyo de la cordillera Apolobamba y la influencia de los elementos climáticos, en el período 1985-2020. Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/60169>
- Kaser, G. Y Osmaston, H., (2002). Tropical glaciers. S.l.: UNESCO 2002. ISBN 0 52163333 8.
- Keshri, A., Shukla, A., and Gupta, R. P., (2009). ASTER ratio indices for supraglacial terrain mapping

- KNIGHT, P. (1999). *Glaciers*. Primera edición. Cheltenham: Stanley Thornes, 261 pp
- Kodirekkal K., (2017). Cultural adaptation to climate change among indigenous people of South India. *Cambio climático*.p. 1 – 14
- Kumar, P., Sardana, D., Weller, E., & Bhaskaran, P. K. (2022). Influence of Climate Variability on Sea Level Rise and its Teleconnection with SST Anomalies over the Indo-Pacific Ocean. *International Journal of Climatology*.
<https://doi.org/10.1002/joc.7893>
- Kundu, S. K., Singh, C., & Chauhan, P. (2021). Assessment of regional and global climate models for the investigation of monsoon rainfall variability over the North-West Himalayan region. *International Journal of Climatology*, 42(9), 4580–4600.
<https://doi.org/10.1002/joc.7491>
- Leiva, Jenny Lorena Leiva. (2018). Análisis Multitemporal Delretroceso Glaciar De Los Nevados De Colombia A Traves Dela Utilización De Herramientas Sig. Bogota Colombia : s.n., 2018,Scielo, pág. 11.
- Lopez, Pedro. (2004). Poblacion muestra y muestreo. obtenido de:
<file:///C:/Users/user/Downloads/Documents/v09n08a12.pdf>
- Lozano-Povis, A., Alvarez-Montalván, C. E., & Moggiano, N. (2021). Climate change in the Andes and its impact on agriculture: a systematic review. *Scientia Agropecuaria*, 12(1), 101–108. <https://doi.org/10.17268/sci.agropecu.2021.012>
- Mal S., Singh R, Schickhoff U. (2016). Estimating Recent Glacier Changes in CentralHimalaya, India, Using Remote Sensing Data. Climate change, response of glaciers and vegetation dynamics in theHimalayas. Springer, Cham. p.58

- Manrique, B., Gallardo Ballat, Yurisbel, Santana, C., & Barrios García, Sergio. (2015). El cambio climático y sus evidencias en las precipitaciones. *Ingeniería Hidráulica Y Ambiental*, 36(1), 88–101.
http://scielo.sld.cu/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1680-03382015000100007
- Meier, Wolfgang. (2018). *Frontiers en Ciencias de la tierra*, pág. 21.
- Ministerio del Ambiente-MINAM (2014). El Cambio Climático y sus efectos en el Perú.
http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca/10561_informe-tecnico-n0-06-monitoreo-glaciologico-en-el-glaciar-sullcon.pdf
- Ministerio del Ambiente-MINAM (2016). Monitoreo glaciológico en el glaciar Sullcon Huarochirí - Lima. El Cambio Climático y sus efectos en el Perú. SINIA | Sistema Nacional de Información Ambiental.
<https://sinia.minam.gob.pe/documentos/cambio-climatico-sus-efectos-peru>
- Mojica, D., Cárdenas, C., Mojica, J., Brondi, F., Barragán, D., Marangunic, C., Holland, D., Franco, A., & Casassa, G. (2021). Study of the Lange Glacier and its impact due to temperature increase in Admiralty Bay, King George Island, Antarctica. *Boletín de Investigaciones Marinas Y Costeras*, 50(1), 59–84.
<https://doi.org/10.25268/bimc.invemar.2021.50.suplep.949>
- Molero, F., & Alejandro. (2020). Evaluación de la regresión glaciar de los nevados Salkantay y Veronica mediante el análisis multi-temporal entre los años 1990-2020, Cusco. Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/60800>
- Monterroso-Tobar, Jhon Makario Londoño-Bonilla, & Sergey Samsonov. (2018). Estimación del retroceso glaciar en los volcanes Nevado del Ruiz, Tolima y Santa

