

UNIVERSIDAD NACIONAL DEL CALLAO

FACULTAD DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS
NATURALES



“TECNOLOGÍAS DE INFORMACIÓN GEOGRÁFICA PARA DETERMINAR LA DINÁMICA DE LOS GLACIARES DE ROCA COMO FORMAS DE PERMAFROST EN LOS ANDES TROPICALES DEL PERÚ”

TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO AMBIENTAL
Y DE RECURSOS NATURALES

Bach. Edwin Noé Badillo Rivera

Asesores:

Ing. Ena María Jaimes Espinoza (UNAC)

Mg. Edwin Anibal Loarte Cadenas (INAIGEM)

FIRMA DIGITAL
INAIGEM
NACIONAL INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES
Firmado digitalmente por LOARTE
CADENAS Edwin Anibal FAU
20600404262 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 14.12.2021 14:40:55 -05:00

Mg. Katy Medina Marcos (INAIGEM)

FIRMA DIGITAL
INAIGEM
NACIONAL INGENIERÍA AMBIENTAL Y RECURSOS NATURALES
Firmado digitalmente por MEDINA
MARCOS Katy Damacia FAU
20600404262 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 14.12.2021 09:52:21 -05:00

Callao, 2020

PERÚ

Dedicatoria:

A Benjamín, Noé y Omar,

cuyas palabras y apoyo

incondicional guiaron y

formaron la persona

que soy hoy.

Estaré siempre agradecido

a la vida por brindarme tres padres.

A Bety, por ser guía espiritual de mi vida.

GVLA-BJBL

Agradecimientos

A Benjamín, Noé, Omar, María, sin su apoyo incondicional y sus consejos la culminación de esta primera etapa en mi vida académica y profesional no hubiera sido posible. A mis profesores de la Facultad de Ingeniería Ambiental y Recursos Naturales de la Universidad Nacional del Callao por compartir sus conocimientos e impulsarnos a ser los mejores no solo en lo profesional sino también en lo humano. A Ena Jaimes Espinoza por su apoyo y disposición en todo momento de la realización de la tesis, y por orientarme al estudio de la gestión del riesgo de desastres en nuestro país. También, a cada una de las personas que de alguna u otra manera me apoyaron y dieron una mano amiga cuando más lo necesité.

Al Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) por promover y fomentar la investigación en el país, dando soporte científico, logístico y humano, a los nuevos y futuros científicos del país.

A mis co-asesores Katy Medina y Edwin Loarte del INAIGEM, por su disposición para absolver mis dudas, apoyo constante y además, por permitirme conocer y trabajar con investigadores nacionales e internacionales.

Esta investigación ha sido financiada por el Proyecto Concytec - Banco Mundial “Mejoramiento y Ampliación de los Servicios del Sistema Nacional de Ciencia Tecnología e Innovación Tecnológica” 8682-PE, a través de su unidad ejecutora ProCiencia. [Contrato N°23-2018-FONDECYT-BM-IADT-MU], subproyecto “Evaluación y estimación de la distribución espacio temporal de permafrost a nivel nacional como potencial de reserva hídrica - Permafrost”.



ÍNDICE

INTRODUCCIÓN	1
I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA	3
1.1 Descripción de la realidad problemática	3
1.2 Formulación del problema.....	4
1.2.1 Problema General	4
1.2.2 Problemas Específicos	5
1.3 Objetivos de la Investigación	5
1.3.1 Objetivo General	5
1.3.2 Objetivos Específicos	5
1.4 Justificación.....	5
1.4.1 Legal	5
1.4.2 Teórica e Investigación.....	6
1.4.3 Ambiental, Ecológica y económica.....	6
1.4.4 Justificación metodológica.....	7
1.5 Limitantes de la Investigación.....	7
1.5.1 Teórica	7
1.5.2 Temporal.....	7
1.5.3 Espacial.....	8
II. MARCO TEÓRICO	8
2.1 Antecedentes del estudio.....	8
2.2 Bases teóricas	12
2.2.1 Glaciar de roca.....	12
2.2.2 Dinámica de los glaciares de roca	19
2.2.3 Factores que influyen en la presencia de glaciares de roca de alta montaña ..	21
2.2.4 Tecnologías de Información Geográfica (TIG).....	22

2.3 Marco Conceptual.....	31
2.3.1 Cambio climático y el impacto en los glaciares de roca.....	31
2.3.2 El permafrost.....	31
2.3.3 Formas de permafrost	32
2.3.3 Tecnologías de Información Geográfica.....	34
2.4 Definición de Términos Básicos.....	35
2.4.1 Criósfera.....	35
2.4.2 Ambiente periglacial:	35
2.4.3 Glaciares libres de detritos.....	35
2.4.4 Glaciar cubierto por detritos.....	35
2.4.5 Permafrost de montaña	36
2.4.6 Modelo de Elevación Digital (DEM)	36
III. HIPÓTESIS Y VARIABLES.....	36
3.1 Hipótesis.....	36
3.1.1 Hipótesis General	36
3.1.2 Hipótesis Específica	36
3.2 Operacionalización de variables.....	36
3.1.1 Definición conceptual de variables	36
3.2.1 Definición operacional de la variable.....	38
IV. DISEÑO METODOLÓGICO	39
4.1 Tipo y diseño de investigación	39
4.2 Método de Investigación	39
4.2.1 Procedimiento para fotointerpretar y digitalizar los glaciares de roca.....	39
4.2.2 Caracterización topoclimática y actividad de los glaciares de roca	40
4.2.3 Estimación de velocidad de los glaciares de roca	44
4.3 Población y Muestra.....	46

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado	49
4.4.1 Lugar de estudio	49
4.4.2 Periodo desarrollado	50
4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información	51
4.6 Análisis y procedimientos de datos.....	53
4.6.1 Respecto a la digitalización de los glaciares de roca.....	53
4.6.2 Respecto a la velocidad de los glaciares de roca.....	54
4.6.4 Respecto a los factores que influyen en la presencia de los glaciares de roca	54
V. RESULTADOS	57
5.1 Resultados descriptivos	57
5.1.1 Objetivo específico 1: <i>distribución espacial, caracterización toponclimática, actividad y velocidad de los glaciares de roca.</i>	57
5.1.2 Objetivo específico 2: <i>variables toponclimáticas que controlan la presencia de glaciares rocosos activos.</i>	94
5.2 Resultados inferenciales.....	97
5.2.1 Objetivo específico 1: <i>relación entre la altitud, superficie, distribución, actividad, PISR, TMAA, precipitación y velocidad de los glaciares de roca</i>	97
5.2.2 Objetivo específico 2: <i>variables toponclimáticas que influyen en la presencia de los glaciares de roca</i>	106
VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	107
6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados	107
6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares.....	107
6.2.1 Respecto a la distribución y el número de glaciares de roca	107
6.2.2 Respecto a la superficie de los glaciares de roca.....	110
6.2.3 Respecto a la altitud de los glaciares de roca.....	111
6.2.4 Respecto a la orientación y pendiente predominante de los glaciares de roca	112

6.2.5	Respecto a la TMAA, PIRS y precipitación de los glaciares de roca	113
6.2.6	Respecto a la actividad de los glaciares de roca.....	117
6.2.8	Respecto a la velocidad de los glaciares de roca.....	118
6.2.9	Respecto a la configuración climática de las zonas donde están los glaciares de roca	119
6.2.10	Validación del modelo de regresión logística binaria de los factores topoclimáticos que influyen en la presencia de glaciares de roca en el Perú	122
6.3	Responsabilidad ética.....	123
VII.	CONCLUSIONES.....	124
VIII.	RECOMENDACIONES	126
IX.	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	129
X.	ANEXOS	148

Índice de figuras

<i>Figura 1.</i>	Esquema de un glaciar de roca.	18
<i>Figura 2.</i>	Factores que influyen en las condiciones de permafrost en zonas de montaña. Fuente, Azocar (2013).....	21
<i>Figura 3.</i>	Esquematación del funcionamiento de un sistema RADAR. Fuente, Prieto Morín (2015). ...	26
<i>Figura 4.</i>	Lista de todas las misiones de Radar de Apertura Sintética en los últimos 40 años. Fuente, Emery y Camps (2017).....	27
<i>Figura 5.</i>	Producto Cosi-Corr. Muestra el desplazamiento en “m” en 16 días de glaciares en las Islas del Sur de Nueva Zelanda, Herman et al. (2011).....	28
<i>Figura 6.</i>	Interferometría diferencial (DInSAR). Fuente, Villaroel et al. (2018).	30
<i>Figura 7.</i>	Diagrama de una parte de la corteza superior con permafrost de montaña y los materiales que lo componen. Fuente, modificado en base a Ruiz (2013) y Scott y Mock (2013).....	32
<i>Figura 8.</i>	Diagrama conceptual de la degradación del permafrost. Fuente, Lafrenière y Lamoureux (2019).....	34
<i>Figura 9.</i>	Flujograma de determinación de velocidades superficiales de glaciares rocosos.	45
<i>Figura 10.</i>	Flujograma general de la investigación.....	46
<i>Figura 11.</i>	Población del ámbito de estudio, Cordillera de los Andes Tropicales del Perú.	48
<i>Figura 12.</i>	Muestra del ámbito de estudio, 20 Cordilleras de los Andes Tropicales Peruanas.	49

<i>Figura 13.</i> Lugar de estudio de campo. La zona de estudio en el GR San Félix está ubicado en E=803134.33 y N=8292582.06.....	50
<i>Figura 14.</i> Metodología usada en la digitalización de glaciares de roca.	53
<i>Figura 15.</i> Ejemplos de glaciares de roca digitalizados por dos operadores.....	60
<i>Figura 16.</i> Mapa de la distribución altitudinal y latitudinal de los glaciares de roca.	69
<i>Figura 17.</i> Mapa de distribución de GR en base a su PIRS.	76
<i>Figura 18.</i> Mapa de TMAA de los glaciares de roca del Perú.....	80
<i>Figura 19.</i> Mapa de distribución de GR en base a su precipitación.	84
<i>Figura 20.</i> Mapa de distribución de glaciares de roca en base a su actividad.....	88
<i>Figura 21.</i> Mapa de velocidades horizontales y verticales de los glaciares de roca en el Perú. “a”, velocidad superficial del GR San Félix, “b”, desplazamiento vertical. En ambos casos se muestra la relación señal/ruido, “c”, SNR para Cosi-corr y “d”, coherencia para DInSAR.	92
<i>Figura 22.</i> Número y superficie de glaciares de roca por cordilleras.....	98
<i>Figura 23.</i> Distribución de los glaciares de roca basado en la clasificación climática propuesta por Sagredo y Lowell (2012).....	121
La herramienta export del software SNAP permiten exportar varios formatos para el procesamiento y análisis de los interferogramas en diversos programas QGIS, Google Earth-Pro, etc., en este caso se exportó en formato TIF para poder visualizar los resultados en un software SIG como QGIS o ArcGIS. <i>Figura 24.</i> Flujoograma de determinación de velocidades superficial y horizontal.	151
<i>Figura 25.</i> Ubicación de las zonas de prospección geofísica sobre el GR.....	159
<i>Figura 26.</i> Sondaje vertical eléctrico y refracción sísmica sobre el GR San Félix.....	161

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Glaciares de roca en base a su actividad</i>	13
Tabla 2 <i>Atributos geomorfológicos y ambientales modificado para mapear y clasificar los glaciares de roca</i>	15
Tabla 3 <i>Principales bandas y longitud de onda que utilizan los satélites Radar</i>	27
Tabla 4 <i>Operacionalización de variables</i>	37
Tabla 5 <i>Atributos específicos de los glaciares de roca</i>	39
Tabla 6 <i>Periodo de estudio</i>	49
Tabla 7 <i>Técnicas e instrumentos de recolección de información</i>	50
Tabla 8 <i>Distribución de los glaciares de roca por ubicación geográfica y por cordillera</i>	57
Tabla 9 <i>Error absoluto de la digitalización de glaciares de roca expresadas en área</i>	59
Tabla 10 <i>Área de digitalización de los glaciares de roca expresados en área</i>	59
Tabla 11 <i>Superficie (km²) total y promedio de glaciares de roca</i>	60
Tabla 12 <i>Altitud de los glaciares de roca</i>	62
Tabla 13 <i>Orientación de los GR por cordilleras</i>	67
Tabla 14 <i>Pendiente predominante por cordillera y ámbito geográfico</i>	69
Tabla 15 <i>Rango, mínimos y máximos de PISR de los glaciares de roca por cordilleras</i>	71
Tabla 16 <i>Rango, mínimos y máximos de TMAA de los glaciares de roca por cordilleras y sectores</i>	74

Tabla 17 Rango, mínimos y máximos de precipitación promedio de los glaciares de roca por cordilleras y sectores.....	79
Tabla 18 Actividad de los glaciares de roca del Perú.....	83
Tabla 19 Promedio, máximo y mínimo de velocidad superficial y desplazamiento vertical de GR.....	88
Tabla 20 Altitud y TMAA, de los glaciares de roca por cordillera y sector geográfico.....	93
Tabla 21 Comparación de superficie de glaciares de roca.....	103
Tabla 22 Distribución de los glaciares de roca en base a la clasificación climática de regiones.....	112
Tabla 23 Análisis de multicolinealidad.....	116
Tabla 24 Variables de regresión logística binaria 1.....	117
Tabla 25 Variables de regresión logística binaria 2.....	118
Tabla 26 Resultados de sondaje vertical eléctrico y refracción sísmica.....	154
Tabla 27 Ubicación de las zonas de prospección geofísica.....	154

Índice de gráficos

Gráfico 1. Distribución espacial de glaciares de roca por cordillera y sector geográfico.....	59
Gráfico 2. Superficie (km ²) de los glaciares de roca por cordillera y sector geográfico.....	63
. Gráfico 3. Distribución altitudinal de los glaciares de roca a través de la Cordillera de los Andes Peruanos de norte a sur.....	66
Gráfico 4. Rango altitudinal de los glaciares de roca.....	68
Gráfico 5. Orientación predominante de los glaciares de roca. ‘a’ muestra la orientación predominante de GR en todas las cordilleras peruanas, ‘b’ en el norte, ‘c’ en el centro y ‘d’ en el sur.....	70
Gráfico 6. Pendiente promedio predominante de los glaciares de roca. ‘a’ muestra la pendiente promedio predominante de GR en todas las cordilleras peruanas, ‘b’ en el norte, ‘c’ en el centro y ‘d’ en el sur.....	72
Gráfico 7. Rango porcentual de glaciares de roca en base al PISR.....	74
Gráfico 8. Rango porcentual de glaciares de roca en base a la TMAA.....	77
Gráfico 9. Rango porcentual de glaciares de roca en base a la precipitación.....	81
Gráfico 10. Clasificación de glaciares de roca en base a su actividad y sector geográfico.....	87
Gráfico 11. Velocidad horizontal y desplazamiento vertical de los glaciares de roca. ‘a’ y ‘b’ muestran la velocidad superficial y desplazamiento vertical de los GR, en barras se muestra la velocidad promedio, en línea de color negro la máxima y en dorado la mínima, en ‘a.1’ y ‘b.1’ se muestra el diagrama de caja de las velocidades promedio de los GR.....	90
Gráfico 12. Perfil longitudinal de velocidad superficial y desplazamiento vertical del glaciar de roca San Félix. En ‘a’ se muestra el perfil longitudinal de la velocidad superficial sobre el GR San Félix, mientras que en ‘b’ se muestra el desplazamiento vertical, las líneas de color rojo hace referencia a los primeros 100 m del perfil AB.....	93
Gráfico 13. Análisis de correlaciones bivariado de Pearson. Las elipses más alargados muestran una fuerte correlación entre los factores, ($r > 0.8$ y $r < -0.8$).....	94
Gráfico 14. (a), relación entre la altitud mínima de los glaciares de roca, la TMAA mínima, Precipitación promedio y PISR. En las barras de color azul se muestran las altitudes mínimas promedio de los GR, las	

líneas punteadas de color celeste muestran la precipitación, las líneas rojas punteadas la TMAA, por último, la línea dorada punteada el PISR.....	101
<i>Gráfico 15.</i> Diagrama de caja de la altitud respecto a la actividad de los glaciares de roca la TMAA, PISR y precipitación. Se muestra los diagramas de cajas de la actividad y altitud de los GR en base a la TMAA (a), la precipitación (b) y el PIRS directa (c), las barras de colores en cada subgráfica representan la variación de TMAA, precipitación y PISR.....	102
<i>Gráfico 16.</i> Altitud, actividad, longitud TMAA, PIRS y precipitación de los glaciares de roca del Perú. Los símbolos representan la dispersión altitudinal de la actividad de los GR, círculos azules=GR activos, aspas naranjas= GR inactivos, triángulos negros=GR relictos o fósiles. Las líneas representan la línea de tendencia de la altitud de los GR. En líneas verdes punteadas el límite inferior de permafrost de montaña en base a los GR intactos.....	103
<i>Gráfico 17.</i> Relación entre la velocidad, altitud, TMAA, latitud y longitud de los glaciares de roca. ‘a’ muestra la relación entre la velocidad superficial y desplazamiento vertical de los GR y la altitud, ‘b’ y ‘c’ se muestra tridimensionalmente la relación entre la altitud, TMAA y la velocidad superficial y desplazamiento vertical de los GR respectivamente	105
<i>Gráfico 18.</i> Relación de la velocidad superficial de glaciares de roca y la TMAA. Gráfico de relación entre la velocidad superficial de GR (área sombreada en celeste) y TMAA, la línea negra diagonal indica la tendencia de la TMAA	106
<i>Gráfico 19.</i> Curva AUROC, o área bajo la curva, valor de 0.7.....	122

Índice de imágenes

<i>Imagen 1.</i> Componentes de un SIG. Fuente, Longley et al. (2005).....	23
<i>Imagen 2.</i> Espectro Electromagnético. Fuente Wood y Roy (2016).	24
<i>Imagen 3.</i> Modelo idealizado del perfil de un GR de los Andes Peruanos. Modificado en base a Jones et al. (2019).	115
<i>Imagen 4.</i> Ortomosaico y mapa de sombras obtenido de vuelo drone en el glaciar de roca San Félix.	163
<i>Imagen 5.</i> Catálogo de imagen radar.	164
<i>Imagen 6.</i> Catálogo de imagen óptica.	165
<i>Imagen 7.</i> Manual metodológico para inventariar glaciares rocas.	166
<i>Imagen 8.</i> Papers y abstract publicados. “a”, paper publicado (https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483589.010) en la conferencia regional del permafrost 2020, publicado en julio de 2021, “b” y “c” abstracts publicados y aceptados en la European Geoscience Union.	167

RESUMEN

Los glaciares de rocas (GR), son una de las formas geomorfológicas más importantes de los sistemas criosféricos de los Andes Tropicales Peruanos, debido a que se espera que en el futuro su aporte hídrico aumente mientras que la de los glaciares libres de detritos (también conocidos como limpios o blancos) disminuyan en un contexto de cambio climático, sin embargo, sus características locales son aún desconocidas. El objetivo de esta investigación fue determinar la dinámica de los GR en los Andes Tropicales del Perú, para esto se usaron tecnologías de información geográfica, como sistemas de información geográfica, percepción remota e internet con la finalidad de identificar, caracterizar y determinar los factores que influyen en la presencia de los GR, la distribución espacial se realizó usando imágenes de alta resolución espacial de proyectos espaciales como Google Earth, Bing Maps e imágenes Sentinel 1 y Landsat 8 para determinar la velocidad de los GR, por otro lado, se determinó los factores que controlan la presencia de los GR usando variables topoclimáticas en un modelo de regresión logística binaria. Los resultados muestran que hay 1122 GR que cubren 49.1 km², distribuidos en 17 de las 20 cordilleras peruanas glaciares, en Blanca, Huagoruncho y Carabaya no se encontraron GR, y el ~98% (~, aproximadamente) del total de GR están ubicados en las cordilleras del sur entre los 14.0°-17.5° latitud S, además, los GR tienen orientaciones de S, SO y SE y pendientes predominantes de 20°-35°, en cuanto a la altitud los GR se ubican entre los 4377-5654 m s.n.m. , a un rango de temperatura media anual del aire (TMMA) de -2.5°-11.4°C, precipitación en el rango de 28-84 mm/año y un potencial de incidencia de radiación solar de directo (PISR) de 906-1165 kWh/m². Del total de GR 424 son activos, 394 inactivos y 304 fósiles o relictos, se estimó que los GR tienen una velocidad horizontal desde los 5.0 cm/mes hasta los 77.2 cm/mes, además, presentan un desplazamiento vertical desde los 1.0 cm/año hasta los -6.4 cm/año. En general se encontró que donde existe la mayor cantidad de GR existe prevalencia de menores valores de TMAA, PISR y precipitación en la medida de que la altitud aumenta y que los factores que influyen o controlan la presencia de GR activos, inactivos o relictos son la altitud mínima, la pendiente y el PISR directa. Por último, en base al modelo de regresión logística binaria se determinó que los factores que controlan la presencia de los GR en un clima moderno son la altitud mínima, pendiente y PISR.

ABSTRACT

Rock glaciers (RG) are one of the most important geomorphological forms of the cryospheric systems of the Peruvian Tropical Andes, because it is expected that in the future their water supply will increase while that of debris-free glaciers (also known as clean or white glaciers) will decrease in a context of climate change, however, their local characteristics are still unknown. The objective of this research was to determine the dynamics of RG in the tropical Andes of Peru, using geographic information technologies such as geographic information systems, remote sensing and the internet to identify, characterize and determine the factors that influence the presence of RG, The spatial distribution was carried out using high spatial resolution images from space projects such as Google Earth, Bing Maps and Sentinel 1 and Landsat 8 images to determine the speed of the RG; on the other hand, the factors that control the presence of RG were determined using topoclimatic variables in a binary logistic regression model. The results show that there are 1122 RG covering 49.1 km², distributed in 17 of the 20 glaciated Peruvian mountain ranges, in Blanca, Huagoruncho and Carabaya no RG were found, and ~98% (~, approximately) of the total RBCs are located in the southern mountain ranges between 14. 0°-17.5° S latitude, in addition, the GR have orientations of S, SW and SE and predominant slopes of 20°-35°, in terms of altitude the RG are located between 4377-5654 m asl. The average annual mean air temperature (AAMT) range is -2.5°-11.4°C, precipitation in the range of 28-84 mm/year and a potential direct solar radiation (PISR) incidence of 906-1165 kWh/m². Of the total RG 424 are active, 394 inactive and 304 fossil or relict, it was estimated that the RG have a horizontal velocity from 5.0 cm/month to 77.2 cm/month, in addition, they present a vertical displacement from 1.0 cm/year to -6.4 cm/year. In general, it was found that where there are more RG there is a prevalence of lower values of TMAA, PISR and precipitation as the altitude increases and that the factors that influence or control the presence of active, inactive or relict RG are the minimum altitude, slope and direct PISR. Finally, based on the binary logistic regression model, it was determined that the factors controlling the presence of GR in a modern climate are minimum altitude, slope and PISR.

INTRODUCCIÓN

La investigación sobre potencial reserva hídrica a grandes altitudes como el permafrost es necesaria en muchas regiones del mundo y específicamente en el Perú en un contexto de disminución del área y volumen de agua de los glaciares, que en los últimos 40 años ha perdido cerca del 54% de su masa (INAIGEM 2018). En la comunidad científica y en la sociedad ha generado gran preocupación (Milana y Güell 2008) y se necesita generar una sólida base de conocimientos y más datos para comprender mejor los efectos negativos, posibles eventos catastróficos y oportunidades con la finalidad de anticipar, mitigar las consecuencias (Valley et al. 2014) aprovechar las oportunidades tanto como sea posible de la degradación del permafrost.

La investigación sobre el permafrost es un campo relativamente nuevo de la ciencia y ha surgido principalmente durante las últimas décadas (Etzelmüller 2013), en esta investigación buscamos profundizar en el estudio de esta geoforma de origen periglacial, por lo tanto, la investigación se enmarca dentro del alcance de glaciares de roca (GR) como indicador de presencia actual y pasada de permafrost en áreas de montaña por ser su forma más visible de identificarla en el terreno (Azócar 2018) y estar relacionada con el clima, topografía y la altitud (Gruber y Haeberli 2007); además, han sido consideradas sensibles al cambio climático por el aumento de la temperatura, la disminución de la superficie congelada y el aumento de su capa activa, todo esto hace que esta geoforma sea un geoindicador del cambio climático, por lo tanto, su importancia radica en el conocimiento y monitoreo de su dinámica.

Un primer paso que se plantea para resolver las interrogantes planteadas en esta investigación consiste en determinar por primera vez en el Perú la dinámica de los glaciares de roca (dGR), es decir, determinar su distribución espacial, características topoclimáticas (ubicación, altitud, área superficial, orientación, pendiente, temperatura media anual del aire-TMMA, precipitación, potencial de incidencia de radiación solar directa-PISR), actividad y velocidad (superficial y vertical) de los GR en las cordilleras glaciares de los Andes Tropicales (CAT) Peruanos.

La metodología empleada para la determinación de la dGR se basó en la aplicación de herramientas de Tecnologías de Información Geográfica (TIG) como los Sistemas de Información Geográfica (SIG), Percepción Remota (PR) o teledetección, Sistema de

posicionamiento Global (SPG) e Internet; experiencias similares empleando TIG se han aplicado en países como Bolivia, Chile, Argentina, Francia, Nepal, Rumania, Suiza, etc., por lo tanto, se considera que la experiencia en estos países es replicable y modificable para obtener resultados en nuestras cordilleras; ya que por primera vez, se realizará en el Perú un estudio completo de los GR como formas de permafrost que dará cuenta del estado actual de estas geoformas de altas montañas y sentará las bases para un amplio campo de estudios futuros relacionados a ecosistemas periglaciares.

La investigación se enmarca dentro del proyecto 2018-01, E041-2018-01-BM, *Evaluación y estimación de la distribución espacio temporal de permafrost a nivel nacional como potencial de reserva hídrica*, y cuenta con financiamiento total del Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnológico y de Innovación Tecnológica (FONDECYT) y el Banco Mundial (BM) ejecutado por el Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña (INAIGEM) del Ministerio del Ambiente (MINAM).

I. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1 Descripción de la realidad problemática

Los glaciares, nieve y permafrost han sido reconocidos en el último reporte del Panel Intergubernamental Sobre el Cambio Climático (IPCC 2019) como particularmente sensibles al cambio climático con un impacto del nivel de confianza de muy alto en cuanto al grado de contribución de dicho fenómeno en los mencionados sistemas en el Perú. Los escenarios climáticos proyectan una tendencia al aumento de la temperatura en las próximas décadas, 4.5° – 5° C en los Andes Tropicales, según escenarios de emisiones a finales del siglo XXI, (Pastick et al. 2015), y esto traerá consigo una disminución de la cobertura del permafrost (Ferrando 2017) y con esto la de los GR. Se espera que la contribución al suministro de agua de los glaciares se reduzca (UNFCCC 2007), mientras que la del permafrost, que en la práctica su forma más común de identificar es la de los GR probablemente aumente (Schrott 1991), tal y como se infiere del estudio de Azocar y Brenning (2010), Perucca y Angillieri (2011), Rangelcroft (2015) y Jones et al. (2018), por lo tanto, los GR como formas de permafrost son geoindicadores del cambio climático (Kong y Wang 2017) y el conocimiento de su estado podría dar cuenta del estado del clima actual y su monitoreo in-situ a futuro puede resultar en información valiosa para la comunidad científica del Perú y el mundo ya que permitiría conocer como la variación del clima tiene impacto en las zonas de alta montaña.

La distribución de los glaciares libres de detritos en el Perú está bien documentada desde mediados del siglo XX y se sabe que en los últimos 43 años se ha perdido cerca del 54% de su masa glaciaria (INAIGEM, 2018), sin embargo, el permafrost y los GR en las CAT del Perú, que se espera que exista de manera más uniforme en todas las laderas de la montaña por encima de la isoterma de 0° C, a aproximadamente 5000 m s.n.m. (Carey 2005), aún ha sido poco estudiado y a la fecha el estudio de Ubeda et al. (2015) y Yoshikawa et al. (2020) son los más representativos de estudio de permafrost en Perú, ya que encontraron permafrost en los volcanes Chachani y Coropuna (trabajo puntual) instalando una red de sensores térmicos del suelo, sin embargo, aún no se conoce la distribución, características topoclimáticas, velocidad, volumen equivalente de agua, factores topoclimáticos que controlan su presencia en un clima moderno, potencial fuente importante de agua como reserva hídrica, impacto en el ciclo del carbono, peligro de origen natural relacionado a su degradación y el real impacto del cambio climático a estas geoformas. A lo indicado anteriormente, el conocimiento, estudio e importancia sobre los

GR en el Perú sigue siendo un tema no conocido y constituye un objetivo clave para el monitoreo del cambio climático y los efectos que este trae consigo.

Los GR no se pueden digitalizar y caracterizar de manera automática a partir de datos obtenidos por teledetección porque son espectralmente similares a su entorno (Rangecroft et al. 2014), por lo que, otras tecnologías de información geográfica (TIG) como los sistemas de información geográfica (SIG), sistemas de posicionamiento global (SPG) y el internet podrían ser herramientas para ubicar, mapear y clasificar los GR a partir de atributos geomorfológicos y ambientales en las CAT peruanas, tal y como se ha demostrado en países como Bolivia (Rangecroft et al. 2014), Chile (Azócar y Brenning 2010), Argentina (Angillieri 2009; Angillieri 2017), Nueva Zelanda (Sattler et al. 2016), los Alpes Centrales Italianos (Scotti et al. 2013) y en los Himalayas Nepalés (Jones et al. 2017). A la vez, para determinar el movimiento de manera cuantitativa de los GR (a nivel regional) la manera óptima de realizarlo es aplicando técnicas de PR como Registro de Imágenes y Correlación de Detección Óptica (Cosi-Corr) e Interferometría Diferencial (DInSAR) usando imágenes ópticas y de radar, tal y como se ha realizado en los Andes Secos Argentinos (Villarroel et al. 2018), Rumania (Necsoiu et al. 2016) y otros, por último, para evaluar cuáles son las variables topoclimáticas que controlan la presencia de GR en un clima moderno se han aplicado modelos estadísticos que combinan variables del clima, topografía y otros como en Argentina y Chile (Brenning y Trombotto 2006; Angillieri 2010) y Austria (Groh 2019b).

Por último, como se ha indicado anteriormente, los GR en la CAT del Perú aún no han sido estudiados, por lo tanto, el uso de las herramientas de tecnologías de información geográfica como sistemas de información geográfica, percepción remota, sistema de posicionamiento global (SPG) e internet podrían ser herramientas para el estudio de su ubicación, distribución espacial, altitud, área, orientación, actividad, temperatura media anual del aire (TMAA), precipitación, potencial de incidencia de radiación solar (PISR), velocidad de los GR y factores que influyen en la presencia de los mismos en un clima moderno.

1.2 Formulación del problema

1.2.1 Problema General

¿De qué manera la aplicación de las Tecnologías de Información Geográfica permitirá determinar la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en la Cordillera de los Andes Tropicales del Perú?

1.2.2 Problemas Específicos

¿Cuál será la distribución espacial, características topoclimáticas, actividad y velocidad superficial de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú?

¿Cuáles son las variables topoclimáticas que controlan la presencia de glaciares rocosos activos en los Andes Tropicales del Perú?

1.3 Objetivos de la Investigación

1.3.1 Objetivo General

Aplicar las Tecnologías de Información Geográfica en la determinación de la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú.

1.3.2 Objetivos Específicos

Determinar la distribución espacial, caracterización topoclimática, actividad y velocidad de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú.

Determinar las variables topoclimáticas que controlan la presencia de glaciares rocosos activos en los Andes Tropicales del Perú.

1.4 Justificación

En el presente estudio se determina por primera vez en el Perú la identificación y caracterización de los GR a lo largo del territorio nacional, es decir, en las 20 cordilleras peruanas de los Andes Tropicales Peruanos, por lo tanto, se obtiene el primer mapeo completo de estas geoformas criosféricas de alta montaña en el Perú y que por su importancia hídrica y riesgos servirá de base para los tomadores de decisiones en temas de gestión integral de recursos hídricos, de gestión de riesgos de desastres, comunidad científica, sociedad y actores económicos como minería, agricultura, energía.

1.4.1 Legal

La Ley N° 29338 “Ley De Recursos Hídricos”, regula el uso y gestión de los recursos hídricos, tanto superficial, continental, subterránea y los bienes asociados a estos, además se atribuye el acceso al agua como una necesidad primaria y un derecho fundamental de toda persona; incluso en épocas de escasez; en el Artículo 3° de la mencionada ley indica que es de necesidad pública y de interés nacional la gestión integrada de los recursos hídricos y en el Artículo 5° se indica que el agua cuya regulación es materia de la ley es la que se encuentra en los nevados, glaciares,

de esta última, los varios tipos de glaciares, entre ellos los GR, por lo tanto, para gestionar correctamente los recursos hídricos de todas las fuentes de agua, entre ellas la de los GR, es preciso conocer su dinámica actual, tema de estudio de la presente tesis. Además, en el marco de la Ley N° 30286, se crea el Instituto Nacional en Glaciares y Ecosistemas de Montaña – INAIGEM adscrito al MINAM, cuya finalidad es fomentar y expandir la investigación científica y tecnológica en el ámbito de los glaciares y ecosistemas de montaña, promoviendo el beneficio de las poblaciones que viven en dichos ecosistemas de montañas. Por lo tanto, el estudio de GR visto desde una perspectiva de seguridad hídrica en un contexto de cambio climático se posiciona como una potencial reserva hídrica aún no explorada en el Perú y el conocimiento de su distribución y características podría integrarse al manejo integral y sostenible de los recursos hídricos.

1.4.2 Teórica e Investigación

En el Perú existe una brecha de conocimiento respecto al estudio de entornos periglaciares, como son los GR, permafrost y otras geoformas de origen periglaciares, es decir, no se conoce dónde están ubicados, cuáles son sus características y su estado actual en los Andes Peruanos, el presente estudio contribuye con la generación de información y base de datos geoespacial de los GR en los Andes Tropicales del Perú como formas de permafrost de montaña que surge como una oportunidad de realizar investigaciones relacionadas a nuevas fuentes de agua no exploradas y su relación con el cambio climático en un clima moderno.

1.4.3 Ambiental, Ecológica y económica

Desde la perspectiva ambiental y ecológica los GR podrían cumplir un rol importante en la regulación hídrica, además, de ser reservas resilientes clave de agua en los Andes debido a la escasez proyectada de agua si continúa la recisión de los glaciares, por otro lado, establecer el estado actual de los GR en un escenario de cambio climático permitirá conocer aspectos como la MAAT, precipitación, actividad (contenido de hielo) y velocidad, además, sienta las bases para estudios específicos en diversas líneas de investigación como recursos hídricos, sucesión ecológica, paleoclimas, riesgos de desastres, indicadores de cambio climático, entre otros.

Desde el punto de vista económico, las actividades económicas que se desarrollan en zonas de alta montaña generalmente es la minería, por lo tanto, conocer si en una concesión minera existe GR obligaría a estas a monitorear el impacto que tienen sus actividades a los glaciares limpios

sino también a los GR que por sus características podrían ser una potencial reserva de agua o regulador hídrico.

1.4.4 Justificación metodológica

Para lograr los objetivos de la presente investigación, se empleará el uso de recolección de información satelital del tipo óptica y radar y el procesamiento se realizará con herramientas de Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota, Sistema de Posicionamiento Global e Internet, esto permitirá determinar la dinámica de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú. Las metodologías usadas para el estudio de los GR en el mundo serán adoptada y modificada para los fines del presente estudio, por ejemplo, los criterios geomorfológicos para la clasificación de la actividad y determinación de la velocidad de los GR.

En líneas generales saber dónde están ubicados los GR, conocer sus características y estado actual podría dar cuenta de la importancia desde el punto de seguridad hídrica en zonas donde hay poca presencia de glaciares limpios ya que la potencial contribución hídrica de los GR en un contexto de cambio climático podría necesitar que se generen políticas públicas para la conservación y aprovechamiento sostenible de estos recursos que aún no han sido explorados; además, permitiría empezar el monitoreo de estas geoformas, esto resultaría en información valiosa como geoindicadores de cambio climático que tendría un nivel de alcance mundial debido a que la Cordillera de los Andes es considerado como un termómetro natural muy sensible a los cambios de la variabilidad climática.

1.5 Limitantes de la Investigación

1.5.1 Teórica

La falta de antecedentes de estudio de geoformas periglaciares -en- y a lo largo de la cordillera de los Andes Tropicales del Perú, lo cual fue superado, pues se usaron referencias internacionales para el estudio de los GR de los Andes peruanos como las directrices del Action Group: Rock Glacier Inventories and Kinematics (<https://www3.unifr.ch/geo/geomorphology/en/research/ipa-action-group-rock-glacier/>) de la Asociación Internacional del Permafrost liderada por la Universidad de Fribourg (Alemania).

1.5.2 Temporal

Se necesitan con urgencia una sólida base de conocimientos y una mejor comprensión de los procesos que rigen para hacer frente eficazmente a las consecuencias del cambio climático sobre

la evolución de los paisajes de montaña, para lograr esto se necesita realizar el monitoreo de los GR por un tiempo considerable, mayor a 10 años, esto con la finalidad de entender los fenómenos que rigen sobre ella, y los cambios que ocurren en el tiempo. Sin embargo, al iniciar el estudio base de GR como formas de permafrost en el Perú, se sentarán las bases para continuar con esos estudios que requerirán un periodo más largo de tiempo para su entendimiento, a saber, para la identificación de los GR sobre la CAT del Perú se usaron imágenes libres de alta resolución espacial de libre disponibilidad para el Perú desde el año 2015 al 2019, mientras que para determinar la velocidad de los GR se usaron imágenes satelitales disponibles del año 2017 – 2018.

1.5.3 Espacial

El acceso a las zonas de GR, por lo general requieren grandes esfuerzos logísticos de personal y equipos para abarcar grandes extensiones de terrenos donde se encuentren GR, por tanto, las herramientas que ofrecen las tecnologías de información geográfica ayudan a superar esta limitación, gracias al apoyo de imágenes satelitales de alta resolución, por ejemplo, el uso de Google Earth-Pro y SASPlanet imágenes satelitales de alta resolución espacial. El alcance del área establecida para la unidad de estudio se encuentra delimitado por la población de estudio, que son todos los GR que se encuentran en la CAT del Perú (Ampato, Apolobamba, Barroso, Blanca, Carabaya, Central, Chila, Chonta, Huagoruncho, Huallanca, Huanzo, Huayhuash, Huaytapallana, La Raya, La Viuda, Raura, Urubamba, Vilcabamba, Vilcanota y Volcánica), que para esta investigación coincide con la muestra de estudio, ya que los estudios con imágenes satelitales permiten el estudio de amplios espacios geográficos, por lo tanto, el estudio de toda la población.

II. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes del estudio

A continuación, se presenta investigaciones en temas relacionados al tema de estudio.

Jaken et al. (2017), el objetivo fue determinar la distribución, caracterización y estimación de reserva de agua en glaciares, glaciares cubiertos y GR en la cuenca del río Aconcagua (Chile) usando técnicas de SIG como fotointerpretación y digitalización, herramientas de internet como Google Earth. En el estudio examinaron la distribución geográfica y determinaron las características topográficas como elevación, pendiente, aspecto y forma, para realizar el estudio

usaron imágenes satelitales como Aster (15 m) del 2009, SPOT-5 (2.5/5 m) del 2011, las geoformas fueron digitalizadas y clasificadas (aplicando SIG) usando el entorno ArcGIS 10.4 y características geomorfológicas como el tipo de superficie y forma. Los resultados indican que existen 916 geoformas de las cuales 669 son GR y representan del 48% al 64% de agua almacenada, seguido de los glaciares cubiertos 15%-25% y por último 15%-19% los glaciares. Los autores concluyen que la expansión de la minería genera una fuerte presión sobre las geoformas ricas en hielo y sugieren que debe realizarse una evaluación del coste económico del recurso hídrico y la minería.

El objetivo principal del estudio de Falaschi et al. (2015) fue realizar el inventario de GR en los Andes Patagónico Argentino, para ello aplicaron SIG, Internet y SPG, usaron imágenes satelitales pancromáticas ALOS PALSAR de 2.5 m de resolución espacial para la identificación de las geoformas y la digitalización se realizó en Google Earth-Pro, la clasificación de la actividad se realizó usando las características y atributos geomorfológicos de los GR. Se digitalizaron 177 GR, de los cuales 130 (9.86 km²) son intactos (activos e inactivos) y 47 (1.45 km²) son fósiles. Concluyeron que la aplicación de imágenes satelitales de alta resolución es importante para realizar una clara identificación de GR, además su estudio provee un importante conocimiento científico para la protección de todos los glaciares de roca de los Andes Patagónicos.

Haq y Baral (2019) estudiaron la distribución del permafrost en Sikkim (Himalaya oriental) usando GR como variable dependiente y factores topoclimáticos como altura, radiación, pendiente, orientación como variable independiente en un modelo de regresión logística para calcular la probabilidad de extensión del permafrost, los GR fueron clasificados en base a su actividad y origen usando un entorno SIG, se usaron imágenes ópticas Sentinel-2 para su digitalización en ArcGIS 10.5, la clasificación se basó en sus características y atributos geomorfológicos como su forma, flujos superficiales, superficie, tonalidad, pendiente frontal. Se identificaron 109 GR intacto (activo e inactivo) y 76 relictos. Una de sus conclusiones fue que la aplicación de imágenes satelitales de alta resolución espacial como Google Earth (disponible en internet) e imágenes Sentinel-2 disponibles libremente son importante input que podrían ser usados para mapear los GR en los Himalayas.

El estudio de Marcer et al. (2017) en los Alpes Franceses tuvo el mismo objetivo que el estudio anterior, varió en que usaron imágenes libres de proyectos espaciales como Bing (disponible en

internet) que es de acceso libre en el entorno QGIS (SIG), en este último, se digitalizaron y clasificaron en base a la actividad, la digitalización estuvo a cargo de diferentes operadores y fue revisado por expertos en mapeo de GR, 3261 fueron inventariados, 814 activos, 671 como inactivo y 1776 como fósiles. También estudiaron los factores que controlan la presencia de GR activos usando factores topoclimáticos bajo un enfoque estadísticos. Los autores concluyeron que la cubierta de nieve y la litología pueden controlar la actividad de los GR a escala regional.

En el estudio de Brenning y Tromboto (2006) el objetivo principal fue determinar los factores topoclimáticos que controlan la presencia de GR activos en los Andes Semiáridos en Chile y Argentina aplicando un modelo de regresión logística binaria y validada bajo la curva ROC. Los resultados muestran que los factores topoclimáticos combinados muestran una buena predicción de los factores que controlan la presencia de GR activos, pues el área bajo la curva fue 0.84 lo que muestra que el modelo tuvo un buen ajuste, además, encontraron que las bajas elevaciones de los GR es una condición no favorable para la presencia de GR activos.

Estudios similares como los mismos objetivos y metodologías de digitalización y clasificación usando SIG, SPG e Internet descritos anteriormente se han realizado en Bolivia (Rangecroft et al. 2014; Rangecroft et al. 2015), los Andes Secos Argentinos Perucca (2011), Cordillera Frontal de San Juan, y los Andes Secos de San Juan, Argentina (Angillieri 2009 y 2017), los Andes Secos Chilenos (Azocar 2010), Nueva Zelanda (Sattler et al. 2016), los Alpes Centrales Italianos (Scotti et al. 2013) y en los Himalayas Nepalés (Jones et al. 2017).

Diversos estudios se han llevado a cabo para estudiar la cinemática de los glaciares de roca, es decir, el movimiento que presentan los GR en su superficie; en el que se han valido de técnicas de PR como DInSAR y Cosi-Corr, a continuación, se detalla algunos de estos estudios.

El estudio de Bertone et al. (2019) en los Alpes de Europa del Este, tuvo por objetivo determinar la actividad de los GR usando interferometría InSAR, las imágenes usadas fueron descargadas del satélite Sentinel-1, del modo IW, franja de 250 km producto del tipo Single Look Complex (SLC), polarización vertical-vertical VV, las imágenes se seleccionaron de periodos sin nieve. De 1665 GR incluidos del inventario óptico el método clasificó 270 GR como activos y 257 como no activos, es decir, inactivos o fósiles, los GR restantes fueron separados del análisis debido a que en su superficie tienen vegetación, por lo tanto, esto es un indicativo de no movimiento en la superficie. Los autores concluyen que el método es aplicable a escala regional donde se conoce la ubicación geográfica de los GR, pero no su actividad, si el inventario ya

cuenta con información sobre la actividad determinada desde atributos geomorfológicos este método puede reducir incertidumbres y mejorar la confiabilidad del inventario.

El estudio de Villaroel et al. (2018) en los Andes Secos Argentinos, tuvo por objetivo realizar el mapeo de los GR activos usando DInSAR y compararlo con el inventario óptico realizado por el IANIGLA que se basó en atributos geomorfológicos de los GR. Los autores usaron imágenes del satélite Sentinel-1 para generar interferogramas, producto IW y polarización VV, la fase de desenrollamiento se realizó el software CTTC. Los resultados indican que aplicando DInSAR se detectaron 1524 GR activos, mientras que con el inventario del tipo óptica hay 2522 GR activos, el movimiento que presentan los GR va desde los 2.2 cm/año hasta los 170 cm/año, los autores concluyen que el uso de esta técnica es eficiente, rápida y de bajo costo para generar inventarios de GR a escala regional y de difícil acceso.

Necsoiu et al. (2016) realizaron un estudio cuyo objetivo fue determinar la actividad de los GR comparando dos técnicas de percepción remota Cosi-Corr y DInSAR en el entorno montañoso del Parque Nacional de Retezat en los Cárpatos, Rumania. Para esto usaron técnicas de teledetección complementaria como DInSAR y Cosi-Corr, para la primera técnica se usaron imágenes radar ALOS PALSAR de la banda L en periodos donde no hay nieve, las imágenes ópticas usadas para la segunda técnica fueron de los satélites SPOT5, Pleiades y WorldView en pancromático, para esto se usó un tamaño de ventana de 32*32 y paso de 4 píxeles en X e Y y un umbral de máscara de 0.9. Cosi-Corr registró desplazamientos de los GR que están entre los 0.55 cm/año – 2.2 cm/año, mientras que DInSAR se obtuvieron valores similares, los autores concluyen que la combinación de estas técnicas de percepción remota permite caracterizar el movimiento de los glaciares de roca en áreas donde hay escasa o no hay información de la dinámica de los glaciares de roca.

Delaloye et al. (2010) realizaron el análisis de los resultados InSAR para detectar fenómenos de remoción en masa, en particular los GR en los Alpes Suizos. Para esto usaron imágenes radar del ENVISAT, ALOS PALSASR y TerraSAR-X, lograron identificar que los GR activos tienen un desplazamiento anual en promedio de 2-3 m/año y por día existían glaciares de roca que se mueven a razón de 0.5 m/día aproximadamente. Los autores concluyen que esta técnica provee una importante herramienta para la evaluación de peligros naturales asociados a áreas de permafrost de montaña.

Por último, Brenning y Trombotto (2006), Azocar (2013) y Angillieri (2010; 2017), determinaron los controles topográficos y climáticos regionales que modelan o influyen en la presencia de GR en Chile y Argentina. Para esto aplicaron modelos de regresión logística binaria y validados bajo la curva ROC, encontrando que las variables topográficas y climáticas en conjunto (aspecto, pendiente, radiación solar) modelan o influyen la presencia de GR en los Andes del Sur (climas fríos y secos), la validación del modelo bajo la curva ROC mostraron valores de entre 0.76 a 0.84, valores que indican una buena predictibilidad de los modelos aplicados para validar la presencia de GR.

2.2 Bases teóricas

2.2.1 Glaciar de roca.

La detección de permafrost en zonas de montaña se puede basar en indicadores directos e indirectos de la presencia o ausencia de condiciones de permafrost (Azócar et al. 2017), los GR también llamado rocosos (Trombotto et al. 2014) son indicadores visuales directos de permafrost de montaña (Haeberli et al. 2006; Ahumada et al. 2014) debido a que son geformas criogénicas constituidos por una mezcla de hielo y materiales no consolidados moviéndose pendiente abajo, contienen entre 40-60% de hielo, aunque algunos autores sostienen que este porcentaje puede variar desde 30 a 90% (Haeberli et al. 2006), y una capa activa de espesor variable (Rangecroft et al. 2015; Haq y Baral 2019, Jones et al. 2018). Una de las importancias de estos cuerpos en los Andes radica, entre otras cosas, es que los GR activos han sido utilizados para inferir el límite altitudinal del permafrost discontinuo o continuo de montaña a escala regional (Barsch 1996; Brenning 2005a) y se usan comúnmente como indicador directo de permafrost de montaña (Angillieri 2017).

A. Tipos de Glaciar de roca.

Los GR se tipifican en base a su actividad (Barsch 1996) que hace referencia al contenido de hielo y movimiento presente en los GR.

Hay tres tipos de GR en base a su actividad, activo, inactivo y relicto o fósil, además, según Barsch (1996) los GR activos e inactivos son agrupados en ‘intactos’ debido a que tienen hielo y algunos presentan movimiento.

Los activos contienen hielo y movimiento pendiente abajo con un desplazamiento promedio entre 10 a 100 cm/año (Barsch 1996; Roer et al. 2005; Wirz et al. 2016), topografía de crestas y

surcos creado por la compresión longitudinal y transversal por acción del hielo intersticial (Sattler et al. 2016), presentan una pendiente frontal mayor a 35°, están libre de vegetación y presentan una cobertura inestable en su superficie (Ruiz 2013) este tipo de glaciario de roca por su alto contenido de hielo 40-60% son considerados como reservas de agua.


Los inactivos, contiene hielo, pero dejaron de moverse, presentan una pendiente frontal menos definida > 35°, tienen bordes algo suavizados y redondeados, evidencian pendientes frontales y marginales oscuras con poco contraste de color (Ahumada et al. 2014a) y pueden contener vegetación en su frente (Brenning 2005a).



Relicto o fósil, cuerpo de sedimento que queda después de la fusión total del hielo (Brenning 2005a), tiene una topografía más redondeada y depresiones (paleotermokarst) debido al colapso por fusión del hielo intersticial, la vegetación cubre la pendiente frontal y su superficie (Haeberli 1985; Brenning 2005a; Ahumada et al. 2014a).

Los GR activo o inactivos sugieren la existencia de permafrost, mientras que los relictos o fósiles indican su ausencia (Haeberli 1985), por lo tanto, GR activos e inactivos se agrupan generalmente como intactos, esto con fines de modelado de permafrost (Jones et al. 2018).

Tabla 1

Glaciares de roca en base a su actividad

Actividad	Imagen referencial	Ubicación
Activo		Cordillera Volcánica E= 869748.4 N= 8204647.4
Caracterización	Pendiente frontal superior al 30%, flujos transversales y longitudinales bien marcados, crestas y surcos en la superficie, tonalidad clara en los márgenes de manera homogénea, espesor entre el plano de la superficie y el GR muy bien definido.	


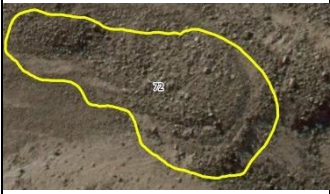




Inactivo		Cordillera Chila E= 825102.4, N= 8283423.8
Caracterización	Pendiente frontal menor al 30%, flujos transversales y longitudinales redondeados, crestas y surcos en la superficie, tonalidad variable en los márgenes de manera heterogénea, espesor entre el plano de la superficie y el GR muy bien definido.	
Relicto o fósil		Cordillera Volcánica E= 867860 N= 8212679
Caracterización	Pendiente frontal menor colapsada, flujos transversales y longitudinales no definidos, crestas y surcos en la superficie, tonalidad oscura sobre la superficie del GR que muestra erosión, espesor entre el plano de la superficie y el GR no definido, muy colapsado.	


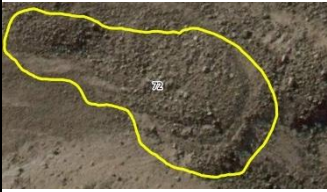

B. Mapeo geomorfológico de glaciares de roca

Los GR no se pueden digitalizar de manera automática a partir de datos obtenidos por teledetección porque son espectralmente similares a su entorno (Rangecroft et al. 2014), por lo tanto, el enfoque óptimo para realizar el mapeo y clasificar estas geoformas es identificarlas, interpretarlas y digitalizarlas manualmente a partir de imágenes satelitales de alta resolución espacial en base a criterios geomorfológicos ya establecidos (Roer y Nyenhuis 2007), como el frente y los márgenes laterales, la textura de la superficie, la pendiente frontal de la geoforma, el espesor y el grado de espesor, todas estas son las llamadas “Reglas de Oro” (Haeberli 1975) que será adoptado y modificado para que se ajusten a nuestra realidad peruana. A continuación, se muestra la tabla de atributos geomorfológicos y ambientales adoptada y modificada para los fines de la presente investigación, con el aporte de expertos del IPA.

