

PONTIFICIA UNIVERSIDAD
CATÓLICA DEL PERÚ

Facultad de Letras y Ciencias Humanas



Impactos de la minería en el retroceso glaciar en La Rinconada,
Cordillera Apolobamba, sur del Perú

Tesis para obtener el título profesional de Licenciado en Geografía y
Medio Ambiente que presenta:

Joseph Mijail Lopez Tineo

Asesor:

Dr. Fabian Drenkhan

Lima, 2023



PUCP

Facultad de Letras
y Ciencias Humanas

Informe de Similitud

Yo, Fabian Drenkhan, docente de la Facultad de Letras y Ciencias Humanas de la Pontificia Universidad Católica del Perú, asesor(a) de la tesis/el trabajo de investigación titulado:

Impactos de la minería en el retroceso glaciario en La Rinconada, Cordillera Apolobamba, sur del Perú,

del autor Joseph Mijail Lopez Tineo, dejo constancia de lo siguiente:

- El mencionado documento tiene un índice de puntuación de similitud de 27%. Así lo consigna el reporte de similitud emitido por el software *Turnitin* el 27/11/2023.
- He revisado con detalle dicho reporte y la Tesis o Trabajo de Suficiencia Profesional, y no se advierte indicios de plagio.
- Las citas a otros autores y sus respectivas referencias cumplen con las pautas académicas.

Lugar y fecha: Lima, 27.11.2023

Apellidos y nombres del asesor: <u>Drenkhan, Fabian</u>	
DNI: 000746404	Firma 
ORCID: 0000-0002-9443-9596	

AGRADECIMIENTOS

Agradezco profundamente a mi familia, por su apoyo incondicional durante mi etapa universitaria y realización de esta tesis. A mis padres, Elmer y Patricia, por su esfuerzo y comprensión durante esta etapa de mi vida, y a mis hermanos, Gianmarco y Erik, por su aliento constante para ser un buen profesional.

A mi asesor, el Dr. Fabian Drenkhan, por su orientación y paciencia durante este proceso. Esta investigación no hubiera sido posible sin su apoyo constante y su tiempo dedicado para las asesorías y correcciones.

A los profesores y profesoras de la especialidad de Geografía y Medio Ambiente, por su dedicación y sabiduría para la formación de nuevos geógrafos. Agradezco especialmente al Dr. Fernando González, por sus comentarios al manuscrito de esta investigación, y cuya cercanía me permitió adquirir un mayor conocimiento.

Por último, quiero agradecer a los grandes amigos que conocí en la especialidad, en especial a Carolina, Claudia, Kory y Marco. Su apoyo y amistad durante mi formación universitaria fueron fundamentales para culminar este proceso tan importante.

RESUMEN

A pesar del creciente número de estudios sobre el efecto del cambio climático en los glaciares peruanos y su impacto en la seguridad hídrica, existe una brecha de conocimiento sobre cómo la minería afecta a los glaciares. Esta problemática adquiere mayor relevancia considerando que el Perú es un país minero, donde los principales proyectos actuales y numerosas concesiones se ubican en la zona altoandina. Con esta tesis se presenta una aproximación a los impactos de la minería en los glaciares Rinconada y Ananea, cercanos al centro poblado La Rinconada en la Cordillera Apolobamba, Puno.

Se realizó un análisis anual de cobertura glaciar de 1985 a 2022 mediante el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve. Para el mismo periodo, se aplicó un análisis multitemporal cada 5 años de la cobertura no-natural usando el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest. Ambos análisis fueron computados en la plataforma Google Earth Engine con imágenes satelitales de mediana resolución espacial (Landsat 5 y 8, Sentinel 2) con corrección atmosférica.