- Isabel, Colombia a través de imágenes ópticas y Din-SAR. *DYNA*, 85(206), 329–337. <https://www.redalyc.org/journal/496/49659032039/html/>
- Moreno G. (1996). Introducción a la metodología de la investigación educativa. 2ª ed. Mexico, Guadalajara: Progreso S.A de C.V, p. p.128
- Muñoz Jiménez, J. (2000). Geomorfología general. In Editorial Síntesis (Ed.), Espacios y Sociedades.
- Olivo-Garrido, M. L, & Soto-Olivo, A. G. (2012). Impactos potenciales de los cambios climáticos. *Universidad, Ciencia Y Tecnología*, 16(62), 12–22. http://ve.scielo.org/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1316-48212012000100002
- Olvera, Leticia. (2019). Órgano informativo de la universidad nacional autónomade México. órgano informativo de la universidad nacional autónoma de México
- Otzen, Tamara. (201). Técnicas de Muestreo sobre una Población a Estudio. obtenido de: <https://scielo.conicyt.cl/pdf/ijmorphol/v35n1/art37.pdf>
- Páez, B. y García, A. (2016). “Análisis multitemporal del retroceso glaciar en la Sierra nevada de Santa Marta – Colombia- para los períodos 1986, 1996, 2007 Y 2014.” Bogotá D.C., Colombia, Universidad Distrital Francisco José De Caldas. p.8.
- Palma, C. (2017). “Factores ambientales de temperatura y precipitación que inciden en la dinámica de la montaña glaciar Pastoruri.” Ucv.edu.pe. <https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/3507>
- Petsch, C., Rosa, K. K. K. da, Vieira, R., Braun, M. H., Costa, R. M., & Simões, J. C. (2020). The Effects Of Climatic Change On Glacial, Proglacial And Paraglacial System At

Collins Glacier, King George Island, Antarctica. *Investigaciones Geográficas*, 103.

<https://doi.org/10.14350/rig.60153>

Pilato, G. L., Ortone Lois, A. S., Barrios, A., Saavedra, S., & Macote Yparraguirre, E. L. (2021). Tecnología espacial aplicada a glaciares patagónicos y su comportamiento como indicadores ambientales. *Revista Cartográfica*, 104, 133–163.

<https://doi.org/10.35424/rcarto.i104.1049>

PUCP- Pontificia Universidad Católica del Perú. (2022). Vista de En el Perú, se ha perdido hasta el 22% de los glaciares.

<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/strategia/article/view/17684/17948>

Puyravaud J., (2003). Standardizing the calculation of the annual rate of deforestation. *Forest Ecology and Management* 177, 593-596.

Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., & Sicart, J.-E. (2012). Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? *Journal of Glaciology*, 58(212), 1027–1036. <https://doi.org/10.3189/2012JoG12J027>

Rabatel, A., Bermejo, A., Loarte, E., Soruco, A., Gomez, J., Leonardini, G., Vincent, C., & Sicart, J.-E. (2012). Can the snowline be used as an indicator of the equilibrium line and mass balance for glaciers in the outer tropics? *Journal of Glaciology*, 58(212), 1027–1036. <https://doi.org/10.3189/2012JoG12J027>

Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., & Ginot, P.

- (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Rabatel, A., Francou, B., Soruco, A., Gomez, J., Cáceres, B., Ceballos, J. L., Basantes, R., Vuille, M., Sicart, J.-E., Huggel, C., Scheel, M., Lejeune, Y., Arnaud, Y., Collet, M., Condom, T., Consoli, G., Favier, V., Jomelli, V., Galarraga, R., ... Wagnon, P. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: A multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *Cryosphere*, 7(1), 81–102. <https://doi.org/10.5194/tc-7-81-2013>
- Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Williams, M. W., & Ordoñez, J. (2008). Decadal changes in glacier parameters in the Cordillera Blanca, Peru, derived from remote sensing. *Journal of Glaciology*, 54(186). <http://www.glims>
- Ramos Alonzo, R.B., (2018). Evolución de la cobertura glaciaria del nevado Coropuna y su relación con el entorno climático. S.l.: Universidad Agraria La Molina. <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/3321>.
- Ramos, Hugo & Rabatel, A. (2018). Projections of the future disappearance of the Quelccaya Ice Cap in the Central Andes. *SciEntIfIcREPOrTS* N° 8. <https://DOI:10.1038/s41598-018-33698-z>
- Richardson, S. & Reynolds, J., (2000). An overview of glacial hazard of the Himalayas. *Quaternary International*, Volumen 65/66, pp. 31-47.