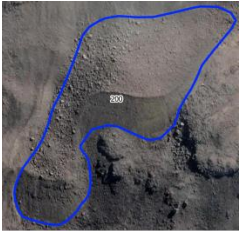







Tabla 2





Atributos geomorfológicos y ambientales modificado para mapear y clasificar los glaciares de roca

Indicador	Activo	Inactivo	Relicto
Frente y márgenes laterales y superiores	<p>Límite frontal y lateral bien definido, límite superior con evidencias claras del arranque de la geoforma, zona de mezcla entre la nieve y los detritos</p> 	<p>Límite frontal y lateral bien definido, límite superior con evidencias del arranque de la geoforma</p> 	<p>Límite frontal medianamente definido por el colapso de la geoforma Límite lateral medianamente definido por el colapso de la geoforma Límite superior de la geoforma visible</p> 
Superficie	<p>Signos de flujos, topografía definida por surcos y crestas, comprensión longitudinal, en ocasiones pueden no estar muy definidos por la litología</p> 	<p>Signos de flujos, topografía definida por surcos y crestas, en ocasiones pueden no estar muy definidos por la litología</p> 	<p>Líneas de flujo menos definidas, superficie colapsada, pequeñas depresiones cóncavas en la superficie</p> 
Pendiente frontal	Muy escarpado, >30°	Escarpado, Pendiente >25°	Pendiente colapsada, generalmente <25°, transición





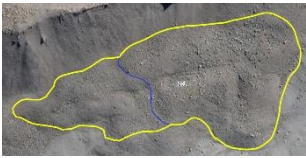

			<p>suave entre la superficie de la geoforma y la pendiente redondeada</p> 
--	---	--	---

Continúa...

Indicador	Activo	Inactivo	Relicto
<p>Espesor</p>	<p>En el caso de glaciares de roca activos el grosor está muy bien definido.</p> 	<p>En el caso de glaciares de roca inactivos generalmente el grosor está bien definido</p> 	<p>Grosor pequeño en comparación con los GR activos e inactivos. Espesor que en ocasiones suele confundir con el nivel del suelo</p> 
<p>Presencia de roca</p>	<p>Presencia de rocas bajo el frente y bajo las laderas del glaciar de roca</p> 	<p>En ocasiones presentan rocas en los pies y laterales del glaciar de roca, además presentan rocas sobre el frente y en los márgenes laterales</p> 	<p>Rocas de considerable tamaño sobre la geoforma en la parte alta, media y baja, signos de erosión de las rocas</p> 
<p>Grado de erosión</p>	<p>Se observa fresca en el frente y márgenes laterales (una sola tonalidad bien definida)</p> 	<p>Se observan signos de frescura con signos de erosión (oscurecimiento de la superficie) en los márgenes laterales y el frente.</p>	<p>Geoforma erosionada evidenciada en la superficie, frente y márgenes laterales</p> 

			
Tonalidad	Color claro con la superficie barnizada un tanto más oscura, en el frente solo hay una tonalidad 	Color variante, en el frente hay más de una tonalidad 	Presentan muchas tonalidades en la superficie que evidencian erosión, el frente presenta un color bien definido y aspecto duro 

Continúa...

Indicador	Activo	Inactivo	Relicto
Fuente de alimentación	Muy cerca de una zona de aporte de detritos: Pie de laderas Circos En zonas de nieve estacional y nieve perenne 	Muy cerca de una zona de aporte de detritos: Pie de laderas Circos En zonas de nieve estacional 	Muy cerca de una zona de aporte de detritos: Pie de laderas Circos No hay evidencias claras de nieve en la zona 
Vegetación	En la mayoría de casos no hay vegetación sobre la superficie de la geoforma, pero podría existir en sus alrededores 	En la mayoría de casos no hay vegetación sobre la superficie de la geoforma, pero podría existir en sus alrededores 	Presencia de vegetación sobre la superficie de la geoforma y en sus alrededores 

Adaptado en base a Martini (2010); Pereyra (2010); Azocar (2013); Rangecroft et al. (2014) y Jones et al. (2018).

El Action Group Rock Glacier: Inventories and Kinematics (2019), propone que el mapeo de los GR se limita por las siguientes evidencias en su morfología: frente, márgenes laterales,

topografía de surcos y el límite superior, esto debido a que son detectables en el paisaje usando parámetros geomorfológicos. En la siguiente figura se muestra la digitalización de un GR y el diagrama de las partes.

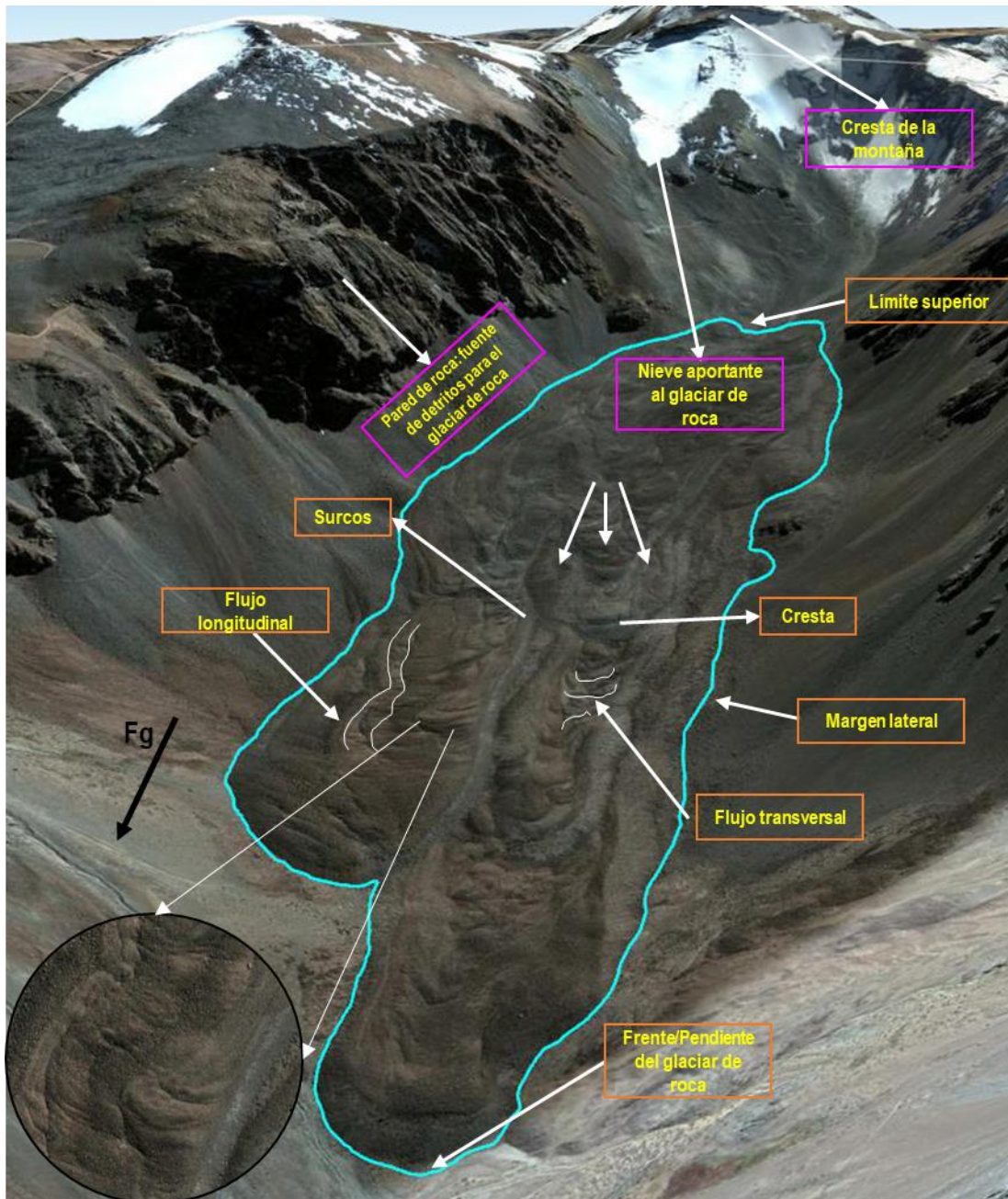


Figura 1. Esquema de un glaciar de roca.

La Figura 2 muestra un GR del tipo piedemonte y activo en la Cordillera Chila (803149.57 m E y 8292707.66 m N), los cuadros de color naranja representan las partes del glaciar de roca y los cuadros de color fucsia los fenómenos génesis de este glaciar de roca.

2.2.2 Dinámica de los glaciares de roca

Los GR son geoformas generadas por el arrastre de suelo congelado (IPA 2020), el mecanismo de movimiento más característico de los GR se debe a la deformación del hielo intersticial del hielo contenido en ellos (Haeberli et al. 2006), la deformación está en función a la tensión de cizallamiento aplicado o tasas de deformaciones plásticas a temperaturas casi constantes (Haeberli 1985) que está en función de la densidad, tamaño de fragmentos de detritos, forma, tamaño de los cristales de hielo, densidad del hielo (Barsch 1996), el grado de dinamismo de estas geoformas están en función a condiciones del clima, ubicación y topografía en la que se encuentran (Azocar 2013).

A. Distribución espacial de glaciares de roca

La distribución espacial de los GR han sido ampliamente usados para inferir la presencia y distribución de permafrost, los GR han sido utilizados como variable de respuesta junto a variables predictoras, como variables topoclimáticas (elevación, pendiente, orientación, temperatura media anual del aire, radiación) para modelar la distribución de permafrost como en los Andes secos de Argentina (Angillieri 2017), en los Andes semiáridos de Chile (Azocar 2013), los Alpes Franceses (Marcer et al. 2017), etc.

B. Características topoclimáticas de los glaciares de roca

Las características topoclimáticas de los glaciares de roca se refieren al área superficial, altitud, pendiente, orientación, potencial de incidencia de radiación solar (PISR) temperatura media anual del aire (TMAA) y precipitación para determinar las características topoclimáticas se usan los SIG, PR, herramientas de internet y SPG.

ii. Área superficial

Se refiere al área de la superficie de cada GR, permite realizar una caracterización del área superficial de los GR en el ámbito de estudio,

iii. Altitud

Se refiere a la altitud sobre el nivel del mar en la que se encuentran los GR, altitud del pie del GR (altitud mínima), altitud del centroide del GR (altitud media) y altitud de la cabeza del GR (altitud máxima).

iv. Pendiente

Se refiere a la relación que existe entre el largo del GR y el desnivel de cotas máxima y mínima predominante.

v. Orientación

La orientación es la dirección predominante de cada GR basado en ocho ejes cardinales N (337.5° - 22.5°), NE (22.5° - 67.5°), E (67.5° - 112.5°), SE (112.5° - 157.5°), S (157.5° - 202.5°), SO (202.5° - 247.5°), O (247.5° - 292.5°), NO (337.5° - 360°), esta variable representa el ajuste a un plano cartesiano de la dirección a la que apunta el plano en el que se encuentra el GR.

vi. Potencial de incidencia de radiación solar directa (PISR)

El PISR describe el proceso del calentamiento del suelo a causa de la exposición directa a la luz del sol, este parámetro es un controlador de la duración de la capa de nieve (Marcer et al. 2017; Haq y Baral 2019), debido a que sus valores representan la cantidad de energía entrante sobre una ubicación dada y esta se relaciona con el albedo de la capa de nieve. Se considera el PISR promedio de los valores de los píxeles que se encuentran en cada GR.

vii. Temperatura media anual del aire (TMAA)

Se refiere al promedio estadístico entre la temperatura máxima y mínima de un tiempo determinado (días, meses, años), para este caso se promedió los valores mínimos y máximos de TMAA para cada mes, de enero a diciembre, en tiempo de 30 años, luego de obtenido el promedio mensual de TMAA se promediaron todos los meses para obtener un promedio de TMAA de 30 años. Se considera la TMAA a la temperatura media de los valores de los píxeles que se encuentran en cada GR.

viii. Precipitación media anual

Se refiere a la precipitación media anual (mm) que cae en la superficie de la tierra, es decir, se considera el promedio de la precipitación media mensual de enero a diciembre durante 30 años, este promedio representa la precipitación media anual. Se considerará la precipitación media anual (mm) a la precipitación media de los valores de los píxeles que se encuentran en cada GR.

C. Actividad de los glaciares de roca

Como se indicó en el ítem 2.2.1 (A) los glaciares de roca se dividen según su actividad en: glaciares de roca activos, inactivos y fósiles y relictos, los dos primeros llamados también “intactos” y su importancia es que permite inferir el límite inferior del permafrost de montaña y estimar el volumen hídrico contenido en ellos, los relictos tienen una importancia en la estimación de la paleo-temperatura media anual del aire.

D. *Velocidad de los glaciares de roca*

La estimación de la velocidad de los GR se realiza usando técnicas de SIG y de PR, como DInSAR y Cosi-Corr. Se refiere a la velocidad con la que fluyen los GR pendiente abajo por la gravedad, es decir, al desplazamiento medida en la superficie en los X, Y y Z durante un periodo de tiempo.

2.2.3 Factores que influyen en la presencia de glaciares de roca de alta montaña

De manera general el permafrost de montaña generalmente está controlado por tres factores que controlan la temperatura del suelo a grandes altitudes: clima, topografía y las condiciones locales del terreno (Gruber y Haeberli 2009).



Figura 2. Factores que influyen en las condiciones de permafrost en zonas de montaña. Fuente, Azocar (2013).

Burger et al. (1999) indica que los factores que influyen en la formación de los GR como formas de permafrost son: los microclimas propicios para generar gelifracción (proceso de fragmentación de roca por la oscilación de la temperatura menor y mayor a 0°C) y cubiertas de nieve aislante, la combinación de factores geográficos como, la latitud que controla la cercanía o lejanía al Ecuador, mientras más lejos del Ecuador (zonas menos calientes), más condiciones de formarse GR, la altitud que permiten procesos periglaciares que sostengan la temperatura del suelo bajo 0°C, es decir, a mayores altitudes favorecen la presencia de temperaturas más frías, otro factor sería que los GR estarían ubicados en zonas de alta pendiente que permita el arrastre de escombros pendiente abajo producto de la fuerza de la gravedad, por último, estas geoformas se dan en cordilleras relativamente jóvenes cuyas características de intemperismo favorece la formación de escombros.

El reporte de Úbeda et al. (2014) en el sur del Perú en el que encontraron permafrost en el complejo volcánico Coropuna y Chachani instalando sensores de temperatura del suelo y aire,

sugiere que la presencia de permafrost en estas zonas está dominada por tres factores, la altitud > 5200 m (menores temperaturas), la orientación sur (menor insolación, es decir, menor exposición al sol, por tanto, zonas más frías) y el albedo (la cubierta detrítica que los protege, funcionan como un aislante de la temperatura ambiental y radiación solar).

2.2.4 Tecnologías de Información Geográfica (TIG)

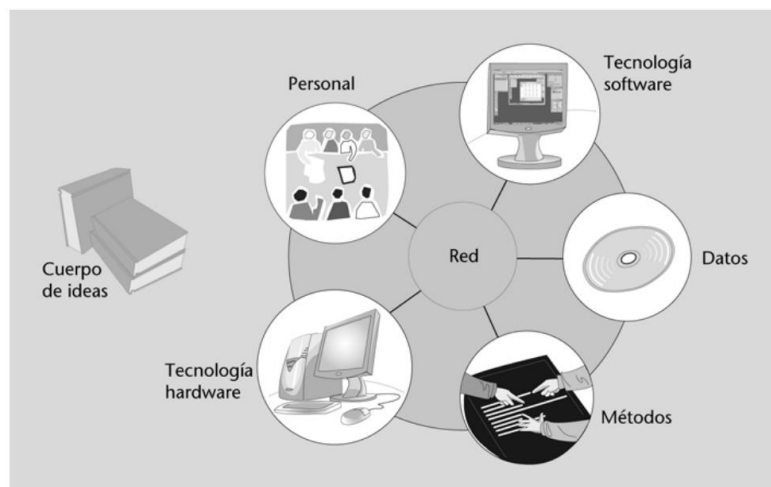
Son un conjunto de Tecnologías de Información y Comunicación (TIC) especializadas que ayudan en la recolección, manejo y análisis espaciotemporal de información alfanumérica relacionada con los recursos, características de los espacios naturales y aspectos socioeconómicos de una zona (Ehrensperger et al. 2007). Las TIG incluyen herramientas como los Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota o Teledetección, Sistemas de Posicionamiento Global y Herramientas de Internet.

A Sistema de Información Geográfica

Los SIG son un conjunto de programas, equipamientos, metodologías, datos y personas perfectamente integrados, de manera que hace posible la recolección de datos, almacenamiento, procesamiento y análisis de información georreferenciada, así como información derivada de su aplicación (Buzai 2013), por otro lado, Olaya (2014) define los SIG como un sistema que integra tecnología informática, personas e información geográfica y su principal función es capturar, analizar, almacenar, editar y representar datos georreferenciados.

i. Componentes de un SIG

Los componentes principales que componen un SIG son 5 (Olaya 2014) software, hardware,



datos métodos, personal, ideas y red (Rodríguez 2009).

Imagen 1. Componentes de un SIG. Fuente, Longley et al. (2005)

ii. Los SIG como herramienta de visualización

Los SIG permiten crear representaciones dentro del mismo entorno SIG, los usuarios deben tener la capacidad de que mediante la visualización sean capaces de convertir los datos en elementos visuales mediante el cartografiado (Olaya 2014).

✓ *Interpretación*

Cualquier tipo de forma puede ser representada de forma gráfica (Olaya 2014), una vez obtenida la imagen satelital el proceso por el que se extrae información contenida en la imagen, se puede visualizar, analizar y digitalizar para obtener nueva información, esto es el proceso de fotointerpretación (Longley et al. 2005).

✓ *Digitalización*

El tipo de digitalización usada en esta investigación es la digitalización manual en pantalla (heads-up), que se basa en las capacidades de un SIG para visualizar y dibujar elementos en la pantalla del ordenador, entidades y formas tales como puntos, líneas y rectas en representación vectorial (Olaya 2014), en imágenes satelitales o de los proyectos espaciales como Google Earth (Buzai 2013).

B. Teledetección o percepción remota

Es la disciplina que se surge y desarrolla en el siglo XX, en la que de acuerdo a su evolución hay dos etapas bien marcadas, la teledetección aérea y espacial (Angulo 2017). Se encarga del estudio de los fundamentos físicos de la observación remota de la superficie terrestre, y de los procedimientos que permiten obtener datos de la misma y su posterior tratamiento (Chuvieco 2008), es decir, cualquier procedimiento o técnica de adquisición de información sin tener contacto directo con ella (Angulo 2017), y en un sentido más estricto, la teledetección es entendida como una técnica que tiene por objeto la captura, tratamiento y análisis de imágenes digitales tomadas desde satélites artificiales que utilizan radiación electromagnética (Rees 2010).

i. El espectro electromagnético

La energía radiante se encuentra en función de la longitud de onda (λ), que es la distancia entre dos picos o dos senos de onda sucesivas y la frecuencia (F), que es el número de crestas o ciclos que pasan por un determinado punto en un segundo; además se relacionan con la velocidad de la

luz (Ardila León y Quintero Delgado 2015). El conjunto de longitudes de onda que puede adoptar la radiación es denominado espectro electromagnético (López 2014), este último es una representación de la energía en función de la longitud de onda y la frecuencia (Piedra 2016).

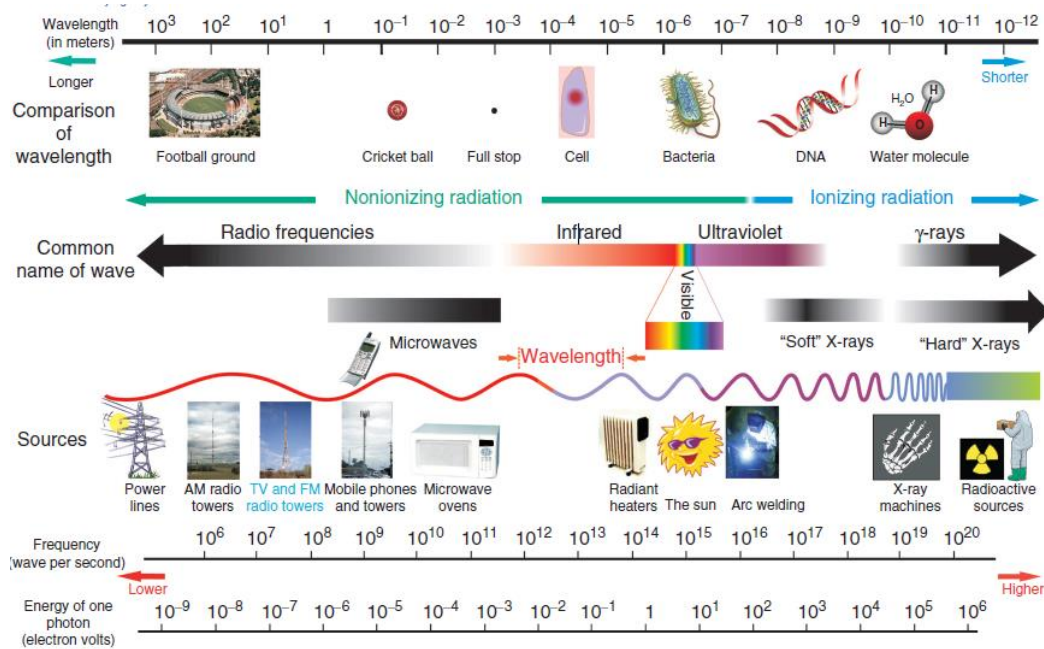


Imagen 2. Espectro Electromagnético. Fuente Wood y Roy (2016).

A continuación, se enumeran las principales bandas que son empleadas en PR.

1. Visible (0.4 - 0.7 μm).
2. Infrarrojo próximo (0.7 - 1.3 μm)
3. Infrarrojo medio (1.3 - 8.0 μm)
4. Infrarrojo lejano o térmico (8.0 - 14 μm)
5. Microondas (desde 1 μm)

ii. Resolución de los sensores remotos

Resolución espacial: Se interpreta como el tamaño del objeto más pequeño que puede ser distinguido en una imagen, el tamaño del píxel sobre el terreno.

✓ Resolución radiométrica

Es una determinación del nivel de la reflectancia que se puede representar: cuanto mayor sea la resolución radiométrica, más capaz el dispositivo será de detectar diferencias en la reflectancia

(Angulo 2017), es decir, mayor número de bits reservados para almacenar el valor de la reflectividad en un píxel (Perez y Muñoz 2006)

✓ *Resolución espectral*

Indica el número y anchura de bandas espectrales que puede discriminar el sensor, es decir, mientras mayor número de bandas tenga el sensor, mayor resolución espectral (Gareth Rees 2006).

✓ *Resolución temporal*

Se refiere al tiempo de paso del satélite sobre la vertical de un punto, en base a esto se determina el periodo de adquisición de imágenes de una misma zona. La resolución temporal está condicionada por el tipo de órbita, el ángulo de barrido y la velocidad del satélite (Chuvieco 1995; Gareth Rees 2006).

✓ *Resolución angular*

Se entiende como la capacidad que tiene un sensor para tomar imágenes oblicuas. Esto permite la generación de imágenes estereoscópicas y por tanto la reconstrucción del relieve (Perez y Muñoz 2006).

iv. Imágenes satelitales

La imagen representa una colección de los valores de energía procedentes de la observación, los cuales son detectados por el sensor y ordenados electrónicamente de forma sistemática en una matriz de números mediante un sistema de filas y columnas (Gaita Iparraguirre 2017). Asociado íntimamente al concepto de imagen, está el concepto de celda o píxel (proveniente del término en inglés picture element), que representa la mínima unidad de formación de esa matriz de datos, y es donde se “alberga” como número digital (ND) cada uno de los valores de intensidad de energía observados (Chuvieco Salinero 2008).

v. Imagen radar

Los sistemas de imágenes de microondas activas es el término que engloba este tipo de imágenes radar que (Rees 2010) se encuentran en las plataformas móviles radares, con la que se consiguen imágenes satelitales en dos dimensiones sobre la superficie del terreno (Guerrero y Hernandez 2017).

El radar acrónimo de Radio Detection And Ranging en inglés, es un sensor activo que funciona en las microondas (Rees 2010), región del espectro electromagnético comprendida entre 1 m y 1

cm de longitud de onda, por esta razón tiene la capacidad de trabajar en cualquier condición atmosférica (Chuvieco 1995), de día o noche (Guerrero y Hernandez 2017). En todos estos sistemas, la radiación de microondas es transmitida hacia la superficie de la Tierra desde una antena, y la radiación dispersada es recogida por la misma antena transmisora (Rees 2010), sin embargo, este proceso es mucho más amplio, un transmisor genera una señal en forma de pulsos discretos en el espectro electromagnético de las ondas radio, un duplexor envía esta señal a una antena, esta a su vez envía los pulsos a la superficie, éste refleja la señal en función a sus características y parte de la radiación reflejada es recibida por la antena, el duplexor separa la radiación que capta la antena y la envía al receptor, luego existe un procesamiento de la señal que la registra y digitaliza. En una última instancia el sistema control proporciona las imágenes registradas para su posterior tratamiento según su uso (Prieto Morín 2015).

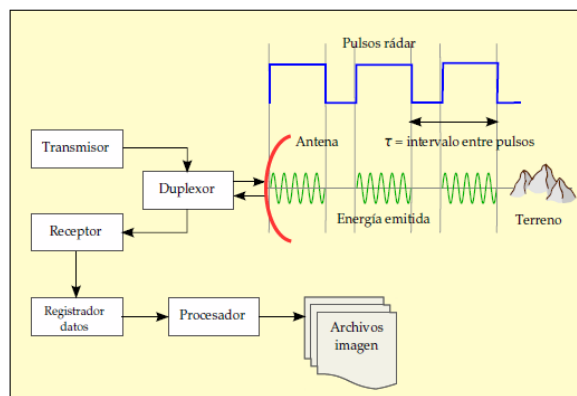


Figura 3. Esquematización del funcionamiento de un sistema RADAR. Fuente, Prieto Morín (2015).

El sistema registra la intensidad de la señal de retorno (radiación retrodispersada), que nos informa de la rugosidad de la pendiente y las propiedades eléctricas del objeto (en función de la temperatura, humedad, etc), y el retardo en tiempo entre la transmisión y recepción de cada pulso de energía (fase), el cual se relaciona con la distancia de los objetos observados (CCRS

Sensor	Frequency Band/ Polarization	Agency
Seasat	L/HH	NASA/JPL
ERS-1/2	C/VV	ESA
JERS-1	L/HH	JAXA
SIR-C/X-SAR	L/quad, C/quad, X/VV	NASA/JPL, DLR, ASI
Radarsat-1	C/HH	CSA
SRTM	C/HH + VV, X/VV	NASA/JPL, DLR, ASI
ENVISAT/ASAR	C/dual	ESA
ALOS/PalSAR	L/quad	JAXA
TerraSAR-X/TanDEM-X	X/quad	DLR/Astrium
Radarsat-2	C/quad	CSA
COSMOSkyMed-1/4	X/dual	ASI/MiD
RISAT-1	C/quad	ISRO
HJ-1C	S/VV	
Kompsat-5	X/dual	KARI
PAZ	X/quad	CDTI
ALOS-2	L/quad	JAXA
Sentinel-1a/1b	C/dual	ESA
Radarsat constellation-1/2/3	C/quad	CSA
SAOCOM-1/2	L/quad	CONAE/ASI

1995).

Figura 4. Lista de todas las misiones de Radar de Apertura Sintética en los últimos 40 años. Fuente, Emery y Camps (2017).

El recuadro rojo en la Figura 4 muestra la misión de radar de apertura sintética que se usará en la presente investigación, Sentinel 1, debido a su libre disponibilidad (imágenes gratis), por su cobertura global (disponible para zonas de alta montaña), resolución espacial (2.5 m en azimut y 14 m en rango), longitud de onda (C) y ángulo de observación del satélite sensible a las deformaciones (20° - 30°), alta resolución temporal (revisita de 6 días), por último, a la fecha se encuentra vigente su adquisición.

Como se mencionó, las longitudes de onda, bandas y frecuencias en las que opera estos radares están representados por la siguiente tabla.

Tabla 3

Principales bandas y longitud de onda que utilizan los satélites Radar

Banda	Frecuencia (GHz)	Longitud de onda (cm)
Ka	40 - 25	0.75 - 1.2
Ku	17.6 - 12	1.7 - 2.5
X	12.0 - 7.5	2.5 - 4
C	7 - 3.75	4 - 8
S	3.75 - 2	8 - 15
L	2 - 1	15 - 30
P	0.5 - 0.25	60 - 120

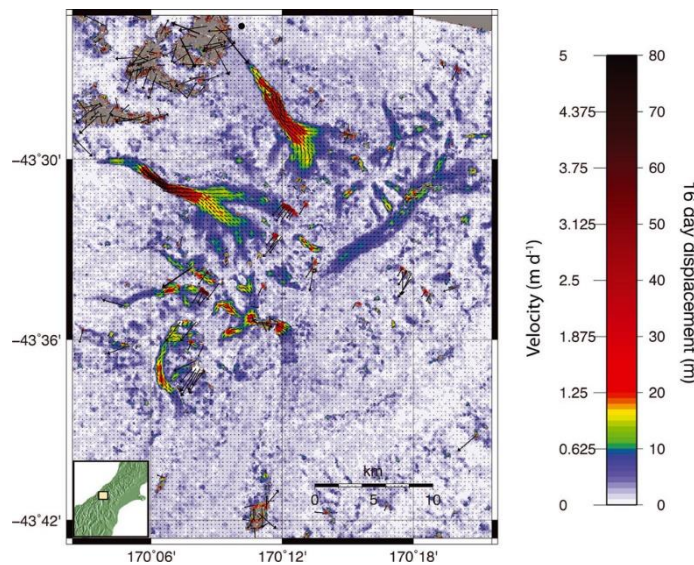
Banda "C" usada para el estudio de glaciares limpios y de roca. Fuente: Prieto (2015)

Las principales ventajas de trabajar con imágenes del tipo radar son que se puede usar indistintamente de las condiciones atmosféricas (por ejemplo, cielo nublado, neblina, polvo, granizo o humo), el ruido es mucho menor en comparación con las imágenes óptica que sí son muy dependientes de las condiciones atmosféricas, esto se debe a que la longitud de onda es más larga y puede penetrar con mayor facilidad, además, con las imágenes radar se puede trabajar tanto en el día como en la noche.

Para el presente estudio se usará las imágenes radar del sensor Sentinel-1, debido a lo mencionado en el párrafo anterior y que las imágenes de este sensor de banda C se usan para estudio de criósfera y su libre disponibilidad <https://scihub.copernicus.eu/dhus/#/home>.

vi. Cosi-Corr

La técnica denominada Registro de Imágenes y Correlación de Detección Óptica (Cosi-Corr), fue desarrollada por el Instituto Tecnológico de California (ITC), y sus desarrolladores son François Ayoub, Sébastien Leprince, y Jean-Philippe Avouac (Ayoub et al. 2007), es una técnica de correlación cruzada óptica de imagen, que es capaz de detectar los cambios de subpíxeles (Necsoiu et al. 2016), esta técnica ha sido empleada para determinar desplazamiento de fallas sísmicas, movimiento del hielo de los glaciares, deslizamientos, migraciones de dunas, y movimiento de glaciares de roca (Necsoiu et al. 2016; Türk 2017), el procedimiento se realiza mediante una extensión del software ENVI, dicha extensión puede ser descargada libremente desde la plataforma del (ITC), una de las ventajas es que el procedimiento no requiere



información externa como mediciones GPS de puntos de control en tierra, se basa únicamente en el conocimiento de la topografía y datos auxiliares proporcionados por la plataforma de observación (posiciones, velocidades, variaciones y ángulos de observación de los sensores), (Leprince et al. 2007). Los movimientos superficiales se determinan mediante la ortorrectificación y el corregistro de un par de imágenes ópticas mediante el uso del software Cosi-Corr (Türk 2017).

Figura 5. Producto Cosi-Corr. Muestra el desplazamiento en “m” en 16 días de glaciares en las Islas del Sur de Nueva Zelanda, Herman et al. (2011).

Las imágenes satelitales utilizadas en esta investigación para realizar la correlación de imágenes ópticas son las LANDSAT 8 de la banda 8 (pancromática, 15 m de resolución espacial), esto debido a que ha mostrado muy buenos resultados para estudios a niveles regionales como en Herman et al. (2011) y locales como en Sam et al. (2015) y Sattar et al. (2019), además, su relativa alta resolución espacial de 15 m de la banda 8, frente a las otras bandas mayor a 30 m, su actual adquisición de imágenes y su libre disponibilidad para descarga.

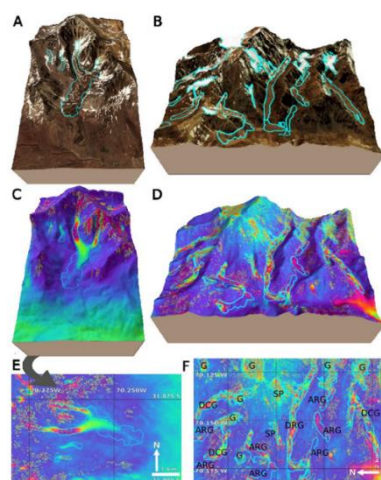
vii. Técnica de Interferometría Diferencial (DInSAR)

Es una potente técnica de PR empleada para monitorizar deformaciones en la superficie terrestre. El análisis de la fase diferencial contenida en los interferogramas, resultantes de la combinación de dos imágenes SAR adquiridas en fechas distintas, ha demostrado su potencial para el estudio de fenómenos geofísicos, tales como terremotos o erupciones volcánicas (Hooper et al. 2004).

Esta técnica permite hacer una eliminación de las contribuciones topográficas y orbitales para poder revelar movimientos de tierra a lo largo de la línea de visión entre el radar y el objetivo, cualquier desplazamiento de una parte de la escena aparece directamente como un cambio de fase con respecto al resto de la escena (Peñaloza Molina 2018), es decir, los softwares usados para procesar esta técnica extraen cuantitativamente el desplazamiento superficial que dio entre la diferencia en tiempo de las imágenes procesadas. Matemáticamente, el radar mide el cambio escalar en la distancia del satélite a la tierra, que es igual a la componente del vector de desplazamiento o en la dirección del eje del radar (Rosen et al. 2000). Según Prieto, (2015) para poder calcular un interferograma de radar diferencial se puede hacer uso de dos técnicas, usando varias imágenes (stacking) o haciendo uso de un modelo digital de elevación del terreno para que la topografía sea sustraída, resultando entonces el interferograma diferencial, que contendrá solo los desplazamientos del terreno (Peñaloza Molina 2018).

$$\phi d = -4\pi Dp/\lambda \quad \text{Ecuación (3)}$$

Debido al carácter cíclico de la fase, la fase interferométrica se encuentra comprendido entre,



$-\pi$ y $+\pi$, o entre, 0 y 2π , es decir, la fase interferométrica tiene un módulo de 2π , esta última se conoce como la fase enrollada (Prieto Morín 2015). La Ecuación 3, se emplea para desenrollar la fase, y como consecuencia se obtiene la distancia entre el objetivo y el sensor en la línea de señal del satélite (LOS, en adelante deformación en la vertical), es decir, de la diferencia de la fase de las imágenes SAR esclava y maestra se obtiene la fase interferométrica, y para obtener las deformaciones se aplica la Ecuación 3 a la fase para obtener las distancias medidas en longitud.

Figura 6. Interferometría diferencial (DInSAR). Fuente, Villaroel et al. (2018).

La Figura 6 muestra un interferograma diferencial (DInSAR) de movimientos de glaciares de roca en las Montañas de los Andes Seco en Argentina, los glaciares de roca tienen un desplazamiento que va desde los 2.2 cm-170 cm/año, en “a” y “b” se visualiza los límites de los GR en color cyan, en “c” y “d” se visualiza el interferograma desenrollada que va en tonalidades de violeta (subsistencia, el objetivo se aleja del satélite) al rojo (levantamiento, el objetivo se acerca al satélite) que muestran la deformación del suelo a medida que cambia los colores, en “e” y “f” se muestra lo anterior en vista en planta.

La interferometría diferencial DInSAR permite determinar cuantitativamente el desplazamiento en una gama de colores (espectro), esto permite determinar el desplazamiento vertical de las superficies de los glaciares de roca.

C. Sistema de Posicionamiento Global (SPG)

Consisten en un conjunto de satélites, control y usuarios (Grunwald 2006) que permiten determinar la ubicación de puntos en la superficie terrestre (Ehrensperger et al. 2007) mediante un receptor del usuario que registra las señales de radio emitidas por el satélite, estas se procesan para obtener la distancia desde el satélite, los satélites definen una posición única en el espacio en dos y tres dimensiones.

D. Herramientas de Internet

Brindan nuevas formas de visualizar y compartir información geoespacial en tiempo real, ejemplo de esto es Google Earth-Pro, Bing satellite (Ehrensperger et al. 2007).

i. Google Earth-Pro

Es un programa que permite viajar por todo el planeta a través de imágenes satelitales, planos, mapas y topografías en 3D, el programa fue creado bajo el nombre de Earth Viewer 3D por la

compañía Keyhole Inc (2001), financiada por la Agencia Central de Inteligencia, en el 2004 la compañía fue comprada por Google (Bonett 2017).

Tanto Google Earth-Pro como Bing satellite se usó en la identificación de la actividad de los glaciares de roca es de mucha utilidad por la capacidad de observar las geoformas en tres dimensiones, 3D.

2.3 Marco Conceptual

2.3.1 Cambio climático y el impacto en los glaciares de roca

Los GR son sensibles al cambio climático, pero estas al ser formas de permafrost no son tan sensibles como los glaciares, debido a que el manto de detritos produce una relación de inercia térmica (Haeberli et al. 2006). Sin embargo, como los glaciares de roca existen a temperaturas menores a 0°C, un ligero aumento de la temperatura inicia la transferencia de calor en el suelo y esto daría paso a un proceso de fusión del hielo en estos cuerpos de permafrost cuya temperatura aumentó a $0.31 \pm 0.1^\circ\text{C}/\text{década}$ (Oliva y Fritz 2018), esto podría traer problemas de desestabilización de laderas, flujo de escombros, derrumbes, etc (Barsch 1996), también como menciona Drewes et al. (2018), los flujos de movimiento de los GR van desde 10 cm a 1 m por año y bajo un aumento de temperatura las velocidades de los movimientos podrían ser más altos (Wirz et al. 2016), los flujos de movimiento podrían depender de los materiales finos (arena, limo, arcilla) y gruesos (detritos >1 cm), contenido de hielo, pendiente en la que se encuentra, etc, sin embargo, un estudio a detalle de las condiciones topográficas, térmicas y otras variables, aún no ha sido estudiado. A la actualidad, en el mundo se han inventariado 73000 GR, de los cuales 39500 son intactos y 33500 son relictos, estos inventarios se están elaborando alrededor del mundo y se están uniformizando criterios para realizar su estudio, por lo que, un análisis del impacto del cambio climático en los GR se está empezando a realizar.

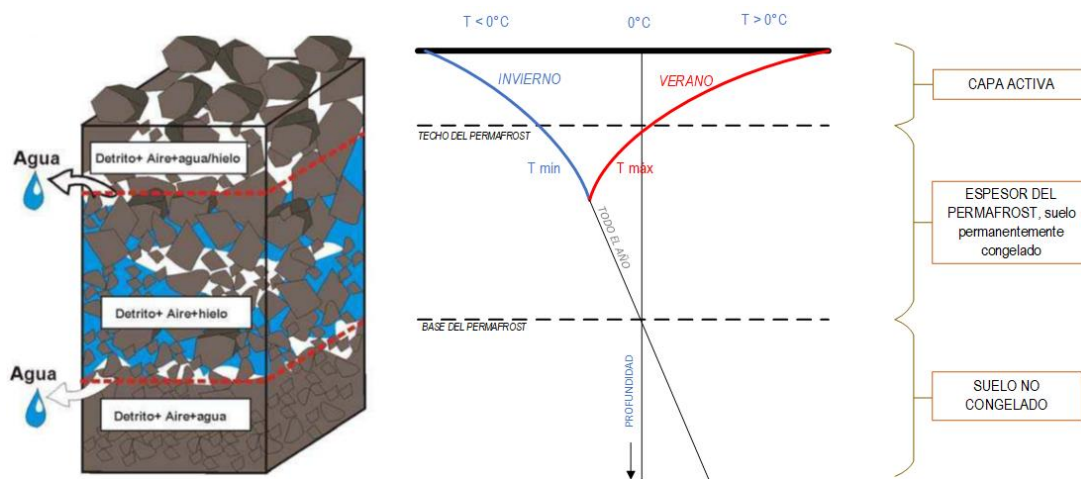
2.3.2 El permafrost

Un componente importante de la criósfera es el permafrost (Ying y Cheng-hai 2017), se distribuye en altas latitudes y zonas de alta montaña (Haeberli 1975; Trombotto 2000; Oliva y Fritz 2018) en Sudamérica esta se encuentra en la Cordillera de los Andes (Hoelzle, Mittaz y Etzelm 2001) y condiciona los ecosistemas terrestres (Oliva y Fritz 2018). El permafrost se define térmicamente como una zona de la litósfera (suelo o roca) que permanece por debajo de los 0°C por dos años consecutivos o más, incluye hielo y materia orgánica (Haeberli 1975; IPA 1998; Gruber 2005), este último en altas latitudes. El permafrost puede ser

una reserva de agua sólida, a medida que el suelo congelado se desarrolla, va captando agua, se almacena en forma de hielo y durante el verano es liberada, sobre todo la capa activa (Ruiz 2013).

En la Cordillera de los Andes, la creciente presión de las actividades mineras (Azócar y Brenning 2008) y las consecuencias del cambio climático están aumentando la importancia del permafrost de montaña en la estabilidad de taludes, riesgos de origen natural (Lambiel et al. 2010), influencia en el sistema hidrológico (Haeberli 2013) e hidrogeológico como potencial recarga de acuíferos proglaciares y reserva de agua sólida (Ruiz 2013), además que aún no se sabe su influencia en el ciclo del carbono (Úbeda et al. 2014).

Por lo expuesto, la cartografía del permafrost tiene una relevancia fundamental para abordar los



problemas de recursos hídricos y los riesgos asociados a estos (Rangecroft et al. 2014).

Figura 7. Diagrama de una parte de la corteza superior con permafrost de montaña y los materiales que lo componen. Fuente, modificado en base a Ruiz (2013) y Scott y Mock (2013).

En la figura anterior se observan las 3 partes principales del permafrost, la capa activa, el cuerpo del permafrost y la base de éste. La capa activa está formada por una cubierta de detritos, hielo y aire que lo separa de la atmósfera, generalmente la temperatura en esta zona coincide con la isoterma anual de 0°C (Ruiz 2013). La parte central, cuerpo del permafrost, permanece congelado durante todo el año y no depende de las fluctuaciones estacionales.

2.3.3 Formas de permafrost

En los sistemas periglaciares existen formas de evidencia de permafrost de montaña, a saber, los GR y protalus rampart que son llamados también glaciares de roca embrionarios (Barsch 1996)

o glaciares de roca en formación, estos se forman por el resultado del arrastre de hielo (Colucci et al. 2016) en laderas laterales de las montañas y se acumulan en el frente (Trombotto 2000).

A. Permafrost y el cambio climático

La criósfera ha experimentado un retroceso en el mundo, evidenciado en el retroceso de masa glaciar en todo el mundo de -335 ± 144 Gt/y desde el 2006 al 2016 (Zemp et al. 2019), mientras que en Sur América el impacto del cambio climático se ha observado a lo largo de todos los Andes de América del Sur con el retroceso de los glaciares, Colombia perdió 50% del área glaciar, Bolivia cerca de 30%, Perú 43%, mientras que Chile y Argentina tienen valores similares de pérdida de área glaciar. sobre el permafrost sabemos su probable extensión en el mundo 3.6 – 5.2 millones de km^2 para zonas de alta montaña (IPCC 2019). El permafrost es un componente estructural del suelo en regiones frías y está en función de las condiciones climáticas (Burn 2013), con el cambio climático, los cambios de temperatura del aire en la superficie de la tierra están provocando el aumento de la temperatura del permafrost (Oliva y Fritz 2018; Ding et al. 2019) a una razón de $0.31\pm 0.10^\circ\text{C}/\text{década}$ y la profundización de la capa activa (Burn 2013; Lafrenière y Lamoureux 2019). Diversos estudios muestran que los efectos del cambio climático en los glaciares y el permafrost son distintos, aunque ambas tienen la misma tendencia a su degradación, mientras que el volumen de los glaciares de las cadenas montañosas disminuye rápidamente, el permafrost reacciona de una manera mucho más lenta (Kääb et al. 2005; Kanevskiy et al. 2013), la tasa de pérdida probable del permafrost frente a los glaciares guarda una relación de 1/10 o 1/100 (Haeberli et al. 2016).

La degradación del permafrost tiene un impacto en los medios de vida humanos, efectos sobre la dinámica natural de los ecosistemas terrestres, al afectar los procesos geomorfológicos, dinámica hidrológica de los ríos y lagos, así como la alteración de la biodiversidad en muchas áreas (Oliva y Fritz 2018), además de estar relacionado con riesgos de origen natural (Haeberli y Beniston 1998; Vuille et al. 2008; Haeberli et al. 2015). Por lo tanto, conocer cuál es el impacto al cambio climático (en la forma de aumento de temperatura del aire) en el permafrost de montaña durante el siglo XXI es importante para la planificación y gestión de recursos (Burn 2013), considerando que en el mundo cerca del 10% de la población mundial vive en zonas de altas montañas (IPCC 2019) y en el Perú, cerca del 10% de la población total vive en áreas de influencia de las 20 cordilleras peruanas (INAIGEM 2018).

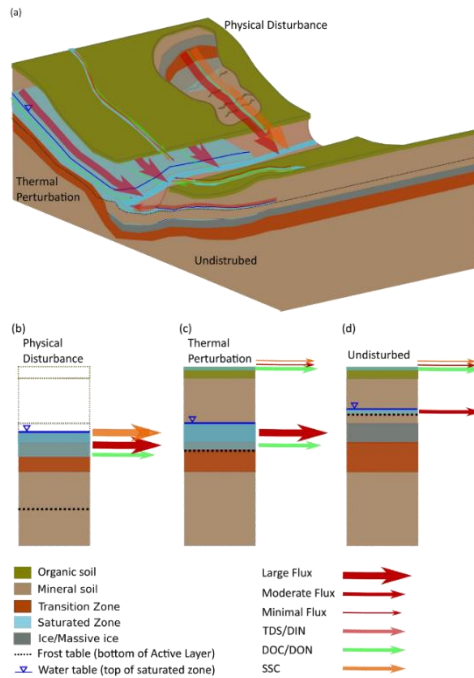


Figura 8. Diagrama conceptual de la degradación del permafrost. Fuente, Lafrenière y Lamoureux (2019).

El diagrama anterior muestra las rutas hidrológicas primarias y las transferencias de masa relativa a la degradación del permafrost, por efecto de la perturbación térmica y física, en el que se muestran escenarios de afectación de la zona de permafrost, existe una transición de la estructura del permafrost, pues con perturbación física y térmica se espera que en el futuro esté cubierta por una cubierta vegetal (significa que la temperatura aumentó) y sean propensos a generarse procesos de desestabilización de laderas debido a la pérdida de fuerza de cohesión al disminuir el contenido de hielo en la estructura del permafrost.

2.3.3 Tecnologías de Información Geográfica

Las tecnologías de información geográfica (TIG) incluyen todo tipo de sistemas informáticos como software-hardware y un conjunto de medios tecnológicos que permiten obtener, procesar, almacenar, representar y analizar información georreferenciada de la realidad.

Las TIG se encuentran en pleno desarrollo dado el gran avance en sistemas computacionales y el desarrollo geoespacial; se basan principalmente en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica, Percepción Remota, Sistema de Posicionamiento Global e Internet (Ehrensperger et al. 2007), y actualmente son indispensables para el análisis de espacios

territoriales en diversas disciplinas asociadas principalmente -para los fines de la presente investigación- al campo de ciencias de la tierra. (Aldalur 2011).

2.4 Definición de Términos Básicos

2.4.1 Criósfera

Es el término colectivo para los componentes del sistema de la Tierra que contienen una fracción sustancial de agua en el estado congelado, que comprende nieve, río y lago de hielo, el hielo marino, placas de hielo, plataformas de hielo, glaciares y capas de hielo, y suelo helado (Ding et al. 2019).

2.4.2 Ambiente periglacial:

Es un ambiente frío y criogénico, pero no de origen glaciar, por arriba del límite superior del bosque si éste existe, el límite del ambiente no periglacial está claramente definido por los siguientes indicadores: Ocurrencia de permafrost, dominio del proceso de congelamiento pero con ciclos de congelamiento y descongelamiento que afectan las rocas y a la parte superior del suelo, además de la presencia de soliflucción/geliflucción y otros procesos criogénicos (Trombotto et al. 2014).

2.4.3 Glaciares libres de detritos

También llamados limpios o blancos son una masa perenne de hielo, que se origina en la superficie terrestre por la recristalización de la nieve u otras formas de precipitación sólida y mostrando evidencias de flujo pasado o presente (UNESCO 2011), según el IPCC (2001), un glaciar es una masa de hielo terrestre que fluye pendiente abajo (por deformación de su estructura interna y por el deslizamiento en su base), encerrado por los elementos topográficos que lo rodean, como las laderas de un valle o las cumbres adyacentes.

2.4.4 Glaciar cubierto por detritos

Glaciares cubiertos de escombros parcial o total por restos adyacentes (detritos y/o fragmentos de rocas) erosionados en su área terminal (INAIGEM 2017). Según la UNESCO, un glaciar cubierto de detritos es un glaciar que soporta una capa de roca, polvo o cenizas en la mayor parte de la superficie de su zona de ablación, en la zona de acumulación, los residuos depositados son enterrados por nevadas posteriores, pero en la zona de ablación, los residuos permanecen en la superficie y los residuos de la zona se añaden a la capa de la superficie desde abajo, ya que el hielo se aleja (UNESCO 2011).

2.4.5 Permafrost de montaña

Es el Permafrost existente en zonas de alta montaña en latitudes altas, medias o bajas. El Permafrost de montaña puede presentar cierto grado de zonificación altitudinal, y en los andes se les puede denominar permafrost andino (Trombotto et al. 2014)

2.4.6 Modelo de Elevación Digital (DEM)

Un modelo digital de elevación es una estructura numérica de datos que representan la distribución espacial de la altitud de la superficie del terreno, siendo el valor de altitud z la unidad básica de información del DEM, además de que este valor es acompañado por los valores correspondientes de x y y expresados en una proyección geográfica para una precisa referenciación espacial (Felicísimo 1992).

III. HIPÓTESIS Y VARIABLES

3.1 Hipótesis

3.1.1 Hipótesis General

La aplicación de las Tecnologías de Información Geográfica permite la descripción y el análisis adecuado de la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú.

3.1.2 Hipótesis Específica

- La aplicación de las TIG permite determinar correctamente la distribución espacial, caracterización topoclimática, actividad y velocidad de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú.
- La combinación de variables topoclimáticas explican la presencia de glaciares rocosos activos en los Andes Tropicales del Perú.

3.2 Operacionalización de variables

3.1.1 Definición conceptual de variables

A. Dinámica de los glaciares rocosos.

Los GR son geoformas generadas por el arrastre de suelo congelado (IPA 2020) constituido por una mezcla de hielo y materiales no consolidados moviéndose pendiente abajo (Haeberli et al. 2006), por lo que, la dinámica de los GR está en función de las condiciones del clima,

ubicación y topografía en la que se encuentran (Azocar 2013), considerando como dimensiones la distribución espacial, características topoclimáticas y velocidad de los GR.

B. Tecnologías de información geográfica.

Son un conjunto de tecnologías especializadas que ayudan en la recolección, manejo y análisis espaciotemporal de información alfanumérica relacionada con los recursos, características de los espacios naturales de una zona (Ehrensperger et al. 2007).

3.2.1 Definición operacional de la variable

Tabla 4

Operacionalización de variables

Variable	Definición conceptual	Definición operacional	Dimensiones	Indicadores	Índices	Técnica	Instrumento
V.D. Dinámica de los glaciares de roca	Los GR son geofomas generadas por el arrastre de suelo congelado (IPA 2020). Por lo tanto, la dinámica de los glaciares de roca está en función de las condiciones del clima, ubicación y topografía en la que se encuentran (Azocar 2013).	La dinámica de los glaciares de roca que están en función del clima, la ubicación y la topografía, se expresará bajo la forma de la distribución espacial y velocidad de los glaciares de roca.	D1. Distribución espacial de los glaciares de roca	Coordenadas UTM y geográficas del centroide de los glaciares de roca	m, ° sexagesimales	Observación/ exploración visual	Ficha de recolección de datos.
			D2. Caracterización topoclimática de los glaciares de roca	Altitud mínima, máxima y promedio de los glaciares de roca	msnm		
				Área de los glaciares de roca	m ²		
				Orientación de los glaciares de roca	N, S, E, W		
D3 Velocidad de los glaciares de roca	Pendiente de los glaciares de roca	°					
	Actividad de los glaciares de roca	Tipo de actividad					
V.I. Tecnologías de Información Geográfica	Son un conjunto de tecnologías especializadas que ayudan en la recolección, manejo y análisis espaciotemporal de información alfanumérica relacionada con los recursos, características de los espacios naturales de una zona (Ehrensperger et al. 2007)	Las tecnologías de información geográfica se usarán como una herramienta para analizar las imágenes satelitales usadas para estudiar la dinámica de glaciares rocosos.	D1 Imágenes satelitales	Resolución espacial	m		

IV. DISEÑO METODOLÓGICO

4.1 Tipo y diseño de investigación

Tipo:

Descriptivo - explicativo:

Según el alcance el estudio es del tipo descriptivo, ya que, según Álvarez (2020) y Sampieri (2010), en este tipo de estudio se describen los fenómenos, cómo son y se manifiestan, por lo tanto, en el presente estudio se pretende describir las características de la dinámica de los GR aplicando las Tecnologías de Información Geográficas.