Los resultados indican que la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba se redujo alrededor del 43 % entre 1985 (161.4 km²) y 2022 (92.1 km²). Asimismo, el área urbana aumentó en un 1 176 % entre 1990 (17 ha) y 2022 (200 ha), mientras que el área degradada incrementó en un 289 % entre 2010 (1 774 ha) y 2022 (3 389 ha). Los cambios de la cobertura glaciar y no-glaciar fueron analizados mediante el coeficiente de correlación de Pearson con tres indicadores socioeconómicos claves ligados a la actividad minera incluyendo datos de población, producción y precio del oro en la región. Este análisis permitió establecer un alto grado de asociación positiva entre el crecimiento de la actividad minera y la reducción de la cobertura glaciar. Este caso y el potencial de impactos mineros en la evolución glaciar actual y futura resaltan la urgencia de desarrollar y fortalecer una agenda ambiental para la protección de glaciares y cabeceras de cuenca en el Perú considerando lecciones aprendidas en la región, en particular en Argentina.

ABSTRACT

Despite an increasing number of studies on the effect of climate change on Peruvian glaciers and its impact on water security, there is a knowledge gap on how mining affects these glaciers. This issue becomes even more relevant considering that Peru is a mining country, where the main current projects and numerous concessions are located in the high-Andean region. This thesis presents an approach to the impacts of mining on the Rinconada and Ananea glaciers, close to the town of La Rinconada in the Apolobamba mountain range, Puno.

An annual analysis of glacier coverage from 1985 to 2022 was conducted using the Normalized Difference Snow Index. For the same period, a 5-year multitemporal analysis of non-natural coverage was applied using the Random Forest machine learning algorithm. Both analyses were computed in the Google Earth Engine platform with medium spatial resolution satellite images (Landsat 5 and 8, Sentinel 2) with atmospheric correction.

The results indicate that the glacier coverage of the Apolobamba mountain range decreased by about 43 % between 1985 (161.4 km²) and 2022 (92.1 km²). Likewise, the urban area increased by 1 176 % between 1990 (17 ha) and 2022 (200 ha), while the degraded area increased by 289 % between 2010 (1 774 ha) and 2022 (3 389 ha). Changes in glacier and non-glacier coverage were analyzed using the Pearson correlation coefficient with three key socioeconomic indicators linked to mining activity, including population, production, and gold price data in the region. This analysis established a high degree of positive association between the growth of mining activity and the reduction of glacier coverage. This case and the potential impacts of mining on current and future glacier evolution highlight the urgency of developing and strengthening an environmental agenda for the protection of glaciers and headwaters in Peru considering lessons learned in the region, particularly in Argentina.

ÍNDICE DE CONTENIDO

AGRADECIMIENTOS	ii
RESUMEN	iii
ABSTRACT	iv
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE FIGURAS	viii
ÍNDICE DE MAPAS	ix
SIGLAS Y ACRÓNIMOS	x
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1: PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN	4
1.1. Problemática	4
1.2. Justificación.....	6
1.3. Preguntas de investigación.....	7
1.4. Hipótesis.....	8
1.5. Objetivos.....	8
CAPÍTULO 2: ÁREA DE ESTUDIO	10
2.1. Ubicación.....	10
2.2. Características físicas	11
2.3. Características socioeconómicas	13
CAPÍTULO 3: MARCO CONCEPTUAL	17
3.1. Fundamentos sobre glaciares tropicales	17
3.2. La minería en el Perú	19
3.3. Plataforma Google Earth Engine	23
CAPÍTULO 4: ESTADO DEL ARTE	26
4.1. Los glaciares en la Cordillera Apolobamba.....	26
4.1.1. Líneas de investigación	27
4.1.2. Evolución de la cobertura glaciár.....	29
4.2. Impactos de la minería en zonas glaciares	30
4.3. Políticas de conservación y protección glaciár.....	33
4.3.1. Avances en la protección de glaciares en Argentina y Chile	33
4.3.2. El estado legal de la conservación de glaciares en el Perú	36
4.4. Análisis del cambio de cobertura de suelo con Google Earth Engine	40
CAPÍTULO 5: METODOLOGÍA	44
5.1. Recopilación de datos	46