- Rojas, M. (2018). Alteración del clima en la provincia de Huaraz como consecuencia del cambio climático, periodo 1986-2027, Ancash, 2018. Ucv.edu.pe.
<https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/30025>
- Rosa. (2017). "Impacto del cambio climático en el retroceso glaciar de la subcuena del Río Sahuanay, provincia de Abancay en el 2017." Ucv.edu.pe.
<https://doi.org/https://hdl.handle.net/20.500.12692/27194>
- Rozante, J. R., Ramirez, E., & Fernandes, A. de A. (2021). A newly developed South American Mapping of Temperature with estimated lapse rate corrections. *International Journal of Climatology*, 42(4), 2135–2152.
<https://doi.org/10.1002/joc.7356>
- Sagredo Lillo, E. J., & Pérez Lienqueo, M. de L. (2019). Gestión del tiempo, trabajo colaborativo docente e inclusión educativa. *Revista Colombiana de Educación*, 1(78). <https://doi.org/10.17227/rce.num78-9526>
- Sagredo, E. A., Rupper, S., & Lowell, T. V. (2014). Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes. *Quaternary Research*, 81(2), 355–366. <https://doi.org/10.1016/j.yqres.2014.01.008>
- Salinger, M. J., Fitzharris, B. B., & Chinn, T. (2021). Extending end-of-summer-snowlines for the Southern Alps glaciers of New Zealand back to 1949. *International Journal of Climatology*, 41(13), 6122–6132. <https://doi.org/10.1002/joc.7177>
- Schauwecker, S. y otros. (2014). Climate trends and glaciar retreat in the Cordillera Blanca, Perú, revisited. *Global and Planetary Change, Volumen 119*, pp. 85-97.

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C.,
Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M.
(2014). Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited.
Global and Planetary Change, 119, 85–97.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C.,
Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M.
(2014). Climatetrends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited.
Global and Planetary Change, 119, 85–97.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>

Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C.,
Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., & Vuille, M.
(2014). Climatetrends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited.
Global and Planetary Change, 119, 85–97.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>

Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes
of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and
area fluctuations. *The Cryosphere*, 13(10), 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>

Sergio Mauricio Molano, Diana Paola Cardenas, Howard Snaider Gómez, Dayana Mairely
Alvarado, Andrés Fernando Galindo, Jeisson Fabian Sanabria, & Juan Sebastian
Gómez-Neita. (2022). Evaluación del retroceso glaciar de la Sierra Nevada del

- Cocuy, Colombia a partir de la clasificación de imágenes multisensor. *Boletín de Geología*, 44(1), 49–73. <https://www.redalyc.org/journal/3496/349671141002/html/>
- Sharma, R.C.; Tateishi, R.; Hara, K. (2016). A new water-resistant snow index for the detection and mapping of snow cover on a global scale. *Int. J. Remote Sens.* 37, 2706–2723
- Silva, A. (2020). Spatial and temporal analysis of changes in the glaciers of the Antarctic Peninsula. 2020, *Global and Planetary Change*, Vol.184, pág. 103.
- Silva, T., Schlosser, E., & Lehner, M. (2022). A 25-year climatology of low-tropospheric temperature and humidity inversions for contrasting synoptic regimes at Neumayer Station, Antarctica. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7780>
- SILVERIO, W., JAQUET, J.(2017).Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca(Peru) by remote sensing between 1987 and 2016 in the context of ENSO,n.º 69, p. 145-162. Disponible en <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:98197>
- Sobrino, J., Raissouni, N., Oliosio, A., López, M., Kharraz, M., Cuenca, J., & Dempere, L. (2000). Teledetección. Valencia: Servicio de Publicación de la Universidad de Valencia
- Sobrino, Jose. (2000). Guía del presupuesto participativo. Pro descentralizacion. Teledeteccion. España
- Stahr, A., & Langenscheidt, E. (2015). Landforms of High Mountains. In Landforms of HighMountains. *Springer Berlin Heidelberg*. <https://doi.org/10.1007/978-3-642-53715-8>