Por otro lado, también es del tipo explicativa, ya que según Dominguez et al. (2009) y Sampieri et al. (2014) este tipo de estudio indaga sobre posibles causas de los fenómenos que se estudian, por lo tanto, en el presente estudio se pretende determinar cuáles son las variables topoclimáticas que controlan la presencia de los GR en un clima moderno.

Diseño de investigación:

La presente investigación es del tipo no experimental-transeccional, ya que como indica Álvarez (2020) y Sampieri et al. (2014), -no experimental- en este tipo de estudio las variables no se manipulan porque ya ha sucedido y las inferencias entre las variables se realizan sin que haya una influencia directa, por lo tanto, en este estudio se no se manipulan las variables, pues se pretende describir las características de los GR, por otro lado, es transeccional, pues no se pretende realizar un estudio de la evolución de los GR, sino se pretende realizar la caracterización de los GR en un momento dado 2015-2019 (en base a la información usada en una escala nacional).

4.2 Método de Investigación

4.2.1 Procedimiento para fotointerpretar y digitalizar los glaciares de roca

La técnica de fotointerpretar (que consiste en visualizar la imagen satelital y extraer la información contenida en ella) y digitalizar (que se realiza de forma manual en la pantalla, se basa en la capacidad de los SIG en visualizar y dibujar elementos en la imagen, en este caso, polígonos) los GR (SIG) permitirán conocer el número de GR que existen en las Cordilleras Tropicales Peruanas, cada GR identificado será digitalizado por un shapefile

del tipo polígono, además, estos shapefiles tendrán atributos como: cordillera, latitud, longitud, altitud, orientación, área superficial, pendiente, PISR, TMAA, precipitación, además, su actividad y velocidad (superficial y vertical).

Tabla 5

Atributos específicos de los glaciares de roca

Cordillera	Latitud	Longitud	Altitud	Orientación	Pendiente	Área	PISR	TMAA	Precipitación	Actividad	Vel. Horizontal y vertical
------------	---------	----------	---------	-------------	-----------	------	------	------	---------------	-----------	----------------------------

Para lograr esto, se visualiza sobre las imágenes satelitales de Bing Satellite, Google Earth Pro en un software QGIS, luego se comienza la búsqueda de los GR en el ámbito de las 20 cordilleras, para esto nos valemos de los indicadores geomorfológicos de los GR como se menciona en la Tabla 2, una vez identificado los GR se comienza a realizar el dibujo de manera manual sobre los límites de los GR.

A. Distribución espacial de los glaciares de roca

Determinar la distribución espacial de los GR como formas de permafrost significa ubicar espacialmente en un sistema de coordenadas el centroide los GR en un área de estudio, en este caso, las 20 cordilleras peruanas.

Para este procedimiento se usa la herramienta ArcToolbox/Data Management Tools/Features/Feature To Point del ArcMap y se extrae las coordenadas del centroide de cada GR, luego se realiza una selección por ubicación geográfica en ArcGIS y se seleccionan el total de GR que se encuentran en cada una de las cordilleras peruanas.

4.2.2 Caracterización topoclimática y actividad de los glaciares de roca

Determinar la clasificación topoclimática, es decir, área superficial, altitud, pendiente, orientación, PISR, TMAA, precipitación, PISR y actividad de los GR.

A. Superficie

Se determina el área de los GR usando la herramienta Calculate Geometry de la tabla de atributos, vale mencionar que el sistema de proyección de coordenadas debe ser el UTM.

B. Altitud

Para extraer la altitud máxima, mínima y media de los GR se usa la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table del ArcToolbox y el input de entrada es un Modelo Digital de Elevación del Terreno (DEM) de 12.5 m de resolución espacial del sensor Alos Palsar (en adelante para cualquier parámetro que requiera de una DEM se usará el Alos Palsar), se usa este sensor debido a que tiene una muy buena resolución espacial para los fines de la investigación y además es de descarga libre, se encuentran disponibles en <https://search.asf.alaska.edu/#/>.

En resumen, una vez descargado el DEM los Palsar este se abre en ArcGIS, luego se ingresa los polígonos de GR, se usa la herramienta Zonal Statistics, y se extraen los valores mínimos, máximo y media para cada GR, estos valores representan el promedio de los píxeles que se encuentran dentro de cada GR, esto para el caso de la media, en el caso de la mínima y máxima, se escogen los menores y mayores valores de los píxeles que se encuentran en cada polígono de GR.

C. Orientación

La orientación promedio de los GR se obtienen de un DEM haciendo uso de la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst/Surface/Aspect del ArcToolbox, con la herramienta anterior se puede obtener un ráster de orientaciones, para extraer el valor promedio de la orientación de los glaciares de roca se usa la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table del ArcToolbox.

D. Pendiente

Para determinar la pendiente predominante de los GR se usa un DEM haciendo uso de la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst/Surface/Slope; para extraer el valor medio de la pendiente predominante de cada GR se usa la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table del ArcToolbox.

E. Potencial de incidencia de radiación solar directa

El potencial de incidencia de radiación solar directa se calcula usando un DEM con la herramienta de SAGA, el cálculo se asume en condiciones de cielo despejado, 70% de transmitancia atmosférica, no se usó el 100% de transmitancia debido a que en los Andes los cielos están parcialmente nublado en época seca de mayo a octubre (época en donde ocurre la mayor incidencia de radiación solar) para extraer el valor medio del PISR de cada GR se usa la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table del ArcToolbox.

En resumen, una vez descargado el DEM los Páscar este se abre en SAGA, luego se ingresa los polígonos de GR, se usa la herramienta Area Solar Radiation de SAGA, se coloca los valores de transmitancia y se calcula el PISR para las cordilleras peruanas, luego se ingresan los polígonos de los GR en ArcGIS en este mismo software se introduce el ráster de PISR y se extraen los valores medios para cada GR, estos valores representan el promedio de los píxeles que se encuentran dentro de cada GR. G. Temperatura media anual del aire (TMAA)

Para determinar la temperatura media anual del aire de los GR, se usa los datos de temperatura de WorldClim que es un conjunto de capas climáticas globales de resolución espacial de 1 km², esto es un producto que tiene información climática global desde 1970-2000 mensualizado. Estos rústers mensualizados se promedian primero por año, luego por 30 años, así se puede obtener la temperatura media anual del aire para un periodo de 30 años, esta álgebra de mapas se realiza usando la herramienta Ráster Calculator del ArcToolbox, luego para extraer el valor promedio del ráster para cada GR se usa la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table del ArcToolbox.

Aquí usamos la data de temperatura de WorldClim 2, esta data muestra una muy buena correlación entre la información colectada y los registrados en estaciones meteorológicas convencionales, con un $R^2 > 97\%$ (Anderson-Teixeira et al. 2015).

F. Precipitación media anual de los glaciares de roca

Para determinar la precipitación media anual de los GR, se usa los datos de precipitación de WorldClim que es un conjunto de capas climáticas globales de resolución espacial de 1 km², esto es un producto que tiene información climática global desde 1970-2000

mensualizado. Estos rásters mensualizados se promedian primero por año, luego por 30 años, así se puede obtener la precipitación media para un periodo de 30 años, esta álgebra de mapas se realiza usando la herramienta Ráster Calculator del ArcToolbox, luego para extraer el valor promedio del ráster para cada GR se usa la herramienta ArcToolbox/Spatial Analyst Tools/Zonal/Zonal Statistics as Table del ArcToolbox.

Aquí usamos la data de precipitación mensual de WorldClim 2, esta data muestra una muy buena correlación entre la información colectada y los registrados en estaciones meteorológicas convencionales, con un $R^2 > 97\%$ (Anderson-Teixeira et al. 2015).

G. Actividad de los glaciares de roca

Para determinar de manera visual la clasificación de los GR en base a su actividad (activos, inactivos y fósiles o relictos) se usará la modificación de los de los atributos geomorfológicos y ambientales en las imágenes ópticas de alta resolución espacial como, textura superficial, color, cuerpo, pendiente frontal, presencia de vegetación ubicación. La modificación de los atributos de la Tabla 2, se realizó en base a la observación de los atributos de los GR de nuestras cordilleras, además de las sugerencias realizadas por expertos del Action Group Rock Glacier del IPA.

Vale indicar que, para determinar la presencia de hielo en un GR activo, se realizó de manera intuitiva el análisis gráfico de los resultados obtenidos del procesamiento de las técnicas geofísicas (refracción sísmica y sondaje vertical eléctrico) en el GR San Félix en la cordillera Chila, los resultados de la prospección geofísica se muestran en los anexos.

La refracción sísmica es una técnica geofísica basadas en la velocidad de propagación de las ondas P, haciendo uso de estas técnicas se puede inferir presencia de hielo en la estructura interna de la geoforma de estudio basado en los valores de la velocidad de las ondas P, por otro lado, la técnica de sondaje vertical eléctrico se basa en la resistencia del paso de corriente eléctrica que ofrece el sustrato (resistividad eléctrica del suelo), esta técnica permite inferir presencia de hielo en la estructura interna del GR a partir del análisis de los valores de la gráfica SEV. La refracción sísmica se aplicó usando un sismógrafo digital de 24 geófonos marca PASI modelo GEA RM1 (en los anexos se muestran la descripción del equipo usado). El sondaje vertical eléctrico (SEV) marca PASI modelo GEA24 (en los anexos se muestran la descripción del equipo usado) se aplicó usando un equipo de SEV usando un voltaje de 200 V.

Tanto la refracción sísmica como el sondaje vertical eléctrico son técnicas diferentes pero complementarias, de ambas se derivará la presencia de hielo en la estructura interna del GR basado en los valores de velocidad de ondas P (refracción sísmica) y valores de resistividad del suelo (SEV). En el apartado de anexos se muestra las gráficas resultantes y la interpretación de los resultados.

4.2.3 Estimación de velocidad de los glaciares de roca

Las imágenes satelitales a utilizar para determinar la velocidad superficial de los glaciares de roca serán las imágenes de la banda pancromática del sensor Landsat-8 de resolución espacial de 15m. Para determinar las velocidades de desplazamiento superficial de los GR se requiere del uso de dos imágenes ópticas multitemporales en pancromático de la misma zona de estudio, es decir, que presenten un diferencial de tiempo de adquisición, luego a estas imágenes se les hará un procesamiento con la técnica desarrollada por el Instituto de Tecnología de California, Registro de Imágenes y Correlación de Detección Óptica (Cosi-corr), en la que se usan dos imágenes ópticas de diferentes periodos de tiempo, se correlacionan y como resultado dan los desplazamientos en los ejes X e Y, luego se calcula los vectores de velocidad superficial usando la resultante de vectores. Para determinar la velocidad vertical (o desplazamiento) de los GR se usará Interferometría Diferencial (DInSAR) en la que se usa dos imágenes radar de diferente periodo de tiempo, se forma el interferograma y se desenrolla, de esto se obtiene velocidades verticales de desplazamiento.

i Procedimiento para determinar la velocidad superficial de los glaciares de roca

En resumen, se abren las imágenes ópticas Landsat 8 (banda 8) en la extensión Cosi-Corr, se realiza la correlación de Fourier y se establece un umbral de 0.7 como umbral de calidad de la correlación, luego se obtienen dos rásters como producto, el desplazamiento en la dirección X e Y. Para obtener la velocidad superficial se calcula la resultante de vectores dividida por el tiempo entre el tiempo entre las imágenes.

$$V_s = \sqrt{EW^2 + NS^2}/n \quad \text{Ecuación (2)}$$

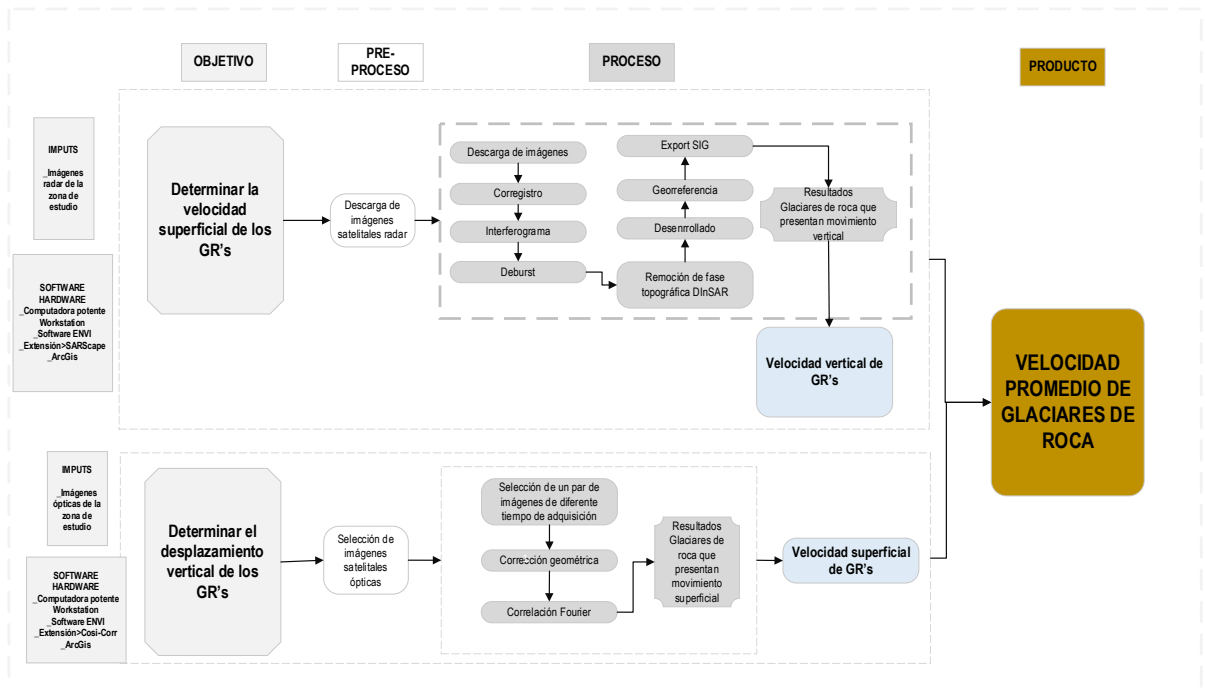
Donde n representa el espacio temporal de las imágenes.

En los anexos se amplía los procedimientos para estimar la velocidad superficial de los GR.

ii. Procedimiento para determinar la velocidad vertical de los glaciares de roca

En resumen, para estimar la velocidad vertical de los GR se descargan las imágenes Sentinel-1 en las zonas de estudio, luego se abren las imágenes en el software SNAP de la ESA se corregistran las imágenes, el producto da como resultado el interferograma, este debe ser desenrollado para obtener los desplazamientos verticales de los GR, vale indicar que se usó un umbral de coherencia mayor a 0.7 para la calidad del interferograma. Los valores negativos del interferograma desenrollado indican un desplazamiento vertical que se aleja del satélite, es decir, bajo el nivel del suelo, mientras que un valor positivo indica un desplazamiento vertical que se acerca al satélite, es decir, sobre el nivel del suelo. Finalmente, se divide el interferograma desenrollado entre el tiempo de adquisición de las imágenes para obtener la velocidad vertical de los GR.

En los anexos se amplía los procedimientos para estimar la velocidad superficial de los



GR.

Figura 9. Flujograma de determinación de velocidades superficiales de glaciares rocosos.

En la siguiente figura se muestra el diagrama de flujo de la metodología usada en esta investigación.

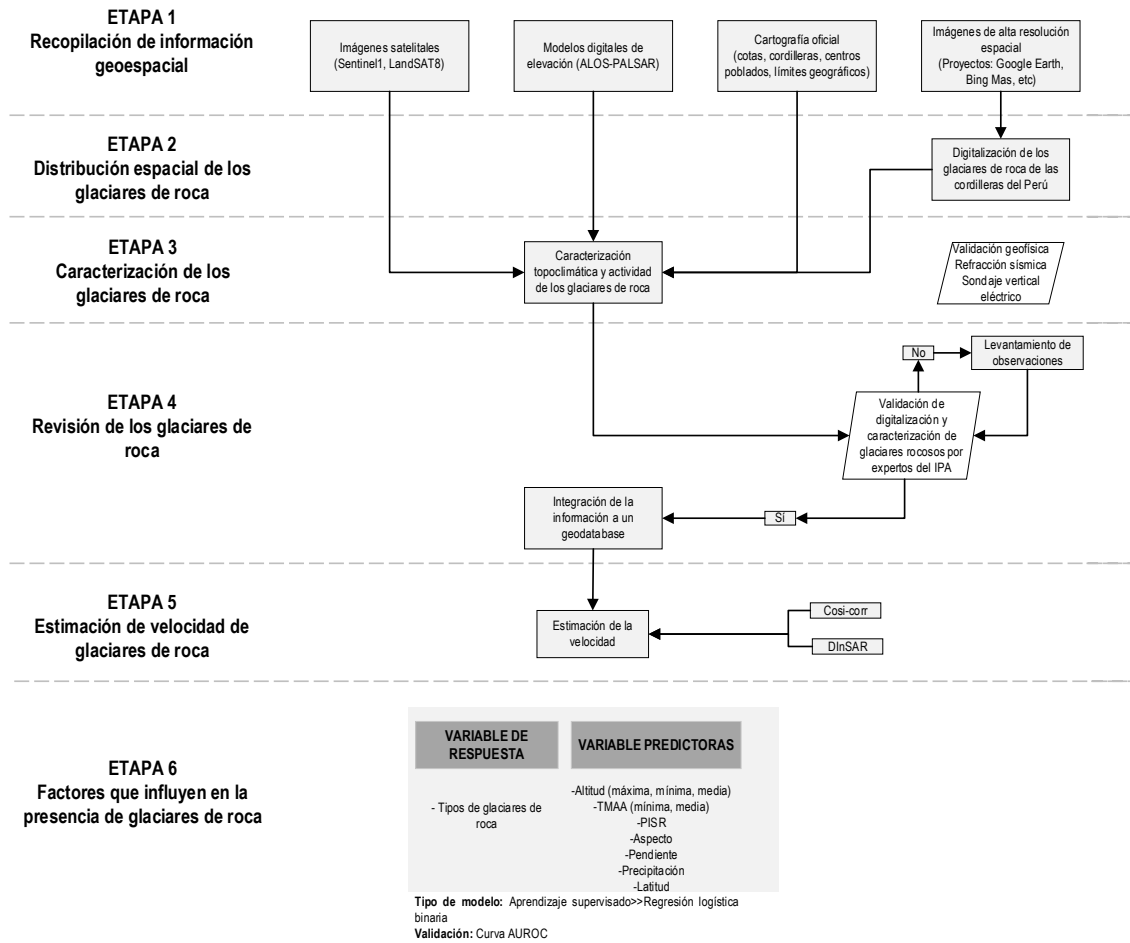


Figura 10. Flujograma general de la investigación.

4.3 Población y Muestra

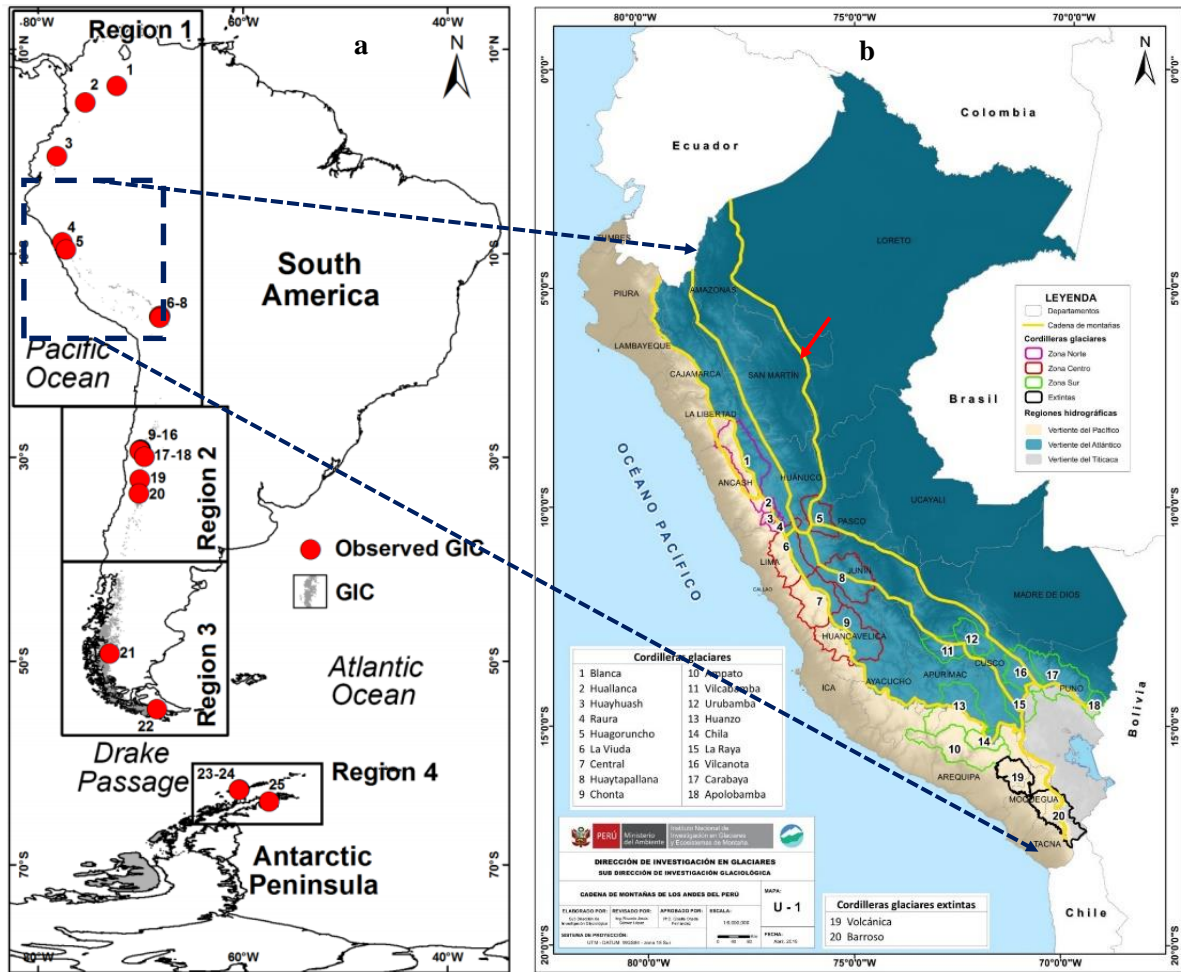
Población: Este término se refiere al conjunto limitado de individuos, objetos, elementos, etc., que pertenecen a una misma clase por poseer características similares (Bautista 2009), y concuerdan con determinadas especificaciones (Sampieri 2014).

En la presente investigación la población de estudio son los GR que se encuentran en la Cadena Montañosa de los Andes Sudamericanos, esta última se extiende a lo largo de la zona occidental de América del Sur, ocupa una superficie aproximada de 3.37 millones de km² que va desde el extremo de la costa sur del Océano Pacífico y parte del Mar del Caribe (7240 km de longitud); y forma parte de los territorios de Venezuela, Colombia, Ecuador, Perú, Bolivia, Chile y Argentina (INAIGEM 2018).

En la Figura 14 se muestra los límites de la Cadena Montañosa de los Andes Sudamericanos en el territorio suramericano (Figura 14a) y peruano (Figura 14b).

Muestra: La muestra es un segmento o subgrupo pequeño de la población que proporciona datos válidos respecto a la población y es representativa (Bautista 2009; Sampieri 2014). La bibliografía sugiere que existen dos tipos de muestra, probabilística y no probabilística, en la primera todos los elementos de la población tienen la posibilidad de ser escogidos, mientras que en la segunda la elección de los elementos no depende de la probabilidad, sino de causas relacionadas con los fines de la investigación (Sampieri 2014).

El tipo de muestra usada en la investigación es la no probabilística, ya que los elementos de estudio no dependen de la probabilidad, sino de las necesidades de acuerdo al propósito de la investigación. Los elementos de estudio son los GR de las Cordilleras de los Andes Tropicales del Perú, es decir, las 20 cordilleras glaciares, 2 de ellas de glaciares extintos (Volcánica y Barroso), que suman un total de 155309 km², y se encuentran en un rango altitudinal comprendido entre los 3459 - 6768 m s.n.m.



En la Figura 14 “a” (Mernild et al. 2015) la cadena montañosa de la Cordillera de los Andes se encuentra regionalizado en 3 partes (1, 2 y 3), en la Región 1 se encuentra la Cordillera de los Andes Peruanos y en la figura “b” (INAIGEM 2018) se muestra en líneas amarillas el ámbito de la cadena montañosa de la Cordillera de los Andes en territorio peruano.

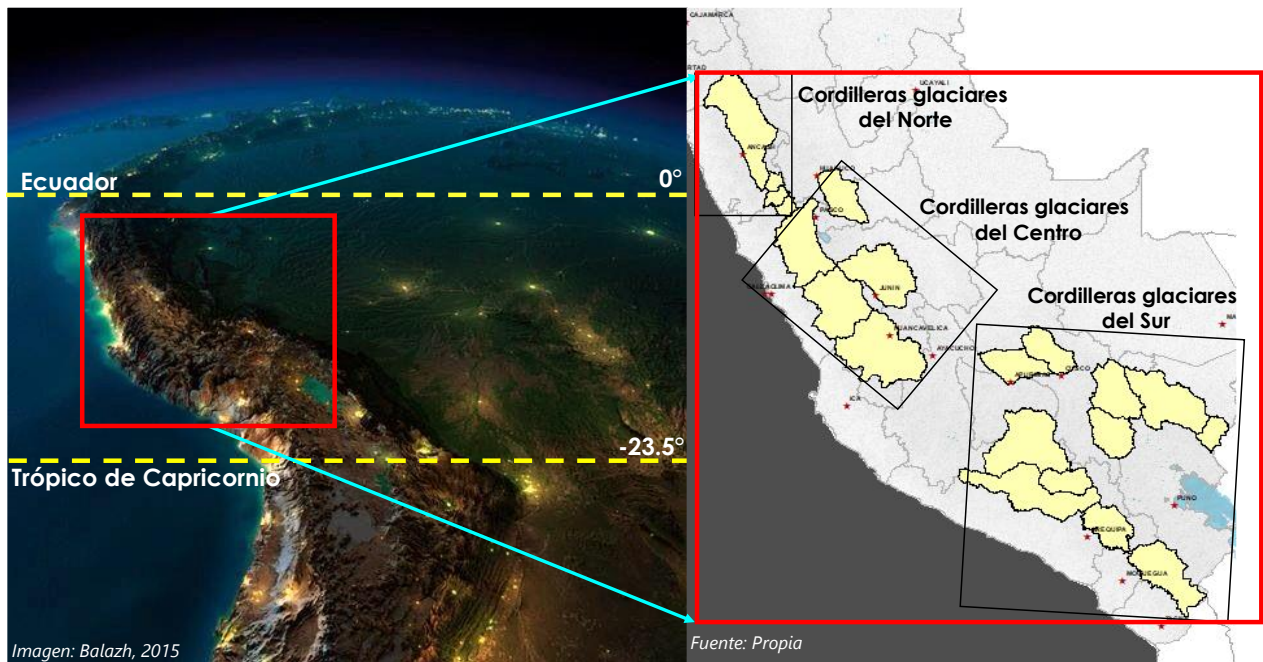


Figura 12. Muestra del ámbito de estudio, 20 Cordilleras de los Andes Tropicales Peruanas.

En la figura anterior de color amarillo se muestran los límites de las 20 cordilleras que se encuentran en el sistema montañoso peruano, estas a su vez están distribuidos en tres sectores geográficos, cordilleras del norte, cordilleras del centro y cordilleras del sur.

4.4 Lugar de estudio y periodo desarrollado

4.4.1 Lugar de estudio

El estudio de la dinámica de los GR se realizará en las 20 Cordilleras Peruanas, sin embargo, los lugares de trabajo de estudio de campo se realizaron en el GR San Félix en la cordillera Chila, aquí se realizó la verificación de los aspectos geomorfológicos y ambientales visualizados en imágenes satelitales. La zona elegida fue establecida por el proyecto que financió la tesis, y está en función a la accesibilidad a la zona de trabajo, la mayor parte de GR en el ámbito de estudio no tienen una fácil accesibilidad, sin embargo, en el GR San Félix si se tiene una buena accesibilidad, lo que la pone en ventaja frente a otras zonas de estudio, además, otro aspecto por el que se seleccionó el GR San Félix fue que se evidencia una clara conectividad o sucesión ecológica, a saber, en la parte superior está la cima de la montaña y bajo esta el GR San Félix, bajo esta se encuentra un humedal

altoandino, por último, existe una laguna, esto le da una importancia para el estudio a futuro de la posible relación entre la sucesión ecológica del GR con otras geoformas.

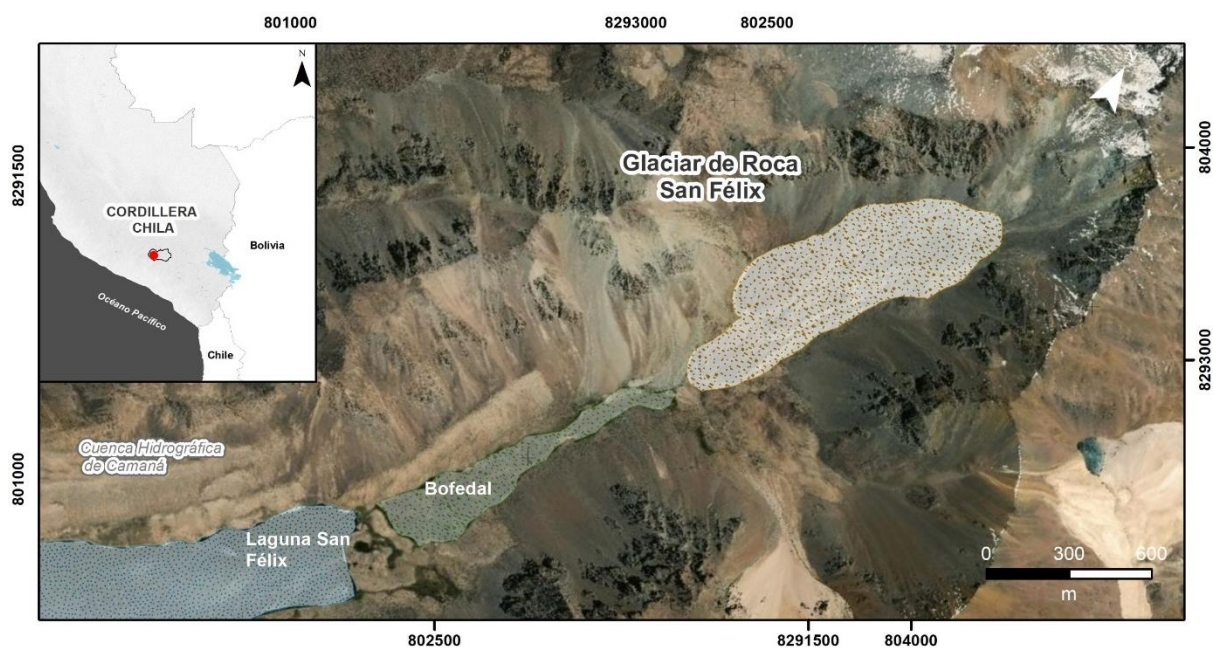


Figura 13. Lugar de estudio de campo. La zona de estudio en el GR San Félix está ubicado en E=803134.33 y N=8292582.06.

4.4.2 Periodo desarrollado

El periodo de estudio corresponde al año 2015-2020, durante este periodo se determinó la dinámica de los glaciares de roca, en la siguiente tabla se muestra los tipos de trabajos realizados durante el periodo de estudio.

Tabla 6

Periodo de estudio

Año	Actividad
2015-2016-2017-2018-2019-2020	Se realizó la recopilación y búsqueda de imágenes satelitales para fines de digitalizar los glaciares de roca haciendo uso de la opción de visualización de multitemporalidad en Google Earth Pro y otras plataformas.
2018-2019	Para determinar la velocidad de los glaciares de roca se analizaron imágenes ópticas y radar de 1 año de temporalidad.
18 noviembre al 22 de noviembre de 2019	Se realizaron los trabajos de campo en el glaciar de roca San Félix, en la Cordillera Chila (distrito de Chachas-Arequipa).

4.5 Técnicas e instrumentos para la recolección de la información

A continuación, se muestran las técnicas e instrumentos a utilizar para la recolección de información, además en los anexos se muestra la ficha de campo a usar para caracterizar aspectos geomorfológicos y ambientales de los glaciares rocosos.

Tabla 7

Técnicas e instrumentos de recolección de información

FICHA TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS							
NOMBRE DEL PROYECTO				Proyecto Permafrost			11/19/2019
DIRECCIÓN			ÁREA		RESPONSABLE		
Investigación Glaciológica			Subdirección de Investigación Glaciológica		Edwin Noé Badillo Rivera		
II. DATOS GENERALES							
OBJETIVO	Aplicar las Tecnologías de Información Geográfica en la determinación de la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú.						
ÁMBITO	20 cordilleras de los Andes Tropicales del Perú						
PERIODO DE IMÁGENES	Imágenes satelitales de los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020.						
III. DATOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES							
FUENTE DE ADQUISICIÓN	-- Servicio Geológico de los Estados Unidos -- Agencia Espacial Europea -- Agencia Espacial Japonesa			SATÉLITE	-- LANDSAT 8 -- SENTINEL 1 -- ALOS PALSAR	PROYECTOS ESPACIALES	-- Google Earth Pro -- Bing Maps
SENSOR	Operational Land Imager (OLI)	ÓRBITA	Satélite de órbita polar	RESOLUCIÓN TEMPORAL	16 días	ANCHO DE BARRIDO DE LA ESCENA	185 km * 180 km
MODO DE ADQUISICIÓN	Single Look Complex (250 km)	ÓRBITA	Satélite de órbita polar	TIPO	Interferometric Wide	ÁNGULO DE INCIDENCIA EN RANGO	29.1 °- 46° Polarización HH+HV+VV
LC08_L1TP_003070_20170615_20170629_01_T1							
LC08_L1TP_006068_20160617_20170323_01_T1							
LC08_L1TP_006069_20180623_20180704_01_T1							
LC08_L1TP_008067_20180418_20180501_01_T1							
LC08_L1TP_008067_20180909_20180913_01_T1							
S1B_IW_SLC__1SDV_20170528T103830_20170528T103857_005797_00A29F_6D03							
S1B_IW_SLC__1SDV_20170614T104618_20170614T104645_006045_00A9D7_3F79							
S1B_IW_SLC__1SDV_20171121T101433_20171121T101500_008378_00ED57_838C							
S1B_IW_SLC__1SDV_20171126T102252_20171126T102319_008451_00EF95_E653							
S1B_IW_SLC__1SDV_20171128T100717_20171128T100744_008480_00F085_2CCF							
S1B_IW_SLC__1SDV_20180516T104623_20180516T104650_010945_014093_AE73							
S1B_IW_SLC__1SDV_20181109T102259_20181109T102326_013526_01907B_AE83							
S1B_IW_SLC__1SDV_20181123T100724_20181123T100751_013730_0196F6_084D							
S1B_IW_SLC__1SDV_20181128T101440_20181128T101507_013803_01995A_B49F							

4.6 Análisis y procedimientos de datos

4.6.1 Respecto a la digitalización de los glaciares de roca

La digitalización de los GR se realizó visualizando imágenes ópticas de alta resolución disponibles en plataformas de acceso libre como Google Earth-Pro y SASPlanet (resoluciones espaciales <2 m), por lo que la digitalización de estas geoformas se llevó a cabo en imágenes en el que el nivel de detalle de la superficie es muy buena, además se siguió una rigurosa visualización en estos entornos entrenando a dos personas para que puedan realizar la digitalización de los GR en las veinte cordilleras peruanas, bajo la siguiente metodología.

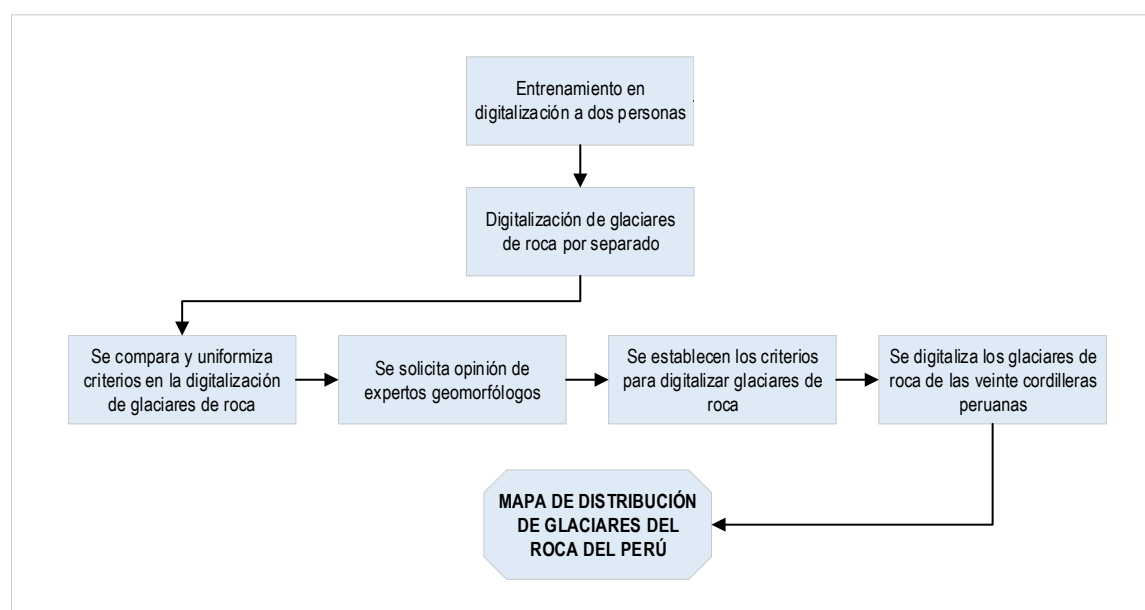


Figura 14. Metodología usada en la digitalización de glaciares de roca.

Una vez terminada la digitalización de los GR y su clasificación topoclimática y actividad en las veinte cordilleras peruanas, el archivo fue enviado a expertos geomorfológicos del Action Group: Rock glacier inventories and kinematics de la Asociación Internacional del Permafrost (IPA) como, quienes contribuyeron con criterios geomorfológicos (producto de esto se tiene la Tabla 2 de los criterios geomorfológicos) para mejorar la digitalización de los GR en este grupo se encuentran investigadores como Xavier Bodín (Francia),

Guillermo Azócar (Chile), Sebastián Vivero (Suiza), Lidia Ferri (Argentina) y Christian Huggel (Suiza) quienes realizan estudios de GR y permafrost en distintos sectores geográficos. Una vez terminado este proceso, se escogieron 10 GR (como en Marcer et al, 2017) de manera aleatoria y se calcula el error absoluto expresada en área para cada GR digitalizado.

4.6.2 Respecto a la velocidad de los glaciares de roca

En cuanto a la determinación de la velocidad de los GR, estas se realizaron usando técnicas de percepción remota avanzada como interferometría diferencial DInSAR y Cosi-Corr, empleando imágenes satelitales del tipo radar y ópticas respectivamente, con el uso de estas técnicas se determinó el desplazamiento y velocidad de los GR, el uso de las imágenes satelitales ópticas y de radar pasaron por una serie de correcciones para disminuir las distorsiones que estas presentan (propias de las técnicas, como los filtros y correcciones indicadas en el ítem de las técnicas) y que podrían originar errores en los procesos, además, se determinó el error de las imágenes por estadística espacial, es decir, se calculó la calidad de correlación de las imágenes usando la relación señal/ruido (SNR por sus siglas en inglés para las imágenes ópticas y coherencia para las imágenes radar) que tienen un valor de 0 a 1, donde valores cercanos a 1 representan zonas de buena correlación y valores cercanos a 0 valores donde no hay buena correlación, se excluyeron los píxeles que tienen un valor inferior de 0.6 de SNR.

4.6.4 Respecto a los factores que influyen en la presencia de los glaciares de roca

Para determinar la influencia de factores topoclimáticos en la presencia de GR activos/inactivos/relictos se empleó la técnica de regresión logística binaria (MRLB), para esto se usaron los GR activos/inactivos/relictos como variable de respuesta y factores climáticos y topográficos como variables predictoras, el modelo permitió determinar los factores que mayor significancia tienen en el control de GR, es decir, que sean activos o inactivos, además, la técnica ha sido evaluada bajo la supervisión del área bajo la curva (AUROC). El MRLB usa variables independientes (predictoras) 'x' para predecir la presencia de variables dicotómicas dependiente 'y' (Haq y Baral 2019), la ecuación del MRLB es:

$$P(Y_{1,0}) = \frac{e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}}{1 + e^{\beta_0 + \beta_1 X_1 + \beta_2 X_2 + \dots + \beta_n X_n}} \quad \text{Ecuación (2)}$$

Donde $Y=1$ y $Y=0$ se refiere a la probabilidad de que los GR sean intactos o relictos respectivamente, β_0 es el intercepto, $\beta_1, \beta_2, \beta_n$ es el valor de los coeficientes de las variables independiente X_1, X_2, \dots, X_n respectivamente.

Para aplicar el MRLB primero se deben considerar:

- Que no haya dependencia entre las variables (correlación de las variables)
- Que las variables no estén influenciadas por la multicolinealidad

Además, se consideró un valor de significancia de $p < 0.05$, lo que indica que las variables predictoras son significativas estadísticamente para ser consideradas predictoras de la actividad de los GR. Para esto primero se realizó el análisis de correlación entre las variables a usar en el MRLB, se usó la correlación de Pearson para determinar la dependencia entre dos variables, para esto se aplicó la siguiente fórmula.

$$r = \sigma_{xy} / \sigma_x \sigma_y \quad \text{Ecuación (3)}$$

Donde σ_{xy} es la covarianza de las variables “x” e “y”, σ_x y σ_y son las desviaciones estándar de las variables “x” e “y”, los resultados están entre el rango de $-1 < r < 1$, en donde si $r < 0$ la correlación de las dos variables es negativa o inversa y es más fuerte cuando se acerca a -1, un valor de $r > 0$ indica que la correlación es positiva y es más fuerte cuando se acerca a 1, si $r = 0$, no existe correlación entre las variables y si es $r = 1$ o $r = -1$ la correlación de las variables son totalmente dependientes, como lo indica Field (2009) un valor de correlación de 0.8 puede influir en el que el modelo de regresión esté afectado por la multicolinealidad. La multicolinealidad se verifica con los estadísticos de factor de tolerancia (T), que indica la independencia de una variable respecto a otra y factor de inflación de la varianza (VIF) que es la inversa del factor de tolerancia (Beltran y Ponte 2015).

$$VIF = 1 / (1 - R_j^2) \quad \text{Ecuación (4)}$$

Donde R_j^2 es el coeficiente de determinación para la regresión x_j en función de otras variables explicativas, un valor de VIF mayor a 10 se considera como problema de multicolinealidad otra forma de determinar si existe la multicolinealidad es encontrar un valor menor a 0.1 de factor de tolerancia (T) (Menard 2002).

La capacidad general de predictibilidad del modelo se evalúa con la curva característica operativa del receptor (ROC) que se abrevia como AUROC (por sus siglas en inglés) (Brenning y Trombotto 2006), que indica el porcentaje de positivos observados que se predicen correctamente, es decir, cuantifica la probabilidad de que el modelo de MRLB clasifique adecuadamente la actividad de los GR basado en el conjunto de variables predictoras (MAAT, PISR, precipitación, aspecto, orientación, etc). Estas técnicas se realizan usando el software SPSS (versión de prueba).

V. RESULTADOS

5.1 Resultados descriptivos

5.1.1 Objetivo específico 1: *distribución espacial, caracterización topoclimática, actividad y velocidad de los glaciares de roca.*

A. Distribución espacial de los glaciares de roca

La foto-interpretación y digitalización de los glaciares de roca en las imágenes satelitales y herramientas de internet como Google Earth-Pro, SASPlanet (incorpora imágenes de Google Earth, Bing Maps, etc) en las veinte cordilleras peruanas tienen la siguiente distribución espacial por ubicación geográfica (cordilleras del norte '4', centro '5' y sur '11' del Perú) y cordilleras. Como se mencionó los atributos geomorfológicos de la Tabla 2, fueron aplicados para interpretar y digitalizar los GR en el ámbito de las cordilleras peruanas, que se basó principalmente en 3 atributos, a saber, la pendiente frontal, los márgenes laterales, el límite superior y la topografía de crestas y surcos en la superficie y fueron las que mejor permiten discernir entre GR y otras geoformas. En base a lo anterior, se identificó y digitalizó 1122 GR sobre las cordilleras peruanas.

Tabla 8

Distribución de los glaciares de roca por ubicación geográfica y por cordillera

Sector geográfico (SG)	Cordillera	Número de glaciares de roca	% de glaciares de roca	Número de GR por SG	%GR por SG
Norte	Blanca	-	-	6	0.5
	Huallanca	1	0.1		
	Huayhuash	3	0.3		
	Raura	2	0.2		
	Central	11	1.0		
	Chonta	2	0.2		
Centro	Huagoruncho	-	-	19	1.7
	Huaytapallana	1	0.1		
	La Viuda	5	0.4		
	Ampato	75	6.7		
	Apolobamba	5	0.4		
	Carabaya	-	-		
	Chila	254	22.6		
	Huanzo	367	32.7		
Sur	La Raya	5	0.4	1097	97.8
	Urubamba	2	0.2		
	Vilcabamba	3	0.3		
	Vilcanota	37	3.3		
	Barroso	272	24.2		
	Volcánica	77	6.9		
Total		1122	100	1122	100

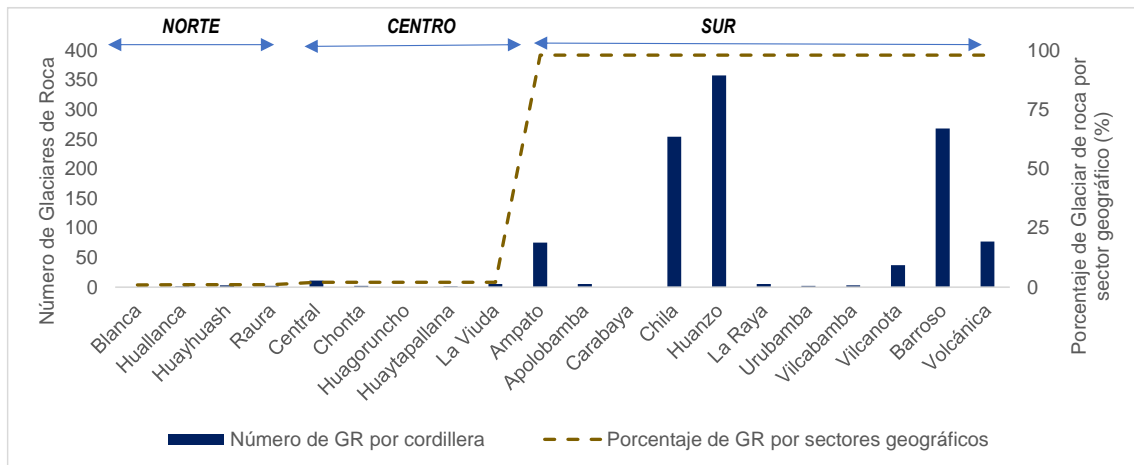


Gráfico 1. Distribución espacial de glaciares de roca por cordillera y sector geográfico.

En la Tabla 8 y Gráfico 1 se muestra la distribución de los GR en las veinte cordilleras peruanas. Por sector geográfico, las cordilleras que tienen un mayor porcentaje de GR son las del sur con 97.8%, seguida de las cordilleras del centro con 1.7% y por último la cordillera del norte con solo 0.5%. Del ~98% de GR que están distribuidas en las cordilleras del sur cerca del ~80% de GR se encuentran en la cordillera Huanzo (367-32.7%), Barroso (272-24.2%) y Chila (254-22.6%), mientras que la que menor cantidad de GR están en Huallanca, Huaytapallana ambas con 1 GR cada una; de la tabla y gráfico anterior se muestra que hay tres cordilleras donde no se encontraron GR, Blanca, Huagoruncho y Carabaya, esto quiere decir que de la búsqueda de GR basado en los atributos geomorfológicos de la Tabla 2 (como pendiente frontal, márgenes laterales y límite superior) en las 3 cordilleras donde no hubo GR, no se encontró evidencias de la presencia de geoformas con las características de GR.

Por otro lado, en cuanto a la distribución espacial de GR, como se indicó en el ítem de validación de resultados, se realizó la comparación de los resultados en la digitalización de GR de dos operadores entrenados en la interpretación y digitalización de GR en el ámbito de las cordilleras peruanas, se solicitó que realicen la digitalización de 10 GR de manera aleatoria de los GR identificados e interpretados y se comparó sus límites, los resultados se muestran en la siguiente figura.

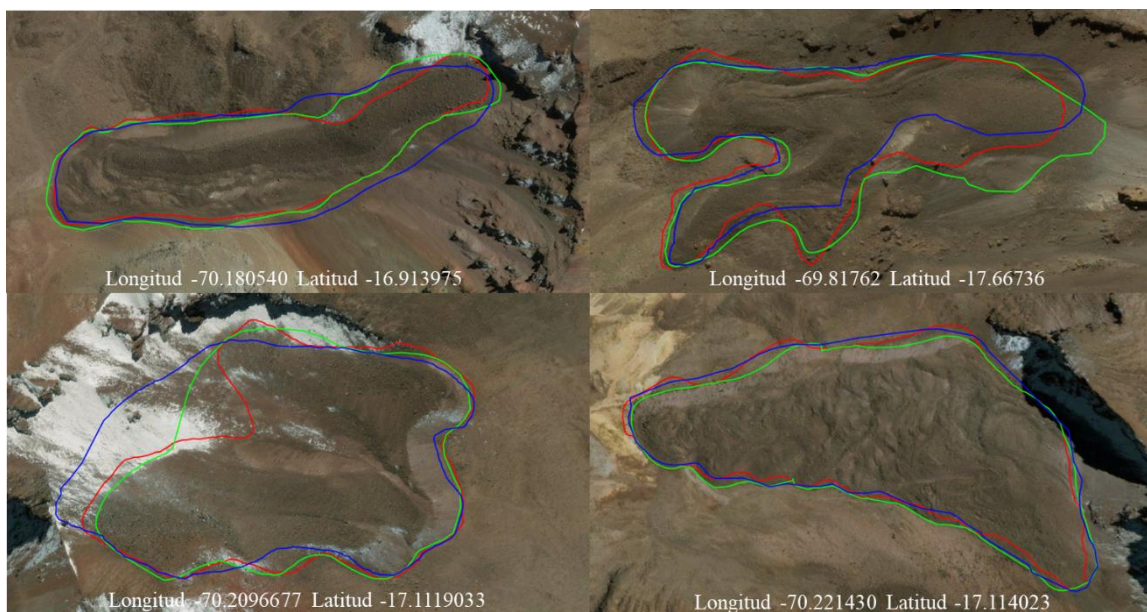


Figura 15. Ejemplos de glaciares de roca digitalizados por dos operadores.

Las líneas rojas y azules muestran los límites de digitalización de GR realizadas por dos diferentes operadores, la línea verde, representa la versión final del límite de GR en base a las sugerencias y recomendaciones de expertos de la IPA.

También se encontró el error absoluto de 10 GR digitalizados por los dos operadores expresadas en áreas (ha), las cuales se indican a continuación.

Tabla 9

Error absoluto de la digitalización de glaciares de roca expresadas en área.

Operador 1 (ha)	Operador 2 (ha)	Versión revisada (ha)	Error absoluto (ha)
3.6	5.0	4.2	±0.7
5.5	6.8	7.0	±0.9
8.3	8.6	8.5	±0.2
11.5	12.4	13.7	±1.8
12.0	12.8	14.5	±2.0
17.7	19.2	17.5	±1.0
19.4	20.0	18.3	±1.4
20.6	21.3	21.7	±0.7
24.2	21.5	22.2	±1.4
57.4	55.3	55.9	±1.1

Cada valor del área de GR expresada en hectáreas, el error absoluto de la digitalización de los GR por parte de cada operador se indica en la cuarta columna.