5.1.1. Información espacial.....	46
5.1.2. Indicadores socioeconómicos indirectos.....	48
5.2. Procesamiento de datos.....	50
5.2.1. Cambio anual de la cobertura glaciar.....	50
5.2.2. Cambio multitemporal de la cobertura no-natural	54
5.3. Obtención de parámetros.....	64
5.4. Evaluación de implicancias.....	65
CAPÍTULO 6: RESULTADOS.....	67
6.1. Cambio anual de la cobertura glaciar (1985 – 2022).....	67
6.1.1. Cambios en la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba.....	67
6.1.2. Cambios en la cobertura glaciar (Glaciares Rinconada, Ananea y Caballune)	69
6.2. Cambio multitemporal de la cobertura no-natural (1985 – 2022).....	72
6.2.1. Cambios de la cobertura urbana y área degradada	73
6.2.2. Cambios altitudinales de la cobertura urbana y área degradada.....	74
6.2.3. Importancia de variables de clasificación	75
6.2.4. Evaluación de la exactitud de la clasificación	77
6.3. Correlaciones entre cambios de cobertura de suelo y actividad minera.....	79
CAPÍTULO 7: DISCUSIÓN	82
7.1. Evolución anual de la cobertura glaciar.....	82
7.2. Evolución multitemporal de la cobertura no-natural	87
7.3. Alcance de esta investigación.....	92
7.4. Perspectivas sobre la conservación y protección de glaciares peruanos.....	94
CAPÍTULO 8: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	97
8.1. Conclusiones	97
8.2. Recomendaciones.....	99
BIBLIOGRAFÍA	xi
ANEXOS	xxxiii

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 2.1 Población estimada en el centro poblado La Rinconada, Puno (2006 – 2019)	14
Tabla 2.2 Población del distrito de Ananea (1981-2017)	14
Tabla 4.1 Superficie glaciaria en la Cordillera Apolobamba	29
Tabla 4.2 Iniciativas legales para la conservación y protección de glaciares y ecosistemas de montaña en el Perú	39
Tabla 5.1 Características de las imágenes Landsat 5 TM, 8 OLI (Colección 2) y Sentinel-2	46
Tabla 5.2 Bandas usadas en el NDSI de acuerdo a los satélites	51
Tabla 5.3 Variables predictoras para la clasificación de cobertura no-natural ..	56
Tabla 5.4 Tamaño de muestras por clase	58
Tabla 5.5 Número de árboles de decisión (<i>ntree</i>) utilizados en los modelos (1985 – 2022)	59
Tabla 6.1 Cambios anuales en la cobertura glaciaria de la Cordillera Apolobamba (1985 – 2022)	68
Tabla 6.2 Cambios anuales en los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune ...	70
Tabla 6.3 Cambio altitudinal del terminus glaciario en los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune	72
Tabla 6.4 Año de retroceso de los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune ...	72
Tabla 6.5 Cambios en la cobertura no-natural cerca de la Rinconada	74
Tabla 6.6 Cambios altitudinales de la cobertura no-natural cerca de la Rinconada	75
Tabla 6.7 Evaluación de exactitud de la clasificación	77
Tabla 6.8 Correlaciones de la variable área glaciaria	79
Tabla 6.9 Correlaciones de la variable área Urbana	80
Tabla 6.10 Correlaciones de la variable área degradada	80
Tabla 7.1 Comparación de la extensión de los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune con el inventario nacional, año base 2016	84

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 Climograma de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación en la estación climatológica de Ananea.....	13
Figura 3.1 Producción de oro en el Perú (1984 – 2022).....	21
Figura 3.2 Producción de plata en el Perú (1984 – 2022).....	21
Figura 5.1 Diagrama de flujo de la investigación.....	45
Figura 5.2 Diagrama de flujo para el cálculo de NDSI en GEE.....	53
Figura 5.3 Matriz de confusión	61
Figura 5.4 Diagrama de flujo para el cálculo de la cobertura de suelo.....	63
Figura 6.1 Evolución de la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba.....	69
Figura 6.2 Evolución de la cobertura glaciar (glaciares Rinconda, Ananea y Caballune).....	71
Figura 6.3 Importancia de variables de los modelos 1985 y 1990.....	76
Figura 7.1 Glaciares cubiertos mapeados por el INAIGEM	84
Figura 7.2 Episodios cálidos y fríos basados en el umbral de +/- 0.5 °C, Índice del Niño Oceánico, Niño 3.4.....	86
Figura 7.3 Precio mensual del oro 2000 – 2023.....	88
Figura 7.4 Evolución del área degradada 2004 – 2010.....	90