- Tarazona Y. (2012). "Aplicación de la Teledetección como una herramienta para el análisis Multitemporal del retroceso glaciar en el Nevado Pastoruri debido al Cambio Climático". Universidad Nacional Mayor de San Marcos Lima – Perú. p.23.
- Tarbutck, E. Y F. Lutgens. (2009). Earth: An introduction to physical geology. Octava edición. Pearson:Prentice Hall, 655 pp.UGRH (Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos)
- Tarbutck, E., & Lutgens, F. (2005). Ciencias de la Tierra: Una introducción a la geología física (P.Education (ed.); 8th ed.).
- Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Davis, M. E., & Brecher, H. H. (2011). Tropical glaciers, recorders and indicators of climate change, are disappearing globally. *Annals of Glaciology*, 52(59), 23–34. <https://doi.org/10.3189/172756411799096231>
- UGRH. (2014). Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas. Huaraz: Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú.
- UNESCO. (2020). The Andean Glacier and Water Atlas –The Impact of Glacier Retreat on *Water Resources*. Arenda. <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265810>
- Vaughan, D., Comiso, J. C., Allison, I., & Zhang, T. (2013). Observations: Cryosphere. Climate Change 2013: The Physical Science Basis. *ResearchGate*. https://www.researchgate.net/publication/285661352_Observations_Cryosphere_Climate_Change_2013_The_Physical_Science_Basis
- Veettil, B. K., Bremer, U. F., de Souza, S. F., Maier, É. L. B., & Simões, J. C. (2015). Influence of ENSO and PDO on mountain glaciers in the outer tropics: case studies

in Bolivia. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3-4), 757–768.

<https://doi.org/10.1007/s00704-015-1545-4>

Vergara, Rodriguez, Karla. (2011). Variabilidad climática, percepción y estrategia de adaptación de la comunidad campesina de conucos, Ancash. Tesis (Bachiller). Lima: Pontificia Universidad Católica del Perú, Letras y Ciencias humanas. http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/bitstream/handle/123456789/1240/VERGARA_RODRIGUEZ_KARLA_VARIABILIDAD.pdf;jsessionid=998A8D47F5870DA66DC8564A856F9BFD?sequence=1

Viana Sorribas. (2016). Projections of climate change effects on discharge and inundation in the Amazon basin Chiapas. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul. <https://link.springer.com/article/10.1007/s10584-016-1640-2>

VIGNON, F., (2002). Glaciares y recursos hidricos en el valle alto deI rio Santa. , no.January 2002, pp. 63.

Vuille, M., Burns, S. J., Taylor, B. L., Cruz, F. W., Bird, B. W., Abbott, M. B., Kanner, L. C., Cheng, H., & Novello, V. F. (2012). A review of the South American monsoon history as recorded in stable isotopic proxies over the past two millennia. *Climate of the Past*, 8(4), 1309–1321. <https://doi.org/10.5194/cp-8-1309-2012>

Wang, H., Zhang, X., Xiao, P., Zhang, K., & Wu, S. (2021). Elevation-dependent response of snow phenology to climate change from a remote sensing perspective: A case survey in the central Tianshan mountains from 2000 to 2019. *International Journal of Climatology*, 42(3), 1706–1722. <https://doi.org/10.1002/joc.7330>