En general, se obtiene un valor absoluto promedio de ± 1 ha (± 0.01 km²) para cada GR analizado anteriormente, esto para GR con una superficie mayor a 4 ha. En general, se ha encontrado que las mayores incertidumbres en la digitalización de GR se presentaron en el límite superior de GR antes de la reunión con expertos del IPA, esta reunión permitió presentar la Tabla 2 de los criterios geomorfológicos que mejoraron los criterios para definir los límites superiores de los GR.

En la siguiente tabla se muestra en unidades de área la digitalización realizada inicialmente y con los ajustes de digitalización sugeridos por la IPA.

Tabla 10

Área de digitalización de los glaciares de roca expresados en área

Digitalización	Área (km ²)	$\Delta\%$
Inicial	42.8	
Final	49.1	+14.7

Como se observa, los ajustes en base a las sugerencias de los expertos del IPA (expresadas en la tabla de atributos geomorfológicos para clasificación de la actividad de los GR) asociados a los criterios geomorfológicos para la correcta digitalización de los GR mejoró la digitalización, aumentando en 14.7% la digitalización inicial realizada.

Por otro lado, aquí se aclara que solo se consideraron aquellos GR en los que se tienen alta certeza de que son GR y no otras geoformas de alta montaña, como laderas de crioflucción, soliflucción, protalus rampart, etc, en total se clasificaron más de 2000 geoformas de origen periglacial, estos están en una etapa de revisión que no está contemplada en la presente investigación

B. Superficie de glaciares de roca del Perú

En la siguiente tabla se muestra la superficie de los GR por sector geográfico y por cordilleras, a la vez, se muestra los mínimos y máximos y media encontrados, vale aclarar que se consideró integrar todos los glaciares de roca encontrados, no se estableció una unidad mínima cartografiable, debido a la alta resolución de las imágenes satelitales usadas para la digitalización de GR. Se encontró un valor mínimo en

superficie de GR de $1.15E-3 \text{ km}^2$ (0.15 ha) y un valor máximo de 0.45 km^2 (45 ha), en general los GR presentan un promedio de 0.04 km^2 (4.4 ha).

Tabla 11

Superficie (km^2) total y promedio de glaciares de roca

Sector Geográfico	Superficie total (km^2)	Cordillera	Superficie (km^2)	Superficie media (km^2)	%	Superficie mínima (ha)	Superficie máxima (ha)
Norte	0.77	Blanca	-	-	-	-	-
		Huallanca	0.01	0.01	0.0	1.09	1.09
		Huayhuash	0.61	0.20	1.2	3.71	37.46
		Raura	0.15	0.08	0.3	5.86	9.59
		Central	0.46	0.04	0.9	0.77	11.88
Centro	0.56	Chonta	0.03	0.02	0.1	1.29	1.86
		Huagoruncho	-	-	-	-	-
		Huaytapallana	0.01	0.01	0.0	1.39	1.39
		La Viuda	0.06	0.01	0.1	0.16	2.07
		Ampato	5.15	0.07	10.5	0.49	22.31
Sur	47.33	Apolobamba	0.10	0.02	0.2	0.74	3.24
		Carabaya	-	-	-	-	-
		Chila	8.44	0.03	17.2	0.15	37.28
		Huanzo	15.36	0.04	31.3	0.24	45.24
		La Raya	0.22	0.04	0.4	0.79	8.78
		Urubamba	0.09	0.05	0.2	3.21	6.04
		Vilcabamba	0.24	0.08	0.5	3.05	17.81
		Vilcanota	0.93	0.03	1.9	0.22	8.22
		Barroso	13.88	0.05	28.3	0.32	40.05
Volcánica	3.30	0.04	6.7	0.34	29.07		
Total			49.06	0.04	100	-	-

La columna de superficie media está expresada como el promedio de superficie de los GR que se encuentran en el ámbito de cada cordillera, la superficie mínima y máxima representa la superficie mínima y máxima encontrada en el ámbito de cada cordillera.

El siguiente gráfico muestra la superficie de los glaciares de roca por cordilleras.

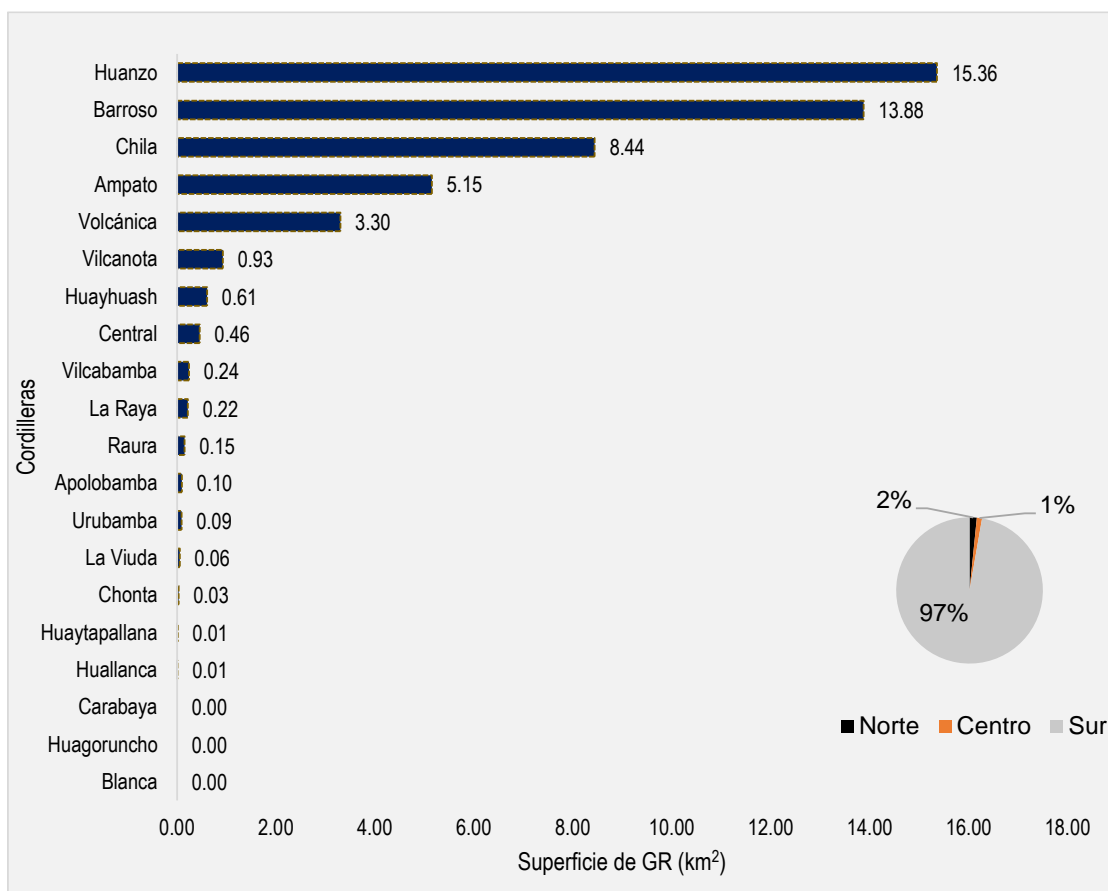


Gráfico 2. Superficie (km²) de los glaciares de roca por cordillera y sector geográfico.

La cordillera que mayor superficie de GR tiene es Huanzo, seguida de Barroso, Chila, Ampato y Volcánica con valores iguales a 15.36, 13.88, 8.44, 5.15 y 3.30 km² respectivamente. Por sector geográfico, las cordilleras del sur del Perú son las que cuentan con un porcentaje de ~97% de la superficie total, seguida de las cordilleras del centro con ~2% y norte ~1%. Por otro lado, el rango de superficie de los GR están entre los 0.15 a ~45 ha.

C. Altitud de los glaciares de roca del Perú

En el siguiente Gráfico 3 se muestra la distribución altitudinal mínima de los GR de norte a sur, en “a” se muestra la altitud mínima de los GR de los sectores norte, centro y sur del Perú, en “b” se muestra la altitud mínima de los GR a través de las cordilleras del Perú.

Tabla 12

Altitud de los glaciares de roca

Sector Geográfico	Altitud promedio (m s.n.m.)	Cordillera	Altitud mínima promedio (m s.n.m.)	Altitud máxima promedio (m s.n.m.)	Altitud promedio (m s.n.m.)
Norte	4800	Blanca	-	-	-
		Huallanca	4666	4785	4717
		Huayhuash	4752	4984	4839
		Raura	4789	4910	4844
		Central	4841	4975	4901
Centro	4804	Chonta	4861	4933	4895
		Huagoruncho	-	-	-
		Huaytapallana	4631	4667	4647
		La Viuda	4751	4794	4771
		Ampato	5072	5189	5128
		Apolobamba	4992	5051	5020
		Carabaya	-	-	-
		Chila	4944	5047	4991
		Huanzo	4881	4964	4920
		Sur	4904	La Raya	4741
Sur	4904	Urubamba	4705	4858	4763
		Vilcabamba	4363	4524	4436
		Vilcanota	4993	5058	5023
		Barroso	4951	5058	5002
		Volcánica	4904	5012	4956

La tabla anterior ha sido elaborada en función de los promedios de la altitud de los GR, a saber, los valores de altitud mínima de cada cordillera se ha calculado en base al promedio de las altitudes mínimas del pie de los GR que fue extraído usando la herramienta de estadísticas zonales de cada GR, la misma lógica se usó para la altitud máxima, es decir, estos valores representan el promedio de las altitudes máxima de los GR de cada cordillera, en cuanto a la altitud promedio, estos valores fueron calculados en base al promedio de la altitud del centroide de los GR de cada cordillera. Se debe mencionar que la altitud mínima del inicio del pie de los GR está en el rango de 4332 m s.n.m a 5606 m s.n.m. (en la Cordillera Vilcabamba y Ampato respectivamente), mientras que la altitud máxima o límite superior (cabeza) de los GR encontrados está en

el rango de 4422 m s.n.m. a 5707 m s.n.m. (en la Cordillera Vilcabamba y Ampato respectivamente).

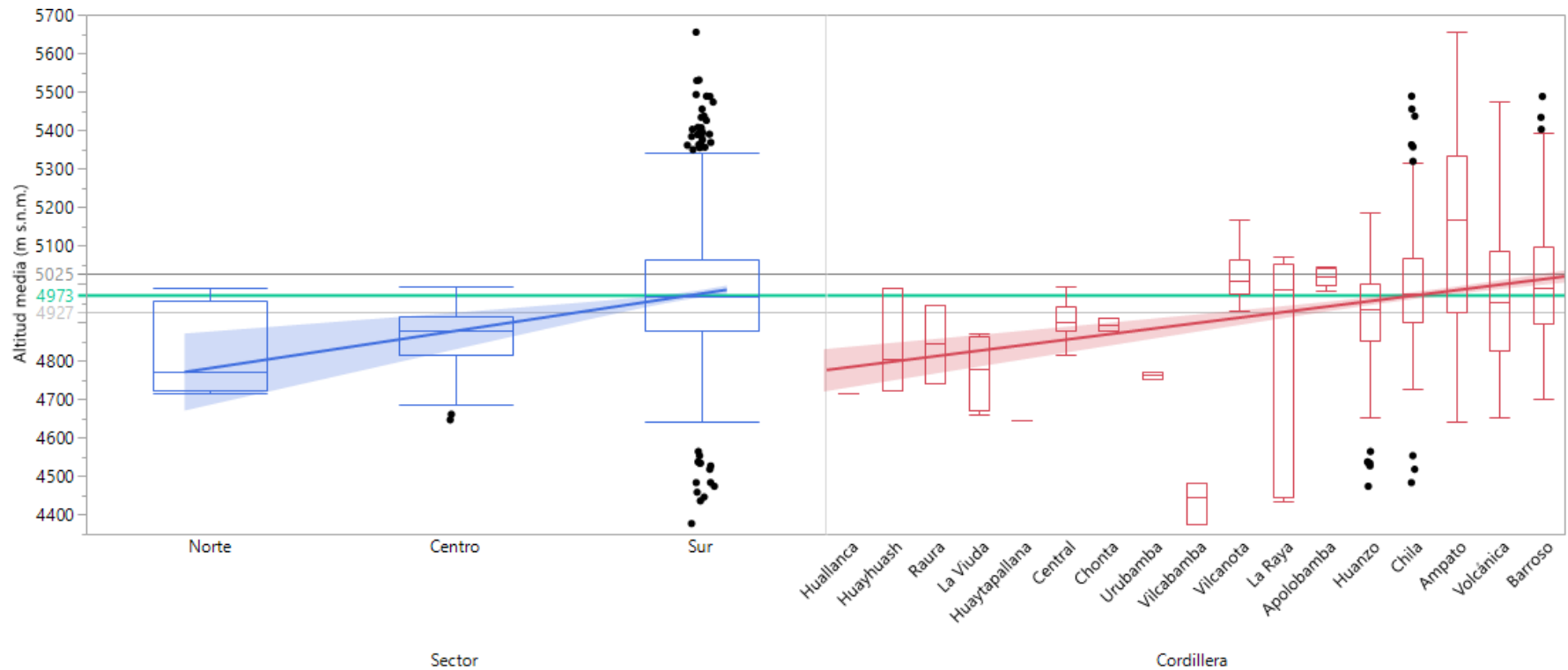


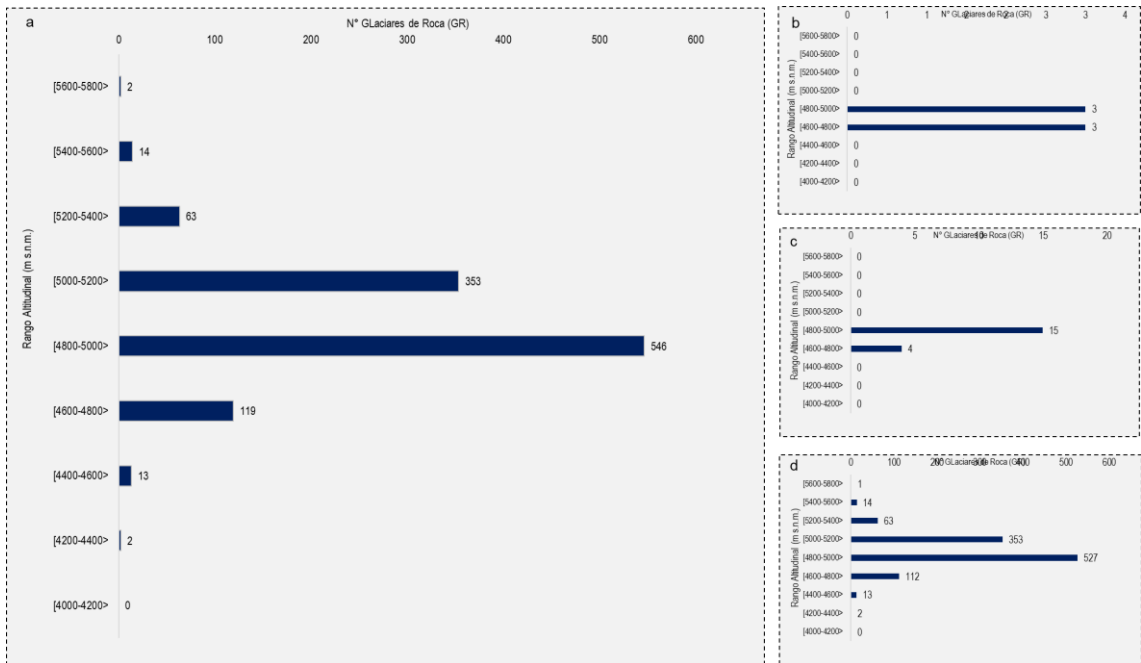
Gráfico 3. Distribución altitudinal de los glaciares de roca a través de la Cordillera de los Andes Peruanos de norte a sur.

En el gráfico, la línea de recta de color gris tenue muestra que el promedio de la altitud mínima de los GR es 4927 m s.n.m., mientras que la línea verde indica que el promedio de altitud del centroide de los GR del Perú es 4973 m s.n.m., y la línea gris marca la altitud máxima promedio de la altitud de los GR, 5025 m s.n.m. En general se muestra que la altitud de los GR aumenta de norte a sur, tanto a nivel sectorial como de cordilleras, lo que indica que la altitud de los GR en el ámbito de las Cordilleras Peruanas aumenta en la medida en la

que aleja del Ecuador, es decir, la altitud promedio de las cordilleras del norte es menor en comparación a las cordilleras del centro, y ésta es menor en

comparación a las cordilleras del sur, que es donde se han encontrado GR a una mayor altitud de hasta 5654 m s.n.m. en promedio (referencia del centroide del GR). Por otro lado, los GR están ubicado entre los 14.5°-15.5° de latitud S y entre los 16.5°-17.5° de latitud S, todas estas en las cordilleras del sur del Perú.

En el siguiente gráfico, en “a” se muestra el rango altitudinal de los GR en todas las cordilleras peruanas, “b”, “c” y “d” en las cordilleras norte, centro y sur respectivamente.



respectivamente.

Gráfico 4. Rango altitudinal de los glaciares de roca.

En general, el 81% de los GR están distribuidos espacialmente en el rango altitudinal de 4800-5200 m s.n.m., seguido del 12% que están entre los 4200-4800 m s.n.m. y el 7% entre los 5200-5800 m s.n.m.

En la siguiente figura se muestra el mapa de distribución altitudinal de los GR en las cordilleras peruanas.

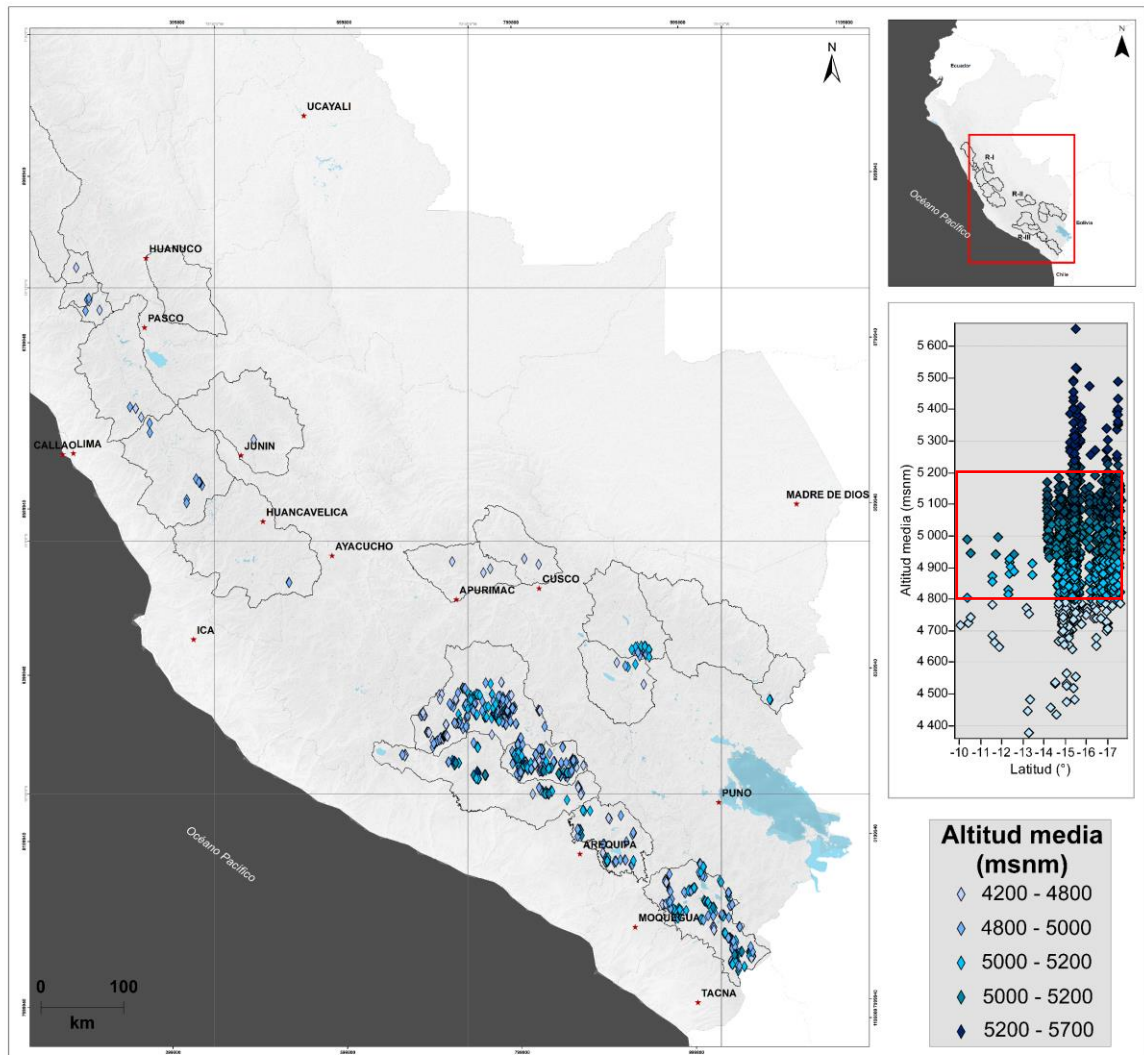


Figura 16. Mapa de la distribución altitudinal y latitudinal de los glaciares de roca.

Los puntos dispersos en tonalidades de azul tenue que representan las menores altitudes hasta un azul oscuro que representan una mayor altitud son los GR, del mapa anterior se desprende que la mayoría de GR está en latitudes mayores a 14° y 17.5° S y 73.5° y 69.7° de longitud W, también, la mayoría de GR se concentran en 5 cordilleras del sur del Perú, Ampato, Volcánica, Chila, Huanzo y Barroso.

E. Orientación predominante de los glaciares de roca

En el siguiente gráfico se muestra la orientación predominante de los GR representado por ocho ejes cardinales, norte (N), noreste (NE), este (E), sureste (SE), sur (S), suroeste (SO), oeste (O), noroeste (NO).

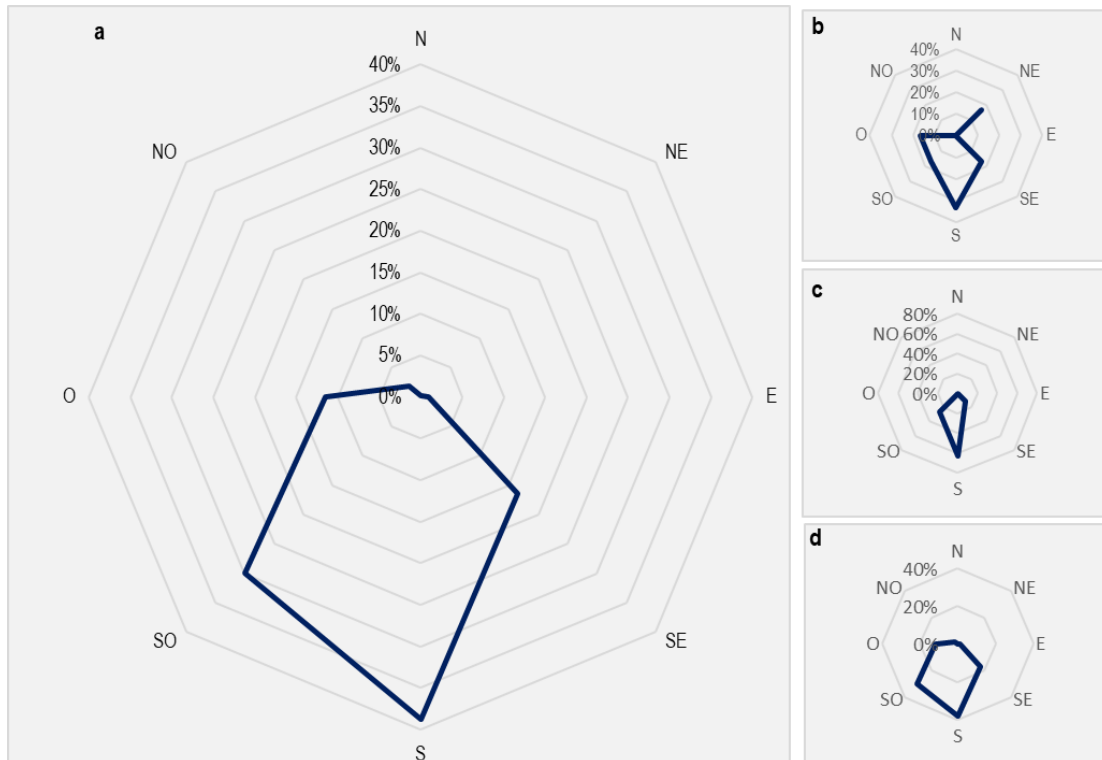


Gráfico 5. Orientación predominante de los glaciares de roca. 'a' muestra la orientación predominante de GR en todas las cordilleras peruanas, 'b' en el norte, 'c' en el centro y 'd' en el sur.

La orientación predominante de los GR en las cordilleras del Perú son S (39%), seguida de SO (30%), SE (17%), O (12%) el resto de GR tienen orientaciones predominantes diferente a las indicadas anteriormente (3%).

Tabla 13

Orientación de los GR por cordilleras

Ámbito Geográfico	Cordillera	N 337.5° - 22.5°	NE 22.5° - 67.5°	E 67.5° - 112.5°	SE 112.5° - 157.5°	S 157.5° - 202.5°	SO 202.5° - 257.5°	O 247.5° - 292.5°	NO 337.5° - 360°O
Norte	Blanca	-	-	-	-	-	-	-	-
	Huallanca	0	0	0	1	0	0	0	0
	Huayhuash	0	1	0	0	1	0	1	0
	Raura	0	0	0	0	1	1	0	0
	Subtotal 1	0	1	0	1	2	1	1	0
	Central	0	0	0	2	6	3	0	0
Centro	Chonta	0	0	0	0	1	1	0	0
	Huagoruncho	-	-	-	-	-	-	-	-
	Huaytapallana	0	0	0	0	0	1	0	0
	La Viuda	0	0	0	0	5	0	0	0
	Subtotal 2	0	0	0	2	12	5	0	0
	Ampato	0	0	2	12	28	17	12	4
Sur	Apolobamba	0	0	0	0	4	1	0	0
	Carabaya	-	-	-	-	-	-	-	-
	Chila	0	0	6	39	100	76	28	5
	Huanzo	0	0	0	68	153	98	40	8
	La Raya	0	0	0	1	0	4	0	0
	Urubamba	0	0	0	0	1	1	0	0
Sur	Vilcabamba	0	0	0	0	1	2	0	0
	Vilcanota	0	0	0	6	21	6	4	0
	Barroso	1	1	1	46	86	97	36	4
	Volcánica	0	0	2	8	31	29	7	0
	Subtotal 3	1	1	11	180	425	331	127	21
	Total	1	2	11	183	439	337	128	21

La Tabla 13 muestra la orientación predominante en todas las cordilleras peruanas y por sectores. Los valores mostrados en la Tabla 13 son los números de GR que se encuentran en cada orientación de los puntos cardinales, además, se muestra que las orientaciones predominantes son sur ($157.5^\circ - 202.5^\circ$), sor-oeste ($202.5^\circ - 257.5^\circ$), sur-este ($112.5^\circ - 202.5^\circ$) y oeste ($247.5^\circ - 292.5^\circ$), en general, en todas las cordilleras peruanas la orientación sigue la misma tendencia que la que se mencionó anteriormente, es decir, tienen su orientación predominante entre los 112.5° y 292.5° . Como se indicó la técnica usada para determinar la orientación se explicó en el ítem de 4.2.2 (d), esta

variable representa el ajuste a un plano cartesiano de 360° de la dirección a la que apunta el plano en el que se encuentra el GR.

F. Pendiente promedio predominante de los glaciares de roca

En el siguiente gráfico se muestra la pendiente promedio predominante de los GR.

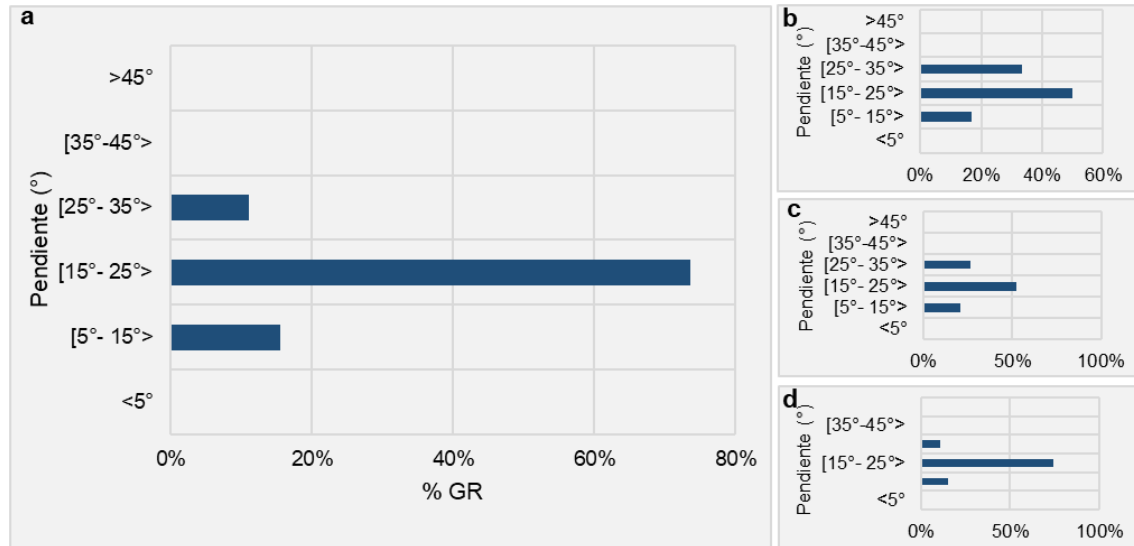


Gráfico 6. Pendiente promedio predominante de los glaciares de roca. ‘a’ muestra la pendiente promedio predominante de GR en todas las cordilleras peruanas, ‘b’ en el norte, ‘c’ en el centro y ‘d’ en el sur.

De manera general, el 74% de los GR tiene una pendiente promedio predominante que está en el rango de los [15°-25°>, seguido del 15% que está en el rango de los [5°-15°>, por último, el 11% restante tienen una pendiente promedio predominante que está en el rango de los [25°-35°>.

Tabla 14

Pendiente predominante por cordillera y ámbito geográfico.

Ámbito Geográfico	Cordillera	<5°	[5°- 15°>	[15°- 25°>	[25°- 35°>	[35°-45°>	>45°
Norte	Blanca	-	-	-	-	-	-
	Huallanca	0	0	0	1	0	0
	Huayhuash	0	1	1	1	0	0
	Raura	0	0	0	2	0	0
	Subtotal 1	0	1	1	4	0	0
Centro	Central	0	1	5	5	0	0

	Chonta	0	0	2	0	0	0
	Huagoruncho	-	-	-	-	-	-
	Huaytapallana	0	0	1	0	0	0
	La Viuda	0	1	3	1	0	0
	Subtotal 2	0	2	11	6	0	0
	Ampato	0	22	45	8	0	0
	Apolobamba	0	0	4	1	0	0
	Carabaya	-	-	-	-	-	-
	Chila	0	20	167	67	0	0
	Huanzo	0	41	301	25	0	0
Sur	La Raya	0	0	3	2	0	0
	Urubamba	0	0	2	0	0	0
	Vilcabamba	0	0	3	0	0	0
	Vilcanota	0	2	30	5	0	0
	Barroso	0	24	213	35	0	0
	Volcánica	0	8	62	7	0	0
	Subtotal 3	0	117	830	150	0	0
	Total	0	120	842	160	0	0

De la Tabla 13 se desprende que en Huanzo, Chila y Barroso la pendiente predominante se encuentra entre los $[15^\circ - 25^\circ>$, es decir, cerca del 74% del total de GR se encuentran entre ese rango, además, las cordilleras del norte en las que existen GR (Huallanca, Raura y Huayhuash) el 67% (4 GR) tienen una pendiente predominante de $[25^\circ - 35^\circ>$, mientras que las cordilleras del centro la pendiente predominante del 58% de GR está entre los $[15^\circ - 25^\circ>$.

G. Potencial de incidencia de radiación solar predominante en los glaciares de roca

Solo el 3% de los GR están ubicados en zonas donde el PISR es $<2000 \text{ kWh/m}^2$, el 26% de los GR está en zonas donde el PISR está comprendido entre los $<2000 - 2200] \text{ kWh/m}^2$, el 55% se encuentra entre los $<2200 - 2400] \text{ kWh/m}^2$, la mayor cantidad de GR, 16%, se encuentra entre los $[2400 - 2600> \text{ kWh/m}^2$, por último, el 1% de GR se encuentra comprendido entre los $>2600 \text{ kWh/m}^2$; además, presentan un mínimo de 1763 kWh/m^2 , un máximo de 2706 kWh/m^2 y un promedio de PIRS de 2272 kWh/m^2 en las zonas donde ubican los GR.

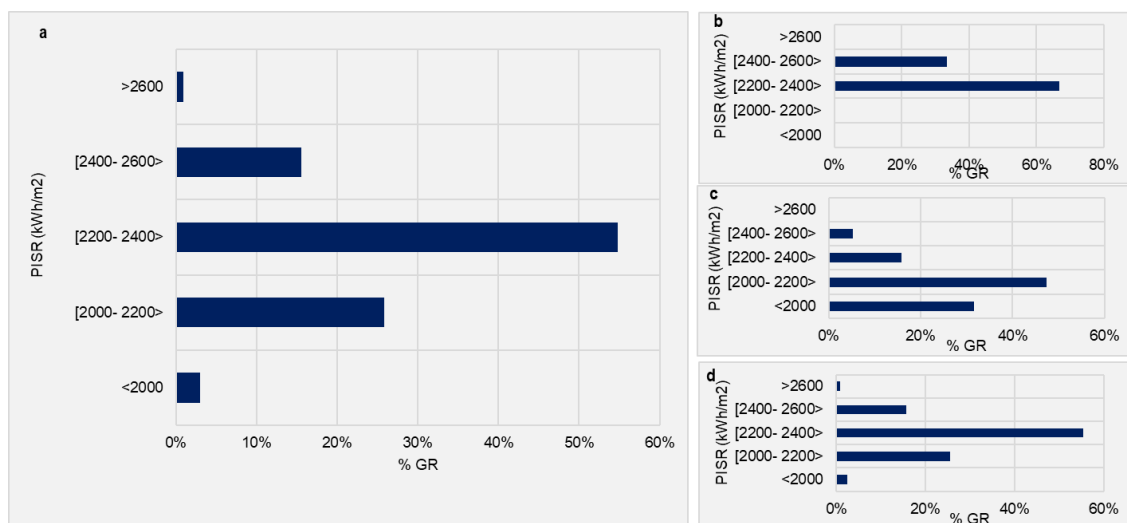


Gráfico 7. Rango porcentual de glaciares de roca en base al PISR.

‘a’ muestra la PISR de la ubicación en la que se encuentran los GR en todas las cordilleras peruanas, ‘b’ en el norte, ‘c’ en el centro y ‘d’ en el sur, en ‘e’ se presenta el diagrama de cajas de la PISR en GR, todos los valores tienen como unidad al kWh/m²

Tabla 15

Rango, mínimos y máximos de PISR de los glaciares de roca por cordilleras.

Ámbito Geográfico	Cordillera	N° GR, <2000 kWh/m ²	N° GR [2000-2200> kWh/m ²	N° GR [2200-2400> kWh/m ²	N° GR [2400-2600> kWh/m ²	N° GR >2600 kWh/m ²	PISR mínima kWh/m ²	PISR máxima kWh/m ²
	Blanca	-	-	-	-	-	-	-
Norte	Huallanca	0	0	1	0	0	0	2212
	Huayhuash	0	0	2	1	0	2253	2489
	Raura	0	0	1	1	0	2322	0
	Subtotal 1	0	0	0	0	0	6	
Centro	Central	5	4	2	0	0	1823	2347
	Chonta	0	2	0	0	0	2075	2124
	Huagoruncho	-	-	-	-	-	-	-
	Huaytapallana	0	0	0	1	0	2422	2422
	La Viuda	1	3	1	0	0	1953	2340
	Subtotal 2	1	0	0	0	0	19	
Sur	Ampato	1	6	25	35	8	1983	2706
	Apolobamba	0	2	3	0	0	2081	2387
	Carabaya	-	-	-	-	-	-	-
	Chila	12	79	133	29	1	1774	2660
	Huanzo	7	60	220	71	0	1861	2593
	La Raya	0	3	2	0	0	2087	2296
	Urubamba	0	2	0	0	0	2143	2164

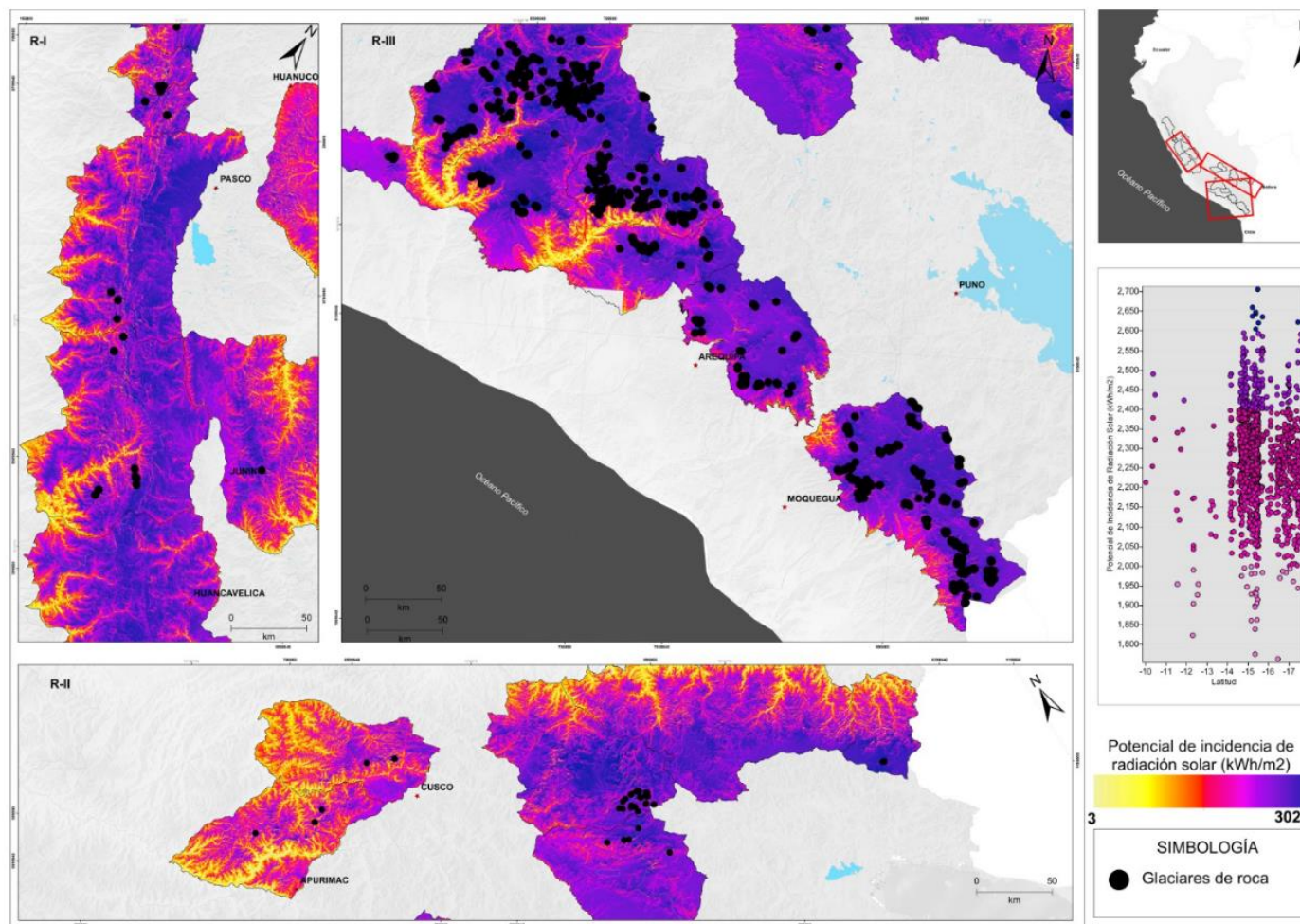
Vilcabamba	0	2	1	0	0	2080	2357
Vilcanota	0	10	20	3	0	2032	2490
Barroso	7	89	147	24	1	1763	2622
Volcánica	0	23	51	3	0	2063	2477
Subtotal 3	27	276	602	165	10	-	-
Total	33	285	609	168	10	-	-

En la Tabla 14 se muestra el número de GR que están en uno de los 5 rangos de PISR en las cordilleras del Perú, por otro lado, el promedio de PISR de los GR que se encuentran en el norte es mayor a todas, 2348 kWh/m², seguido de las cordilleras del sur 2274 kWh/m² y, por último, las cordilleras del centro 2107 kWh/m².

Los mayores rangos entre el valor mínimo y máximo de PISR se encontraron en la Cordillera Chila ($\Delta=886$ kWh/m²), Barroso ($\Delta=859$ kWh/m²), Huanzo ($\Delta=732$ kWh/m²) y Ampato ($\Delta=722$ kWh/m²), todas en las cordilleras del sur.

s

En el siguiente mapa se observa la distribución de GR en base a su PISR.



En el mapa mostrado, el extremo superior izquierdo representa las cordilleras del norte (R-1), el mapa inferior representa las cordilleras del centro (R-II), mientras que el mapa (R-III) representa las cordilleras del sur, el gráfico de dispersión de la derecha muestran la distribución de los GR basado en el PISR (eje de las ordenadas) y la latitud (eje de las abscisas). Se observa que los GR están ubicados en zonas donde el PISR es mayor a 900 (GR sobre zonas en tonalidades violetas en la paleta de colores).

Figura 17. Mapa de distribución de GR en base a su PIRS.

H. Temperatura media anual del aire de los glaciares de roca

El 7% de los GR están ubicados en zonas donde la TMAA es $<0^{\circ}$ C, el 36% de los GR está en el rango térmico comprendido entre los $<0^{\circ} - 2^{\circ}$] C, el 39% se encuentra entre los $<2^{\circ} - 4^{\circ}$] C, por último, el 18% de GR se encuentra comprendido entre los $<4^{\circ} - 9^{\circ}$] C.

En el siguiente gráfico se muestra el porcentaje de GR en base a la TMAA en las cordilleras del Perú, norte, centro y sur.

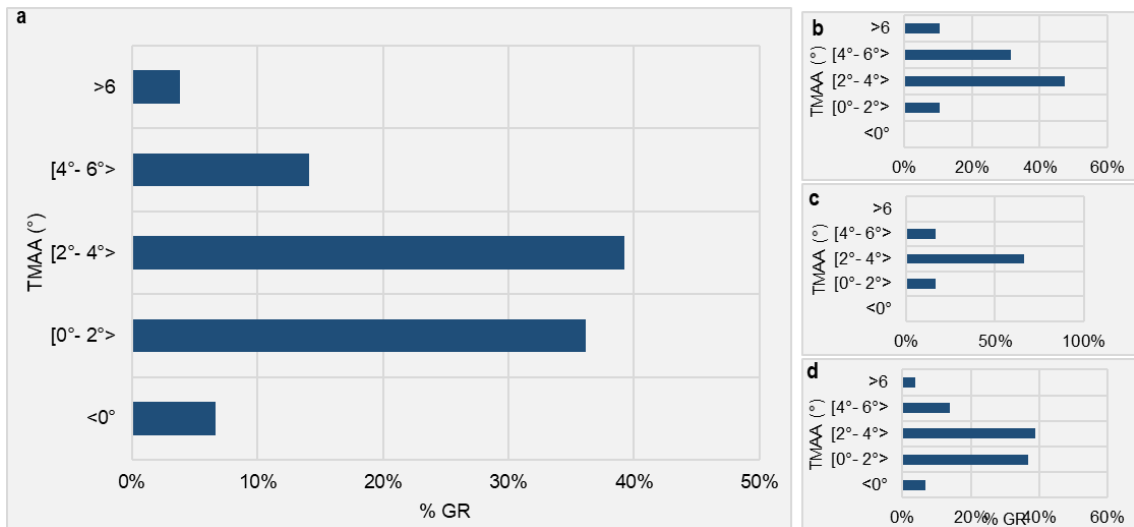


Gráfico 8. Rango porcentual de glaciares de roca en base a la TMAA.

'a' muestra la TMAA de la ubicación en la que se encuentran los GR en todas las cordilleras peruanas, 'b' en el norte, 'c' en el centro y 'd' en el sur, en 'e' se presenta el diagrama de cajas de la TMAA en glaciares de roca.

El promedio de TMAA de las zonas donde se ubican los GR es 2.4° C, además, presentan un valor mínimo de -2.5° C y un valor máximo de 9.4° C (ver Tabla 15). De la distribución de GR, existen algunos que se encuentran en lugares o zonas atípicas debido a que la TMAA es mayor a 7.0° C, como se observa en el diagrama de cajas del Gráfico 9.

Tabla 16

Rango, mínimos y máximos de TMAA de los glaciares de roca por cordilleras y sectores.

Ámbito Geográfico	Cordillera	<0° C	[0°- 2°> C	[2°- 4°> C	[4°- 6°> C	>6° C	TMAA mínima (°C)	TMAA máxima (°C)
Norte	Blanca	-	-	-	-	-	-	-
	Huallanca	0	0	1	0	0	3.2	3.2
	Huayhuash	0	0	3	0	0	2.7	3.3
	Raura	0	1	0	1	0	0.0	5.3
	Subtotal 1	0	0	1	4	1	0	
	Central	0	0	5	4	2	2.2	6.6
	Chonta	0	0	1	1	0	2.8	4.0
Centro	Huagoruncho	-	-	-	-	-	-	-
	Huaytapallana	0	0	0	1	0	4.6	4.6
	La Viuda	0	2	3	0	0	1.8	2.7
	Subtotal 2	0	0	2	9	6	2	
	Ampato	18	31	15	3	8	-2.5	8.1
	Apolobamba	0	0	5	0	0	3.7	3.7
	Carabaya	-	-	-	-	-	-	-
Sur	Chila	48	94	79	29	4	-0.8	6.9
	Huanzo	0	199	141	26	1	0.6	8.9
	La Raya	0	1	0	3	1	2.0	7.5
	Urubamba	0	0	0	1	1	5.8	6.6
	Vilcabamba	0	0	0	0	3	7.7	7.7
	Vilcanota	0	19	17	1	0	0.0	4.5
	Barroso	7	58	136	63	8	-1.6	6.6
Volcánica	0	9	30	22	16	0.3	9.4	
Subtotal 3	73	73	411	423	148	42	-	-
Total	73	73	414	436	155	44	-	-

En la Tabla 15 se muestra la clasificación de los rangos del TMAA de las cordilleras peruanas, los valores mostrados en la tabla que están entre los <0° – 6°>C representan al número de GR que se encuentran en cada uno de los 5 rangos indicados en la tabla. En la tabla se muestra que en las cordilleras del norte, centro y sur predominan los GR que se encuentran entre los [4° – 6°>C (39%, 436 GR) y [0° - 2°>C (37%, 414 GR), y de este total el 88% se concentran en las Cordilleras, Chila, Huanzo y Barroso. Además, se encontró que las únicas cordilleras del Perú en donde los GR se encuentran bajo los 0°C son Ampato, Chila y Barroso, todas en el sur del Perú, en las cordilleras del centro y norte del Perú los GR se encuentran sobre los 0°C, es decir, sobre el punto de

congelación, así también se encontró que el mínimo valor de TMAA registrado sobre un GR es -2.5°C (en la Cordillera Ampato) y el máximo valor de 9.4°C (en la Cordillera Volcánica), además, el mayor rango térmico de TMAA entre el mínimo y máximo se presenta en la Cordillera Ampato ($\Delta=10.6^{\circ}\text{C}$), Volcánica ($\Delta=9.1^{\circ}\text{C}$), Huanzo ($\Delta=8.3^{\circ}\text{C}$) y Barroso ($\Delta=8.2^{\circ}\text{C}$).

En el siguiente mapa se muestra la distribución de los GR en base a la TMAA, el rango térmico mostrado corresponde al rango de la TMAA del periodo comprendido entre los años 1970-2000 obtenido del WorldClim versión 2, la resolución de los ráster de temperatura es de 1 km².

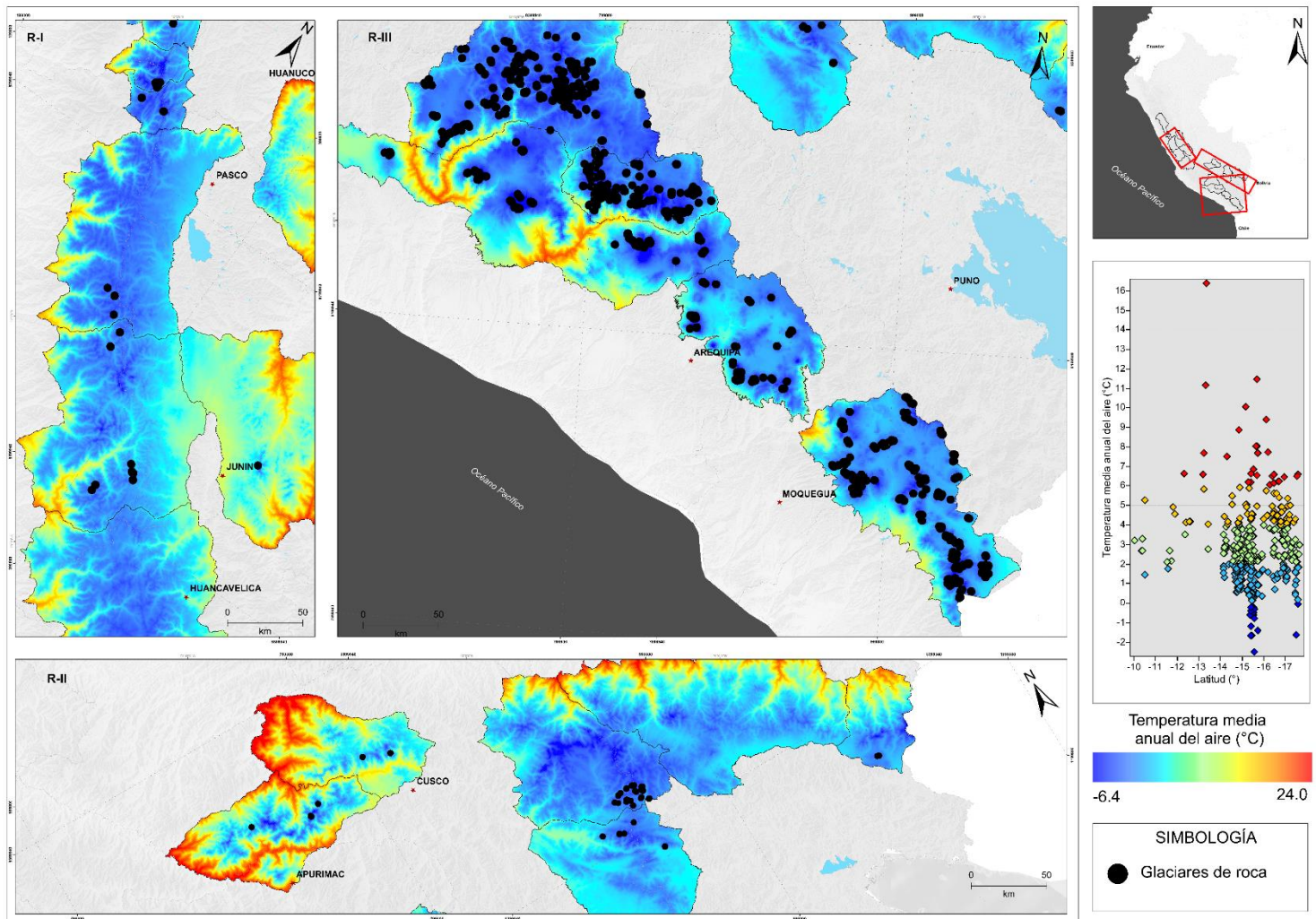


Figura 18. Mapa de TMAA de los glaciares de roca del Perú.

En el mapa mostrado, el extremo superior izquierdo representa las cordilleras del norte (R-1), el mapa inferior

I. Precipitación media

El 19% de los GR están ubicados en zonas donde la precipitación es $<40^\circ$ mm/año, el 14% de los GR está en zonas donde la precipitación está en el rango [40 - 50] mm/año, el mayor porcentaje de GR, 33%, se encuentra entre los $<50 - 60$] mm/año, seguido del 27% de GR que están en [60 – 70> mm/año, por último, el 7% de GR se encuentra en zonas donde la precipitación es >70 mm/año.

En el siguiente gráfico se muestra el porcentaje de GR en base a la precipitación en las cordilleras del Perú, norte, centro y sur.