ÍNDICE DE MAPAS

Mapa 2.1 Mapa de ubicación del área de estudio.....	11
Mapa 3.1 Distribución de los glaciares tropicales.....	18
Mapa 3.2 Elementos antrópicos colindantes a los glaciares Rinconada y Ananea	23
Mapa 5.1 Concesiones mineras en el área de estudio	50
Mapa 7.1 Evolución de la cobertura de suelo en La Rinconada (1990 – 2022)....	89
Mapa 7.2 Evolución de la cobertura de los glaciares Rinconada y Ananea 1985 – 2022	92



SIGLAS Y ACRÓNIMOS

ANA	Autoridad Nacional del Agua
BCRP	Banco Central de Reserva del Perú
DEM	Modelo Digital de Elevación
EIA	Estudio de Impacto Ambiental
ENOS	El Niño-Oscilación del Sur
ESA	Agencia Espacial Europea
GEE	Google Earth Engine
GLOF	Inundación por desembalse de laguna glaciár
INAIGEM	Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Alta Montaña
INEI	Instituto Nacional de Estadística e Informática
INGEMMET	Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico
INRENA	Instituto Nacional de los Recursos Naturales Renovables y del Ambiente
IPCC	Panel Intergubernamental del Cambio Climático
MINAGRI	Ministerio de Agricultura y Riego
MINEM	Ministerio de Energía y Minas
NDC	Contribuciones Nacionalmente Determinadas
NDSI	Índice de Nieve de Diferencia Normalizada
NDWI	Índice de Nieve de Diferencia Normalizada
NIR	Infrarrojo cercano
ODP	Oscilación Decadal del Pacífico
OLI	Operational Land Imager
PBI	Producto Bruto Interno
PNGYEM	Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña
RF	Random Forest
SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú
SR	Reflectancia Superficial
SRTM	Shuttle Radar Topography Mission
SWIR	Infrarrojo de Onda Corta
TM	Thematic Mapper
TOA	Top of Atmosphere
URGH	Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos
USGS	Servicio Geológico de Estados Unidos

INTRODUCCIÓN

Durante las últimas dos décadas, el Perú ha experimentado ciclos de bonanza económica, en gran parte ligado al sector extractivo, en particular el minero. En la década de los noventa, el sector minero mundial tuvo una de sus mayores expansiones, posibilitada por el aumento de precios de los minerales debido al incremento de su demanda (León & Barrantes, 2021). En el Perú, esta bonanza minera se fortaleció con las reformas neoliberales implementadas en la década de los noventa (Glave & Kuramoto, 2007). El crecimiento en el sector minero posibilitó el desarrollo económico del Perú, convirtiendo al país en uno de los principales exportadores de minerales en el mundo y también estableciendo al sector minero como uno de los principales aportantes al Producto Bruto Interno (PBI), 12.9 % del PBI nacional (Ccama et al., 2019).

El boom minero que se experimentó también impulsó el crecimiento de las zonas dedicadas a la minería a pequeña escala, minería informal y minería ilegal. Estos dos últimos representaron un desafío debido a sus impactos sobre los ecosistemas y la salud humana (De Echave, 2016). Una de las áreas donde se ha observado un crecimiento significativo de la minería informal es en la región de Puno. Esta expansión se ha dado tanto en la explotación de depósitos en llanuras aluviales como en yacimientos filonianos o de vetas diseminadas (De Echave, 2016). El caso de Puno es particularmente notable, ya que en esta región se encuentra el centro poblado minero La Rinconada, que es el área de estudio de esta investigación, y que está situado en las proximidades de los glaciares Rinconada y Ananea (ver Mapa 2.1).

La literatura científica en relación a los glaciares ha enfocado su atención en temas vinculados al impacto del cambio climático. Esto se debe a la relevancia que los glaciares poseen para la seguridad hídrica (Drenkhan, 2016; Seehaus et al., 2019). Y también debido a los peligros que representa el retroceso glaciar,

como la posibilidad de ocurrencia de eventos provocados por el desprendimiento de hielo o el desbordamiento de lagunas glaciares (Portocarrero, 2011; Yap, 2015).