- Xiao, X., Shen, Z., and Qin, X., (2001). Assessing the potential of Vegetation sensor data for mapping snow and ice cover:a normalized difference snow and ice index. *International Journal of Remote Sensing*, 22(13), 2479–2487.
- Xiao, Y., Ke, C., Fan, Y., Shen, X., & Cai, Y. (2022). Estimating glacier mass balance in High Mountain Asia based on Moderate Resolution Imaging Spectroradiometer retrieved surface albedo from 2000 to 2020. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7873>
- Yang, P., Zhang, S., Xia, J., Zhang, Y., Wang, W., & Yao, T. (2022). Occurrence of drought events at the land–atmosphere interface in Central Asia assessed via advanced microwave scanning radiometer data. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7655>
- Yang, Y., You, Q., Jin, Z., Zuo, Z., & Zhang, Y. (2022). Construction of surface air temperature over the Tibetan Plateau based on generative adversarial networks. *International Journal of Climatology*. <https://doi.org/10.1002/joc.7886>
- Zemp, M., Frey, H., Gärtner-Roer, I., Nussbaumer, S. U., Hoelzle, M., Paul, F., Haeberli, W.,Denzinger, F., Ahlstrøm, A. P., Anderson, B., Bajracharya, S., Baroni, C., Braun, L. N.,Cáceres, B. E., Casassa, G., Cobos, G., Dávila, L. R., Delgado Granados, H., Demuth, M. N.,... Vincent, C. (2015). Historically unprecedented global glacier decline in the early 21stcentury. *Journal of Glaciology*, 61(228), 745–762. <https://doi.org/10.3189/2015JoG15J017>

ANEXOS

Anexo N° 1. Ficha de registro de cobertura glaciar.

UNIDAD DE ESTUDIO					
INVESTIGADOR					
UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO		DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	
COORDENADAS			ALTITUD		
PERIODO DE ANALISIS			1986 A 2022		
AÑO	SATELITE	FECHA DE IMAGEN ADQUIRIDA	COBERTUR A NIEVE	COBERTUR A HIELO	COBERTURA NIEVE Y HIELO
			Kilómetros cuadrados	Kilómetros cuadrados	Kilómetros cuadrados
1986					
1988					
1990					
1992					
1994					
1996					
1998					
2000					
2002					
2004					
2006					
2008					
2010					
2012					
2014					
2016					
2018					
2020					
2022					

Fuente (Ccallata, 2021)

Anexo N° 2. Registro de precipitación superficial y temperatura superficial.

UNIDAD DE ESTUDIO				
INVESTIGADOR				
UBICACIÓN DEL AREA DE ESTUDIO	DEPARTAMENTO	PROVINCIA	DISTRITO	
COORDENADAS	ALTITUD			
PERIODO DE ANALISIS	1986 A 2022			
AÑO	PRECIPITACION N milímetros por kilómetro cuadrado - (mm/km ²)	TEMPERATURA MAXIMA grados centígrados por kilómetro cuadrado - (°C/km ²)	TEMPERATURA MINIMA grados centígrados por kilómetro cuadrado - (°C/km ²)	TEMPERATURA PROMEDIO grados centígrados por kilómetro cuadrado - (°C/km ²)
1986				
1988				
1990				
1992				
1994				
1996				
1998				
2000				
2002				
2004				
2006				
2008				
2010				
2012				
2014				
2016				
2018				
2020				
2022				

Fuente (Ccallata, 2021)

Anexo N° 3. Matriz de operacionalización de variables.

VARIABLES	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
COBERTURA GLACIAR	Es toda superficie cubierta de nieve y hielo, esto se debe a la solidificación de nieves (Morales, 2016)	La cobertura glaciar es medida el índice NDSI y NDSII	Cobertura de Nieve Cobertura de Hielo	Superficie	Kilómetros cuadrados
PRECIPITACIÓN	Es toda agua que cae en la superficie de terrestre, tanto en forma líquida (llovizna y lluvia.) y sólida (nieve y granizo.) y las precipitaciones ocultas (rocío, la helada blanca, etc.) (Ordoñez, 2011).	Es el valor climático precipitación es determinado por superficie, su valor será medido en milímetros por km2.	Precipitación	Precipitación acumulada superficial	mm/km2
TEMPERATURA	Es una magnitud para describir el estado de la atmósfera y medir el grado de movimiento de las partículas atmosféricas, cuanto mayor es la agitación, mayor será la temperatura (Rodríguez et al., 2004).	Es el valor climático temperatura es determinado por superficie, su valor será medido en °C/ km2.	Temperatura	Temperatura promedio superficial	Celsius (°C)/km2