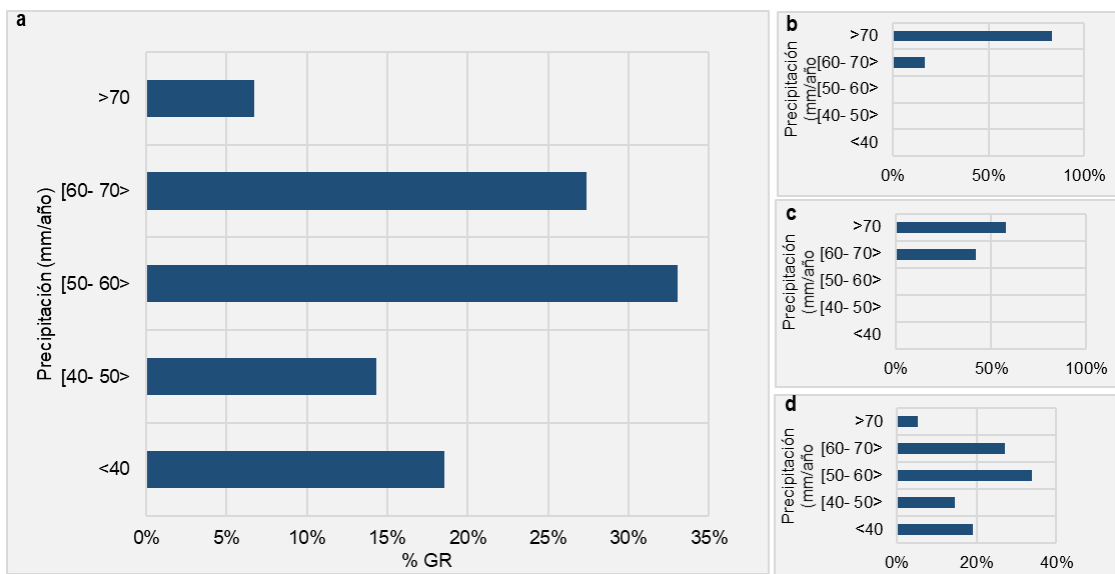


Gráfico 9. Rango porcentual de glaciares de roca en base a la precipitación.

‘a’ muestra la precipitación de la ubicación en la que se encuentran los GR en todas las cordilleras peruanas, ‘b’ en el norte, ‘c’ en el centro y ‘d’ en el sur, en ‘e’ se presenta el diagrama de cajas de la precipitación en GR.

El promedio de precipitación de las zonas donde se ubican los GR es 54 mm/año, además, presentan un valor mínimo de 28 mm/año y un valor máximo de 84 mm/año. De la distribución de GR, en este caso no hay valores atípicos de precipitación.

Tabla 17

Rango, mínimos y máximos de precipitación promedio de los glaciares de roca por cordilleras y sectores.

Ámbito Geográfico	Cordillera	<40 mm	[40- 50> mm	[50- 60> mm	[60- 70> mm	>70 mm	Precipitación mm	Precipitación máxima mm
Norte	Blanca	-	-	-	-	-	-	-
	Huallanca	0	0	0	0	1	72.0	72.0
	Huayhuash	0	0	0	0	3	70.0	77.0
	Raura	0	0	0	1	1	69.6	73.6
	Subtotal 1	0	0	0	1	5	-	-
Centro	Central	0	0	0	8	3	61.1	77.0
	Chonta	0	0	0	0	2	70.4	71.4
	Huagoruncho	-	-	-	-	-	-	-
	Huaytapallana	0	0	0	0	1	83.7	83.7
	La Viuda	0	0	0	0	5	74.3	75.1
	Subtotal 2	0	0	0	8	11	-	-
	Ampato	1	19	55	0	0	39.6	59.1
	Apolobamba	0	0	0	0	5	77.6	78.4
	Carabaya	-	-	-	-	-	-	-
	Chila	0	15	214	25	0	45.1	63.4
Sur	Huanzo	0	0	75	282	10	53.9	72.8
	La Raya	0	0	0	0	5	75.1	79.5
	Urubamba	0	0	0	0	2	78.7	81.2
	Vilcabamba	0	0	0	0	3	79.2	83.8
	Vilcanota	0	0	0	0	37	75.0	79.2
	Barroso	168	88	16	0	0	28.0	53.3
	Volcánica	40	37	0	0	0	32.3	49.7
	Subtotal 3	209	159	360	307	62	-	-
Total	209	159	360	316	78	-	-	

En la Tabla 17 se muestra la clasificación de los rangos de la precipitación promedio de las cordilleras peruanas, los valores mostrados en la tabla que están entre los <40 – 70>mm representan al número de GR que se encuentran en cada uno de los 5 rangos indicados en la tabla. En la tabla se muestra que las cordilleras del sur, en general, presentan las menores precipitaciones en promedio (70 mm) en comparación con las precipitaciones promedio de las cordilleras norte (74.2 mm) y centro (76.8 mm). También, el 93% de GR (1044 GR) se encuentran bajo una precipitación promedio de <70 mm, y los menores valores promedio de GR por cordilleras se encuentran en las

Cordilleras Volcánica (49.7 mm), Barroso (53.3 mm), Ampato (59.1 mm), Chila (63.4 mm) y Huanzo (72.8 mm), mientras que los mayores valores de precipitación promedio encontrado están en la cordillera Vilcabamba (83.8 mm) y Huaytapallana (83.7), en las cordilleras del sur y centro respectivamente.

En el siguiente mapa se muestra la distribución de los GR en base a la precipitación promedio, el rango de precipitación mostrado corresponde al periodo comprendido entre los años 1970-2000 obtenido del WorldClim versión 2, la resolución de los ráster de precipitación es de 1 km².

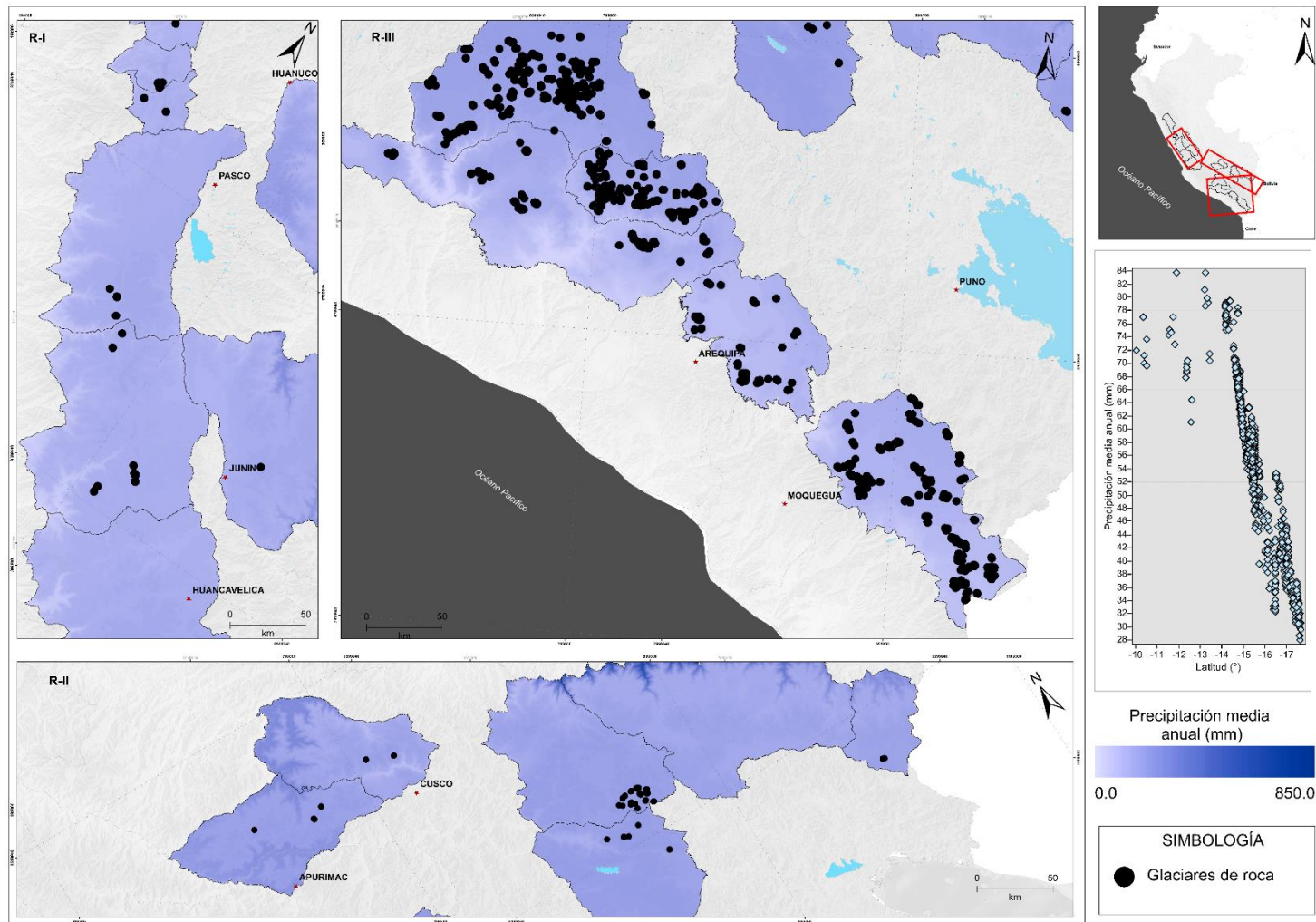


Figura 19. Mapa de distribución de GR en base a su precipitación.

En el mapa mostrado, el extremo superior izquierdo representa las cordilleras del norte (R-I), el mapa inferior representa las cordilleras del centro (R-II), mientras que el mapa (R-III) representa las cordilleras del sur, el gráfico de dispersión de la derecha muestra la distribución de los GR basado en la precipitación media (eje de las ordenadas) y la latitud (eje de las abscisas).

J. Actividad de los glaciares de roca

Los resultados muestran que los GR del tipo activo e inactivo prevalecen en las CAT peruanos, el 38% de los GR son del tipo activo, mientras que el 35% pertenecen inactivos, por último, el 27% pertenecen a los relictos.

En las cordilleras del sur se encuentran la mayor cantidad de GR del tipo activo, inactivo y relicto, con porcentajes del total de glaciares de roca iguales a 38%, 34% y 26% respectivamente.

Las cordilleras que cuenta con el mayor número de GR del tipo activo es Huanzo y Chila con 124 y 118 GR activos respectivamente (~11% cada uno del total del GR del Perú), seguido de Barroso 99 (9%) y Ampato 53 (5%), el resto está distribuido en las demás cordilleras peruanas; en cuanto a los GR inactivos, Huanzo cuenta con 172 GR inactivos (15% del total de GR del Perú), seguido de Chila 84 (8%) y Barroso 76 (7%), el resto está distribuido en las demás cordilleras peruanas, por último, en cuanto a los GR relictos, en Barroso se encontró 97 GR (9% del total de GR del Perú), Huanzo 71 (6%) y Chila 52 (5%), el resto está distribuido en las demás cordilleras peruanas.

En la siguiente tabla se muestra la distribución de GR en base a su actividad por cordilleras y sector geográfico.

Tabla 18

Actividad de los glaciares de roca del Perú

Sector Geográfico	Cordilleras	Actividad		
		Activo	Inactivo	Relicto
Norte	Blanca	-	-	-
	Huallanca	0	0	1
	Huayhuash	0	0	3
	Raura	0	0	2
	Subtotal 1	0	0	6
	Subtotal 1 (%)	0	0	1
Centro	Central	2	5	4
	Chonta	1	1	0
	Huagoruncho	-	-	-
	Huaytapallana	0	0	1
	La Viuda	0	1	4
	Subtotal 2	3	7	9
	Subtotal 2 (%)	16	37	47
	Ampato	53	11	11
	Apolobamba	1	3	1
	Carabaya	-	-	-
Sur	Chila	118	84	52
	Huanzo	124	172	71
	La Raya	3	0	2
	Urubamba	1	1	0
	Vilcabamba	1	1	1
	Vilcanota	7	14	16
	Barroso	99	76	97
	Volcánica	14	25	38
	Subtotal 3	421	387	289
	Subtotal 3 (%)	38%	34%	26%
	Total	424	394	304
	Total (%)	38%	35%	27%

En el siguiente gráfico se muestra la clasificación de los GR en base a su actividad por sector geográfico.

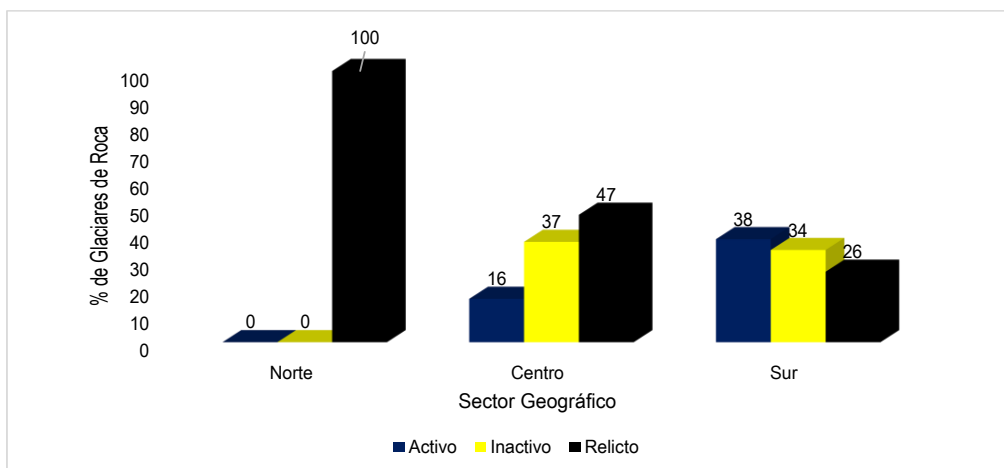


Gráfico 10. Clasificación de glaciares de roca en base a su actividad y sector geográfico.

Como se observa del gráfico anterior en el sector geográfico del norte, el 100% de GR es relicto, en el centro, el mayor porcentaje de GR es relicto y en el sur este último representa el menor porcentaje de GR. En el siguiente mapa se observa la distribución de GR en base a su actividad a lo largo de las cordilleras peruanas.

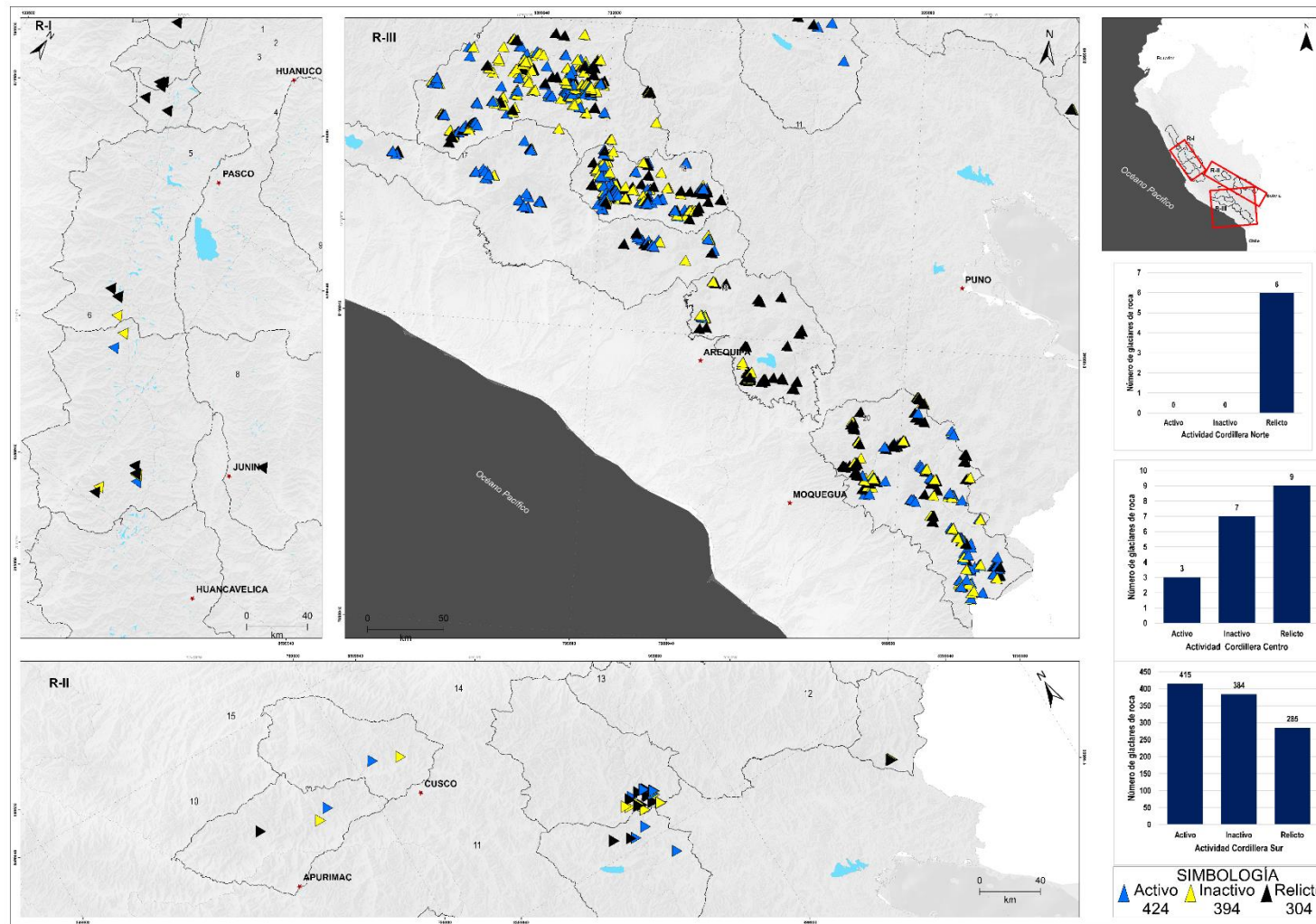


Figura 20. Mapa de distribución de glaciares de roca en base a su actividad.

En el mapa mostrado, el extremo superior izquierdo representa las cordilleras del norte (R-1), el mapa inferior representa las cordilleras del centro (R-II), mientras que el mapa (R-III) representa las cordilleras del sur, el gráfico de dispersión de la derecha muestra la distribución de los GR basado en la precipitación media (eje de las ordenadas) y la latitud (eje de las abscisas).

L. Velocidad de los glaciares de roca basado en Cosi-Corr y DInSAR

Los resultados usando Cosi-Corr y DInSAR muestran que los GR tienen movimiento, tanto en horizontal como en la vertical. La cordillera donde se ha obtenido una mayor velocidad superficial promedio ($\overline{V_s}$) de los GR es Vilcanota con un valor $\overline{V_s} = 53.5$ cm/mes, seguida de la cordillera Ampato con una $\overline{V_s} = 31.7$ cm/mes, Huanzo $\overline{V_s} = 19.8$ cm/mes, Chila $\overline{V_s} = 16.2$ cm/mes, Barroso $\overline{V_s} = 15.5$ cm/mes y Volcánica $\overline{V_s} = 6.6$ cm/mes; en las demás cordilleras no se encontró movimiento superficial de los GR. En cuanto al movimiento o desplazamiento vertical promedio (\overline{dv}) de los GR usando DInSAR, se determinó que existen fenómenos de subsidencia y levantamiento en los GR, en Vilcanota y Volcánica se determinó que existen mayores fenómenos de levantamiento con valores iguales a $\overline{dv} = 0.4$ cm/año y $\overline{dv} = 0.5$ cm/año respectivamente, en cuanto a fenómenos de subsidencia, las cordilleras de Ampato, Huanzo, Chila y Barroso tienen en promedio valores iguales a $\overline{dv} = -3.2$ cm/año, $\overline{dv} = -1.6$ cm/año y $\overline{dv} = -2.9$ cm/año.

En el siguiente gráfico se muestra en un mapa los resultados obtenidos producto las técnicas señaladas en este ítem.

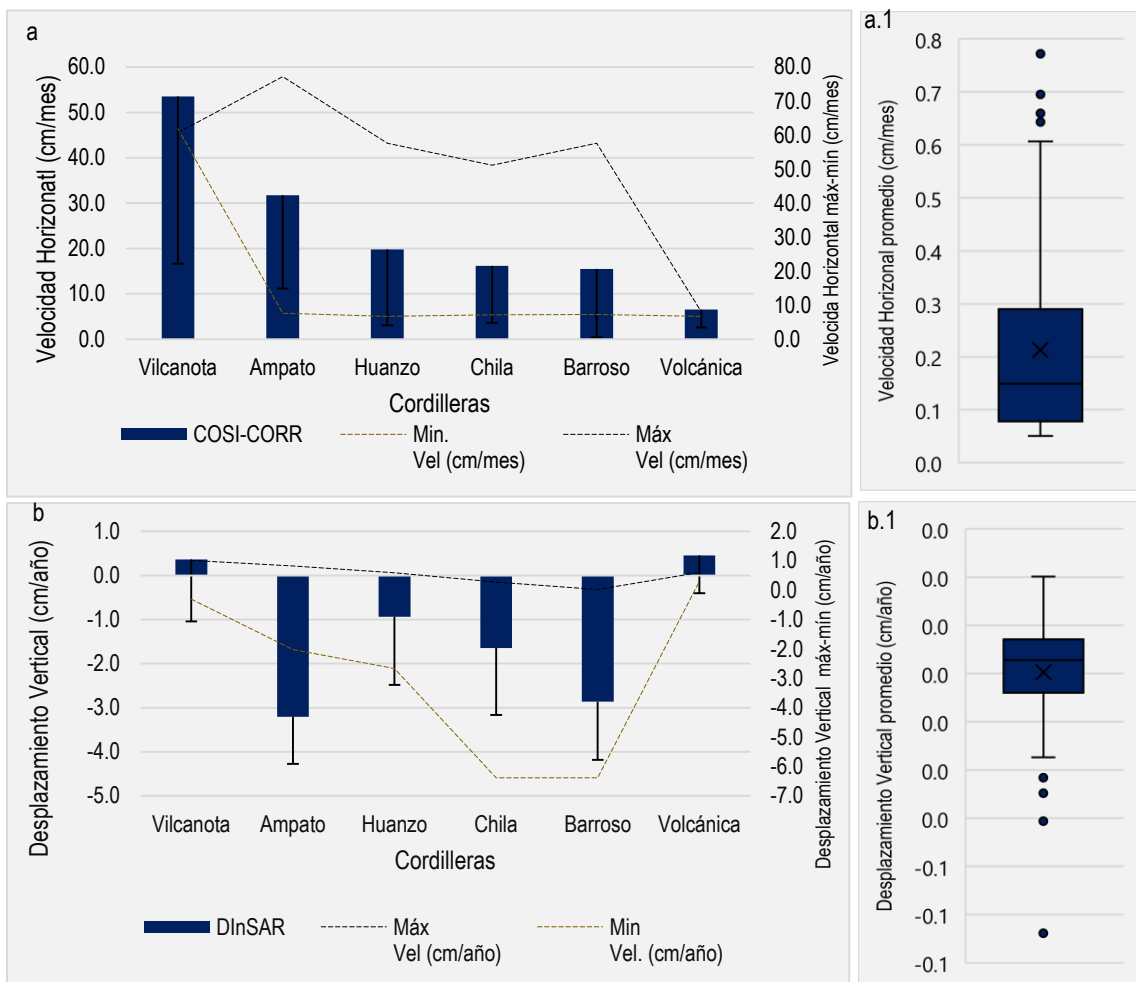


Gráfico 11. Velocidad horizontal y desplazamiento vertical de los glaciares de roca. ‘a’ y ‘b’ muestran la velocidad superficial y desplazamiento vertical de los GR, en barras se muestra la velocidad promedio, en línea de color negro la máxima y en dorado la mínima, en ‘a.1’ y ‘b.1’ se muestra el diagrama de caja de las velocidades promedio de los GR.

En la siguiente tabla se presenta los resultados de la velocidad mínima, máxima y promedio de la velocidad superficial y el desplazamiento vertical de los GR de las cordilleras donde se han registrado movimiento de GR en base a las técnicas aplicadas, Cosi-Corr y DInSAR.

Tabla 19

Promedio, máximo y mínimo de velocidad superficial y desplazamiento vertical de GR.

Cordilleras	Promedio (cm/mes)	Mínimo (cm/mes)	Máximo (cm/mes)	Promedio. (cm/año)	Mínimo (cm/año)	Máximo (cm/año)
		COSI-Corr			DInSAR	
Vilcanota	53.5	3.3	147.7	0.4	-7.0	1.0
Ampato	31.7	2.5	105.8	-3.2	-6.4	-2.1
Huanzo	19.8	1.2	75.6	-0.9	-6.1	0.7
Chila	16.2	0.7	50.1	-1.6	-6.1	0.0
Barroso	15.5	0.2	55.4	-2.9	-6.0	-1.1
Volcánica	6.6	0.1	14.1	0.5	-3.4	2.0

De manera general, se ha encontrado que existen GR cuya \overline{Vs} máxima por cordillera superan los 100 cm/mes, a saber, la Cordillera Vilcanota, cuya \overline{Vs} máxima es 147.7 cm/mes (Cordillera Vilcanota) y Cordillera Ampato, cuya \overline{Vs} máxima es 105.8 cm/mes, además, el mayor dv se registró en la Cordillera Vilcanota $dv = -7.0$ cm/año y Ampato con $dv = -6.4$ cm/año, mientras que Huanzo y Chila presentan un valor similar de $dv = -6.1$ cm/año.. Se encontró que la tendencia en general, es que los GR que tienen los máximos movimientos están en su mayoría en el extremo sur occidental de las cordilleras peruanas.

En el siguiente mapa se muestran los resultados de Cosi-Corr y DInSAR para el GR San Félix de la cordillera Chila. En “a” se presenta movimientos que llegan al orden de 1

m/mes de movimiento superficial, estos valores en tonalidades naranjas y rojas, representan los máximos movimientos superficiales que ocurren en el GR bajo análisis, mientras que las tonalidades azules muestran valores más cercanos al reposo (0 m/mes). En “b” se presenta el desplazamiento vertical del GR San Félix, en el que se observa que los mayores desplazamientos ocurren en el extremo superior izquierdo y muy cerca al frente del GR en el orden de -7 cm/año. En cuanto a la correlación de imágenes o indicador señal/ruido, se observa que superficialmente y verticalmente hay menor correlación (tonalidades blancas y grises de la Figura 21c y d, esto debido a la presencia de nieve y zonas de mayor dinámica en la raíz del GR, sin embargo, es mayor a 0.7 por lo que no se enmascaró esta zona como valores nulos o sin datos, por lo que, muestran buena relación señal/ruido..

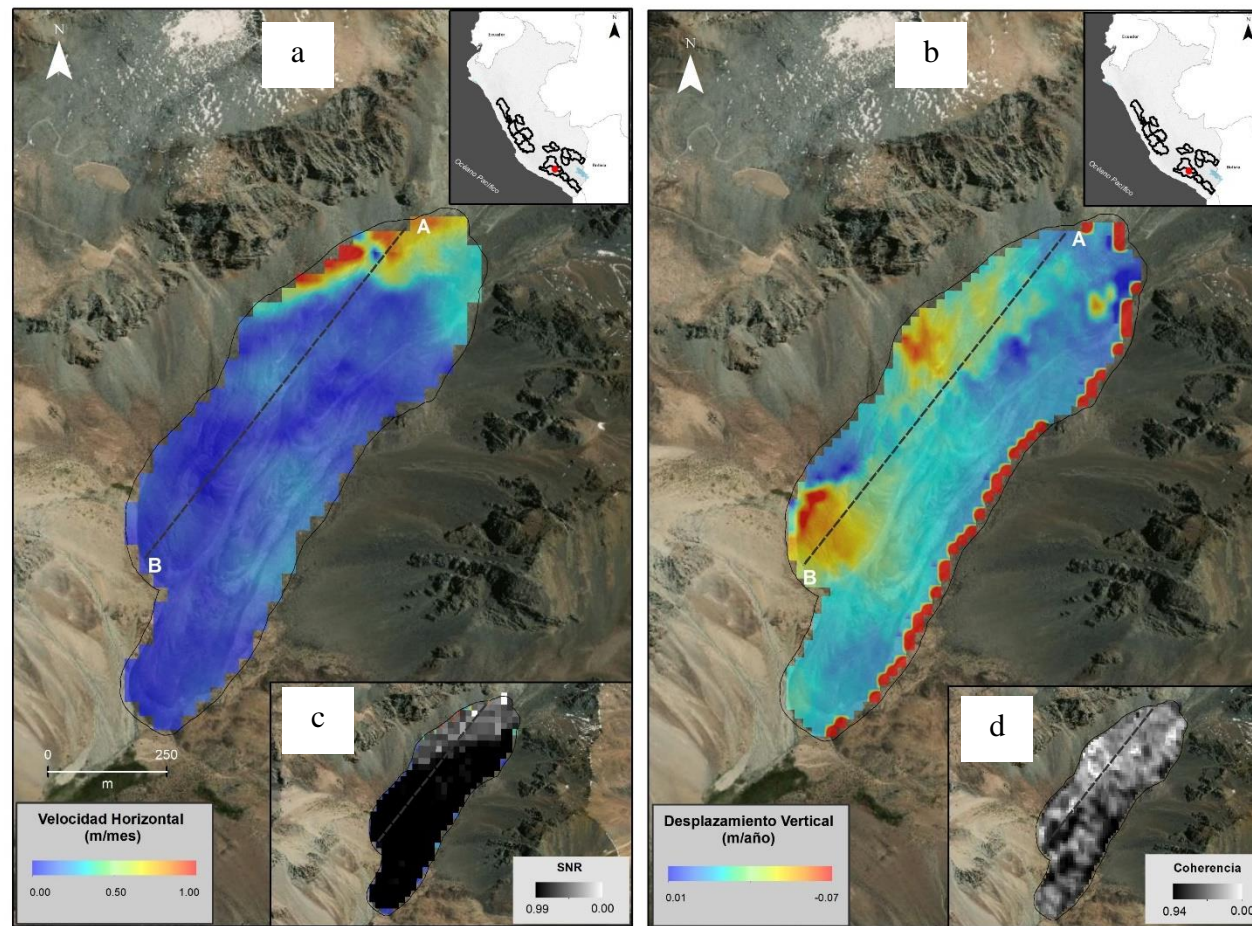


Figura 21. Mapa de velocidades horizontales y verticales de los glaciares de roca en el Perú. “a”, velocidad superficial del GR San Félix, “b”, desplazamiento vertical. En ambos casos se muestra la relación señal/ruido, “c”, SNR para Cosi-corr y “d”, coherencia para DInSAR.

De la figura anterior, se representó el perfil longitudinal de la la recta AB respecto a la velocidad superficial del GR San Félix y el desplazamiento o movimiento vertical, siendo A el punto más alto y B el punto más bajo del perfil, en el siguiente gráfico se muestra el perfil indicado.

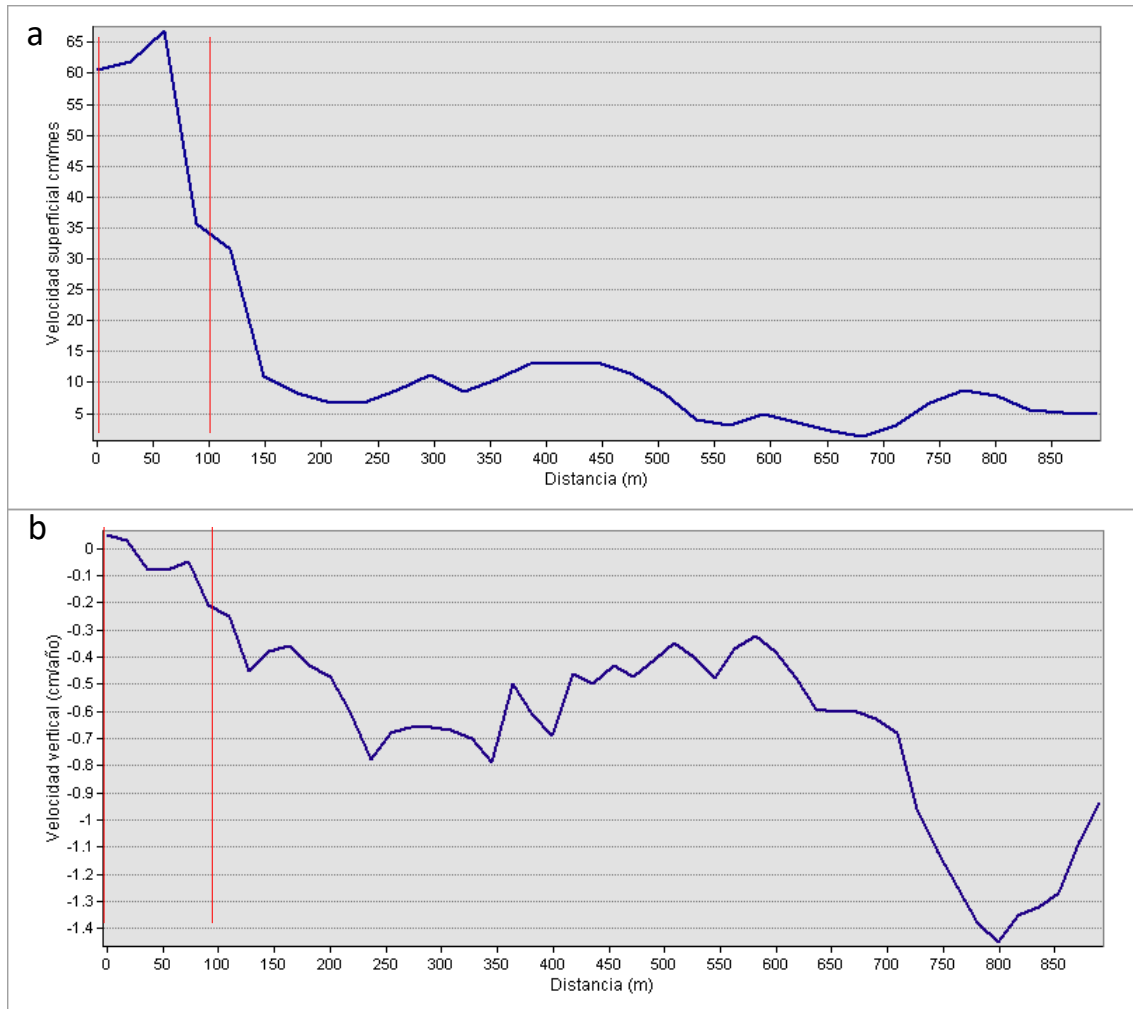


Gráfico 12. Perfil longitudinal de velocidad superficial y desplazamiento vertical del glaciar de roca San Félix. En ‘a’ se muestra el perfil longitudinal de la velocidad superficial sobre el GR San Félix, mientras que en ‘b’ se muestra el desplazamiento vertical, las líneas de color rojo hace referencia a los primeros 100 m del perfil AB.

Del Gráfico 15(a) se muestra que las mayores velocidades superficiales del perfil AB se dan en los primeros 100 m, esto se muestra por el marcado quiebre de pendiente que ocurre entre los 50 y 150 m del inicio de la recta. Lo anterior tiene coherencia, debido a que es en las partes altas de los GR en donde ocurre los mayores aportes de detritos de las partes altas de las montañas y las mayores precipitaciones sólidas. En “b” se muestra

que predominan los movimientos de subsidencia (valores negativos de movimiento) a lo largo de todo el perfil AB.

5.1.2 Objetivo específico 2: variables topoclimáticas que controlan la presencia de glaciares rocosos activos.

A. Correlaciones bivariadas de Pearson de las variables topoclimáticas.

Se analizaron los factores climáticos y topográficos que podrían controlar la presencia de GR activos/inactivos/relictos en los Andes Tropicales del Perú aplicando métodos de regresión logística binaria, se muestran los principales hallazgos.

Del análisis de correlaciones bivariados de Pearson se obtienen aquellas variables que están relacionadas y de las cuales se tendría que evaluar su consideración en el modelo de regresión logística para evaluar su influencia en el control de la presencia de GR activo/inactivos/relictos.

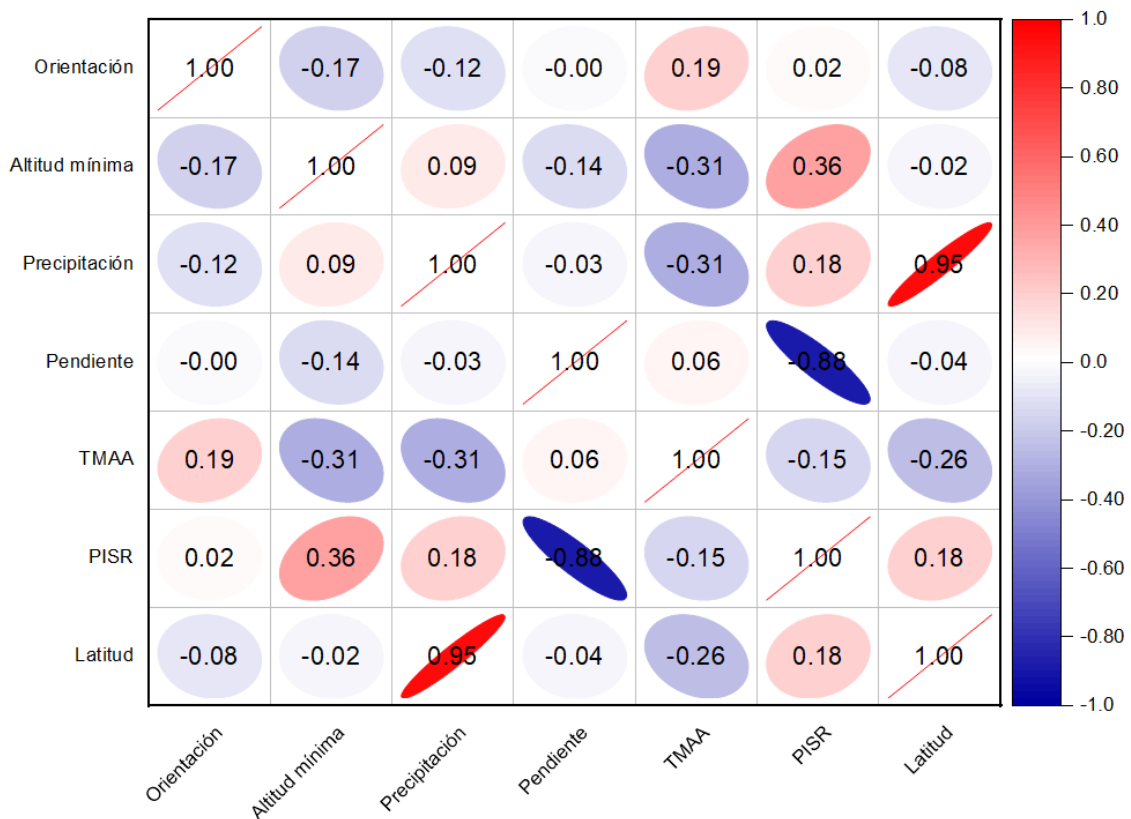


Gráfico 13. Análisis de correlaciones bivariado de Pearson. Las elipses más alargadas muestran una fuerte correlación entre los factores, ($r > 0.8$ y $r < -0.8$).

Del gráfico anterior se observa una fuerte relación entre el PISR y la pendiente, además de la latitud y precipitación con valores de -0.88 y 0.95 respectivamente, además, gráficamente son las variables con el elipse más alargado en sus vértices.

Ahora, hace falta el análisis de multicolinealidad para analizar aquellas variables que podrían influir o sesgar los factores que pueden explicar la presencia de GR activos/inactivos/relictos en los CAT del Perú, unos indicadores más sofisticados que puedan explicar la colinealidad de los factores es el factor de tolerancia (T), que un valor es menor a 0.1 indica una grave multicolinealidad (Menard 2002), también el factor de inflación de la varianza (VIF), los valores de VIF mayores a 10 se consideran críticos (Sattler 2016; Angillieri 2017), a continuación se presenta la tabla del análisis de multicolinealidad.

Tabla 20

Análisis de multicolinealidad

Factores	Coeficientes	
	Estadísticas de colinealidad	
	Tolerancia	VIF
Orientación promedio	0.907	1.103
Altitud mínima	0.555	1.802
Precipitación media	0.087	11.458
Pendiente promedio	0.162	6.180
TMAA	0.809	1.236
PISR (kWh/m ²)	0.136	7.352
Latitud	0.087	11.551

De color rojo se indican aquellos factores que presentan multicolinealidad

De la tabla anterior se observa que la precipitación media-latitud podrían generar multicolinealidad en el modelo de regresión logística, y esto indica que los factores predictores podrían predecirse haciendo uso de solo una de ellas, esto debido a que el T y el VIF es menor a 0.1 y mayor a 10 respectivamente.

En cuanto al grado de influencia de los factores para indicar presencia de GR activos/inactivos se aplicó el modelo de regresión logística binaria para su predicción

usando los factores de: orientación promedio, altitud mínima, TMAA, precipitación media, pendiente promedio y PISR; dichos factores han sido usados en estudios similares (Angillieri 2017; Brenning 2005a; Brenning y Azócar 2010; Azócar et al. 2017), además, son los factores topográficos y climáticos más usados para describir la ocurrencia de estas geoformas. Vale indicar que en el modelo se usaron los GR que tienen un área mayor a 3 ha, esto debido a la resolución espacial de los ráster de precipitación y temperatura usada (1 km), además, los ráster de orientación, altitud mínima, pendiente promedio (12.5 m) y PISR (30 m), por lo que, a fin de uniformizar los productos del modelo, se usó solo GR con un área mayor a 3ha. En estudios similares, se usaron solo aquellos GR con un áreas mayores a 1ha (Brenning y Trombotto 2006).

Tabla 21

Variables de regresión logística binaria 1

Factores	B	Significancia	Exp(B)
Orientación promedio	-0.003	0.414	0.997
Altitud mínima	0.004	0.000	1.004
Precipitación media	-0.067	0.051	0.935
Pendiente promedio	0.196	0.047	1.216
TMAA	-0.026	0.704	0.974
PISR (kWh/m2)	0.019	0.086	1.019
Constante	-23.216	0.118	0.000

Significancia $p < 0.05$, de color rojo se indican los factores que no son significativos para el modelo

La segunda columna, “B” indica los coeficientes de cada factor en el modelo de regresión logística, los valores positivos de los coeficientes en el caso de la altitud indica que, a mayor altitud, hay más probabilidad de encontrar un GR activo o inactivo, en el caso de la TMMA el coeficiente negativo indica que, mientras más bajos los valores de TMAA, hay más probabilidad de encontrar GR activos o inactivos, es decir, el caso de éxito en el MRLB. La tercera columna muestra la “significancia” de los factores de estudio, para esta investigación se estableció una significancia para $p < 0.05$, la cuarta columna Exp(B) u odds ratios, muestra la relación del factor con la variable dependiente, valores iguales a 1, muestran que el factor no tiene asociación con la variable dependiente, mientras más alejados o cercanos a 1 estén los odds ratios, significa una mayor o menor asociación, de todos los factores, en este modelo, la

pendiente es la que tiene mayor asociación con la variable dependiente, probabilidad de que los GR sean activos o inactivos, es decir, a mayor pendiente, hay más probabilidad de que los GR sean activos o inactivos,

Del tabla anterior se desprende que, si se consideran en un mismo modelo factores topográficos y climáticos, estadísticamente no hay significancia en algunas de las variables, ante esto se van depurando factores en el modelo y se va ajustando el modelo, hasta encontrar solo aquellas variables que en el MRLG son estadísticamente significativas, resultando lo siguiente.

Tabla 22

Variables de regresión logística binaria 2

Factores	B	Significancia	Exp(B)
Pendiente promedio	0.275	0.002	1.317
PISR (kWh/m2)	0.029	0.003	1.030
Altitud mínima	0.003	0.001	1.003
Constante	-51.284	0.000	0.000

Significancia $p < 0.05$, AUC=0.7 (área bajo la curva), 82% de predictibilidad

De la tabla anterior se muestra que la pendiente promedio, el PISR y la altitud mínima son factores significativos que podrían explicar la presencia de los GR activos/inactivos/relictos en un modelo estadístico, intrínsecamente la altitud mínima está incluida la TMAA, debido a que son variables que están correlacionadas, a su vez, del PISR está incluido la orientación promedio.

5.2 Resultados inferenciales

5.2.1 Objetivo específico 1: *relación entre la altitud, superficie, distribución, actividad, PISR, TMAA, precipitación y velocidad de los glaciares de roca*

A. *Número y superficie de glaciares de roca por cordillera*

En el siguiente gráfico se muestra el número de GR por cordillera, en él se refleja que la relación entre el número de glaciares de roca y la superficie de los mismos es directamente proporcional, es decir, en aquellas cordilleras donde existe mayor número de glaciares de roca también existe mayor superficie.

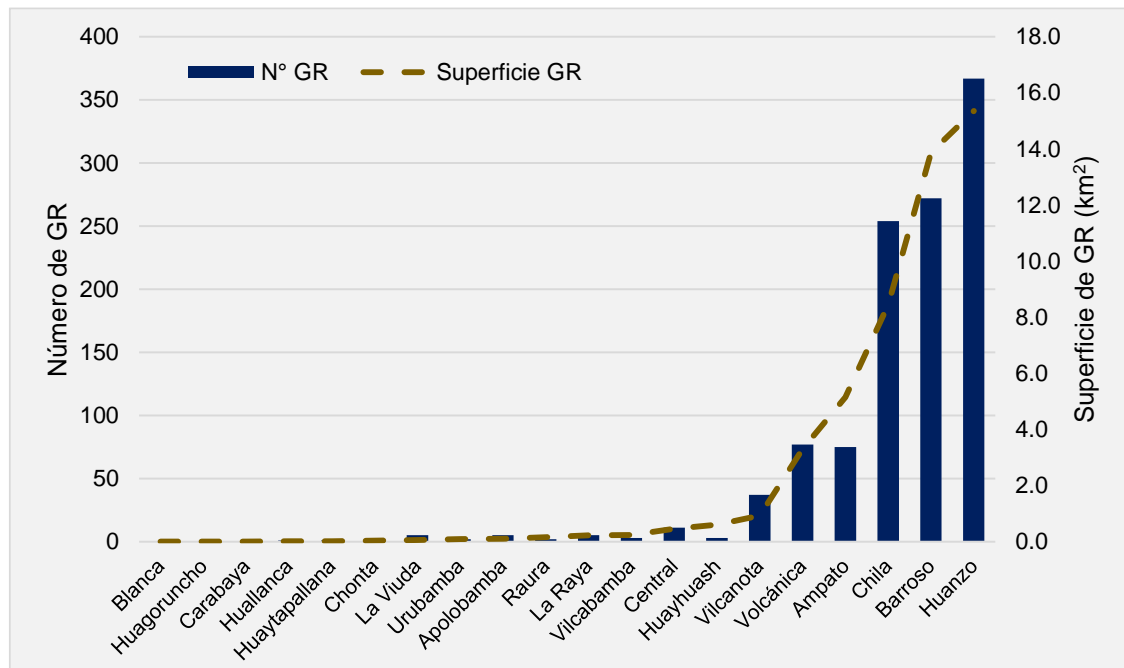


Figura 22. Número y superficie de glaciares de roca por cordilleras.

C. Altitud de los glaciares de roca respecto a la TMAA, PISR y precipitación

Las cordilleras en las que la altitud promedio de los GR son mayores son: Ampato (5128 m s.n.m.), Vilcanota (5023 m s.n.m.), Barroso (5002 m s.n.m.), Chila (4991 m s.n.m.), Volcánica (4955 m s.n.m.) y Huanzo (4920 m s.n.m.), todas con >30 GR, son donde se presenta las menores TMAA promedio de las zonas donde se encuentran GR <3.0° C, en cuanto a la precipitación también presenta la misma tendencia, es decir, en las cordilleras donde los GR se ubican a mayor altitud se presentan los menores valores de precipitación, estas tendencias van en aumento en la medida en la que las altitudes promedio de los GR disminuyen. También se encontró que los GR que se encuentran en las cordilleras del norte tienen una menor altitud mínima promedio (4736 m s.n.m.) en comparación que la altitud mínima promedio de los GR de las cordilleras del centro (4771 m s.n.m.) y este último es menor que el promedio de altitud mínima de los GR de las cordilleras del sur (4855 m s.n.m.), es decir, la altitud mínima o altitud iniciación de los GR aumenta de norte a sur o aumenta en la medida en la que se aleja del Ecuador,

así mismo, en general se observa una disminución de la TMAA mínima sobre los GR de norte a sur, mientras las cordilleras del norte y centro están sobre los $>2^{\circ}\text{C}$ TMAA mínima en las cordilleras del sur la TMAA mínima está bajo los 2°C , es decir, más cerca al punto de congelación (0°C), además, solo en las cordilleras del sur se han registrado valores de TMAA mínima bajo el punto de congelación, mientras que en las cordilleras del centro y norte están sobre los 0°C . En cuanto a la precipitación, los menores valores de precipitación promedio registrados sobre los GR se encuentran en el las cordilleras del sur (64 mm), mientras que la precipitación de los GR de las cordilleras del norte y sur están sobre los >70 mm, por último, no se ha encontrado una tendencia geográfica del PISR sobre los GR, es decir, el PISR promedio de GR de las cordilleras del centro es mayor en el centro (1073 kWh/m^2), seguida de las del norte (1049 kWh/m^2) y por último los GR del sur (1039 kWh/m^2).

La siguiente tabla muestra lo indicado anteriormente.

Tabla 23

Altitud y TMAA, de los glaciares de roca por cordillera y sector geográfico

Sector geográfico	Cordilleras	Número de GR	Altitud promedio (m s.n.m.)	Altitud mínima (m s.n.m.)	TMAA (°C)	TMAA mínima (°C)	PISR (kWh/m ²)	Precipitación (mm/año)
	Blanca	-	-	-	-	-	-	-
Norte	Huallanca	1	4716.8	4666	3.2	3.2	1017.9	72.0
	Huayhuash	3	4839.3	4752	2.9	2.7	1050.3	72.7
	Raura	2	4844.4	4789	3.4	0.0	1078.6	71.6
	Central	11	4901.3	4841	4.3	2.2	1030.3	68.9
Centro	Chonta	2	4895.1	4861	3.4	2.8	1084.7	70.9
	Huagoruncho	-	-	-	-	0.0	-	-
	Huaytapallana	1	4647.0	4631	4.6	4.6	1102.0	83.7
	La Viuda	5	4771.2	4751	2.1	1.8	1075.3	74.7
	Ampato	75	5127.6	5072	2.0	-2.5	1082.8	52.4
	Apolobamba	5	5019.6	4992	3.7	3.7	1050.4	78.0
	Carabaya	-	-	-	-	0.0	-	-
Sur	Chila	254	4990.8	4944	1.8	-0.8	1044.6	55.6
	Huanzo	367	4920.2	4881	2.1	0.6	1066.9	63.9
	La Raya	5	4797.4	4741	4.6	2.0	1007.7	77.7
	Urubamba	2	4763.3	4705	6.2	5.8	1033.3	79.9
	Vilcabamba	3	4435.9	4363	11.7	7.7	1070.7	80.9
	Vilcanota	37	5023.3	4993	2.1	0.0	946.9	68.8
	Barroso	272	4993	4951	1.60	-1.6	1044.8	39.0
	Volcánica	77	4975	4904	1.05	0.3	1047.7	39.6

En el siguiente gráfico se muestra la tendencia de la altitud mínima, la TMAA, precipitación y PISR. En general, se desprende que a medida que la altitud de los GR disminuye (barras azules), la tendencia de la TMAA (líneas punteadas rojas) y precipitación aumenta (líneas punteadas celeste), mientras que no hay una tendencia marcada con el PISR directo (línea punteada dorada), sin embargo, los menores valores promedio de PIRS predominan en los GR de las cordilleras del sur.

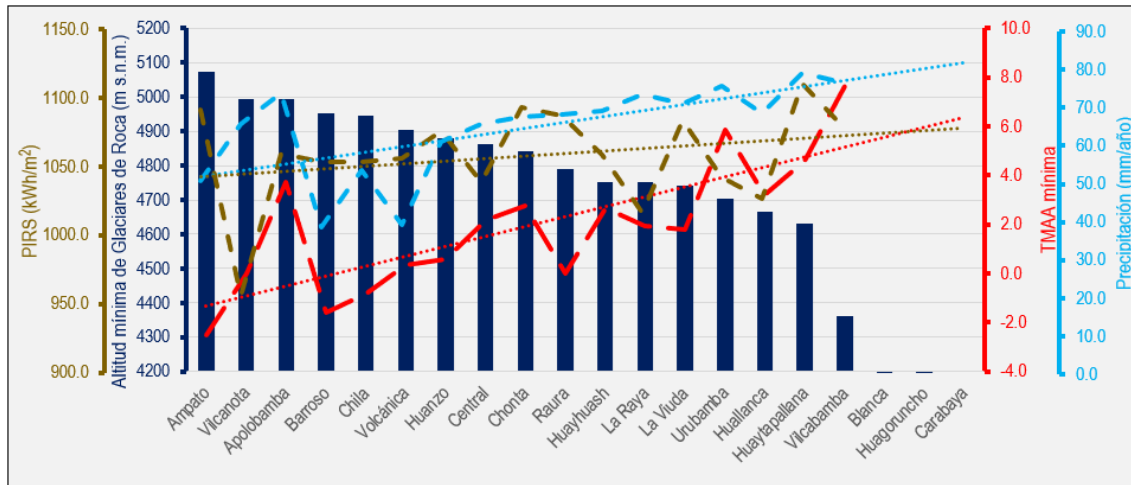


Gráfico 14. (a), relación entre la altitud mínima de los glaciares de roca, la TMAA mínima, Precipitación promedio y PISR. En las barras de color azul se muestran las altitudes mínimas promedio de los GR, las líneas punteadas de color celeste muestran la precipitación, las líneas rojas punteadas la TMAA, por último, la línea dorada punteada el PISR.