En la región andina, la literatura científica sobre el impacto de la minería en los glaciares es escasa, siendo Argentina y Chile los casos donde se ha recibido mayor atención. Brenning & Azócar (2010) fueron los pioneros en estudiar este tema, debido al impacto que tendría el proyecto minero binacional Pascua-Lama sobre los glaciares. Sus primeros resultados mostraron que las actividades mineras podrían llevar a desestabilizar los glaciares, producto de los efectos geotérmicos y geoquímicos de estas actividades.

Los estudios en La Rinconada se han centrado en los problemas de contaminación (Loaiza & Galloso, 2008; Loza Del Carpio & Ccancapa, 2020; Matamet & Bonotto, 2019; Salas-Mercado et al., 2023) y en la salud de las personas (Goyzueta & Trigos, 2009; Trigos, 2008). Sin embargo, en La Rinconada y el Perú no se ha documentado el impacto de la actividad minera sobre los glaciares, lo cual representa un vacío de conocimiento. Por esta razón, esta investigación busca realizar una aproximación a los impactos mineros en el retroceso glaciar en la zona colindante a La Rinconada.

La presente investigación tiene como finalidad aportar información para comprender los impactos de la minería en zonas glaciares. La metodología empleada prescinde de verificación en campo. No obstante, se propone esta metodología para aquellos investigadores que, debido a restricciones de recursos, peligros, ubicación remota, entre otros factores, no tengan la posibilidad de realizar un análisis *in situ*. Por ello, la totalidad de los datos utilizados en esta investigación son de libre acceso.

Para este fin, esta investigación realiza un análisis del cambio anual (1985 – 2022) de la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba mediante el Índice Normalizado de Diferencia de Nieve (NDSI, por sus siglas en inglés). Asimismo,

analiza tres unidades glaciares, Rinconada, Ananea y Caballune. Las dos primeras con influencia directa (cercanía) de la actividad minera en La Rinconada, y la tercera sin influencia minera directa. En esta investigación, los impactos directos de la minería sobre los glaciares corresponden a los impactos ocasionados por los procesos de extracción (a cielo abierto y subterránea), transporte y procesamiento del mineral.

Además del NDSI, se realiza una clasificación multitemporal (cada 5 años) de la cobertura no-natural, con el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest (RF). Con este proceso se busca identificar la evolución de la cobertura no-natural ligado a la minería (área urbana y área degradada). Ambos componentes se computan en la plataforma en la nube Google Earth Engine con imágenes satelitales Landsat 5 y 8 Surface Reflectance (SR) y Sentinel-2 SR.

Conocer con exactitud si la actividad minera ocasiona la aceleración del retroceso glaciar es desafiante, ya que requiere de mediciones *in situ* por un tiempo prolongado para conocer qué proceso específico está afectando a los glaciares. En esta investigación, se ensayan correlaciones estadísticas entre variables socioeconómicas relacionadas a la minería (población, producción minera y precio del oro) y los resultados del cambio de cobertura glaciar y cambio de cobertura no-natural (área urbana y área degradada por minería) para estimar el impacto de la minería sobre los glaciares. Para lograr ello se utiliza el coeficiente de correlación de Pearson para estimar si existe una relación entre la minería (reflejado por los indicadores antes mencionados) y retroceso glaciar en la zona de La Rinconada. Finalmente, se aspira a que los resultados obtenidos puedan contribuir a informar acerca de la relevancia de una ley para la protección y conservación de zonas glaciares y periglaciares en Perú. Para ello, se examina el estado legal de los glaciares peruanos y se realiza una comparación con los avances en este ámbito en Argentina y Chile.