D. Altitud respecto a la TMAA, precipitación, PISR y actividad de los glaciares de roca

Los GR de la cordillera de los andes peruanos tienen una altitud promedio de 4862 m s.n.m., en el siguiente gráfico se muestra que en “a” los GR activos tienen una altura promedio de 5021 m s.n.m. ($\Delta = 1277$ m s.n.m.) y una TMAA promedio de 2.2°C ($\Delta = 11.9^{\circ}\text{C}$), los inactivos 4966 m s.n.m. ($\Delta = 999$ m s.n.m.) y una TMAA de 2.4°C ($\Delta = 17.6^{\circ}\text{C}$), los fósiles o relictos 4914 m s.n.m. ($\Delta = 894$ m s.n.m.) y una TMAA de 2.9°C ($\Delta = 12.3^{\circ}\text{C}$) en promedio, en cuanto a la precipitación en “b”, los GR activos tienen un promedio de 53.7 mm/año ($\Delta = 52.4$ mm/año), los inactivos 55.9 mm/año ($\Delta = 56.1$ mm/año), y los relictos 52.6 mm/año ($\Delta = 55.7$ mm/año), por último, en cuanto al PISR en “c”, los GR activos tienen un PIRS de 1055 kWh/m^2 ($\Delta = 251.2 \text{ kWh/m}^2$), los inactivos 1053.5 kWh/m^2 ($\Delta = 253.7 \text{ kWh/m}^2$) y los relictos 1043.8 kWh/m^2 ($\Delta = 231.4 \text{ kWh/m}^2$). En general, la clasificación altitudinal de los GR basado en la actividad mostrados en el diagrama de caja “a”, “b” y “c” confirman de manera cuantitativa la confiabilidad de la clasificación de la actividad de los GR basado en los atributos geomorfológicos, esto debido a que el rango de altitud promedio de los GR activos es razonablemente mayor a la de los GR inactivos ($\Delta = 55$ m) y mayor a la de los GR relictos ($\Delta = 108$ m), este resultado es acorde

a que los GR activos en general se ubican a mayores altitudes que los GR inactivos y relictos, además, existen GR activos e inactivos que se encuentran en zonas donde la TMAA es mayor a 0°C (evidenciado por los colores de los valores extremos inferiores de la altitud de los GR activos, tonalidades rojos y naranja, en “a” y “b”), mientras que la precipitación “b”, se observa que no hay diferencias significativas entre la precipitación de las zonas donde se encuentran los GR activos, inactivos y relictos (evidenciado en el color de los valores extremos del gráfico “b” todos de color celeste), por último, el PISR en “c”, en la que en general, los mayores valores de PISR se registran en zonas donde la altitud es mayor (evidenciado por tonalidades moradas de los valores extremos de la altitud de los GR activo, inactivo y relictos, en “c”).

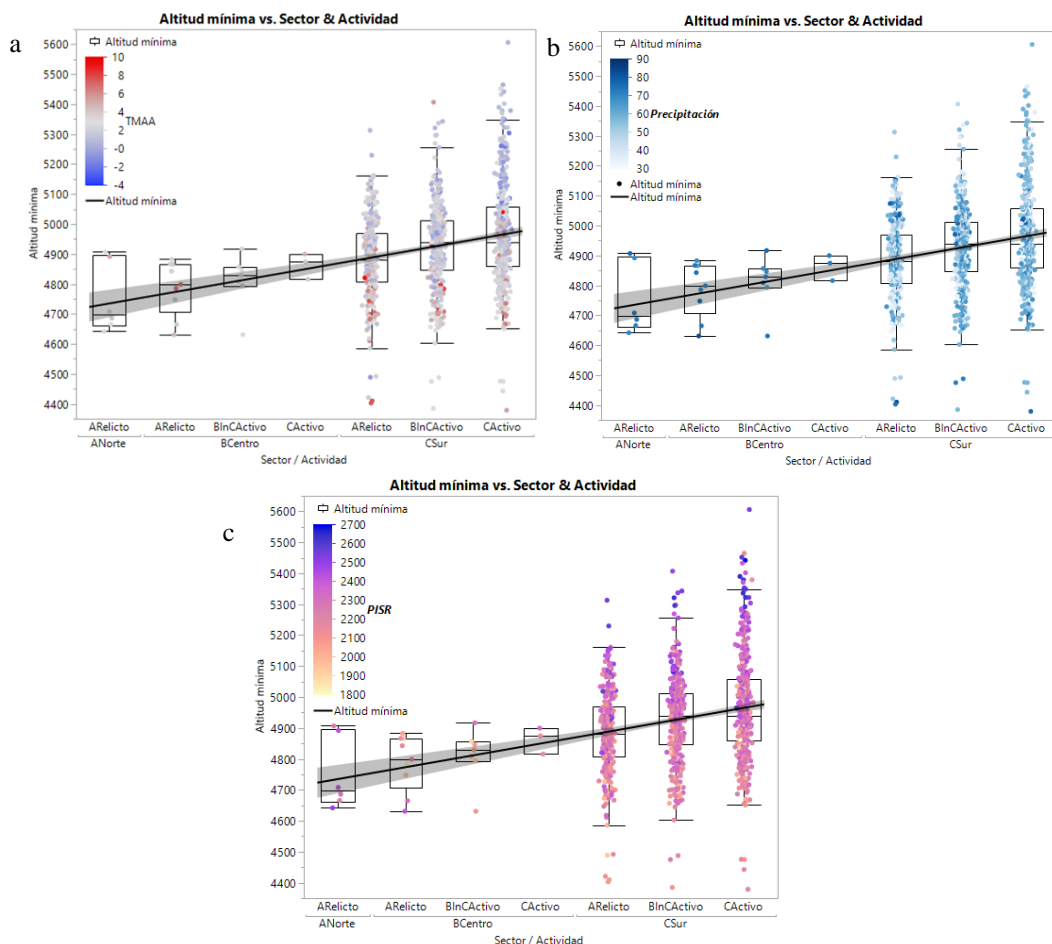


Gráfico 15. Diagrama de caja de la altitud respecto a la actividad de los glaciares de roca la TMAA, PISR y precipitación. Se muestra los diagramas de cajas de la actividad y altitud de los GR en base a la TMAA (a), la precipitación (b) y el PIRS directa (c), las barras de colores en cada subgráfica representan la variación de TMAA, precipitación y PISR.

A continuación, se muestra un gráfico de dispersión latitudinal de GR en base a la altitud y se muestran los promedios de TMAA, precipitación y PIRS por tipo de actividad de los GR. En general, el gráfico muestra que los GR se concentran en latitudes que van desde los 14° S hasta los 17.5°S, además, se muestra de manera gráfica lo mencionando el párrafo anterior, la tendencia de los GR activos se encuentran a mayor altitud que los GR inactivos y relictos, además, la línea verde punteada indica el probable límite inferior del permafrost de montaña trazada en base a los GR intactos (GR activos e inactivos).

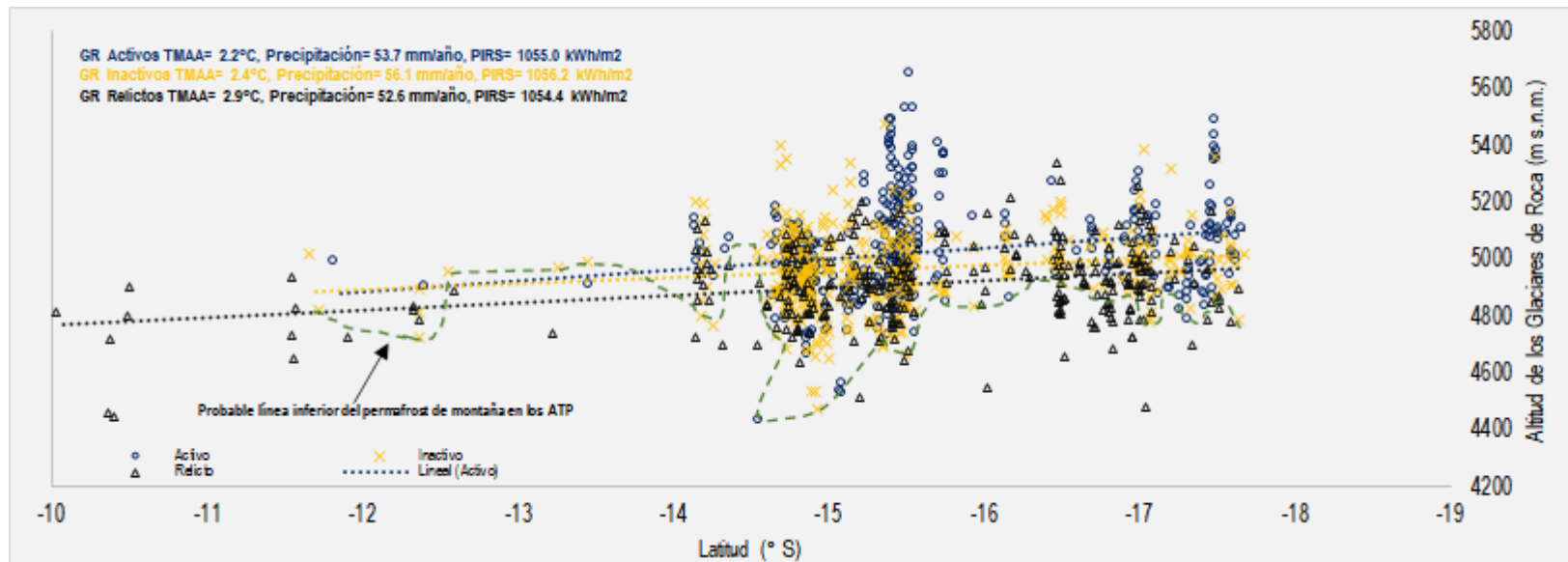


Gráfico 16. Altitud, actividad, longitud TMAA, PIRS y precipitación de los glaciares de roca del Perú. Los símbolos representan la dispersión altitudinal de la actividad de los GR, círculos azules=GR activos, aspas naranjas= GR inactivos, triángulos negros=GR relictos o fósiles. Las líneas representan la línea de tendencia de la altitud de los GR. En líneas verdes punteadas el límite inferior de permafrost de montaña en base a los GR intactos.

Además, se muestra que la pendiente de la línea de tendencia de los GR activos es mayor en comparación de los inactivos y relictos, este último es el que presenta la línea de tendencia más cercana al eje horizontal, lo que se traduce, en una menor variación en el rango de altitudes a lo largo de la cordillera de los andes peruanos.

E. Velocidad de los glaciares de roca, temperatura y altitud

La relación de la velocidad superficial y el desplazamiento vertical de los GR altitud (en “a”) y TMAA (en “b” y “c”) de los GR se muestra en el siguiente gráfico. En general, se observa que tanto la velocidad superficial de los GR como en el desplazamiento vertical hay un aumento de valores en la medida en la que la altitud de los GR aumenta (en “a”), esto se evidencia por el aumento de pendiente de la línea de tendencia de la velocidad superficial en la medida en la que aumenta la altitud y velocidad de GR. En “b” y “c” se observa que los GR que presentan movimiento superficial y vertical están en su mayoría sobre los 4600 m s.m.m. y se concentran entre los 4940 – 5150 m s.n.m., además, presentan una media de 0.2° C muy cercana a los 0.0° C de TMAA. Lo anterior muestra que en general, los mayores movimientos de los GR se dan en aquellas geoformas que están a mayores altitudes y menores TMAA, esto es razonable, ya que teóricamente estos GR tienen más probabilidad de tener hielo en su estructura interna (por estar cerca o bajo los 0°C de TMAA) y por tanto, favorece el desplazamiento descendente de hielo y detritos (Barsch 1996).

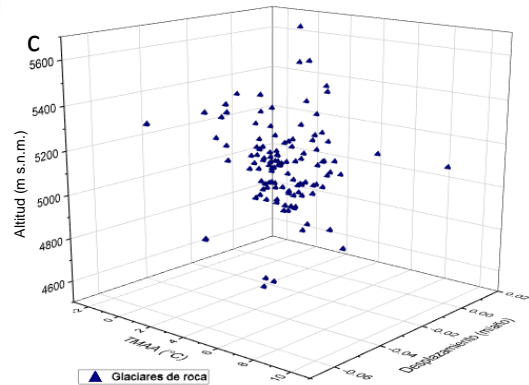
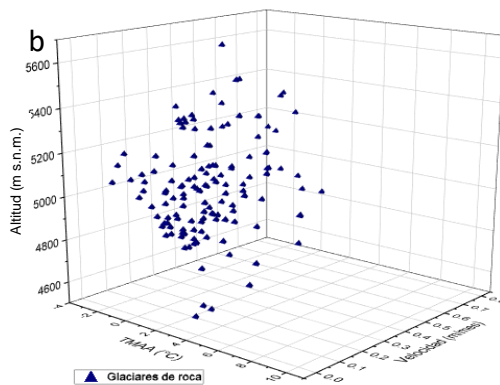
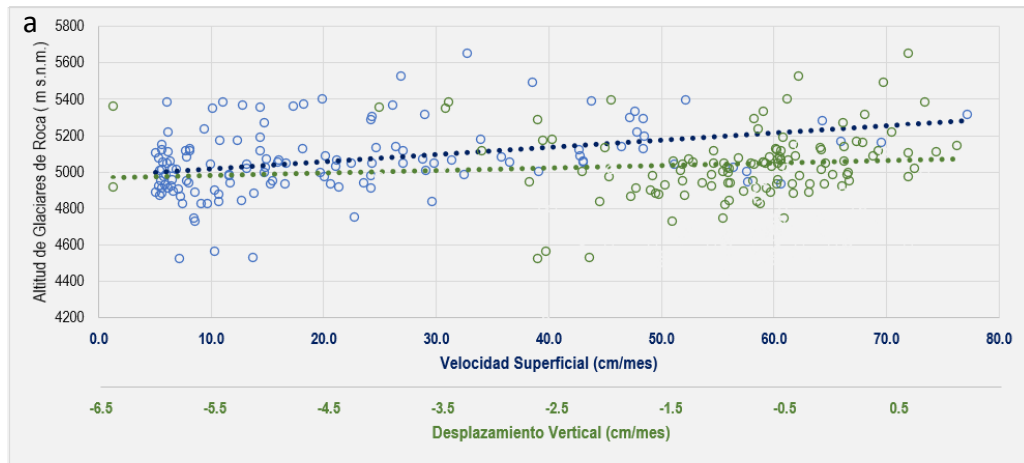


Gráfico 17. Relación entre la velocidad, altitud, TMAA, latitud y longitud de los glaciares de roca. 'a' muestra la relación entre la velocidad superficial y desplazamiento vertical de los GR y la altitud, 'b' y 'c' se muestra tridimensionalmente la relación entre la altitud, TMAA y la velocidad superficial y desplazamiento vertical de los GR respectivamente

En el siguiente gráfico se muestra el gráfico de velocidad horizontal de GR versus la TMAA de las zonas donde se ubican los GR.

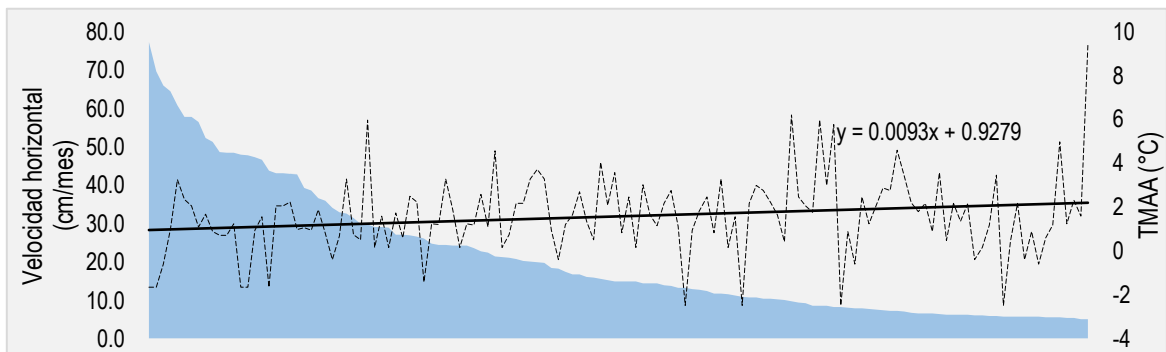


Gráfico 18. Relación de la velocidad superficial de glaciares de roca y la TMAA. Gráfico de relación entre la velocidad superficial de GR (área sombreada en celeste) y TMAA, la línea negra diagonal indica la tendencia de la TMAA

Del gráfico anterior se muestra que en la medida en que la TMAA aumenta la velocidad de los GR disminuye, es decir, existe una relación inversa entre estas variables, lo que podría explicarse con lo anteriormente mencionado, los valores de TMAA más cercanos a 0°C o menores a este, favorecen el desplazamiento descendente de hielo y detritos, por tanto, mayores movimientos, mientras que valores positivos más lejanos al punto de congelamiento (0°C) podrían condicionar en la disminución del contenido de hielo presente en los GR y por tanto en su disminución de su desplazamiento.

5.2.2 Objetivo específico 2: variables topoclimáticas que influyen en la presencia de los glaciares de roca

A. Respecto a la correlación de Pearson, multicolinealidad y modelo de regresión logística binaria de las variables que controlan la presencia de glaciares de roca.

En relación a la correlación de Pearson, Field (2009), indica que un valor de correlación bivariada mayor a ± 0.8 puede resultar en que un modelo de regresión estará influenciado por la multicolinealidad, es decir, dos o más variables predictoras están correlacionados, las demás variables analizadas de forma pareadas no presentan una relación entre ellas.

En cuanto a la multicolinealidad, la precipitación media y la latitud podrían generar multicolinealidad en un MRLB, el resto de las variables pueden usarse en el modelo para predecir la presencia de GR activos/inactivos/relictos ya que no presentan multicolinealidad en un MRLB. Se decidió eliminar del MRLB el factor de latitud, debido a que intrínsecamente, este factor se manifiesta en la distribución espacial de GR, es decir, se ha encontrado mayor cantidad de GR en el sur del Perú. Por otro lado,

En cuanto a los MRLB generados (2 modelos) se optó por considerar un modelo que contemple variables topográficas y climáticas, encontrando que, mientras mayores sean los valores de la pendiente promedio, el PIRS y la altitud mínima existe la probabilidad de que las variables dependientes sean de éxito, es decir, que sean GR activos e inactivos.

VI. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

Los resultados de la presente investigación proporcionan nuevos datos para el establecimiento de las características principales de los GR en el Perú, así como inferir el límite inferior y superior de las zonas periglaciares de las cordilleras peruanas y establecer este rango altitudinal como una zona de monitoreo de los efectos del cambio climático para con los elementos criosféricos de las zonas periglaciares.

6.1 Contrastación y demostración de la hipótesis con los resultados

De acuerdo con la hipótesis específica 1, se comprobó dicha hipótesis, pues en base a la aplicación de las TIG en las Cordilleras Tropicales Peruanas se determinó la distribución espacial de los GR, además se realizó la caracterización topoclimática, actividad y velocidad de los GR, siendo lo resaltante que el 97.8% de los GR del Perú se encuentran distribuidos en las cordilleras del sur del Perú, siendo las cordilleras Barroso, Chila y Huanzo las cordilleras que tienen mayor cantidad de GR, ~80% del total de GR del Perú, además, se encontró una altitud promedio de 4836 m s.n.m. de los GR en la cordillera peruana, con una orientación predominante S y SO, así mismo, el 7% del total de GR está bajo los 0°C. Además, el 38% de los GR son activos, los restantes son inactivos o relictos, por último, se encontró velocidades máximas de los GR de hasta 147.7 cm/mes.

De acuerdo con la hipótesis específica 2, se determinó que la combinación de factores topoclimáticos explica adecuadamente la presencia de GR activos en un clima moderno, pues la pendiente promedio, el PISR y la altitud mínima son los factores más significativos cuando se explica la presencia de GR en las cordilleras peruanas con un 82% de predictibilidad y un valor de 0.7 de la curva AUROC.

6.2 Contrastación de los resultados con otros estudios similares

6.2.1 Respecto a la distribución y el número de glaciares de roca

La distribución espacial de los GR está concentrado en zonas continentales donde existe temperaturas muy frías, secas y elevaciones donde la TMMA está por debajo de los 0°C (Harris 1981) y donde el cinturón periglacial es más grande (Kinworthy 2016), en el Perú, estas condiciones se dan en nuestras Cordilleras Peruanas Tropicales sobre los

4377 m s.n.m. aproximadamente, un total de 1122 GR fueron identificadas en 17 cordilleras peruanas con excepción de las cordilleras Blanca, Huagoruncho y Carabaya, y una mayor presencia de ellas en el sur del Perú (~98% del total de GR), entre las latitudes 14° y 17.5°S, zona caracterizada por presentar MAAT de -4°C y precipitación media de 287 mm, denominada como los trópicos exteriores secos (Sagredo y Lowell 2012). Algunos estudios de distribución de GR publicados en artículos científicos y tesis se han elaborado en la Cordillera de los Andes de países del sur y este del Perú, como Chile, Argentina y Bolivia; en los Andes Áridos Bolivianos, Rangecroft et al. (2014) identificó 130 GR usando Google Earth, desde los 15° – 22 ° de latitud S, en las cordilleras Real, Sajama y del Oeste, zonas caracterizadas por presentar un clima seco de escasa precipitación (entre los 0 – 400 mm/año) y donde la ELA (línea de equilibrio glaciar está sobre los >6000 m s.n.m.) en Chile, Azocar (2013) identificó 3575 GR entre los 29° - 32° de latitud S en los Andes Semi-Áridos Chilenos, zona caracterizada por presentar inviernos fríos y veranos secos y la precipitación en estas zonas se presenta en forma de nieve que tienen una persistencia de nieve de (7% a 100%, que es una medida de la fracción del año que permanece con nieve, Saavedra et al. (2018)) y Angillieri (2017) identificó 526 GR activos en los Andes Secos de San Juan en Argentina, entre los 28.5° a 32.5° S y 71.5° a 69° W, zona caracterizada por ser zonas de bajas de baja temperatura (-18 a 0°C) y escasa precipitación (150-200 mm). En general, se muestra que la distribución de GR en el ámbito de la Cordilleras de los Andes se dan en zonas donde el clima es frío, seco (de escasas precipitaciones), este patrón se repite en la zona sur del Perú, en donde se ha encontrado la mayor cantidad de GR del Perú (~98% del total de GR), y de estos el 20% del total de GR están ubicados en zonas donde la TMAA es <1°C, el promedio de precipitación de los GR del sur del Perú es 54 mm/año y por último, la zona presenta una persistencia de nieve de 7-30% (Saavedra et al. 2018), esto es acorde a lo que mencionan Barsch (1996); Harris (1981) y Brenning (2005a), que señalan que las condiciones anteriormente indicadas son propicias para el desarrollo de los GR. La distribución de los GR del Perú analizada desde el extremo norte de la Cordillera Blanca al sur de la Cordillera Barroso de los Andes Peruanos tiene una diferencia latitudinal de 10° aproximadamente en comparación con los Andes Secos Chilenos y los Andes Secos Argentinos de 3° y 4° de diferencia latitudinal respectivamente muestra que existe una menor cantidad de GR en

las cordilleras peruanas, esto probablemente a que estas zonas chilenas y argentinas tienen climas más fríos y secos en comparación con los Andes peruanos que están más cercanos al Ecuador. De lo anterior, se explica que la poca presencia de GR en las cordilleras del centro y del norte se debe principalmente a que ambas zonas se caracterizan por presentar humedad alta superior al 70%, TMAA muy lejana al punto de congelación (1.6°C), alta precipitación superior a 800 mm y baja radiación solar en comparación con el sur del Perú.

A nivel mundial, se han realizado diversos estudios que tratan de determinar la distribución espacial y características de los GR, Seligman (2009) en el norte de Adsaroka y Beartooth en EEUU (660 GR), caracterizada por presentar escasas precipitaciones (1000 a 1800 mm/año) y un amplio rango de temperatura (-9 a 12° C) ; Strel (2017) en el Norte de Tien Sahn en Asia Central (57 GR), zona caracterizada por estar entre los 40° a 46° N, presentar precipitaciones mayores a >800 mm/año y una media de temperatura de 3°C aproximadamente; Jones et al. (2017) en los Himalayas Nepaleses (6000 GR) entre los 22° y 30° de latitud N, presenta una precipitación <500 mm/año.). En general, los parámetros que controlarían la presencia de los GR en otras partes del mundo no tienen la misma influencia en los parámetros que contralan la presencia de GR en la Cordillera de los Andes, esto se evidencia por la relativa altas precipitaciones en otras partes del mundo, además, al tener otras características de climatología, topografía, geología, no se puede establecer una evaluación comparativa con otras partes del mundo desde el punto de vista de factores que controlan la presencia de GR.

Como se muestra anteriormente, los trabajos realizados a nivel mundial se centran en áreas que no representan la totalidad de un país, en este trabajo se muestra a detalle las características de los GR que están distribuidos a lo largo de todo el territorio peruano, encontrando que la densidad de GR aumenta de norte a sur en la Cordillera de los Andes Peruanos, concentrándose una mayor densidad de GR en el sur del Perú , próxima a la zona denominada como los Andes Secos de 18° a 33° de latitud sur (Saavedra et al. 2018); según el reporte de Jones et al. (2018) se estimó que el Perú concentra el 14% de GR del continente Sudamericano.

6.2.2 Respecto a la superficie de los glaciares de roca

Los 1122 GR en el Perú cubren una superficie de 49.06 km², representado el ~4% de la superficie de los glaciares limpios y cubiertos, además, la superficie de GR va desde los 1.15E-3 km² (0.15 ha) a 0.45 km² (45 ha). Realizando una comparación en cuanto a las superficies de GR encontrados en otros estudio se tiene que la superficie de los GR del Perú son notablemente más grandes respecto a la superficie del inventario nacional de GR de Bolivia (Rangecroft et al. 2014) en una proporción de 4.5:1 que tiene una superficie de 11 km² de GR, en cuanto a la superficie mínima de GR bolivianos presentan una mayor superficie mínima y máxima respecto a los GR peruanos, además, en cuanto a los GR de los Himalayas Nepaleses (Jones et al. 2017a) estos tienen una proporción de 30:1 en relación a la superficie de GR peruanos con un total de 1371 km² y 6000 GR encontrados. En la búsqueda de estudios con el mismo objetivo que la presente, no se ha encontrado más estudios, tanto a nivel regional como internacional, sin embargo, en el estudio de Jones et al. (2018) se muestra que la superficie de GR de Argentina y Chile es 3557.69 km² y representan una proporción de 7250 veces superior a la de los GR peruanos, por tanto, podemos inferir que la superficie de GR en los Andes Sudamericanos aumenta en la medida en la que se alejan del Ecuador y se acercan a la zona de los Andes Secos (18° - 35° latitud S) de la Cordillera de los Andes

En la siguiente tabla se muestra una comparación entre la superficie de GR peruanos frente a superficies de GR realizados en otras partes del mundo de manera integral como parcial.

Tabla 24

Comparación de superficie de glaciares de roca

País	Zona	Superficie (km ²)	Proporción de GR peruanos respecto a otras zonas
<i>Inventario Nacional de GR</i>			
Bolivia	Cordilleras bolivianas	11.00	4.5:1
Nepal	Himalaya Nepalés	1371.00	1:30
<i>Inventario parcial de GR</i>			
Chile	Cuenca del río Aconcagua	70.00	1.4:1
Argentina	Cordillera Frontal Argentina y Andes Secos	15.52	0.2:1
EEUU	Norte de Adsaroka y Beartooth - Nuevo México	18.50	0.4:1

En el párrafo anterior se explicó la relación de la superficie de GR peruanos frente a la superficie de GR bolivianos y de los Himalayas de Nepal, en cuanto a los estudios realizados de manera parcial como en la Cuenca del Río Aconcagua en Chile tiene una proporción de 1.4:1 en relación a la superficie de GR peruanos, mientras que en la Cordillera Frontal y los Andes Secos Argentinos tienen una proporción de 0.2:1 en relación a la superficie de GR peruanos. En general, en solo un estudio parcial de Chile se ha encontrado una mayor superficie de GR en relación a la de los peruanos, esto se debe a que es la zona con mayores condiciones de presencia de GR dada sus características climáticas, como climas fríos, secos y bajas precipitaciones. A la fecha, no se han encontrado acceso a datos abiertos de la distribución de total de GR en Chile y Argentina, por lo que se debería impulsar la libre disponibilidad de datos a nivel sudamericanos para profundizar en el estudio de sistemas periglaciares en los Andes Sudamericanos.

6.2.3 Respecto a la altitud de los glaciares de roca

Los GR, geformas de entornos periglaciares, en las Cordilleras de los Andes Peruanos ocurren en el rango altitudinal de ~4332 m s.n.m. a ~5707 m s.n.m. y presentan una media de ~4973 m s.n.m.; en las cordilleras del norte, el rango se encuentra entre los ~4716 a ~ 4990 m s.n.m. y una media de ~4821 m s.n.m.; en las cordilleras del centro el rango altitudinal se encuentra entre los ~4631 a ~4995 m s.n.m. y una media de ~4853 m s.n.m., por último, en las cordilleras del sur, el rango altitudinal es el más amplio en comparación con las demás cordilleras mostradas, va desde los ~4332 a ~5707 m s.n.m. con una media de ~4976 m s.n.m. , estos rangos altitudinales tienen una importancia en los entornos periglaciares, que en esta investigación se encontró que dicho cinturón periglaciario va en aumento o se amplía de norte a sur, lo que equivale a decir que la altitud mínima de los GR disminuye de norte a sur y el límite superior de los GR aumenta de norte a sur, lo que se traduce a que en el Perú, el cinturón periglaciario aumenta en la medida en la que se aleja del Ecuador y se acerca a los Andes Secos de la Cordillera de los Andes. Se aclara que los mínimos y máximos mostrados en este apartado corresponde a los mínimos y máximos de cada GR, es decir, pie del GR y límite superior del GR, anteriormente se mostró el promedio por cordilleras y por sector

geográfico; se decidió mostrar el límite inferior y superior de la altitud de los GR porque en base a estos se puede establecer la altitud de iniciación y altitud de finalización de los GR en el ámbito de las cordilleras del norte, centro y sur de las cordilleras del Perú.

La altitud mínima de los GR peruanos se encuentra a elevaciones más altas que los encontrados en los andes chilenos, >3000 m s.n.m. (Brenning 2005b) y 2370 m s.n.m. en la Cuenca del Río Aconcagua (Janke et al. 2017), y argentinos, >4300 m s.n.m. (Perucca y Angillieri 2011), y a menor elevación que los GR bolivianos >4475 m s.n.m. (Rangecroft et al. 2015). En cuanto al límite superior de los GR peruanos este se encuentra a mayor altitud que el límite superior de los GR chilenos <5000 m s.n.m., argentinos <5140 m s.n.m. y bolivianos <5162 m s.n.m. En cuanto al promedio de altitud de los GR del Perú se encuentran a una altitud superior a la de los GR argentinos 3766 m s.n.m., no se encontraron la altitud promedio de los GR chilenos y bolivianos. Se encontró que la diferencia altitudinal entre el límite inferior y superior de los GR peruanos, es mayor que la de los GR bolivianos ($\Delta=687$ m), argentinos ($\Delta=840$ m) y menor que la de los chilenos ($\Delta=2630$ m), esto considerando los estudios de Brenning et al., (2005b), Janke et al. (2017), Perucca y Angillieri (2011) y Rangecroft et al. (2014). En países diferentes a América Latina, los GR peruanos se encuentran a elevaciones más altas que los encontrados en los EEUU >1682 m s.n.m. (Legg 2016), Canadá >1900 m s.n.m. (Charbonneau y Smith 2018a), Italia >2000 m s.n.m. (Scotti et al. 2013), Austria >2095 m s.n.m. (Groh 2019b) y el norte de Tien Shan en Asia Central >3554 m s.n.m. (Strel 2017). No se realizó un análisis de la altitud máxima y promedio debido a que en estos estudios no se ha reportado valores de altitud máxima y promedio.

6.2.4 Respecto a la orientación y pendiente predominante de los glaciares de roca

Los GR de los andes peruanos tienen una pendiente predominante de 20° y un mínimo y máximo de 6° y 35° respectivamente, en cuanto a la pendiente predominante de los GR de las cordilleras del norte, centro y sur tienen pendientes predominantes de 23°, 22° y 20°, esto parece indicar que menores valores de pendiente en el pie de las montañas se relacionan con mayores condiciones favorables de formación de GR. En Argentina los

GR están en el rango de 2° - 30° (Perucca y Esper Angillieri 2011; Martini y Strelin 2013) rango consistente con el encontrado en los GR peruanos, mientras que los GR chilenos tienen un promedio de 20.3° muy similar al promedio de pendiente de los GR peruanos, caso contrario a lo que ocurre con la pendiente predominante mínimo y máxima de 0° y 68.5° respectivamente para los GR chilenos (Janke et al. 2017), en cuanto a los GR en USA Seligman (2009) encontró que la pendiente promedio, mínima y máxima son 20° , 5° y 38° respectivamente, valores muy similares a lo reportado para los GR del Perú.

La orientación predominante de los GR peruanos es el sur, suroeste, sureste y oeste, en ese orden de mayor a menor prevalencia, además, tanto en las cordilleras del norte, centro y sur tienen una orientación predominante de sur. Similares resultados se encontraron en la cuenca del río Aconcagua en Chile (Janke et al. 2017), con orientación predominante de sur, sureste y suroeste, en Argentina, Perucca y Angillieri (2011) reportaron orientaciones predominantes de sureste en los andes secos, en USA Seligman (2009) reportó orientaciones predominantes de norte, noreste, noroeste y este de la misma manera, en los Alpes Suizos e italianos centrales (Scapozza 2015; Scotti et al. 2013) se reportaron orientaciones predominantes de norte, noreste, noroeste, este y suroeste. Lo anterior muestra que en el Hemisferio Sur la orientación predominante de los GR va desde el sureste (112.5°) hasta el oeste (292.5°), caso contrario ocurre con el Hemisferio Norte en donde a diferencia del Hemisferio Sur se caracteriza porque los GR tienen una orientación predominante que va desde el noroeste (337.5°) hasta el este (67.5°), por último, se encontró que las condiciones propicias para la formación de GR en el ámbito de la Cordillera de los Andes son las orientaciones predominantes de sureste a suroeste, orientaciones en las que las geoformas de estudio se oponen a la orientación a la que sale el sol.

6.2.5 Respecto a la TMAA, PIRS y precipitación de los glaciares de roca

En esta investigación se encontró que la TMAA disminuye en la medida en la que la altitud de los GR aumenta, en general, la TMAA de las zonas donde están los GR están en el rango térmico de $[-2.5 - 9.4]^{\circ}\text{C}$, es decir, se encuentran bajo y sobre el punto de congelación, y de este último el 93% del total de GR está sobre los $>0^{\circ}\text{C}$, además, los GR presentan una media de 2.4°C , en los estudios de GR se le ha dado poca

importancia a la relación de estos con la TMAA, a pesar, de que este último es uno de los parámetros más importantes para la formación y existencia de GR; Azocar (2013) encontró que el rango de TMAA en los Andes Semiáridos chilenos está entre los $[-6^{\circ} - 8^{\circ}]C$, si bien el límite inferior del rango es mucho menor en comparación al límite inferior de TMAA de los GR peruanos, esto se explica a que el estudio realizado por Azocar se realizó entre los $28.5^{\circ} - 32.5^{\circ}$ de latitud S, zona caracterizada por ser fría y seca, en cuanto al límite superior del rango de TMAA es similar al reportado en los GR peruanos,

Kinworthy (2016) encontró que la mayoría de GR estaban localizados en el rango térmico comprendido entre $[-0.8^{\circ} - 11.4^{\circ}]C$ de TMAA en promedio en Nuevo México EEUU, valores que se encuentran relativamente parecidos a lo encontrado en esta investigación $[-2.5^{\circ} - 9.4^{\circ}]C$, lo que actualmente muestra que la TMAA mínima encontrada en los Andes Peruanos es mucho menor que la encontrada en los GR de las montañas de Nuevo México EEUU, así mismo, la TMAA máxima de los GR de los Andes Peruanos es menor que la encontrada en las montañas de Nuevo México EEUU, esto se debe a la altitud mínima de los GR de las montañas de Nuevo México EEUU que están entre los 2159 – 3762 m s.n.m., mientras que en los Andes Peruanos están entre los 4332 a 5606 m s.n.m., lo que indica que la altitud de iniciación de los GR peruanos está muy por encima de los GR de las montañas de Nuevo México EEUU. Tanto el permafrost de montaña como los GR se desarrollan a $TMAA < 0^{\circ} C$ y el aumento de temperatura en la Cordillera de los Andes a una tasa aproximada de $0.1^{\circ}C/década$ (Vuille et al. 2008) podría ocasionar que los GR que se encuentren a valores cercanos a los $0^{\circ}C$ de TMAA cambien hacia valores positivos; además el 93% de los GR del Perú están en valores $> 0^{\circ}C$, lo que sugiere que estos GR tuvieron su origen cuando el pasado térmico de la TMAA fue $< 0^{\circ}C$, y que en presente estas geoformas son resilientes a las condiciones climáticas debido a su lenta respuesta por la cubierta detrítica que los protege, en esta investigación se usó el promedio de la TMAA para un periodo de 30 años, lo que sugiere que los GR y directamente el permafrost de montaña puede subsistir varias décadas bajo periodos cuyas condiciones de TMAA son $> 0^{\circ}C$, algunos estudios indican que el permafrost puede subsistir bajo estas condiciones por un periodo de hasta un siglo (Gruber y Haeberli 2007), por lo tanto, aquellos GR que se encuentran a una $TMAA < -1.5^{\circ} C$ seguirán siendo fríos, aun cuando la TMAA

aumente en las próximas décadas, sin embargo, se debe monitorear y tener sumo cuidado con aquellos GR cuya TMAA se encuentra entre los -0.5°C y los 0.0°C ya que son los más sensibles a un aumento de temperatura, este aumento de temperatura podría generar la fusión del hielo contenido en ellas y ocasionar aceleración en los flujos del permafrost, provocando desestabilización y colapso de suelo congelado en zonas de alta montaña, como lo indicó Oliva y Fritz (2018) un aumento de temperatura de 0.19°C estaría relacionado a procesos de desestabilización de laderas, aunque indica también que es necesario generar más datos para comprender mejor los efectos negativos y posiblemente catastróficos de la desestabilización de laderas y suelos permanentemente congelados.

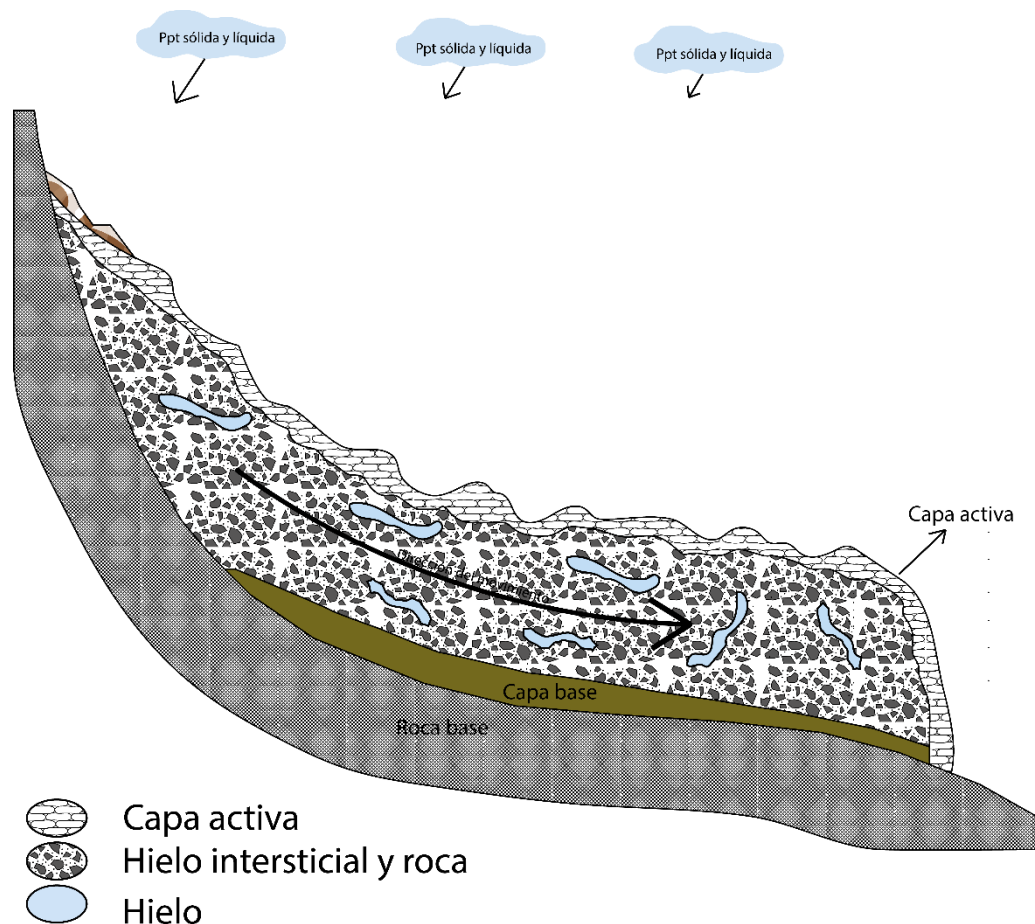


Imagen 3. Modelo idealizado del perfil de un GR de los Andes Peruanos. Modificado en base a Jones et al. (2019).

En la imagen anterior se representa el modelo idealizado del perfil de un GR, en la capa superior se muestra la capa activa, bajo esta la estructura interna del GR compuesta por

una mezcla de hielo intersticial-roca y fragmentos de hielo, bajo esta se encuentra la capa base de la geoforma y roca base o bedrock en inglés.

Como se comentó en el párrafo anterior, los GR podrían llamarse geoformas resilientes a las cambiantes condiciones climáticas debido a su lenta respuesta por la cubierta detrítica o capa activa que los protege que puede tener desde los 0.5 hasta los 5 m de longitud (Barsch 1996; Jones et al. 2018), esta capa activa interactúa con las condiciones estacionales de la TMAA y radiación, es decir, en la época húmeda esta parte de la geoforma se congela, mientras que en la época seca, el hielo que se haya formado en capa activa se fusiona, lo que no ocurre con la estructura interna del GR, que no obedece a las condiciones estacionales, sin embargo, con el aumento de la TMAA en los Andes Peruanos, esta capa activa se va haciendo cada vez más grande, disminuyendo así el espesor de la estructura interna del GR.

Por ejemplo, considerando el aumento de TMAA a razón de $0.1^{\circ}\text{C}/\text{década}$, para el año 2050 solo el 3% de GR peruanos estarían bajo los 0°C en las cordilleras de Ampato, Chila y Barroso, en cuanto a las cordilleras del norte, el promedio de TMAA para el 2050 será de 3.6°C , mientras que para las cordilleras del centro y sur del Perú será de 4.12°C y 2.9°C .

En cuanto a la precipitación los GR peruanos se encuentran en un rango de 28 – 84 mm/año, valores que indican un clima mucho más seco en comparación con los GR de los andes bolivianos (Rangecroft et al. 2014), que están en el rango de 250-300 mm/año, el de los andes centrales chilenos (Brenning 2005a), que están en el rango de 200 – 2000 mm/año, el de los alpes centrales italianos (Scotti et al. 2013), que están en el rango de 900-1600 mm/año, por último el de las montañas de Sierra Nevada, Adsaroka y Beartooth de USA (Millar y Westfall 2008; Seligman 2009), que están en el rango de precipitación de 1000 – 1800 mm/año.

El PISR de las zonas donde están los GR peruanos están en un rango de 906 – 1165 kWhm² mucho más bajo que los GR de los andes semiáridos chilenos que se encuentran a una PISR de 1908 – 2020 kWh/m² (Azocar 2013), mientras que en otros continentes como el europeo, el mínimo valor de PISR de los GR se encuentran a valores más altos en comparación con los peruanos, tal es el caso de los Himalayas de India que están en

el rango de 200-1000 kWh/m² (Haq y Baral 2019) y los Alpes franceses que están en el rango de 500-2000 kWh/m² (Marcer et al. 2017).

De todo lo anterior se infiere que en los andes peruanos la relación entre altas altitudes, TMAA cercanas y menores a 0°C, precipitación escasa o climas secos, bajos valores de PISR podrían influir en la presencia de GR, sin embargo, esto podría funcionar a escalas regionales; y a escalas mucho más locales, los GR podrían estar relacionados a factores locales como la pendiente y orientación, u otras relacionadas como la litología y cobertura de nieve.

A manera de resumen se muestra la siguiente tabla donde se muestra los valores de altitud promedio de los GR, TMAA, PISR y PPT por cordillera.

6.2.6 Respecto a la actividad de los glaciares de roca

En el Perú se han identificado 424 GR activos, 394 inactivos y 304 fósiles o relictos (total, 1122 GR identificados y mapeados), en Bolivia (Rangecroft et al. 2014) se identificaron 54 GR activos y 41 como relictos; en Chile, Azocar (2013) clasificó 1075 GR activos, 493 inactivos, 343 intactos (activos e inactivos) y 1664 relictos en los Andes Semi-Áridos; en Argentina, Angillieri (2009) identificó 126 activos y 14 relictos y Perucca y Angillieri (2011) identificaron 38 intactos. Jones et al. (2017) identificó 4080 GR como intactos y 1920 como relictos en los Himalayas Nepaleses.

En general, se observa que, en las cordilleras de los Andes Sudamericanos a pesar del aumento de temperatura, y siendo nuestras cordilleras las más vulnerables al cambio de temperatura, aún prevalecen los GR activos e inactivos en relación a los relictos, a pesar de que los GR se encuentran en zonas donde la TMAA es positiva y que los GR relictos se formaron cuando la TMAA de las zonas donde están ubicados eran <0°C, es decir, paleoclimas más fríos y secos, donde la isoterma de 0° existía a una elevación más baja en las cordilleras peruanas. De lo anterior se infiere que los glaciares de roca relictos fueron activos en algún momento en el que las paleocondiciones permitieron formarse, es decir, como lo indicó Barsch (1996) los GR relictos se formaron hace más de 11500 años pertenecientes a varias etapas del Pleistoceno, mucho más antiguas al Holoceno, luego pasaron a un periodo de inactividad en la medida que la Tierra se calentó y la isoterma de 0°C se movió más hacia los polos y también se movió hacia las montañas (el paso del Pleistoceno al Holoceno significó un aumento mayor a ~3°C esto provocó

que la isoterma 0°C se desplace hacia latitudinalmente hacia los polos y hacia partes más elevadas de las montañas), esta variación altitudinal de una menor hacia una mayor altitud se experimenta hasta la actualidad producto del aumento de temperatura del planeta y en específico en los Andes, en donde la temperatura aumentó a 0.13°C/década desde 1936-2006 (Vuille et al. 2015) y sobre los 5000 m snm 0.17/década (Aguilar-Lome et al. 2019), razón por lo que los GR relictos que en algún momento se encontraron en zonas donde la TMAA se encontraba en equilibrio con el contenido de hielo en los GR, experimentaron el aumento de temperatura y pérdida del contenido de hielo, pasando de activos a inactivos y finalmente relictos, en la actualidad, se sigue presentando el mismo fenómeno.

6.2.8 Respecto a la velocidad de los glaciares de roca

El uso de técnicas de percepción remota como DInSAR y Cosi-Corr, permitió determinar aquellas geoformas que tienen movimiento. Se encontró promedios de velocidades horizontales de 21.3 cm/mes, mínimo de 5.0 cm/mes y máximo de 77.2 cm/mes, Groh (2019) y Kellererr y Kaufmann (2012) encontraron velocidades horizontales promedio desde los 1.0 cm/mes y 3.0 m/mes y un máximo de 140.0 cm/mes en Austria, Strel (2017) encontró velocidades horizontales que van desde los 1.0 cm/mes hasta los 6.0 cm/mes y un máximo de 25.0 cm/mes en el norte de Tien Shan-Asia Central, Wirz et al. (2016) encontró glaciares de roca que tenían velocidades horizontales que iban desde los 2.0 cm/mes – 54.0 cm/mes en los Alpes Suizos. Estudios en distintas partes del mundo se han medido, con rangos de movimiento que van desde los 10.0 cm/año hasta los 100.0 cm/año (Azocar 2013), sin embargo, valores mayores a 100 cm/año han sido reportado en los Alpes Suizos (Delaloye et al. 2010), casos extremos fueron reportados por Corte que informa velocidades sumamente rápidas de hasta 10000 cm/año (Necsoiu et al. 2016). El desplazamiento vertical de los glaciares de roca del Perú va desde los 1 cm/año hasta los -6.4 m/año y se encontró un promedio de -1.0 cm/año; Villarroel et al. (2018) encontró en los Andes Secos de Argentina y Chile valores que van desde los 2.4 cm/año hasta los 288.0 cm/año y Necsoiu et al. (2016) encontró valores hasta los 3.6 cm/año en las montañas del Sur de Carpatos en Rumania.

En general se observa que los GR de los andes peruanos tienen velocidades y desplazamientos promedios similares a los reportados por diferentes autores en diferentes partes del mundo, sin embargo, en los valores máximos, en las cordilleras peruanas se han reportado valores superiores a los encontrados por diversos autores, esto podría deberse a la metodología, insumos usados, etc., o ser parte del impacto que está teniendo el aumento de temperatura en zonas de alta montaña, que acelera la fusión del hielo contenido en estas geoformas. Hace falta más estudios para determinar los desplazamientos en el eje 'x', 'y' y 'z', en época seca y época húmeda y en periodos largos de monitoreo in situ.

6.2.9 Respecto a la configuración climática de las zonas donde están los glaciares de roca

Para un mejor análisis y monitoreo de aquellos GR que están distribuidos en las cordilleras peruanas, en esta investigación se sugiere que la división de la distribución de los glaciares limpios, cubiertos y de roca se realice no solo en base a la ubicación geográfica de las cordilleras, sino que se realice en base a las configuraciones climáticas propuestas por Sagredo y Lowell (2012).

Subregión-1: Trópicos exteriores húmedos del norte, la humedad media anual es alta, 71%, casi sin estacionalidad de la temperatura, presenta una media anual de 1.6° C, además, presenta una precipitación de 815 mm. Geográficamente va desde la cordillera Blanca hasta la cordillera Chonta, incluye las cordilleras del este, Huaytapallana y Huagoruncho.

Subregión-2: Trópicos exteriores húmedos del sur, en esta zona la humedad es moderada, presenta una media anual de 59%, la temperatura media anual es de 1.6° C y la precipitación anual total es de 723 mm. Geográficamente esta zona va desde la cordillera Vilcabamba y se extiende hasta la cordillera Apolobamba.

Subregión-3: Trópicos exteriores secos, esta zona se caracteriza por ser que la humedad media anual es baja, 50%, presenta una temperatura media anual de -4° C y una precipitación de 287 mm. Geográficamente va desde la cordillera Ampato y se extiende hasta la cordillera Volcánica.

En base a la clasificación climática, los GR se distribuyen de la siguiente manera.

Tabla 25

Distribución de los glaciares de roca en base a la clasificación climática de regiones

Clasificación	Subregión 1	Subregión 2	Subregión 3
Nº de Glaciares de roca	25	48	1049

En base a esta clasificación se evidencia que las características climáticas de las zonas donde están distribuidos los GR son mucho más relevantes en la subregión 3, zona que se caracteriza por tener un clima frío y seco, y si a esto le sumamos las altas altitudes de las cordilleras que en ella se encuentran, representa un lugar propicio para la formación de GR, esto podría explicar que la mayor cantidad de GR están distribuidos en esta zona de las cordilleras peruanas.

La siguiente figura muestra la clasificación climática propuesta por Sagredo y Lowell (2012), el cuadro de la subregión 1 muestra la configuración climática de los trópicos exteriores húmedos del norte, el cuadro de la subregión 2 muestra la configuración climática de los trópicos exteriores húmedos del sur, y el cuadro de la subregión 3 que muestra la configuración climática de los trópicos exteriores secos, lugar en donde se concentra el ~94% de los GR del Perú, que se caracteriza por ser una zona donde la humedad es menor al 50%, con una TMAA de -4°C y una escasa precipitación <300 mm.