CAPÍTULO 1

PLANTEAMIENTO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Problemática

En el Perú, de un total de veinte cordilleras glaciadas, dos ya perdieron la cobertura en su totalidad (Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistemas de Montaña [INAIGEM], 2018). La Cordillera Apolobamba, ubicada en el límite de Perú y Bolivia, ha mantenido una tendencia de retroceso casi continuo (Veettil et al., 2017). En la década de 1920 los glaciares en la Cordillera Apolobamba llegaban a recubrir algunas galerías de las minas de Ananea (Bernex & Tejada, 2010; Oppenheim & Spann, 1946). Sin embargo, desde entonces existe una tendencia general de retroceso. Veettil et al. (2017) evidenciaron que los glaciares de esta Cordillera retrocedieron por encima de los 5 000 m s.n.m. entre 1975 y 2015.

A pesar de ser una cordillera extensa y que cubre dos países, la Cordillera Apolobamba es una de las cordilleras menos estudiada, debido principalmente a que es una zona de difícil acceso (Hoffmann & Weggenmann, 2013). La escasez de investigaciones resulta en un desconocimiento de los problemas ambientales locales, como el impacto de la minería en La Rinconada, centro minero ubicado a 5 200 m s.n.m. y, que, en 2017, albergaba a 8 924 habitantes (Instituto Nacional de Estadística e Informática [INEI], 2018).

El último informe del Panel Intergubernamental del Cambio Climático (IPCC, por sus siglas en inglés) señala que existe una tendencia de retroceso global de los glaciares a pesar de las variabilidades anuales y regionales. Asimismo, se evidenció que en la década 2010-2019, los glaciares perdieron más masa que en cualquier otra década, debido principalmente a cambios en las temperaturas y precipitaciones (IPCC, 2021a). Sin embargo, se tiene evidencia limitada sobre otros factores de presión, como el desarrollo de actividades humanas cerca o sobre los glaciares, que podrían influir en la velocidad de este retroceso.

Investigaciones como de Brenning & Azócar (2010), Evans et al. (2016), H. A. Fernández & Ferrando (2018), Jamieson et al. (2015) y Rey-Coquais (2021) realizadas en minas a tajo abierto en Argentina, Chile y Kirguistán, han demostrado que la minería genera alteraciones físicas y químicas sobre los glaciares que podrían acelerar su retroceso (para mayor detalle ver subsección 4.2). Sin embargo, la literatura sobre minería y retroceso glaciar es escasa, lo que conlleva a que se tenga evidencias limitadas sobre su relación y no se haya desarrollado metodologías normalizadas que permita su corroboración.

A pesar de ser un tema relevante para el contexto peruano, no existe ningún estudio publicado que aborde esta temática. Asimismo, mecanismos legales, como la Ley de Recursos Hídricos (2009), el Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera (2017), la Ley de Cambio Climático (2018), aún no se han implementado correctamente, posibilitando escenarios de expansión de la actividad minera hacia zonas glaciares. De acuerdo a De Echave (2016), en el Perú existen cuatro zonas principales donde prevalece la minería informal: Madre de Dios, Puno, La Libertad y provincias del sur medio (Ica, Ayacucho y Arequipa). No obstante, la minería informal se encuentra presente en 21 de las 25 regiones del país, lo cual evidencia la expansión de esta actividad.

El tema de la minería y los glaciares ha tenido mayor relevancia en Argentina y Chile, logrando la promulgación de leyes para su protección y conservación. Sin embargo, existe una distinción significativa, que es el tipo de minería desarrollada. En Argentina y Chile, la minería cercana a los glaciares es de tipo a tajo abierto, mientras que, en Perú, y específicamente en el caso de La Rinconada en la Cordillera Apolobamba, se trata de minería por socavón. Es importante destacar esto, ya que la minería a tajo abierto y los cambios en la cobertura son más fáciles de detectar mediante el uso de sensores remotos, dado que estos permiten observar la evolución de la actividad minera y asociarla a cambios en la superficie (Giraldo & Vasquez, 2019).

Por lo tanto, esta investigación tiene como objetivo proporcionar una aproximación a los impactos de la actividad minera en los glaciares en La Rinconada, y de esta manera evaluar si existen correlaciones entre la actividad minera y el retroceso glaciar en la zona adyacente al centro poblado minero La Rinconada.