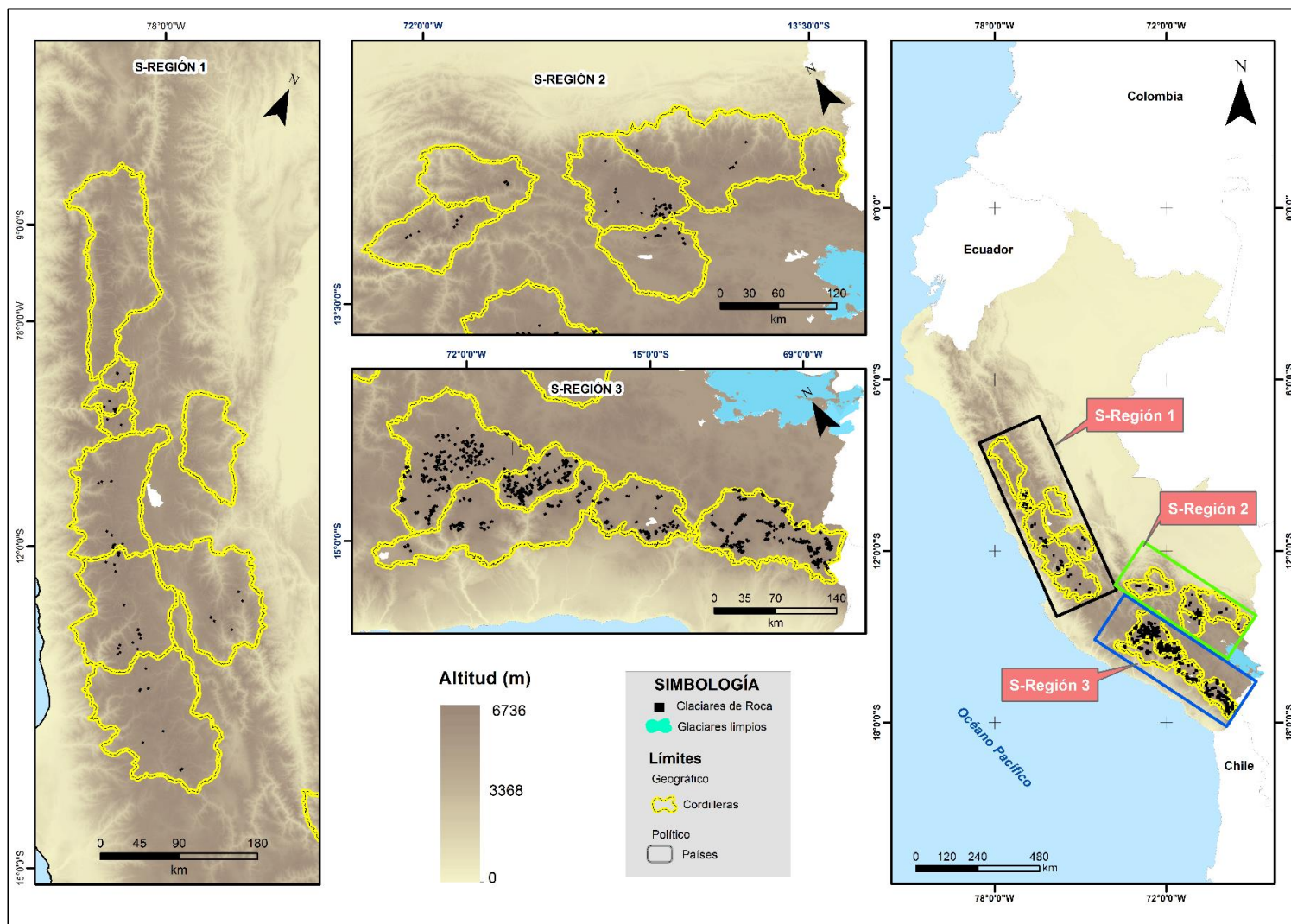


Figura 23. Distribución de los glaciares de roca basado en la clasificación climática propuesta por Sagredo y Lowell (2012).

6.2.10 Validación del modelo de regresión logística binaria de los factores topoclimáticos que influyen en la presencia de glaciares de roca en el Perú

La validación del modelo bajo el enfoque del área bajo la curva AUROC=0.7 es similar a lo encontrado por Groh (2019) AUROC=0.75 en Austria, Azócar et al. (2017) AUROC=0.76 en Chile y Angillieri (2017) AUROC= 0.8 en Argentina. El valor de 0.7 muestra que el MRLB usando tres factores: pendiente promedio, PISR y altitud mínima, es aceptable (Hosmer y Lemeshow 2000), además, el modelo llega a explicar al 82% de las variables dependientes, por lo tanto, explican la presencia de GR activos, inactivos y relictos, siendo la pendiente promedio la que mayor relevancia tiene en el modelo. Se observa que los modelos estadísticos y matemáticos no llegan a representar lo que ocurre en la naturaleza, debido a que en el modelo hay 18% de no predictibilidad. Las relaciones e influencias de las condiciones de la topografía y el clima son integrales, funcionan como un todo, por lo tanto, tratar de integrar esto en un modelo resulta un reto que aún no se ha podido resolver, incluso, esto sin considerar variables litológicas que no han sido analizadas en este estudio. Discusiones similares realizó Seligman (2009) en el que estudió la influencia de 9 factores como el aspecto, altitud, temperatura, pendiente, etc., en un modelo de regresión logística, en el que después de sus análisis usó solo la temperatura y la altitud para estimar la probabilidad de la actividad de los GR en el norte de Absaroka y Beartooth en EEUU. En Chile Brenning y Trombotto (2006) aplicaron un modelo de regresión logística para discriminar áreas de glaciares limpios y de roca usando factores derivados de radiación y altitud.

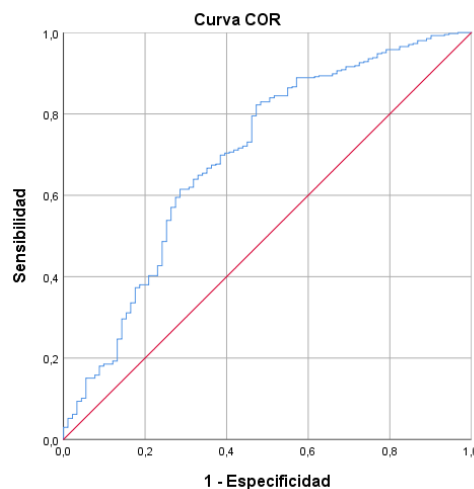


Gráfico 19. Curva AUROC, o área bajo la curva, valor de 0.7

Lo mostrado anteriormente podría indicar que un modelo mixto entre factores climáticas, topográficas y litológicas significativos sería lo más óptimo para determinar los factores que controlan la presencia de GR activos/inactivos/relictos en las cordilleras peruanas, sin embargo, esto al ser una simplificación de lo que ocurre en la realidad, hace notar que en el modelo hace falta incluir variables relacionadas a la litología de las zonas de estudio, sin embargo, para una primera aproximación de las relaciones que existen entre los factores que influyen en la presencia de GR en las cordilleras peruanas se podría considerar consistente con resultados obtenidos en otros estudios debido a que en el modelo están incluidos variables netamente topográficas como la pendiente y la altitud mínima, además, se incluye la variable climática como el PISR, por último, el modelo se valida con el resultado de la curva AUROC obtenida, que es acorde a los valores obtenidos en similar a otros estudios como se indicó anteriormente, en estudios en Chile y Argentina. En resumen, se infiere que los GR en la cordillera peruana se desarrolla en zonas periglaciares de alta montaña cuya altitud mínima es elevada, presentan una pendiente pronunciada y radiación alta e indirectamente TMAA mínimas, es decir, zonas características del sur occidental del Perú.

6.3 Responsabilidad ética

El investigador, autor de la presente tesis desarrollada para contribuir con el entendimiento de sistemas periglaciares de entornos de alta montaña y obtener el título profesional de Ingeniero Ambiental y de Recursos Naturales es responsable de los resultados obtenidos.

VII. CONCLUSIONES

- Esta tesis proporciona nueva información sobre ambientes periglaciares, específicamente GR en las cordilleras tropicales peruanas y se muestra que la aplicación de las tecnologías de información geográfica permitió determinar las características, clasificación, estado y factores que controlan la presencia de los GR en todo el territorio peruano, además, se aceptaron la hipótesis general y específicas planteadas en la investigación, ya que se determinó que la mayor cantidad de GR están ubicadas en el sur del Perú, además, se encontró que los GR peruanos tienen características similares a la de los GR sudamericanos (Bolivia, Chile y Argentina), por último, se determinó que los GR tienen velocidades superficiales y verticales, además de contenido de hielo en su estructura, este último, se comprobó haciendo uso de técnicas de prospección geofísica.
- Con el uso de las Tecnologías de Información Geográfica se identificaron 1122 con una superficie de 49.06 km² (representa el 14% de GR del continente sudamericano, además, el 97.8% GR del Perú están ubicados en el sur), los GR están distribuidos en 17 cordilleras tropicales peruanas, solo en Blanca, Huagoruncho y Carabaya no se encontraron GR, en cuanto a la altitud de los GR, aumentan en el sentido de norte a sur, desde los 4377 – 5654 m s.n.m. con un promedio de 4973 m, presentando un rango de pendiente de 6° - 35° con una predominancia de orientación en el sentido S, SO y SE. Por otro lado, la TMAA de los GR están en un rango de -2.5° a 11.4°C con un promedio de 2.4°C, el 7% está bajo temperaturas <0°C lo que indica que los GR que están en valores positivos de TMAA se formaron cuando en el pasado la TMAA fue <0°, además, los GR del Perú se ubican en zonas de climas secos, pues estos están zonas que se encuentran en el rango de 28 a 84 mm/año en promedio y un PIRS de 906 – 1165 kWh/m². Del total de GR, 304 son fósiles o relictos, 394 son inactivos y 424 son activos, estos últimos tienen una velocidad superficial que va desde los 5.0 cm/mes y un máximo de 77.2 cm/mes, mientras que en la vertical, presentan un desplazamiento que van desde los 1.0 cm/año hasta los - 6.4 cm/año. Por lo expuesto, la aplicación de las TIG permitió determinar

correctamente la distribución espacial, caracterización topoclimática, actividad y velocidad de los GR en los Andes Tropicales del Perú.

- Por último, se encontró que, de los factores analizados en esta investigación, los que mayor influencia tienen o controlan la presencia de GR activos/inactivos/relictos en los Andes Tropicales del Perú son la altitud mínima, pendiente y el PISR, sin embargo, se hace notar que lo que ocurre en la naturaleza es integral, por lo tanto, integrar los factores que influyen en la presencia de GR en los andes peruanos resulta un reto que se tiene que seguir mejorando con la inclusión de nuevos factores no incluidos en el modelo presentando, como la litología, la persistencia de nieve, velocidades de GR, presencia de vegetación, líquenes, etc. Por lo expuesto, la combinación de variables topoclimáticas explican la presencia de GR en los Andes Tropicales del Perú.
- Esta investigación da paso a numerosos campos de estudio como la hidrología e hidrogeología de los GR, estudios paleoclimáticos haciendo uso de la TMAA y altitud actual de los GR, riesgos asociados a desestabilización de GR y permafrost de montaña, estimación del volumen de hielo en los GR; modelización del permafrost en las cordilleras peruanas, además de que servirá de potente herramienta de gestión de recursos hídricos, ya que da paso a que los GR y el permafrost sean sujeto de evaluación en actividades antropogénicas en ambientes periglaciares.

VIII. RECOMENDACIONES

Las siguientes recomendaciones van dirigidas a la comunidad científica, académica, instituciones públicas que desarrollen conocimiento y estén involucradas en la gestión de recursos relacionados a la criósfera de alta montaña, como, INAIGEM, INGEMMET, IGP, IAM, universidades, centros de investigación internaciones, etc, además, se sugiere a los tomadores de decisiones poner en valor ambiental, social y económico los GR en la Política Nacional de Glaciares.

En cuanto a la caracterización de GR usando SIG, SPG, PR e internet

Se sugiere realizar mayores estudios de campo a diferentes latitudes, altitudes y tipos de GR en el ámbito de los Andes Tropicales Peruanos en donde se evidencia los atributos geomorfológicos y ambientales considerados para determinar la actividad de los GR, además, ajustar sus límites inferiores, superiores y laterales. También se sugiere que se identifiquen otras geoformas de sistemas criosféricos como protalus rampart, pronival rampart y lóbulos de soligeliflución que no han sido consideradas en la presente investigación.

Estimación de volumen hídrico

En cuanto a la estimación del volumen hídrico, en esta investigación no se realizó la estimación del volumen hídrico de los GR basado en técnicas SIG y percepción remota, tampoco se realizaron perforaciones in-situ para estimar la proporción hielo/detritos en un GR, por lo que, se sugiere realizar más estudios a diferentes latitudes, altitudes y tipos de GR, es decir, activo, inactivo y relicto, además, complementarlas con extracción de muestras y analizadas para determinar el contenido de hielo de los GR, complementarlos con mediciones indirectas del volumen de hielo usando técnicas geofísicas.

Información climática

En esta investigación se estimó las condiciones de precipitación, temperatura y radiación usando modelos climáticos a partir de imágenes satelitales, por lo que se sugiere instalar estaciones meteorológicas de bajo costo, es decir, con tecnología a Arduino y software libre para poder determinar la TMAA, precipitación, PISR in-situ

y calibrar los modelos satelitales, a la vez, se recomienda instalar mini-datloggers para el monitoreo de la temperatura subsuperficial del GR, esto nos daría una idea de cómo afecta la variabilidad climática en zonas periglaciares de alta montaña.

Movimiento de los GR

Se sugiere realizar mayores estudios in-situ para mejorar la estimación de velocidad de los GR, tanto superficial como vertical, también se recomienda la instalación de puntos de control geodésicos en la superficie del GR, en la parte superior, media e inferior, a la vez se puede complementar la técnica con la monumentación de varillas para el control del movimiento con cintas extensiométricas, vuelos con dron para estimar la velocidad o movimiento, o mejorar la resolución espacial y temporal de las imágenes ópticas y radar. Se aclara que cualquier técnica indicada anteriormente se tendría que realizar en glaciares de roca activo, inactivo y relictos, esto para comprobar lo indicado en la bibliografía respecto al movimiento.

Calidad de agua

Se sugiere realizar estudios de calidad de agua de zonas donde los GR sean aportantes hídricos, esto se podría complementar con estudios de isótopos para estimar la contribución real de escorrentía de los GR al ciclo de agua.

Riesgo asociado a sistemas periglaciares

Se sugiere realizar el estudio de zonas donde los GR activos e inactivos estén en un proceso de desestabilización, es decir, aquellos GR cuya TMAA esté por encima de la isoterma 0°C, de estas zonas se infiere que es zonas de permafrost, por lo tanto, el permafrost también estaría en un proceso de degradación, podrían encontrarse fallas de roca y ocurrir eventos de movimientos en masa que puede resultar en un peligro y riesgo inminente en poblaciones y medios de vida vulnerables.

Socializar la información

Corresponde a las autoridades poner en valor social, ambiental y económico, los recursos y retos que plantean los GR en las cordilleras del Perú, como recurso hídrico estudiar la posibilidad de incluir no solo los glaciares limpios/cubiertos por detritos sino también los de origen periglaciario, es decir, los GR y el permafrost, en la “Política

Nacional de Glaciares” (que se encuentra en etapa de elaboración), cuyo nombre es excluyente a otros sistemas que existen en la criósfera de la Cordillera de los Andes Peruanos, por lo tanto, se sugiere evaluar el nombre de la política en elaboración. Desde el punto de vista de riesgos, corresponde a las autoridades y a los científicos divulgar los resultados, e identificar los GR que se encuentren cercanos a zonas donde habitan poblaciones a fin de identificarlos y evaluar el potencial riesgo a los que estarían expuestos considerando que el aumento de temperatura causa desestabilización del permafrost de alta montaña.

IX. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AGUILAR-LOME, J., ESPINOZA-VILLAR, R., ESPINOZA, J.C., ROJAS-ACUÑA, J., WILLEMS, B.L. y LEYVA-MOLINA, W.M., 2019. Elevation-dependent warming of land surface temperatures in the Andes assessed using MODIS LST time series (2000–2017). *International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation*, vol. 77, no. April 2018, pp. 119-128. ISSN 1872826X. DOI 10.1016/j.jag.2018.12.013.
- AHUMADA, A.L., PALACIOS, G.P.I., TOLEDO, M.A. y CARILLA, J., 2014a. El permafrost reptante , inventario y verificación en las cabeceras del Río Bermejo permafrost creeping , inventory and verification in the upper basin of Bermejo River. , vol. 39, no. 1, pp. 123-137.
- AHUMADA, A.L., PALACIOS, G.P.I., TOLEDO, M.A. y CARILLA, J., 2014b. EL PERMAFROST REPTANTE , INVENTARIO Y VERIFICACIÓN EN LAS CABECERAS DEL RÍO BERMEJO PERMAFROST CREEPING , INVENTORY AND VERIFICATION IN THE UPPER BASIN OF BERMEJO RIVER. , vol. 39, no. 1, pp. 123-137.
- ALDALUR, N., 2011. *Inundaciones y anegamientos en Ingeniero White. Aplicación de las tecnologías de la información geográfica para la planificación y gestión de la hidrología urbana* [en línea]. S.l.: Unversidad Nacional del Sur. Disponible en: http://bibliotecadigital.uns.edu.ar/scielo.php?script=sci_arttext&pid=S1852-42652011001100008&lng=es&nrm=iso&tlng=es.
- ALVAREZ A., 2020. Clasificación de las investigaciones. *Revista de pedagogia* [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://core.ac.uk/download/pdf/322967825.pdf>.
- ANDERSON-TEIXEIRA, K.J., DAVIES, S.J., BENNETT, A.C., GONZALEZ-AKRE, E.B., MULLER-LANDAU, H.C., JOSEPH WRIGHT, S., ABU SALIM, K., ALMEYDA ZAMBRANO, A.M., ALONSO, A., BALTZER, J.L., BASSET, Y., BOURG, N.A., BROADBENT, E.N., BROCKELMAN, W.Y., BUNYAVEJCHEWIN, S., BURSLEM, D.F.R.P., BUTT, N., CAO, M., CARDENAS, D., CHUYONG, G.B., CLAY, K., CORDELL, S., DATTARAJA,

H.S., DENG, X., DETTO, M., DU, X., DUQUE, A., ERIKSON, D.L., EWANGO, C.E.N., FISCHER, G.A., FLETCHER, C., FOSTER, R.B., GIARDINA, C.P., GILBERT, G.S., GUNATILLEKE, N., GUNATILLEKE, S., HAO, Z., HARGROVE, W.W., HART, T.B., HAU, B.C.H., HE, F., HOFFMAN, F.M., HOWE, R.W., HUBBELL, S.P., INMAN-NARAHARI, F.M., JANSEN, P.A., JIANG, M., JOHNSON, D.J., KANZAKI, M., KASSIM, A.R., KENFACK, D., KIBET, S., KINNAIRD, M.F., KORTE, L., KRAL, K., KUMAR, J., LARSON, A.J., LI, Y., LI, X., LIU, S., LUM, S.K.Y., LUTZ, J.A., MA, K., MADDALENA, D.M., MAKANA, J.R., MALHI, Y., MARTHEWS, T., MAT SERUDIN, R., MCMAHON, S.M., MCSHEA, W.J., MEMIAGHE, H.R., MI, X., MIZUNO, T., MORECROFT, M., MYERS, J.A., NOVOTNY, V., DE OLIVEIRA, A.A., ONG, P.S., ORWIG, D.A., OSTERTAG, R., DEN OUDEN, J., PARKER, G.G., PHILLIPS, R.P., SACK, L., SAINGE, M.N., SANG, W., SRI-NGERNYUANG, K., SUKUMAR, R., SUN, I.F., SUNGPALEE, W., SURESH, H.S., TAN, S., THOMAS, S.C., THOMAS, D.W., THOMPSON, J., TURNER, B.L., URIARTE, M., VALENCIA, R., VALLEJO, M.I., VICENTINI, A., VRŠKA, T., WANG, Xihua, WANG, Xugao, WEIBLEN, G., WOLF, A., XU, H., YAP, S. y ZIMMERMAN, J., 2015. CTFS-ForestGEO: A worldwide network monitoring forests in an era of global change. *Global Change Biology*, vol. 21, no. 2, pp. 528-549. ISSN 13652486. DOI 10.1111/gcb.12712.

ANGILLIERI, M., 2017. Journal of South American Earth Sciences Permafrost distribution map of San Juan Dry Andes (Argentina) based on rock glacier sites. *Journal of South American Earth Sciences* [en línea], vol. 73, pp. 42-49. ISSN 0895-9811. DOI 10.1016/j.jsames.2016.12.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.jsames.2016.12.002>.

ANGILLIERI, M.Y.E., 2010. Application of frequency ratio and logistic regression to active rock glacier occurrence in the Andes of San Juan, Argentina. *Geomorphology* [en línea], vol. 114, no. 3, pp. 396-405. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2009.08.003. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2009.08.003>.

ANGULO, M.A., 2017. *Uso de imágenes satelitales para la delimitación y zonificación*

- de áreas de conservación regional en el departamento del Cusco*. S.l.: Universidad Nacional Agraria La Molina.
- ARDILA LEÓN, J.F. y QUINTERO DELGADO, Ó.Y., 2015. Aplicación de la teledetección y los sistemas de información geográfica en la interpretación de zonas inundables. Caso de estudio: Río Soapaga, sector Paz De Río, Boyacá. *Ciencia e Ingeniería Neogranadina*, vol. 23, no. 2, pp. 55. ISSN 0124-8170. DOI 10.18359/rcin.223.
- AYOUB, F., LEPRINCE, S. y AVOUAC, J.P., 2007. *User 's Guide to COSI-CORR v1.0 Co-registration of Optically Sensed Images and Correlation*. S.l.: s.n.
- AZOCAR, G., 2013. *Modeling of Permafrost Distribution in the Semi-arid Chilean Andes* [en línea]. S.l.: s.n. Disponible en: http://kvk.bibliothek.kit.edu/view-title/index.php?katalog=WORLDCAT&url=http%3A%2F%2Fwww.worldcat.org%2Ftitle%2Fmodeling-of-permafrost-distribution-in-the-semi-arid-chilean-andes%2Foclc%2F889923870%26referer%3Dbrief_results&signature=EZqkjH4HE9nTKezB-o5me.
- AZÓCAR, G. y BRENNING, A., 2008. Intervenciones de glaciares rocosos en minera Los Pelambres , Región de Coquimbo , Chile. . S.l.:
- AZÓCAR, G.F. y BRENNING, A., 2010. Hydrological and geomorphological significance of rock glaciers in the dry Andes, Chile (27°-33°s). *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 21, no. 1, pp. 42-53. ISSN 10456740. DOI 10.1002/ppp.669.
- AZÓCAR, G.F., BRENNING, A. y BODIN, X., 2017. Permafrost distribution modelling in the semi-arid Chilean Andes. , pp. 877-890. DOI 10.5194/tc-11-877-2017.
- BALLON BELTRAN, D.D. y BERNABE PONTE, E., 2015. *Analisis clasificadorio de las Gestantes segun via de culminacion del parto aplicando Regresion Logistica Binaria*. S.l.: UNIVERSIDAD NACIONAL AGRARIA LA MOLINA.
- BARSCHE, D., 1996. *Rockglaciers: indicators for the present and former geoecology in high mountain environments*. S.l.: s.n. ISBN 3540607420.

- BISHOP, T.F.A. y MINASNY, B., 2016. *Environmental Soil-Landscape Modeling: Geographic Information Technologies and Pedometrics*. S.l.: s.n. ISBN 9781420028188.
- BRENNING, A, AZÓCAR, G., 2010. Statistical Analysis of Topographic and Climatic Controls and Multispectral Signatures of Rock Glaciers in the Dry Andes , Chile (27° – 33 °S). *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 66, no. December 2009, pp. 54-66. DOI 10.1002/ppp.670.
- BRENNING, A., 2005a. Climatic and geomorphological controls of rock glaciers in the Andes of Central Chile. , no. August.
- BRENNING, A., 2005b. Geomorphological, hydrological and climatic significance of rock glaciers in the Andes of Central Chile (33-35°S). *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 16, no. 3, pp. 231-240. ISSN 10456740. DOI 10.1002/ppp.528.
- BRENNING, A. y TROMBOTTO, D., 2006. Logistic regression modeling of rock glacier and glacier distribution: Topographic and climatic controls in the semi-arid Andes. *Geomorphology*, vol. 81, no. 1-2, pp. 141-154. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2006.04.003.
- BURGER, K.C., DEGENHARDT, J.J. y GIARDINO, J.R., 1999. Engineering geomorphology of rock glaciers. *Geomorphology*, vol. 31, no. 1-4, pp. 93-132. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/S0169-555X(99)00074-4.
- CAREY, M., 2005. Living and dying with glaciers : people ' s historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru B. , vol. 47, pp. 122-134. DOI 10.1016/j.gloplacha.2004.10.007.
- CHARBONNEAU, A.A. y SMITH, D.J., 2018a. An inventory of rock glaciers in the central British Columbia Coast Mountains , Canada , from high resolution Google Earth imagery An inventory of rock glaciers in the central British Columbia Coast Mountains , Canada , from high resolution Google Earth i. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research*, vol. 50, no. 1. ISSN 1523-0430. DOI 10.1080/15230430.2018.1489026.
- CHARBONNEAU, A.A. y SMITH, D.J., 2018b. An inventory of rock glaciers in the

- central British Columbia Coast Mountains , Canada , from high resolution Google Earth imagery An inventory of rock glaciers in the central British Columbia Coast Mountains , Canada , from high resolution Google Earth i. *Arctic, Antarctic, and Alpine Research* [en línea], vol. 50, no. 1. ISSN 1523-0430. DOI 10.1080/15230430.2018.1489026. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/15230430.2018.1489026>.
- CHUVIECO, E., 1995. *Fundamentos de Teledetección Espacial*. 2da edició. Madrid, España: s.n. ISBN 84-321-2680-2.
- CHUVIECO SALINERO, E., 2008. *Teledeteccion Ambiental*. 3ra edició. Barcelona, España: s.n. ISBN 978-84-344-8073-3.
- COLUCCI, R.R., BOCCALI, C., ŽEBRE, M. y GUGLIELMIN, M., 2016. Rock glaciers, protalus ramparts and pronival ramparts in the south-eastern Alps. *Geomorphology* [en línea], vol. 269, pp. 112-121. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2016.06.039. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.06.039>.
- DELALOYE, R., STROZZI, T., LAMBIEL, C., BARBOUX, C., MARI, S., STOCKER, A., TECHEL, F. y RAETZO, H., 2010. The Contribution of InSAR Data To the Early Detection of Potentially Hazardous Active Rock Glaciers in Mountain Areas. *ESA Living Planet Symposium*, vol. 2010, no. July.
- DING, Y., ZHANG, S., ZHAO, L., LI, Z. y KANG, S., 2019. Global warming weakening the inherent stability of glaciers and permafrost. *Science Bulletin* [en línea], vol. 64, no. 4, pp. 245-253. ISSN 20959281. DOI 10.1016/j.scib.2018.12.028. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scib.2018.12.028>.
- DOMINGUEZ, S., SÁNCHEZ, E. y SÁNCHEZ, G., 2009. *Guía para elaborar una tesis*. S.l.: Mc Graw Hill. ISBN 9789701073445.
- DOU, S. y AJO-FRANKLIN, J.B., 2014. Full-wavefield inversion of surface waves for mapping embedded low-velocity zones in permafrost. *Geophysics*, vol. 79, no. 6, pp. EN107-EN124. ISSN 19422156. DOI 10.1190/geo2013-0427.1.

- DREWES, J., MOREIRAS, S. y KORUP, O., 2018. Permafrost activity and atmospheric warming in the Argentinian Andes. *Geomorphology* [en línea], vol. 323, pp. 13-24. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2018.09.005. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2018.09.005>.
- EHRENSPERGER A. y ENZ S., DACH W., K.F., 2007a. Tecnologías de la Información Geográfica para el manejo de los recursos naturales. *Focus No 3/07*. S.l.:
- EHRENSPERGER A. y ENZ S., DACH W., K.F., 2007b. Tecnologías de la Información Geográfica para el manejo de los recursos naturales. *Focus No 3/07* [en línea]. S.l.: Disponible en: http://www.inforesources.ch/pdf/focus07_3_s.pdf.
- EMERY, W. y CAMPS, A., 2017. *Introduction to Satellite Remote Sensing*. S.l.: s.n. ISBN 9780128092545.
- ESPER ANGILLIERI, M.Y., 2009. A preliminary inventory of rock glaciers at 30°S latitude, Cordillera Frontal of San Juan, Argentina. *Quaternary International*, vol. 195, no. 1-2, pp. 151-157. ISSN 10406182. DOI 10.1016/j.quaint.2008.06.001.
- ETZELMÜLLER, B., 2013. Recent Advances in Mountain Permafrost Research. , no. February. DOI 10.1002/ppp.1772.
- FELICÍSIMO, A., 1992. Aplicaciones de los modelos digitales del terreno en las ciencias ambientales. *Biología de organismos y sistemas*, no. January 1994, pp. 235.
- FERRANDO, F., 2017. Sobre la distribución de Glaciares Rocosos en Chile , análisis de la situación y reconocimiento de nuevas localizaciones About rock glaciers distribution in Chile: Situation analysis and new locations recognition Introducción La distribución de los Glaci. *Investig. Geogr.*, vol. 4.
- FIELD, A., 2009. *Discovering statistics using SPSS (and sex and drugs and rock «n» roll)*. S.l.: s.n. ISBN 9781847879066.
- FORSBERG, B., 2014. MERCURIO EN LA CUENCA DEL RÍO MADRE DE DIOS : Un examen crítico de los niveles de contaminación existentes y sus posibles causas y consecuencias. , no. Kuramoto 2001, pp. 1-12.

- FRANCOU, B., FABRE, D., POUYAUD, B., JOMELLI, V. y ARNAUD, Y., 1999. Symptoms of degradation in a tropical rock glacier, Bolivian Andes. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 10, no. 1, pp. 91-100. ISSN 10456740. DOI 10.1002/(SICI)1099-1530(199901/03)10:1<91::AID-PPP304>3.0.CO;2-B.
- GAITA IPARRRAGUIRRE, M.P., 2017. *Cuantificación e impacto del retroceso glaciar sobre los recursos naturales determinados mediante el SIG y teledetección - Microcuenca Llullán, Ancash - Perú* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional Agraria La Molina. Disponible en: <http://repositorio.lamolina.edu.pe/handle/UNALM/2913>.
- GARETH REES, W., 2006. *Remote sensing of snow and ice*. England: s.n. ISBN 0-415-29831-8.
- GOLDSTEIN, R. y WERNER, C., 1997. Radar interferogram filtering for geophysical applications. *Geophysical Research Letters* [en línea], vol. 25, no. 21, pp. 4035-4038. ISSN 0094-8276. Disponible en: <http://www.agu.org/pubs/crossref/1998.../1998GL900033.shtml%5Cnfile:///Users/mbagnardi/Papers/1998/Goldstein.../Geophysical...1998Goldstein...pdf%5Cnpapers://8461d6ef-4184-45b2-aa3d-395291ea6525/Paper/p2063>.
- GROH, T., 2019a. Rock Glacier Kinematics in the Kaunertal , Ötztal . , no. 1955.
- GROH, T., 2019b. Rock Glacier Kinematics in the Kaunertal , Ötztal. *Geosciences*, no. 1955, pp. 25. DOI 10.3390/geosciences9090373.
- GRUBER, S., 2005. Mountain Permafrost: Transient Spatial Modelling , Model Verification and the Use of Remote Sensing . ,
- GRUBER, S. y HAEBERLI, W., 2007. Permafrost in steep bedrock slopes and its temperature-related destabilization following climate change. , vol. 112, pp. 1-10. DOI 10.1029/2006JF000547.
- GUERRERO, C. y HERNANDEZ, P., 2017. *Determinación de un modelo digital de elevación a partir de imágenes de radar Sentinel-1 usando interferometría SAR* [en línea]. S.l.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas. Disponible en:

<http://repository.udistrital.edu.co/bitstream/11349/5915/1/HernandezCardenasPaolaAndrea2017.pdf>.

HAEBERLI, W., 1975. Untersuchungen zur Verbreitung von Permafrost zwischen Flüelapass und Piz Grialetsch (Graubünden). , no. 17.

HAEBERLI, W., 1985. Creep of Mountain Permafrost: Internal Structure and Flow of Alpine Rock Glaciers. *Mitteilungen der Versuchsanstalt für Wasserbau, Hydrologie und Glaziologie an der Eidgenössischen Technischen Hochschule Zurich*, no. 77. ISSN 03740056.

HAEBERLI, W., 2013. Cold Regions Science and Technology Mountain permafrost — research frontiers and a special long-term challenge. *Cold Regions Science and Technology* [en línea], vol. 96, pp. 71-76. ISSN 0165-232X. DOI 10.1016/j.coldregions.2013.02.004. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.02.004>.

HAEBERLI, W. y BENISTON, M., 1998. Change Climate Permafrost and and in the Its Alps Impacts on Glaciers. *Ambio* [en línea], vol. 27, no. 4, pp. 258-265. Disponible en: <http://www.jstor.org/stable/4314732>.

HAEBERLI, W., HALLET, B., ARENSON, L., ELCONIN, R., HUMLUM, O. y KA, A., 2006. Permafrost Creep and Rock Glacier Dynamics z. , vol. 214, no. June, pp. 189-214. DOI 10.1002/ppp.

HAEBERLI, W., SCHAUB, Y. y HUGGEL, C., 2016. Increasing risks related to landslides from degrading permafrost into new lakes in de-glaciating mountain ranges. *Geomorphology* [en línea], ISSN 0169-555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2016.02.009. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2016.02.009>.

HAEBERLI, W., WHITEMAN, C. y SHRODER, J.F., 2015. *Snow and ice-related hazards, risks, and disasters*. S.I.: s.n. ISBN 9780123948496.

HALLA, C., HENRIK BLÖTHE, J., TAPIA BALDIS, C., TROMBOTTO LIAUDAT, D., HILBICH, C., HAUCK, C. y SCHROTT, L., 2021. Ice content and interannual water storage changes of an active rock glacier in the dry Andes of Argentina.

Cryosphere, vol. 15, no. 2, pp. 1187-1213. ISSN 19940424. DOI 10.5194/tc-15-1187-2021.

HAQ, M Anul y BARAL, P., 2019. Study of permafrost distribution in Sikkim Himalayas using Sentinel-2 satellite images and logistic regression modelling. *Geomorphology* [en línea], pp. #pagerange#. ISSN 0169-555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2019.02.024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.024>.

HAQ, M. Anul y BARAL, P., 2019. Study of permafrost distribution in Sikkim Himalayas using Sentinel-2 satellite images and logistic regression modelling. *Geomorphology* [en línea], vol. 333, pp. 123-136. ISSN 0169555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2019.02.024. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2019.02.024>.

HARRIS, S.A., 1981. Climatic relationships of permafrost zones in areas of low winter snow-cover. *Biuletyn Peryglacjalny*, vol. 28, no. January 1981, pp. 227-240. ISSN 00679038. DOI 10.14430/arctic2507.

HAUCK, C., BACH, M. y HILBICH, C., 2008. A four-phase model to quantify subsurface ice and water content in permafrost regions based on geophysical data sets. *Proceedings of the 9th International Conference on Permafrost*, no. Archie 1942, pp. 675-680.

HERMAN, F., ANDERSON, B. y LEPRINCE, S., 2011. Mountain glacier velocity variation during a retreat/advance cycle quantified using sub-pixel analysis of ASTER images. *Journal of Glaciology*, vol. 57, no. 202, pp. 197-207. ISSN 0022-1430. DOI 10.3189/002214311796405942.

HERMOSILLA, D., 2016. *Interferometría radar de apertura sintética (InSAR) aplicada al estudio del movimiento en laderas aledañas al volcán Calbuco con ayuda de imágenes Sentinel-1A* [en línea]. S.l.: Universidad Técnica Federico Santa María. Disponible en: https://www.bertelsmann-stiftung.de/fileadmin/files/BSSt/Publikationen/GrauePublikationen/MT_Globalization_Report_2018.pdf http://eprints.lse.ac.uk/43447/1/India_globalisation%2C_society_and_inequalities%28Isero%29.pdf <https://www.quora.com/What-is-the>.

- HOELZLE, M., MITTAZ, C. y ETZELM, B., 2001. Surface Energy Fluxes and Distribution Models of Permafrost in European Mountain Areas : an Overview of Current Developments. , vol. 68, no. August 2000, pp. 53-68. DOI 10.1002/ppp.
- HOOPER, A., ZEBKER, H., SEGALL, P. y KAMPES, B., 2004. A new method for measuring deformation on volcanoes and other natural terrains using InSAR persistent scatterers. *Geophysical Research Letters*, vol. 31, no. 23, pp. 1-5. ISSN 00948276. DOI 10.1029/2004GL021737.
- HOSMER, D.W. y LEMESHOW, S., 2000. *Applied Logistic Regression*. Second Edi. S.l.: s.n. ISBN 0471356328.
- INAIGEM, 2017. Manual metodológico para el inventario nacional de glaciares. . Huaraz:
- INAIGEM, 2018. *Las Cordilleras Glaciares del Perú*. S.l.: s.n.
- IPA, 1998. *Glossary of Permafrost and Related Ground-Ice Terms*. S.l.: s.n. ISBN 0660125404.
- IPA, 2020. IPA Action group rock glacier inventories and kinematics: Towards standard guidelines for inventorying rock glaciers, version 4.1. . S.l.:
- IPCC, 2019. The Ocean and Cryosphere in a Changing Climate. A Special Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. *Intergovernmental Panel on Climate Change* [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://www.ipcc.ch/srocc/chapter/summary-for-policymakers/>.
- JANKE, J.R., NG, S. y BELLISARIO, A., 2017. An inventory and estimate of water stored in firn fields, glaciers, debris-covered glaciers, and rock glaciers in the Aconcagua River Basin, Chile. *Geomorphology* [en línea], ISSN 0169-555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2017.09.002. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2017.09.002>.
- JONES, D.B., ANDERSON, K., SELLEY, H.L., WOOD, J.L. y BETTS, R.A., 2017a. The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Global and Planetary Change*, ISSN 0921-8181. DOI 10.1016/j.gloplacha.2017.11.005.

- JONES, D.B., ANDERSON, K., SELLEY, H.L., WOOD, J.L. y BETTS, R.A., 2017b. The distribution and hydrological significance of rock glaciers in the Nepalese Himalaya. *Global and Planetary Change* [en línea], ISSN 0921-8181. DOI 10.1016/j.gloplacha.2017.11.005. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2017.11.005>.
- JONES, D.B., HARRISON, S., ANDERSON, K. y BETTS, R.A., 2018. Mountain rock glaciers contain globally significant water stores. *Scientific Reports* [en línea], vol. 8, no. 1, pp. 1-10. ISSN 20452322. DOI 10.1038/s41598-018-21244-w. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1038/s41598-018-21244-w>.
- KÄÄB, A., HUGGEL, C., FISCHER, L., GUEX, S., PAUL, F., ROER, I., SALZMANN, N., SCHMUTZ, K., SCHNEIDER, D., KÄÄB, A., HUGGEL, C., FISCHER, L., GUEX, S. y PAUL, F., 2005. Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains : an overview To cite this version : HAL Id : hal-00301627 Remote sensing of glacier- and permafrost-related hazards in high mountains : an overview. ,
- KANEVSKIY, M., SHUR, Y., KRZEWINSKI, T. y DILLON, M., 2013. Cold Regions Science and Technology Structure and properties of ice-rich permafrost near Anchorage , Alaska. *Cold Regions Science and Technology* [en línea], vol. 93, no. July 2005, pp. 1-11. ISSN 0165-232X. DOI 10.1016/j.coldregions.2013.05.001. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.coldregions.2013.05.001>.
- KELLERER-PIRKLBAUER, A. y KAUFMANN, V., 2012. About the relationship between rock glacier velocity and climate parameters in central Austria. *Austrian Journal of Earth Sciences*, vol. 1.
- KINWORTHY, B., 2016. *New Mexico Rock Glacier Inventory: Analysis of Geomorphology and Paleogeography*. S.l.: University of New Mexico.
- KONG, Y. y WANG, C., 2017. Responses and changes in the permafrost and snow water equivalent in the Northern Hemisphere under a scenario of 1 . 5 C warming. *Advances in Climate Change Research* [en línea], vol. 8, no. 4, pp. 235-244. ISSN 1674-9278. DOI 10.1016/j.accre.2017.07.002. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.accre.2017.07.002>.

- LAFRENIÈRE, M.J. y LAMOUREUX, S.F., 2019. Effects of changing permafrost conditions on hydrological processes and fluvial fluxes. *Earth-Science Reviews* [en línea], vol. 191, pp. 212-223. ISSN 00128252. DOI 10.1016/j.earscirev.2019.02.018. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.earscirev.2019.02.018>.
- LAMBIEL, C., REYNARD, E., LAMBIEL, C. y REYNARD, E., 2010. Norsk Geografisk Tidsskrift - Norwegian Journal of Geography Regional modelling of present , past and future potential distribution of discontinuous permafrost based on a rock glacier inventory in the Bagnes - Hérémence area (Western Swiss Alps) Regiona. , no. October 2014, pp. 37-41. DOI 10.1080/00291950152746559.
- LEGG, B., 2016. Rock glacier morphology and morphometry in Glacier National Park, northwest Montana, USA. , no. May.
- LEPRINCE, S., AYOUB, F., KLINGERT, Y. y AVOUAC, J.-P., 2007. Co-Registration of Optically Sensed Images and Correlation (COSICorr): an operational methodology for ground deformation measurements, in: Geoscience and Remote Sensing Symposium, 2007. *IGARSS 2007. IEEE International*, no. January, pp. 1943-1946.
- LÓPEZ, M., 2014. *Elaboración de un manual de operaciones para la captura de "firmas espectrales" en campo, validada en dos granjas experimentales*. S.l.: Universidad de Cuenca.
- MARCER, M., BODIN, X., BRENNING, A. y SCHOENEICH, P., 2017. Permafrost Favorability Index : Spatial Modeling in the French Alps Using a Rock Glacier Inventory. , vol. 5, no. December, pp. 1-17. DOI 10.3389/feart.2017.00105.
- MARTINI, M.A. y STRELIN, J.A., 2013. Inventario y caracterización morfoclimática de los glaciares de roca en la Cordillera Oriental argentina (entre 22° y 25° S). , vol. 174, pp. 569-581.
- MEIDENAAR, M., 2013. *Rock glaciers in the Eastern Cascades, Washington*. S.l.: s.n.
- MENARD, S., 2002. *Applied Logistic Regression Analysis*. S.l.: s.n. ISBN 0761922083.
- MERNILD, S.H., BECKERMAN, A.P., YDE, J.C., HANNA, E., MALMROS, J.K.,

- WILSON, R. y ZEMP, M., 2015. Mass loss and imbalance of glaciers along the Andes Cordillera to the sub-Antarctic islands. *Global and Planetary Change* [en línea], vol. 133, pp. 109-119. ISSN 09218181. DOI 10.1016/j.gloplacha.2015.08.009. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2015.08.009>.
- MILANA, J.P. y GÜELL, A., 2008. Diferencias mecánicas e hídricas del permafrost en glaciares de rocas glaciogénicos y criogénicos, obtenidas de datos sísmicos en el Tapado, Chile. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, vol. 63, no. 3, pp. 310-325.
- MILLAR, C.I. y WESTFALL, R.D., 2008. Rock glaciers and related periglacial landforms in the Sierra Nevada , CA , USA ; inventory , distribution and climatic relationships. *Quaternary International*, vol. 188, pp. 90-104. DOI 10.1016/j.quaint.2007.06.004.
- NECSOIU, M., ONACA, A., WIGGINTON, S. y URDEA, P., 2016. Rock glacier dynamics in Southern Carpathian Mountains from high-resolution optical and multi-temporal SAR satellite imagery. *Remote Sensing of Environment* [en línea], vol. 177, pp. 21-36. ISSN 00344257. DOI 10.1016/j.rse.2016.02.025. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2016.02.025>.
- OLIVA, M. y FRITZ, M., 2018. Permafrost degradation in a warmer Earth: challenges and perspectives. *Current Opinion in Environmental Science & Health* [en línea], ISSN 2468-5844. DOI 10.1016/j.coesh.2018.03.007. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.coesh.2018.03.007>.
- PASTICK, N.J., JORGENSON, M.T., WYLIE, B.K., NIELD, S.J., JOHNSON, K.D. y FINLEY, A.O., 2015. Remote Sensing of Environment Distribution of near-surface permafrost in Alaska : Estimates of present and future conditions. *Remote Sensing of Environment* [en línea], vol. 168, pp. 301-315. ISSN 0034-4257. DOI 10.1016/j.rse.2015.07.019. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.rse.2015.07.019>.
- PEÑALOZA MOLINA, L., 2018. *Detección y análisis de deslizamientos utilizando interferometría diferencial (D-InSAR) entre los años 2015 y 2017 en las provincias*

- Norte y valderrama del departamento de Boyacá*. S.l.: Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- PERUCCA, L. y ESPER ANGILLIERI, M.Y., 2011. Glaciers and rock glaciers ' distribution at 28 ° SL , Dry Andes of Argentina , and some considerations about their hydrological significance. , DOI 10.1007/s12665-011-1030-z.
- PIEDRA, J.I., 2016. *Estudio de erupciones volcánicas a través de imágenes satelitales caso de estudio: erupción volcán Puyehue, Chile* [en línea]. S.l.: Universidad Nacional de Córdoba. Disponible en: <http://www.famaf.unc.edu.ar/wp-content/uploads/2016/10/37-Piedra-Juan.pdf>.
- PRIETO MORÍN, J.F., 2015. *Métodos diferenciales e interferométricos para la evaluación de deformaciones de la corteza terrestre mediante técnicas GNSS e InSAR Tesis Doctoral*. S.l.: Universidad Politécnica de Madrid.
- RANGECROFT, S., HARRISON, S. y ANDERSON, K., 2015. Rock glaciers as water stores in the Bolivian Andes : an assessment of their hydrological importance. , vol. 47, no. 1, pp. 89-98.
- RANGECROFT, S., HARRISON, S., ANDERSON, K., MAGRATH, J., CASTEL, A.P. y PACHECO, P., 2014. Short Communication A First Rock Glacier Inventory for the Bolivian Andes. , vol. 343, no. July, pp. 333-343. DOI 10.1002/ppp.1816.
- REBELO-MOCHEL, F. y PONZONI, F.J., 2007. Spectral characterization of mangrove leaves in the Brazilian Amazonian Coast: Turiaçu Bay, Maranhão State. *Anais da Academia Brasileira de Ciências*, vol. 79, no. 4, pp. 683-692. ISSN 00013765.
- REES, G., 2010. Remote Sensing Systems for Observation of the Earth's Surface. *Remote Sensing of Snow and Ice*, pp. 23-74. DOI 10.1201/9781420023749.ch2.
- ROER, I., KÄÄB, A. y DIKAU, R., 2005. Rockglacier acceleration in the Turtmann valley (Swiss Alps): Probable controls. *Norsk Geografisk Tidsskrift*, vol. 59, no. 2, pp. 157-163. ISSN 00291951. DOI 10.1080/00291950510020655.
- ROER, I. y NYENHUIS, M., 2007. Rockglacier activity studies on a regional scale : comparison of geomorphological mapping and photogrammetric monitoring. , vol. 1758, pp. 1747-1758. DOI 10.1002/esp.

- ROSEN, P., JOUGHIN, I., LI, F., MADSEN, S., RODRIGUEZ, E. y RICHARD, G., 2000. Synthetic aperture radar interferometry Synthetic aperture radar interferometry. *Inverse Problems* [en línea], pp. 50. ISSN 0266-5611. DOI 10.1088/0266-5611/14/4/001. Disponible en: <http://ieeexplore.ieee.org/lpdocs/epic03/wrapper.htm?arnumber=838084%5Cnhttp://stacks.iop.org/0266-5611/14/i=4/a=001?key=crossref.8f6cbe410d55076593d70a4a99ec4bc6>.
- RUIZ, L., 2013. Análisis geomorfológico , sedimentológico y crono- estratigráfico , de depósitos glaciales , periglaciales y glaciogénicos , en la Cordillera de los Andes y zonas adyacentes entre el paralelo 42 ° y el 43 ° LS , desde la última glaciación. *Facultad de Ciencias Exactas y Naturales. Universidad de Buenos Aires*,
- SAAVEDRA, F.A., KAMPF, S.K., FASSNACHT, S.R. y SIBOLD, J.S., 2018. Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000-2016. *Cryosphere*, vol. 12, no. 3, pp. 1027-1046. ISSN 19940424. DOI 10.5194/tc-12-1027-2018.
- SAGREDO, E. A. y LOWELL, T. V., 2012. Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. *Global and Planetary Change* [en línea], vol. 86-87, no. April, pp. 101-109. ISSN 09218181. DOI 10.1016/j.gloplacha.2012.02.010. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.02.010>.
- SAGREDO, E A y LOWELL, T. V, 2012. Climatology of Andean glaciers: A framework to understand glacier response to climate change. *Global and Planetary Change* [en línea], vol. 86-87, pp. 101-109. ISSN 0921-8181. DOI 10.1016/j.gloplacha.2012.02.010. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.gloplacha.2012.02.010>.
- SAM, L., BHARDWAJ, A., SINGH, S. y KUMAR, R., 2015. Remote sensing flow velocity of debris-covered glaciers using Landsat 8 data. *Progress in Physical Geography*, vol. 40, no. 2, pp. 305-321. ISSN 03091333. DOI 10.1177/0309133315593894.
- SAMPIERI, R., 2010. *Metodología de la investigación*. Quinta edi. S.l.: s.n. ISBN 9786071502919.

- SAMPIERI, R., FERNÁNDEZ, C. y BAPTISTA, M., 2014. *Metodología de la investigación*. Sexta edic. S.l.: McGraw Hill. ISBN 9781456223960.
- SANDOVAL, G.A., 2018. Modelos de Distribución de Permafrost de Montaña. ,
- SATTAR, A., GOSWAMI, A., KULKARNI, A. V. y DAS, P., 2019. Glacier-surface velocity derived ice volume and retreat assessment in the dhauliganga basin, central himalaya – A remote sensing and modeling based approach. *Frontiers in Earth Science*, vol. 7, no. May, pp. 1-15. ISSN 22966463. DOI 10.3389/feart.2019.00105.
- SATTLER, K., 2016. *Periglacial preconditioning of debris flows in the Southern Alps, New Zealand*. S.l.: s.n.
- SATTLER, K., ANDERSON, B., MACKINTOSH, A., NORTON, K. y DE RÓISTE, M., 2016. Estimating permafrost distribution in the maritime southern alps, New Zealand, based on climatic conditions at rock glacier sites. *Frontiers in Earth Science*, vol. 4, no. February, pp. 1-17. ISSN 22966463. DOI 10.3389/feart.2016.00004.
- SCHMID, M.O., BARAL, P., GRUBER, S., SHAHI, S., SHRESTHA, T., STUMM, D. y WESTER, P., 2015. Manual for Mapping Rock Glaciers in the Google Earth. *Cryosphere*, vol. 9, no. 6, pp. 2089-2099. ISSN 19940424. DOI 10.5194/tc-9-2089-2015.
- SCHNEIDER, S., DAENGELI, S., HAUCK, C. y HOELZLE, M., 2013. A spatial and temporal analysis of different periglacial materials by using geoelectrical, seismic and borehole temperature data at murtel-corvatsch, upper engadin, swiss alps. *Geographica Helvetica*, vol. 68, no. 4, pp. 265-280. ISSN 0016-7312. DOI 10.5194/gh-68-265-2013.
- SCHROTT, L., 1991. Global Solar Radiation , Soil Temperature and Permafrost in the Central Andes , Argentina : a Progress Report. *Permafrost and Periglacial Processes*, vol. 2, no. November 1990, pp. 59-66. DOI 10.5194/104S-6740/91/010059-08\$05.00.
- SCOTT, E. y MOCK, C., 2013. *Encyclopedia of quaternary science*. Volume 1.

Columbia, SC, USA: s.n. ISBN 9780444536433.

SCOTTI, R., BRARDINONI, F., ALBERTI, S., FRATTINI, P. y CROSTA, G.B., 2013. Geomorphology A regional inventory of rock glaciers and protalus ramparts in the central Italian Alps. *Geomorphology* [en línea], vol. 186, pp. 136-149. ISSN 0169-555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2012.12.028. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2012.12.028>.

SELIGMAN, Z.M., 2009. *Rock Glacier Distribution, Activity and Movement, Northern Absaroka and Beartooth Ranges, MT, USA*. S.l.: University of Montana.

STREL, A., 2017. *Using high-resolution optical satellite imagery to observe glaciers and rock glaciers in Northern Tien Shan , Central Asia*. S.l.: Technical University of Munich.

TROMBOTTO, D, WAINSTEIN, P, ARENSON, L., 2014. *Guía Terminológica de la Geocriología Sudamericana Terminological Guide of the South American Geocryology*. 1a ed.-Lu. S.l.: s.n. ISBN 9789873352355.

TROMBOTTO, D., 2000. Survey of cryogenic processes, periglacial forms and permafrost conditions in South America. , vol. 21, no. 112, pp. 33-55.

TÜRK, T., 2017. Determination of mass movements in slow-motion landslides by the cosi-corr method. *Geomatics, Natural Hazards and Risk* [en línea], vol. 9, no. 1, pp. 325-336. ISSN 19475713. DOI 10.1080/19475705.2018.1435564. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/19475705.2018.1435564>.

UBEDA, J., YOSHIKAWA, K., PARI, W., PALACIOS, D., MACIAS, P. y APAZA, F., 2015. Geophysical surveys on permafrost in Coropuna and Chachani volcanoes (southern Peru). *EGU General Assembly 2015* [en línea], vol. 17, no. 2012, pp. 35858. Disponible en: <https://cryoperu.files.wordpress.com/2014/12/c3babeda-et-al-egu2015-12592-permafrost-andes.pdf>https://cryoperu.files.wordpress.com/2014/12/c3babeda-et-al-2015_-permafrost-andes.pdf.

ÚBEDA, J., YOSHIKAWA, K., PARI, W., PALACIOS, D., MASÍAS, P., APAZA, F., CCALLATA, B., MIRANDA, R. y CONCHA, R., 2014. Informe sobre el

permafrost encontrado en los volcanes Coropuna y Chachani (Arequipa , sur de Perú). . S.l.:

UNESCO, 2011. Glossary of Glacier Mass Balance and Associated Terminology. [en línea]. Pari, Francia: Disponible en: unesdoc.unesco.org/images/0019/001925/192525e.pdf.

UNFCCC, 2007. Impacts, vulnerabilities and adaptation in developing countries. [en línea]. S.l.: Disponible en: <https://unfccc.int/resource/docs/publications/impacts.pdf>.

VALLEY, E., MONNIER, S., KINNARD, C., SURAZAKOV, A. y BOSSY, W., 2014. Geomorphology Geomorphology , internal structure , and successive development of a glacier foreland in the semiarid Chilean Andes (Cerro Tapado , upper. *Geomorphology* [en línea], vol. 207, pp. 126-140. ISSN 0169-555X. DOI 10.1016/j.geomorph.2013.10.031. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.geomorph.2013.10.031>.

VILLARROEL, C.D., BELIVEAU, G.T., FORTE, A.P., MONSERRAT, O. y MORVILLO, M., 2018. DInSAR for a regional inventory of active rock glaciers in the Dry Andes Mountains of Argentina and Chile with sentinel-1 data. *Remote Sensing*, vol. 10, no. 10, pp. 1-21. ISSN 20724292. DOI 10.3390/rs10101588.

VUILLE, M., FRANCOU, B., WAGNON, P., JUEN, I., KASER, G., MARK, B.G. y BRADLEY, R.S., 2008. Earth-Science Reviews Climate change and tropical Andean glaciers: Past , present and future. , vol. 89, pp. 79-96. DOI 10.1016/j.earscirev.2008.04.002.

VUILLE, M., FRANQUIST, E., GARREAUD, R., LAVADO CASIMIRO, W.S. y CÁCERES, B., 2015. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, vol. 120, pp. 1-17. ISSN 21699275. DOI 10.1002/2014JC010485. Received.

WIRZ, V., GRUBER, S., PURVES, R.S., BEUTEL, J., GÄRTNER-ROER, I., GUBLER, S. y VIELI, A., 2016. Short-term velocity variations at three rock glaciers and their relationship with meteorological conditions. *Earth Surface*

Dynamics, vol. 4, no. 1, pp. 103-123. ISSN 2196632X. DOI 10.5194/esurf-4-103-2016.

WOOD, A. y ROY, C., 2016. Overview: The electromagnetic spectrum and nonionizing radiation. *Non-Ionizing Radiation Protection: Summary of Research and Policy Options*. S.l.: s.n., pp. 1-9. ISBN 9781119284673.

YOSHIKAWA, K., APAZA, F., LUNA, G., ÚBEDA, J., MASÍAS, P., VASQUEZ, P., CCALLATA, B., CONCHA, R., IPARRAGUIRRE, J., RAMOS, I. y DE, G., 2020. Current thermal state of permafrost in the southern Peruvian Andes and potential impact from El Niño – Southern Oscillation (ENSO). , no. April, pp. 1-12. DOI 10.1002/ppp.2064.

ZEMP, M., HUSS, M., THIBERT, E., ECKERT, N., MCNABB, R., HUBER, J., BARANDUN, M., MACHGUTH, H., NUSSBAUMER, S.U., GÄRTNER-ROER, I., THOMSON, L., PAUL, F., MAUSSION, F., KUTUZOV, S. y COGLEY, J.G., 2019. Global glacier mass changes and their contributions to sea-level rise from 1961 to 2016. *Nature*, vol. 568, no. 7752, pp. 382-386. ISSN 14764687. DOI 10.1038/s41586-019-1071-0.

X. ANEXOS

I. Procedimiento para estimar la velocidad superficial de los GR

✓ *Selección de imágenes satelitales ópticas*

La selección de imágenes se realiza tomando como principal criterio el contenido de nubes troposférico en la imagen satelital (porcentaje de nube < 5% en la zona de estudio), se escogen un par de imágenes de la misma zona de estudio, pero con una temporalidad diferente, en este caso por ser un estudio a nivel nacional, se usaron temporalidades entre 1 año en promedio de las imágenes, esto con la finalidad de poder determinar los desplazamientos subpíxeles entre ambas imágenes, es decir, si se usan imágenes de menor temporalidad podrían no detectarse movimientos y si se usan imágenes de una mayor temporalidad los resultados podrían no ser buenos (Leprince et al. 2007) considerando el tamaño de pixel de 15 m, vale indicar que, las velocidades obtenidas durante este periodo pueden diferir si se analizan en otras temporalidades.

✓ *Corrección geométrica*

Este proceso también llamado ortorrectificación se realiza con la extensión libre Cosi-Corr del software ENVI, que será descargado de la página del Instituto de Tecnología de California, http://www.tectonics.caltech.edu/slip_history/spot_coseis/index.html, y consiste en una corrección geométrica automática y precisa, que corrige las distorsiones espaciales de los elementos de la imagen, esta corrección los ajusta a la dirección y sistema adecuado usando el DEM Alos Palsar.

✓ *Correlación Fourier*

La correlación o corregistro Fourier de las imágenes ópticas permiten determinar los desplazamientos horizontales producto de la correlación de subpíxeles de las imágenes ortorrectificadas que se diferencian solo por un movimiento espacial ($\Delta y \Delta x$), este movimiento relativo de las imágenes se estima a partir de las coordenadas pico de correlación obtenido a partir de la transformada de Fourier inversa, algoritmo que está predefinido en la extensión de Cosi-Corr. La técnica de Fourier se aplica debido a que su uso se sugiere para imágenes de buena calidad, es decir, poco ruido sobre la superficie a analizar (nubes, lluvia, etc.), por esto, se escogieron imágenes libres de nubes en las zonas de GR.

✓ *Productos y análisis*

Los productos del procesamiento con Cosi-Corr básicamente son 3, el mapa de desplazamiento en la dirección X e Y (m) de esta se deriva el movimiento superficial usando la resultante de vectores (Ecuación 1), y el ruido de la correlación de las imágenes (SNR) que representa la calidad de la correlación y tiene un rango de 0 (sin calidad en la correlación) y 1 (buena calidad de correlación), se usaron solo las zonas donde el umbral de SNR fue mayor a 0.7.

II. Procedimiento para estimar la velocidad vertical de los GR

✓ *Descarga de imágenes Sentinel-1*

La búsqueda y descarga de las imágenes Sentinel-1 se realizará por medio de la plataforma de la ESA y Copernicus, Copernicus Open Access Hub en base los polígonos de la zona de estudio, es decir, los GR digitalizados en las cordilleras peruanas. Según la literatura consultada, el tipo de polarización en interferometría DInSAR es la del tipo vertical-vertical (VV). La fecha de adquisición de las imágenes será del 2015-2019 del Sentinel-1 (A y B).

✓ *Corregistro*

Este proceso permite que los píxeles de la imagen secundaria sean removidos con el fin de ser alineados con la imagen maestra, la diferencia entre las imágenes esclava y maestra es la temporalidad entre ellas, además, los cambios que se detectan en la superficie terrestre y que para este caso se visualizan como cambios en la deformación del suelo en el eje vertical. Conceptualmente, este procedimiento asegura que cada punto en tierra se corresponda con la misma coordenada (rango, azimuth) de pixel tanto en la imagen maestra como en la secundaria, corrigiendo los efectos relativos de escala, rotación y desplazamiento traslacional entre las imágenes consideradas, representando cada punto de la superficie en el mismo pixel. Para lo anterior se debe contar con un DEM de la zona las zonas de estudio y los datos orbitales para cada imagen vertical-vertical (VV) en este caso, el DEM se descarga usando automáticamente en el software SNAP (Hermosilla 2016).

✓ *Generación del interferograma y coherencia*

Para comenzar con la generación de la fase interferométrica, que ésta es formada mediante la multiplicación cruzada de la imagen maestra con el conjugado complejo de la

secundaria, es decir, la amplitud de imagen esclava y maestra son multiplicadas, mientras que las fases son restadas, de ésta última se obtiene el interferograma. (Hermosilla 2016).

La coherencia es el coeficiente de correlación cruzada del par SAR imagen estimada sobre una pequeña ventana (unos pocos píxeles de distancia y azimut), una vez que todos los componentes de la fase deterministas (principalmente debido a la elevación del terreno) se compensan, el valor de coherencia va de 0 (la fase interferométrica es sólo ruido) a 1 (ausencia total de ruido de fase) (ESA 2019), para este caso se definió un umbral de coherencia de 0.7, es decir, solo se consideró valores de interferograma con coherencia mayor a 0.7.

✓ *Deburst*

La operación Deburst es utilizada para juntar las franjas de cada subfranja ya corregistradas en una sola imagen (Hermosilla 2016), lo que equivale a decir, unir las franjas de la imagen SAR que se divide en tres debido a su alto peso en la descarga, entre 7-8 GB.

✓ *Remoción de la fase topográfica*

En la generación del interferograma despreciando la fase atmosférica y anulando el ruido, solo falta remover la fase generada por la topografía del terreno para aislar el movimiento inducido entre ambas imágenes SAR (lo que equivale a decir, el desplazamiento vertical entre las imágenes maestra y esclava), esta fase topográfica puede ser calculada y modelada con un DEM, que se descarga automáticamente del software SNAP (de la ESA) en base a la zona de estudio, la fase interferométrica quedará reducida al desplazamiento del suelo (Hermosilla 2016).

✓ *Filtro-Goldstein y Multilooking*

El filtro Goldstein, utiliza un sistema que se adapta a la imagen, en zonas de alta concentración de franjas (lo que equivale a decir muchos anillos concéntricos que indican una alta deformación o desplazamiento en la zona de estudio, como se muestra en la Figura 7) el sistema tiende a uniformar los valores de los píxeles, haciendo cambios más graduales, mientras que las áreas donde las franjas son inexistentes (zonas donde no hay anillos concéntricos lo que equivale a decir zonas de no deformación) el filtro tiene menos influencia (Piedra 2016), el algoritmo de filtrado ideado por Goldstein y Werner el año 1998, mejora significativamente la visibilidad de los anillos en un interferograma y reduce el ruido inducido por factores externos de correlacionados (Goldstein y Werner 1998).

El filtro-Multilooking promedia los píxeles en cada dirección, reduciendo el ruido en los datos (Piedra 2016), reduce el ruido del speckle de una imagen SAR o efectos de ruido por la atmósfera, suaviza los valores de los píxeles reduciendo la desviación estándar del promedio de los píxeles

✓ *Desenrollado*

El interferograma obtenido anteriormente proporciona una medida ambigua de altitud relativa del terreno, esto equivale a decir que el desplazamiento vertical del interferograma no está expresado en unidades métricas sino en radianes y cada franja tiene un alcance angular de 2π radianes (Rebelo-Mochel y Ponzoni 2007), lo que equivale a decir que cada franja interferométrica tiene una deformación de 2π radianes y que en longitudes métricas es $\lambda/2$ ($\lambda = 3.6$ cm para la banda C de la imagen Sentinel-1). Con este proceso las discontinuidades de fase 2π son eliminadas de la fase interferométrica y son reemplazadas por $2\pi = \lambda/2 = 1.8$ cm de deformación por cada franja interferométrica, a lo que se llama desenrollado de la fase (Piedra 2016).

✓ *Georreferenciación-dange-doppler terrain correction*

Para poder visualizar correctamente el interferograma obtenido, éste debe encontrarse debidamente posicionado en una localización geográfica única y bien definida en un sistema de coordenadas con un Datum específico, este posicionamiento es llamado georreferenciación de la imagen (Hermosilla 2016). Este paso considera el enfoque Rango-Doppler y las transformaciones geodésicas y cartográficas (Piedra 2016), es decir, considera para la transformación geodésica y cartográfica de las coordenadas de la imagen (que están en coordenadas de rango y azimuth propias de la imagen SAR) el objetivo que se encuentra en una posición fija (suelo) y el satélite (fase móvil), el algoritmo se basa en el efecto Doppler para poder llevar las coordenadas SAR a la cartográfica usando un DEM.

✓ *Export SIG*








La herramienta export del software SNAP permiten exportar varios formatos para el procesamiento y análisis de los interferogramas en diversos programas QGIS, Google Earth-Pro, etc., en este caso se exportó en formato TIF para poder visualizar los resultados en un software SIG como QGIS o ArcGIS. *Figura 24.* Flujograma de determinación de velocidades superficial y horizontal.

III. Matriz de consistencia

PROBLEMA GENERAL	OBJETIVO GENERAL	HIPÓTESIS GENERAL	VARIABLE	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	DIMENSIONES	INDICADORES	UNIDAD	Técnica	Instrumentos
¿De qué manera la aplicación de Tecnologías de Información Geográfica permitirá determinar la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú?	Aplicar las Tecnologías de Información Geográfica en la determinación de la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú.	La aplicación de las Tecnologías de Información Geográfica permite la descripción y el análisis adecuado de la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú.				D1. Distribución espacial de los glaciares de roca	Coordenadas UTM y geográficas del centroide de los glaciares de roca	m, ° sexagesimales		
							Altitud mínima, máxima y promedio de los glaciares de roca	msnm		
							Área de los glaciares de roca	m ²		
							Orientación de los glaciares de roca	N, S, E, W		
							Pendiente de los glaciares de roca	°		
							Actividad de los glaciares de roca	Tipo de actividad		
							Temperatura media anual del aire de los glaciares de roca	° C		
						D3 Velocidad de los glaciares de	Estimación de la velocidad superficial y vertical de los glaciares de roca	m/mes		
Problemas específicos	Objetivos específicos	Hipótesis específicas								
P1. ¿Cuál será la distribución espacial, características topoclimáticas y velocidad superficial de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú? P2. ¿Cuáles son las variables topoclimáticas que controlan la presencia de glaciares rocosos activos en los Andes Tropicales del Perú?	O1. Determinar la distribución espacial, caracterización topoclimática y velocidad de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú. O2. Determinar las variables topoclimáticas que controlan la presencia de glaciares rocosos activos en los Andes Tropicales del Perú.	H1. La aplicación de las TIG permite determinar correctamente la distribución espacial, caracterización topoclimática y velocidad de los glaciares de roca en los Andes Tropicales del Perú. H2. La combinación de variables topoclimáticas explican la presencia de glaciares rocosos en los Andes Tropicales del Perú.	V.D. Dinámica de los glaciares de roca	Los GR son geoformas generadas por el arrastre de suelo congelado (IPA 2020). Por lo tanto, la dinámica de los glaciares de roca está en función de las condiciones del clima, ubicación y topografía en la que se encuentran (Azocar 2013).	La dinámica de los glaciares de roca que están en función del clima, la ubicación y la topografía, se expresará bajo la forma de la distribución espacial y velocidad de los glaciares de roca.	D2. Caracterización topoclimática de los glaciares de roca			Observación visual	Ficha de recolección de datos.

					roca				
			V.I. Tecnologías de Información Geográfica	Son un conjunto de tecnologías especializadas que ayudan en la recolección, manejo y análisis espaciotemporal de información alfanumérica relacionada con los recursos, características de los espacios naturales de una zona (Ehrensperger et al. 2007)	Las tecnologías de información geográfica se usarán como una herramienta para analizar las imágenes satelitales usadas para estudiar la dinámica de glaciares rocosos.	D.1 Imágenes satelitales	Resolución espacial	m	Observación/exploración visual

IV. Instrumentos de recolección de datos

FICHA TÉCNICA DE CAMPO DE CARACTERIZACIÓN GEOMORFOLÓGICA DE LOS GLACIARES DE ROCA													
NOMBRE DEL PROYECTO				Proyecto Permafrost				FECHA		19/11/2019			
DIRECCIÓN				ÁREA				RESPONSABLE					
Investigación Glaciológica				Permafrost				Edwin Noé Badillo Rivera					
DESCRIPCIÓN POLÍTICA													
COMUNIDAD	San Félix	DISTRITO	Chachas	PROVINCIA	San Ramón	DEPARTAM	Arequipa	CUENCA	Camaná				
DESCRIPCIÓN GEOGRÁFICA DEL GLACIAR DE ROCA	LÍM. INF. GR	ESTE=		NORTE=		ALTITUD=		CORDILLERA/ZONA					
	LÍM. SUP. GR	ESTE=		NORTE=		ALTITUD=		Chila- 18S					
	MEDIA GR	ESTE=		NORTE=		ALTITUD=							
CARACTERÍSTICAS DEL GLACIAR DE ROCA													
INDICADOR	ACTIVO			INACTIVO			FÓSIL/RELICTO						
Textura superficial	Signos de flujos, topografía definida por surcos y crestas, comprensión longitudinal			X			Signos de flujos, topografía definida por surcos y crestas			Lineas de flujo menos definidas, superficie colapsada, pequeñas depresiones cóncavas en la superficie			
Color	Color claro con la superficie superficie barnizada un tanto más oscura			X			Color variante			Usualmente son de color gris a plomo o marrón claro, tonalidades intermitentes en su superficie			
Cuerpo	Cuerpo hinchado y redondeado, indica presencia de hielo, puede existir hielo en su superficie			X			Cuerpo hinchado y redondeado, indica presencia de hielo, puede existir hielo en su superficie			Cuerpo aplanado, como resultado de fusión del hielo			
Pendiente frontal	Escarpado, >30°			X			Lisa, >30°			Pendiente suave, <30°, transición suave entre la superficie de la geoforma y la pendiente redondeada			
Presencia de roca en la superficie	Rocas inestables			X			Cantos rodados estables			Cantos rodados estables, detritos distribuidos uniformemente			
Vegetación	Ausencia de vegetación						Ausencia de vegetación			Presencia de vegetación			
Ubicación	Muy Cercanos a un aporte activo (por ejemplo nieve)			X			Puede existir presencia de un aporte activo y se ubican en los valles y también al pie de los montes			No existe presencia de un aporte activo de nieve			
Imagen Referencial:													
													
OTRAS CARACTERÍSTICAS													
DESCRIPC	Arcilla<0.002mm	Limo, 0.002-0.05 mm	Arena, 0.05-2 mm	GRAVA>2mm	>2, 1 cm>	<1 - 5 cm>	<5 - 15 cm>	<15 - 50cm>	<50-100cm>	<100-250cm>	<250-500cm>	<500-750cm>	<750-1000cm>
TAMAÑO DE GRANOS							X			X			X
DESCRIPC	Muy anguloso		Anguloso		Subangulosos		Subredondeados		Redondeados		Muy redondeados		Homo/Hetero
GRADO DE REDONDEZ													
DESCRIPC	Estratigráfico	Paleoambiente/Paleoclima	Hidrogeológico	Hidrológico	Minero	Geomorfológico	Geofísico	Periglacial	Glaciológico	Sedimentológico	Dendrogeomorfología	Dataciones	Geocronología
TIPO DE INTERÉS													
Datos del monitor de campo			Edwin Noé Badillo Rivera					Firma					

FICHA TÉCNICA DE RECOLECCIÓN DE DATOS								
NOMBRE DEL PROYECTO			Proyecto Permafrost				11/19/2019	
DIRECCIÓN			ÁREA		RESPONSABLE			
Investigación Glaciológica			Subdirección de Investigación Glaciológica		Edwin Noé Badillo Rivera			
II. DATOS GENERALES								
OBJETIVO		Aplicar las Tecnologías de Información Geográfica en la determinación de la dinámica de los glaciares de roca como formas de permafrost en los Andes Tropicales del Perú.						
ÁMBITO		20 cordilleras de los Andes Tropicales del Perú						
PERIODO DE IMÁGENES		Imágenes satelitales de los años 2015, 2016, 2017, 2018, 2019 y 2020.						
III. DATOS TÉCNICOS DE LAS IMÁGENES SATELITALES								
FUENTE DE ADQUISICIÓN			SATÉLITE		PROYECTOS ESPACIALES		-- Google Earth Pro -- Bing Maps	
-- Servicio Geológico de los Estados Unidos -- Agencia Espacial Europea -- Agencia Espacial Japonesa			-- LANDSAT 8 -- SENTINEL 1 -- ALOS PALSAR					
SENSOR		ÓRBITA	Operational Land Imager (OLI)	Satélite de órbita polar	RESOLUCIÓN TEMPORAL	ANCHO DE BARRIDO DE LA ESCENA		185 km * 180 km
Single Look Complex (250 km)		ÓRBITA	Satélite de órbita polar	TIPO	16 días	ÁNGULO DE INCIDENCIA EN RANGO	29.1°-46°	Polarización HH+HV+VV
LC08_L1TP_003070_20170615_20170629_01_T1								
LC08_L1TP_006068_20160617_20170323_01_T1								
LC08_L1TP_006069_20180623_20180704_01_T1								
LC08_L1TP_008067_20180418_20180501_01_T1								
LC08_L1TP_008067_20180909_20180913_01_T1								
S1B_IW_SLC_1SDV_20170528T103830_20170528T103857_005797_00A29F_6D03								
S1B_IW_SLC_1SDV_20170614T104618_20170614T104645_006045_00A9D7_3F79								
S1B_IW_SLC_1SDV_20171121T101433_20171121T101500_008378_00ED57_838C								
S1B_IW_SLC_1SDV_20171126T102252_20171126T102319_008451_00EF95_E653								
S1B_IW_SLC_1SDV_20171128T100717_20171128T100744_008480_00F085_2CCF								
S1B_IW_SLC_1SDV_20180516T104623_20180516T104650_010945_014093_AE73								
S1B_IW_SLC_1SDV_20181109T102259_20181109T102326_013526_01907B_AE83								
S1B_IW_SLC_1SDV_20181123T100724_20181123T100751_013730_0196F6_084D								
S1B_IW_SLC_1SDV_20181128T101440_20181128T101507_013803_01995A_B49F								

V. Fotografías de la zona de estudio



Glaciar de roca cubierto con nieve



Roca recientemente fragmentada con presencia de hielo



Glaciar de roca "San Félix", ángulo frontal 50°



Vista frontal del glaciar de roca "San Félix"



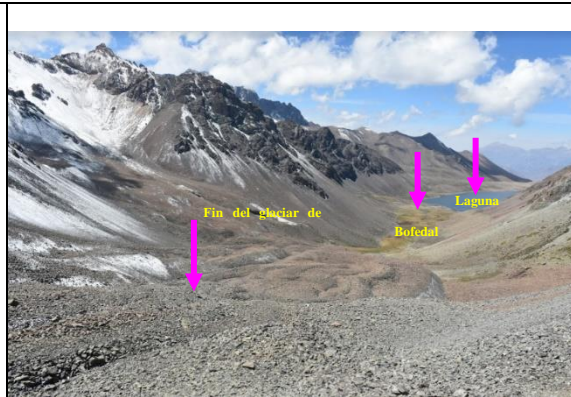
Límite superior del glaciar de roca



Rocas de variado tamaño sobre la superficie del GR



Estación meteorológica instalada sobre el glaciar de roca



Sucesión de glaciar de roca, bofedal y laguna



Vista frontal



Realizando prospección geofísica, SEV



Realizando refracción sísmica



Equipo "PERMAFROST"

VI. Resultados de prospección geofísica

Se han realizado pruebas no invasivas usando prospección geofísica. Los resultados de SEV, muestran que las capas internas del GR San Félix tienen contenido de hielo, esto debido a que, según los resultados de SEV que se muestran en la Figura 26 (ver la tabla de cada gráfico) existen capas internas del GR en las que las lecturas de SEV superan los $>20000 \Omega\text{m}$, valores que según Francou et al. (1999) sugieren una capa rica en hielo, en el GR San Félix, se encontró valores de máximos de resistividad de $40146 \Omega\text{m}$ (a una profundidad de 3.2 m y un espesor de capa de 8.0 m, SEV-1), $29149 \Omega\text{m}$ (a una profundidad de 3.0 m y un espesor de capa de 6.39 m, SEV-2) y $10686 \Omega\text{m}$ (a una profundidad de 17.9 m, y un espesor de 16.3 m de capa, SEV-3). En cuanto a la velocidad de ondas P (VP), los resultados muestran que a una profundidad de 2 a 42 m la VP va desde los 300 a 2100 m/s, y los primeros 5 m predominan valores de VP <1000 m/s (que se asocia a valores de capa activa del GR, Burger et al. 1999), mientras que en la parte central del gráfico y extremo superior derecho se registran valores de VP superiores a >1650 m/s bajo los primeros 5 m, que se asocia con una zona de mezcla de hielo y detritos.

Tabla 26

Resultados de sondaje vertical eléctrico y refracción sísmica.

Parámetro	RS-1	SEV-1	SEV-2	SEV-3
Mínimo (kms^{-1})	0.10	405.58	425.32	410.08
Máximo (kms^{-1})	2.13	29149.00	10231.00	40146.00
Promedio (kms^{-1})	1.13	5339.62	4331.06	6714.96
RMSE (RS, ms^{-1} / SEV, %)	6.08	2.5	3.9	2.6

En la Figura 26, se muestra la interpretación conjunta entre la refracción sísmica y el sondaje vertical eléctrico.

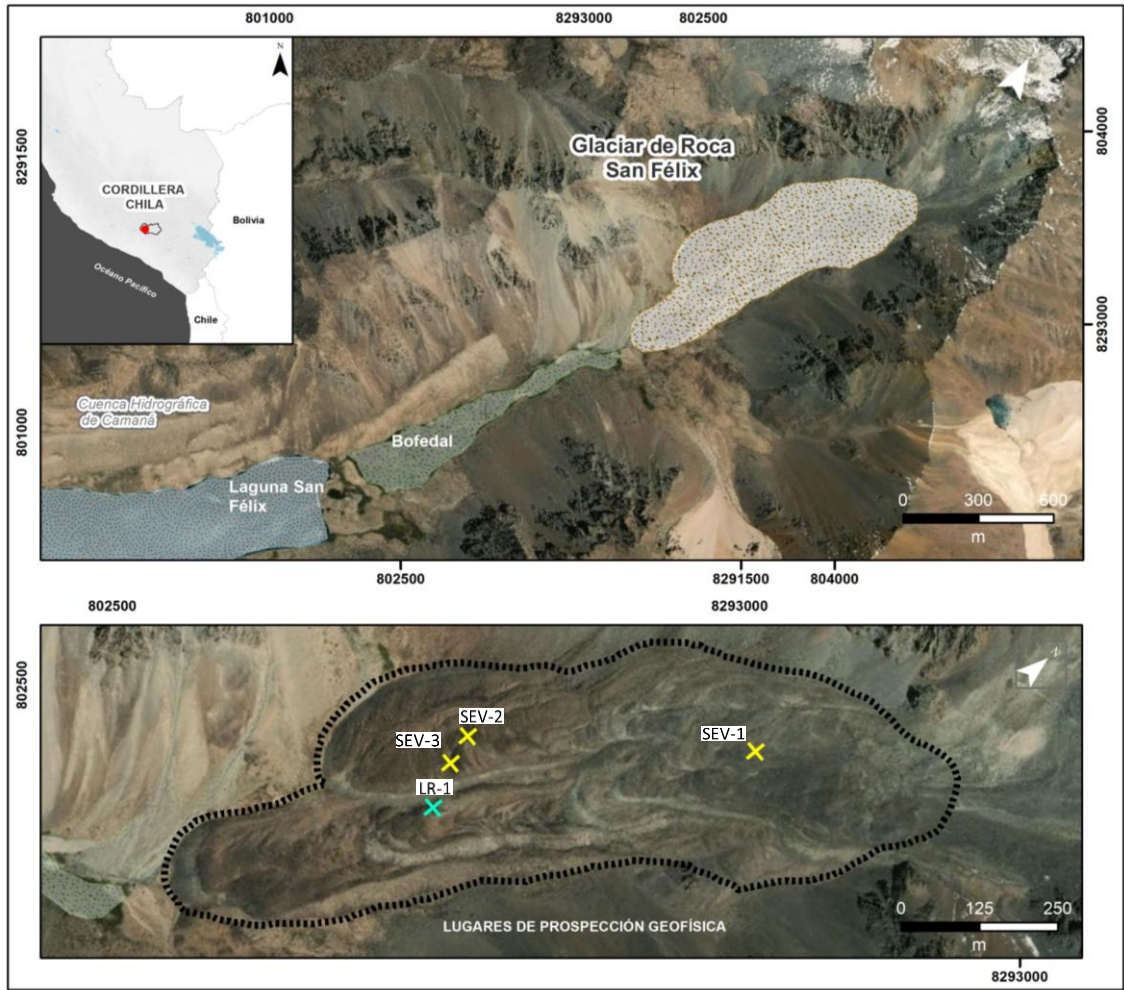






Figura 25. Ubicación de las zonas de prospección geofísica sobre el GR

- Sobre la zona de campo en la cordillera Chila, al sur del Perú, se encuentra una sucesión ecosistémica, en la parte superior se observa el GR, bajo este una bofedal y una laguna.

Tabla 27

Ubicación de las zonas de prospección geofísica

Parámetro	Longitud (°W)	Latitud (°S)	IMAGEN REFERENCIAL
SVE-1	72°10'31.4487"	15°25'30.25"	

SVE-2	72°10'33.4487"	15°25'32.25"	
SVE-3	72°10'33.4487"	15°25'30.64429"	
LR-1	72°10'33.5748"	15°25'35.0507"	

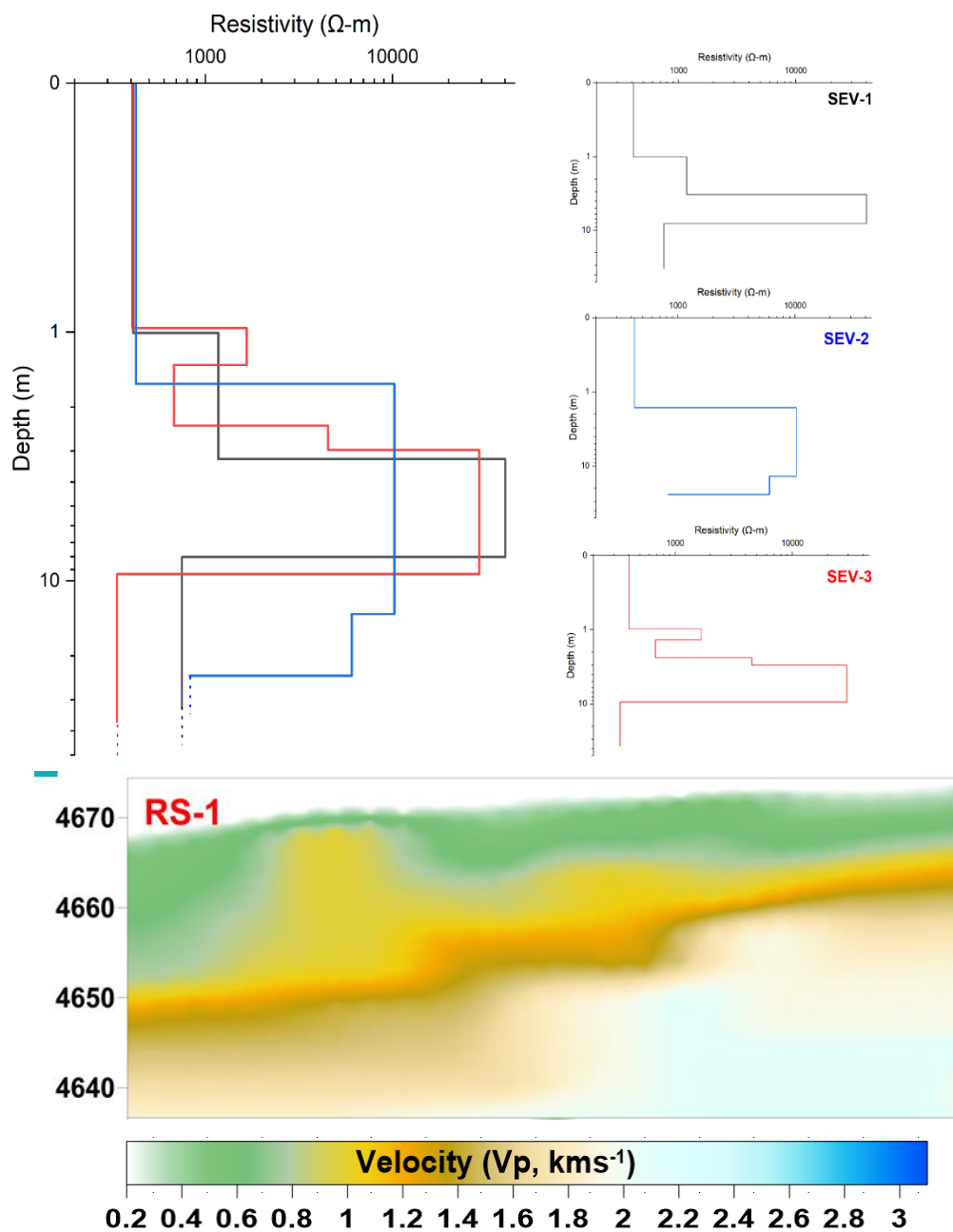


Figura 26. Sondaje vertical eléctrico y refracción sísmica sobre el GR San Félix.

Los resultados de RS y SEV, muestran distribuciones de bajas velocidades de ondas sísmicas y coinciden con valores de bajas resistividades del suelo, por lo que la primera capa del glaciar rocoso se interpretó como una capa del suelo compuesta por rocas no consolidadas, aire y suelo no congelado, a saber, a profundidades menores a 2 m se

presentó V_p menores a 570 m/s que coinciden con resistividades del suelo muy bajas ($<425 \Omega\text{m}$) en los primeros m, bajo la primera zona se presenta una transición de valores de V_p y resistividades del suelo superiores, que sugieren el paso de una capa seca del GR a otra capa húmeda con fragmentos de roca, libre de hielo asociada a la capa activa ($V_p < 770 \text{ ms}^{-1}$ y resistividades $< \sim 1000 \Omega\text{m}$). Bajo la capa activa, se presenta una capa que llega hasta los 2130 m/s y resistividades del suelo que alcanzan valores entre 10000 - 45000 Ωm , estas velocidades de ondas y resistividades del suelo han sido caracterizadas en otros estudios (Dou y Ajo-Franklin 2014; Francou et al. 1999; Halla et al. 2021; Hauck, Bach y Hilbich 2008; Milana y Güell 2008; Rangecroft, Harrison y Anderson 2015; Schneider et al. 2013) como zonas de permafrost con un alto contenido de hielo (para los máximos valores registrados) y un bajo contenido de hielo (para los mínimos valores registrados).

VII. Ortomosaico a partir de vuelo drone



Imagen 4. Ortomosaico y mapa de sombras obtenido de vuelo drone en el glaciar de roca San Félix.

VIII. Catálogo de imágenes satelitales

#	SATÉLITE	VER	CÓDIGO	AÑO	FECHA	NIVEL DEL PRODUCTO	MODO DE HAZ	POLARIZACIÓN	FRECUENCIA (BANDA)	ÓRBITA
1	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170614T104529_20170614T104556_006045_00A9D7_4169	2017	14/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
2	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170614T104554_20170614T104621_006045_00A9D7_661C	2017	14/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
3	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170614T104618_20170614T104645_006045_00A9D7_3F79	2017	14/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
4	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170619T105337_20170619T105405_006118_00ABF8_8E48	2017	19/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
5	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170621T103856_20170621T103934_006147_00ACCD_C2ED	2017	21/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
6	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170623T102312_20170623T102343_006176_00AD9D_EB41	2017	23/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
7	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20170628T103108_20170628T103133_006249_00AFC6_7808	2017	28/06/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
8	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171107T103113_20171107T103138_008174_00E72B_5C57	2017	7/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
9	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171114T102227_20171114T102254_008276_00EA3C_5764	2017	14/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
10	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171119T103048_20171119T103115_008349_00EC78_8351	2017	19/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
11	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171121T101433_20171121T101500_008378_00ED57_838C	2017	21/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
12	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171121T101458_20171121T101525_008378_00ED57_4AFF	2017	21/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
14	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171126T102252_20171126T102319_008451_00EF95_E653	2017	26/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
15	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171126T102316_20171126T102348_008451_00EF95_2291	2017	26/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
17	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171128T100652_20171128T100719_008480_00F085_693E	2017	28/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
18	SENTINEL	1B	S1B_IW_SLC__1SDV_20171128T100717_20171128T100744_008480_00F085_2CFC	2017	28/11/2017	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
N	SATELITE	VER	CODIGO	ANIO	FECHA	NIVEL DEL PRODUCTO	MODO DE HAZ	POLARIZACION	FRECUENCIA	ORBITA
1	SENTINEL	1A	S1A_IW_SLC__1SDV_20181117T100816_20181117T100844_024626_02B485_D927	2018	17/11/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
2	SENTINEL	2a	S1A_IW_SLC__1SDV_20181124T100000_20181124T100028_024728_02B850_26C3	2018	24/11/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
3	SENTINEL	3a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180516T104533_20180516T104600_010945_014093_D77B	2018	16/05/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
4	SENTINEL	4a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180516T104558_20180516T104625_010945_014093_17E7	2018	16/05/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
5	SENTINEL	5a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180516T104623_20180516T104650_010945_014093_AE73	2018	16/05/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
6	SENTINEL	6a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180616T103812_20180616T103840_011397_014EE8_7A35	2018	16/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
7	SENTINEL	7a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180616T103838_20180616T103905_011397_014EE8_86B8	2018	16/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
8	SENTINEL	8a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180616T103903_20180616T103940_011397_014EE8_678C	2018	16/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
9	SENTINEL	9a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180623T103024_20180623T103052_011499_015219_C787	2018	23/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
10	SENTINEL	10a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180623T103050_20180623T103117_011499_015219_1E5B	2018	23/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
11	SENTINEL	11a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180623T103115_20180623T103140_011499_015219_7323	2018	23/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
12	SENTINEL	12a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180626T105344_20180626T105412_011543_015373_7E5D	2018	26/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
13	SENTINEL	13a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180630T102254_20180630T102321_011601_01553A_3B3B	2018	30/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
14	SENTINEL	14a	S1B_IW_SLC__1SDV_20180630T102319_20180630T102351_011601_01553A_5554	2018	30/06/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
15	SENTINEL	15a	S1B_IW_SLC__1SDV_20181111T100659_20181111T100726_013555_01916F_AE62	2018	11/11/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
16	SENTINEL	16a	S1B_IW_SLC__1SDV_20181121T102234_20181121T102301_013701_019608_B032	2018	12/11/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
17	SENTINEL	17a	S1B_IW_SLC__1SDV_20181123T100634_20181123T100701_013730_0196F6_D891	2018	23/11/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente
18	SENTINEL	18a	S1B_IW_SLC__1SDV_20181123T100724_20181123T100751_013730_0196F6_084D	2018	23/11/2018	SLC	IW	W+VH	C	Descendente



Imagen 5. Catálogo de imagen radar.

N	SATELITE	SENSOR	CODIGO	ANIO	FECHA	R_ESPACIAL	TIPO_FR ECUENCI A	TIPO	NIVEL DE PRODUCTO
1	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_002072_20171201_20171207_01_T1	2017	1/12/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
2	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_003071_20171122_20171206_01_T1	2017	22/11/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
3	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_003072_20171122_20171206_01_T1	2017	22/11/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
4	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_005071_20171120_20171206_01_T1	2017	20/11/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
5	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_005070_20171120_20171206_01_T1	2017	20/11/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
6	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_003071_20171106_20171121_01_T1	2017	6/11/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
7	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_002071_20171030_20171109_01_T1	2017	30/10/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
8	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_004071_20171028_20171108_01_T1	2017	28/10/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
9	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_003070_20171005_20171014_01_T1	2017	5/10/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
10	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_004070_20170910_20170927_01_T1	2017	10/09/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
11	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_007067_20170713_20170726_01_T1	2017	13/07/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
12	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_007068_20170713_20170726_01_T1	2017	13/07/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
13	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_006069_20170706_20170716_01_T1	2017	6/07/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
14	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_006070_20170604_20170616_01_T1	2017	4/06/2017	30 m MS/15 m P	MS/P	OPTICA (+ PANC)	NIVEL 1L
N	SATELITE	SENSOR	CODIGO	AÑO	FECHA	RESOLUCION ESPACIAL	TIPO	NIVEL PRODUCTO	
1	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_003072_20181211_20181226_01_T1	2018	11/12/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
2	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_005071_20181209_20181226_01_T1	2018	9/12/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
3	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_002071_20181204_20181211_01_T1	2018	4/12/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
4	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_005070_20181123_20181129_01_T1	2018	23/11/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
5	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_002072_20181118_20181129_01_T1	2018	18/11/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
6	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_003072_20181109_20181127_01_T1	2018	9/11/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
7	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_004071_20180929_20181009_01_T1	2018	29/09/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
8	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_004070_20180929_20181009_01_T1	2018	29/09/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
9	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_008067_20180707_20180717_01_T1	2018	7/07/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
10	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_008066_20180707_20180717_01_T1	2018	7/07/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
11	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_007067_20180630_20180716_01_T1	2018	30/06/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
12	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_007068_20180630_20180716_01_T1	2018	30/06/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
13	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_006069_20180607_20180615_01_T1	2018	7/06/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	
14	Space Launch Complex-3	LANDSAT	LC08_L1TP_006070_20180522_20180605_01_T1	2018	22/05/2018	30 m(MS)/15m (P)	OPTICA+PANCROMATICA	L1	

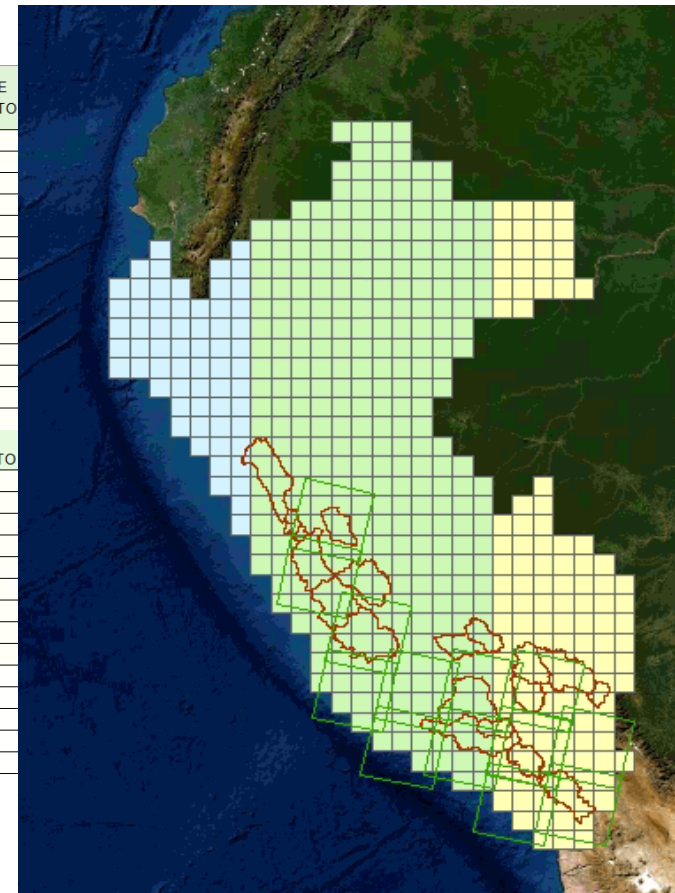


Imagen 6. Catálogo de imagen óptica.

IX. Manual metodológico para inventariar glaciares de rocas

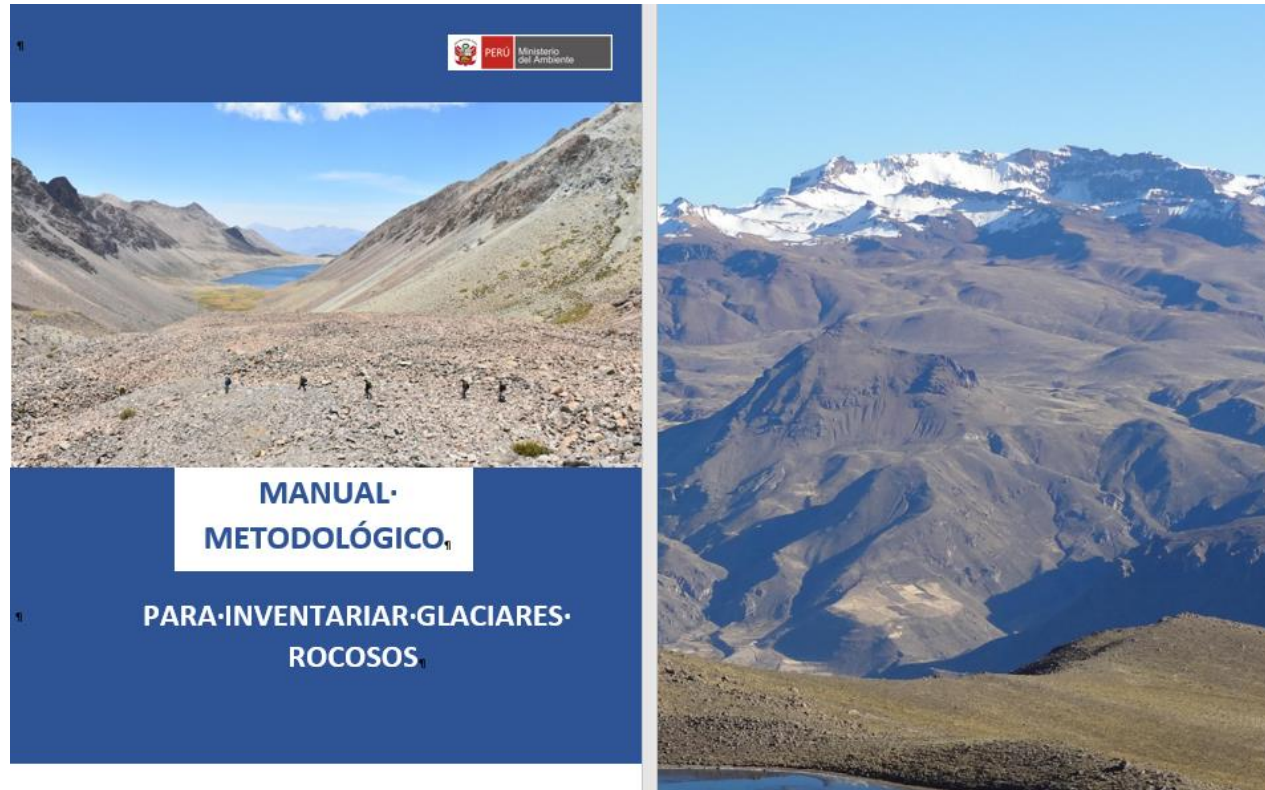


Imagen 7. Manual metodológico para inventariar glaciares rocas.

Uno de los productos de esta investigación y que no se ha indicado es que se elaboró un manual metodológico para inventariar glaciares rocosos o de rocas en los Andes Tropicales Peruanos, el mismo que está en una etapa de revisión por parte de especialistas del INAIGEM y pasará a revisión de especialistas del International Permafrost Association (IPA).

X. Paper y abstract publicados derivados de la tesis

The screenshot displays the ASCE Library website interface. At the top, there is a navigation bar with the ASCE LIBRARY logo and search, cart, login/register, and find my institution options. Below this is a secondary navigation bar with categories: JOURNALS, BOOKS, MAGAZINES, AUTHOR SERVICES, and USER SERVICES. A red banner indicates the current conference: Permafrost 2021, with links for Previous paper and Next paper. The main content area features three abstracts, each with a lettered label (a, b, c) in a box on the left. Abstract 'a' is titled 'An Estimation of Past and Present Air Temperature Conditions, Water Equivalent, and Surface Velocity of Rock Glaciers in Cordillera Volcanica, Peru' by Edwin Badillo-Rivera, Edwin Loarte, Katy Medina, and Xavier Bodin. It includes a download count of 6 times and a Creative Commons Attribution 4.0 license. Abstract 'b' is titled 'Analysis of the spatial distribution and characteristics of the rock glaciers in the Ampato, Vilcanota and La Viuda Cordilleras southern and central Peru' by Katy Medina, Edwin Loarte, Edwin Badillo-Rivera, Hairo León, Xavier Bodin, and Christian Huggel. It references 'Geophysical Research Abstracts Vol. 21, EGU2019-PREVIEW, 2019' and has a Creative Commons Attribution 4.0 license. Abstract 'c' is titled 'Thermal and morphological characteristics and spatial distribution of rock glaciers in the Cordillera Chila, southern Peru' by Edwin Loarte, Katy Medina, Luzmila Dávila, Christian Huggel, Wilfried Haerberli, Holger Frey, and Randy Muñoz. It references '(1) National Glacier and Mountain Ecosystem Research Institute (INAIGEM), Huaraz, Peru' and '(2) Department of Geography, University of Zurich, Switzerland'. The EGU logo is visible in the bottom right of the abstracts section.

a Regional Conference on Permafrost 2021 and the 19th International Conference on Cold Regions Engineering Downloaded 6 times

An Estimation of Past and Present Air Temperature Conditions, Water Equivalent, and Surface Velocity of Rock Glaciers in Cordillera Volcanica, Peru

Edwin Badillo-Rivera; Edwin Loarte; Katy Medina; Xavier Bodin Show all authors

Authors

Edwin Badillo-Rivera
National Institute for Research on Glaciers and Mountain Ecosystems - INAIGEM, Huaraz; Faculty of Environmental Engineering and Natural Resources, National Univ. of Callao, Bellavista-Callao, Peru. E-mail: enbadillor@unac.edu.pe

EGU General Assembly 2021

EGU21-8466
EGU General Assembly 2021
© Author(s) 2021. This work is distributed under the Creative Commons Attribution 4.0 License.

b **Analysis of the spatial distribution and characteristics of the rock glaciers in the Ampato, Vilcanota and La Viuda Cordilleras southern and central Peru**

Katy Medina^{1,3}, Edwin Loarte^{1,3}, Edwin Badillo-Rivera², Hairo León^{1,3}, Xavier Bodin⁴, and Christian Huggel⁵

¹National Institute for Research on Glaciers and Mountain Ecosystems (INAIGEM), Huaraz, Peru (kmedina@inaigem.gob.pe)
²Faculty of Environmental Engineering and Natural Resources, National University of Callao, Callao-Peru
³Faculty of Environmental Science, Santiago Antúnez de Mayolo National University (UNASAM), Huaraz-Peru
⁴Laboratoire EDYTEM, Université de Savoie Mont Blanc, CNRS, Le Bourget-du-Lac, France
⁵University of Zurich, Department of Geography, Zurich-Switzerland.

Geophysical Research Abstracts
Vol. 21, EGU2019-PREVIEW, 2019
EGU General Assembly 2019
© Author(s) 2019. CC Attribution 4.0 license.

c **Thermal and morphological characteristics and spatial distribution of rock glaciers in the Cordillera Chila, southern Peru**

Edwin Loarte (1), Katy Medina (1), Luzmila Dávila (1), Christian Huggel (2), Wilfried Haerberli (2), Holger Frey (2), and Randy Muñoz (2)

(1) National Glacier and Mountain Ecosystem Research Institute (INAIGEM), Huaraz, Peru (eloarte@inaigem.gob.pe), (2) Department of Geography, University of Zurich, Switzerland

Imagen 8. Papers y abstract publicados. “a”, paper publicado (<https://ascelibrary.org/doi/10.1061/9780784483589.010>) en la conferencia regional del

permafrost 2020, publicado en julio de 2021, “b” y “c” abstracts publicados y aceptados en la European Geoscience Union.

Lista de abreviatura

CAT	:	Cordillera de los Andes Tropicales
Cosi-corr	:	Registro de Imágenes y Correlación de Detección Óptica
dGR	:	Dinámica del glaciar de roca
DInSAR	:	Interferometría diferencial
ESA	:	Agencia Espacial Europea
GR	:	Glaciar de roca o rocoso
IPA	:	International Permafrost Association
m s.n.m	:	Metros sobre el nivel del mar
PISR	:	Potencial de incidencia de radiación solar
RS	:	Refracción sísmica
SEV	:	Sondaje vertical eléctrico
SNR	:	Signal to noise ratio (relación señal ruido)
TMAA	:	Temperatura media anual del aire o MAAT (siglas en inglés)
~	:	Aproximadamente
°C	:	Grados Celsius
TIG	:	Tecnologías de Información Geográfica
SIG	:	Sistema de Información Geográfica
PR	:	Percepción Remota o teledetección
SPG	:	Sistema de Posicionamiento Global
VV	:	Polarización vertical vertical