1.2. Justificación

El tema de minería y retroceso glaciar es relevante debido a que es un tema escasamente estudiado, y del que se tiene evidencia limitada tanto a nivel nacional como internacional. Además, el desarrollo de la actividad minera en La Rinconada podría influir en la aceleración del retroceso glaciar. De manera que podría impactar en la disponibilidad hídrica, afectando el suministro poblacional, energético, alimentario y de los ecosistemas ubicados aguas abajo. Asimismo, es importante estudiar el tema de la minería en La Rinconada, por los impactos en la calidad del agua y la degradación ambiental. Por ejemplo, Loaliza & Galloso (2008), Loza Del Carpio & Ccancapa (2020) y Matamet & Bonotto (2019) demostraron que la laguna Rinconada y arroyos cercanos se encontraban contaminados con metales pesados, provenientes de la actividad minera.

Investigar este tema en la Cordillera Apolobamba es significativo, debido a que es una de las cordilleras glaciadas menos estudiadas, por lo que aportaría a la actualización de la información, en términos de cuantificación de cobertura glaciar. Y, sobre todo, en la comprensión de procesos e interacción entre glaciar e impactos de actividades humanas, como la minería. La escasa literatura sobre este tema genera que se tenga evidencia limitada para establecer una relación causal entre la minería y el retroceso glaciar, así como la ausencia de metodologías normalizadas que permita verificar dicha relación. Por esta razón, esta investigación contribuirá con una metodología que facilite una estimación de primer orden de los impactos de la actividad minera en ambiente glaciares.

Además, esta investigación tiene como objetivo aumentar la visibilidad del tema de la minería en zonas glaciares en Perú y otras regiones. De esta manera, los hallazgos resultantes de esta investigación podrían contribuir a la formulación de políticas más acertadas y funcionales para la protección y conservación de los glaciares en el Perú. Este último punto es fundamental, ya que se ha observado que los mineros de La Rinconada se han trasladado hacia el área de la Reserva Regional Ausangate, en la Cordillera Vilcanota, aunque esta zona ha experimentado un mayor control por parte del Estado (Talledo, 2015). La formulación e implementación correcta de mecanismos legales existentes podrían reducir la posibilidad de expansión de la actividad minera hacia otras cordilleras glaciadas, por medio de un mejor control y fiscalización.

Finalmente, el tema de la minería y los glaciares ha recibido mayor atención en Argentina y Chile, logrando la promulgación de una ley para la protección de los glaciares en Argentina, mientras que Chile se encuentra en proceso. Por ello, esta investigación examina los casos de Argentina y Chile con el objetivo de extraer información que pueda ser adaptada a una agenda política para la conservación y protección de los glaciares en Perú.

1.3. Preguntas de investigación

La presente investigación busca evaluar si se puede establecer una correlación entre minería y retroceso glaciar. Para ello se busca responder ¿Qué relación tiene la minería en el retroceso glaciar en la zona cercana a La Rinconada? Asimismo, buscar responder ¿Cuál es la situación legal respecto a la conservación y protección de los glaciares en Perú?

Para obtener una respuesta concluyente, se buscará responder a las siguientes preguntas específicas:

1. ¿Cómo ha evolucionado la superficie glaciar en el área de estudio de 1985 a 2022?

2. ¿Cómo ha evolucionado la cobertura no-natural en la zona colindante a La Rinconada entre 1985 y 2022?
3. ¿Existen diferencias en las tasas de retroceso entre los glaciares Rinconada y Ananea, colindantes al centro poblado La Rinconada con el glaciar Caballone el cual no está expuesto a actividad minera?
4. ¿Existe relación entre indicadores socioeconómicos y retroceso glaciar en La Rinconada?
5. ¿Qué indicadores socioeconómicos pueden usarse para relacionar los impactos de la minería en el retroceso glaciar de forma indirecta? Y
6. ¿Cuál es el estado legal de la conservación de glaciares en el Perú? y ¿Cómo los avances en Argentina y en Chile en esta materia pueden guiar el desarrollo y la implementación de medidas de protección de glaciares en el Perú?

1.4. Hipótesis

La minería por socavón desarrollada en las minas de La Rinconada ha impactado de manera negativa en los glaciares cercanos, incrementando su tasa de retroceso en comparación a glaciares de la región que no se encuentran directamente expuestos a dicha actividad. Asimismo, en materia legal, la protección de glaciares en el Perú no ha sido abordada a profundidad, por lo que los avances en legislación en esta materia no se han implementado de manera apropiada. Por esta razón, existen actividades de gran impacto, como la minería, cerca de zonas glaciares.

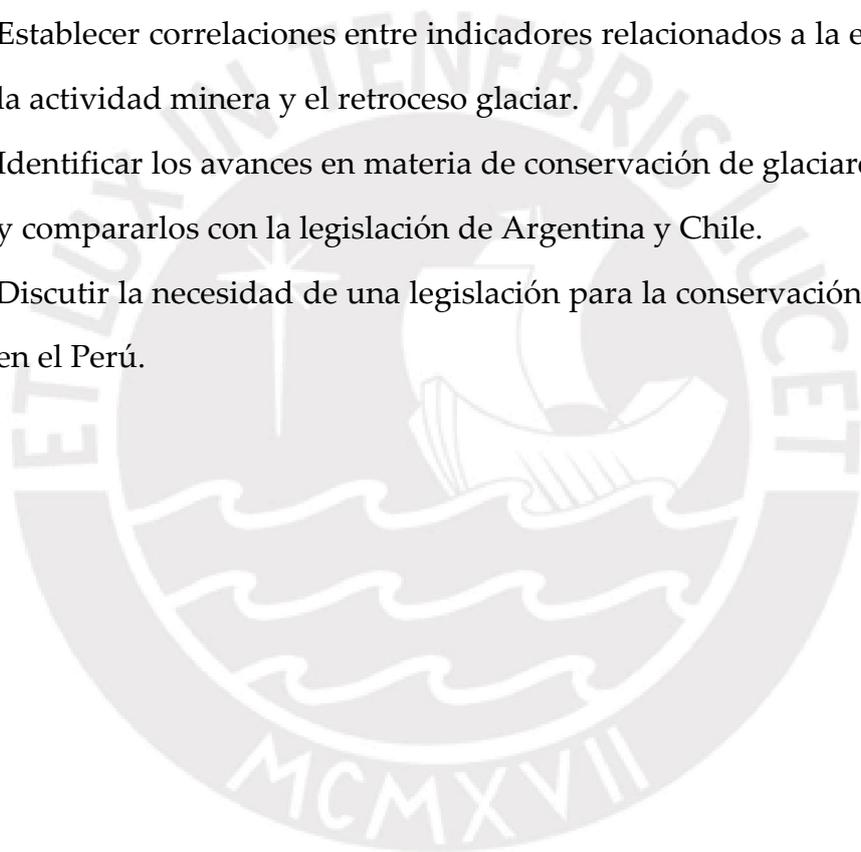
1.5. Objetivos

Objetivo general

Analizar la relación de la minería en el retroceso glaciar en la zona cercana a La Rinconada, Puno, para usar el estudio de caso como caso emblemático y en base a los resultados obtenidos, contribuir a la discusión de la necesidad de una legislación para la conservación y protección glaciares en el Perú.

Objetivos específicos

1. Estimar la variación de la superficie glaciar en el área de estudio entre 1985 y 2022.
2. Estimar los cambios en la cobertura no-natural en la zona colindante a La Rinconada entre 1985 y 2022.
3. Comparar las tasas de retroceso de los glaciares Rinconada y Ananea, colindantes al centro poblado minero La Rinconada con la tasa de retroceso del glaciar Caballune, el cual no se encuentra expuesto a minería.
4. Establecer correlaciones entre indicadores relacionados a la expansión de la actividad minera y el retroceso glaciar.
5. Identificar los avances en materia de conservación de glaciares en el Perú y compararlos con la legislación de Argentina y Chile.
6. Discutir la necesidad de una legislación para la conservación de glaciares en el Perú.



CAPÍTULO 2

ÁREA DE ESTUDIO

En este capítulo se presentan las principales características físicas y sociales del área de estudio, que ayudarán a comprender la problemática de la investigación. En la primera parte se presentará la ubicación geográfica del área de estudio, luego las características físicas y, finalmente, las características sociales.

2.1. Ubicación

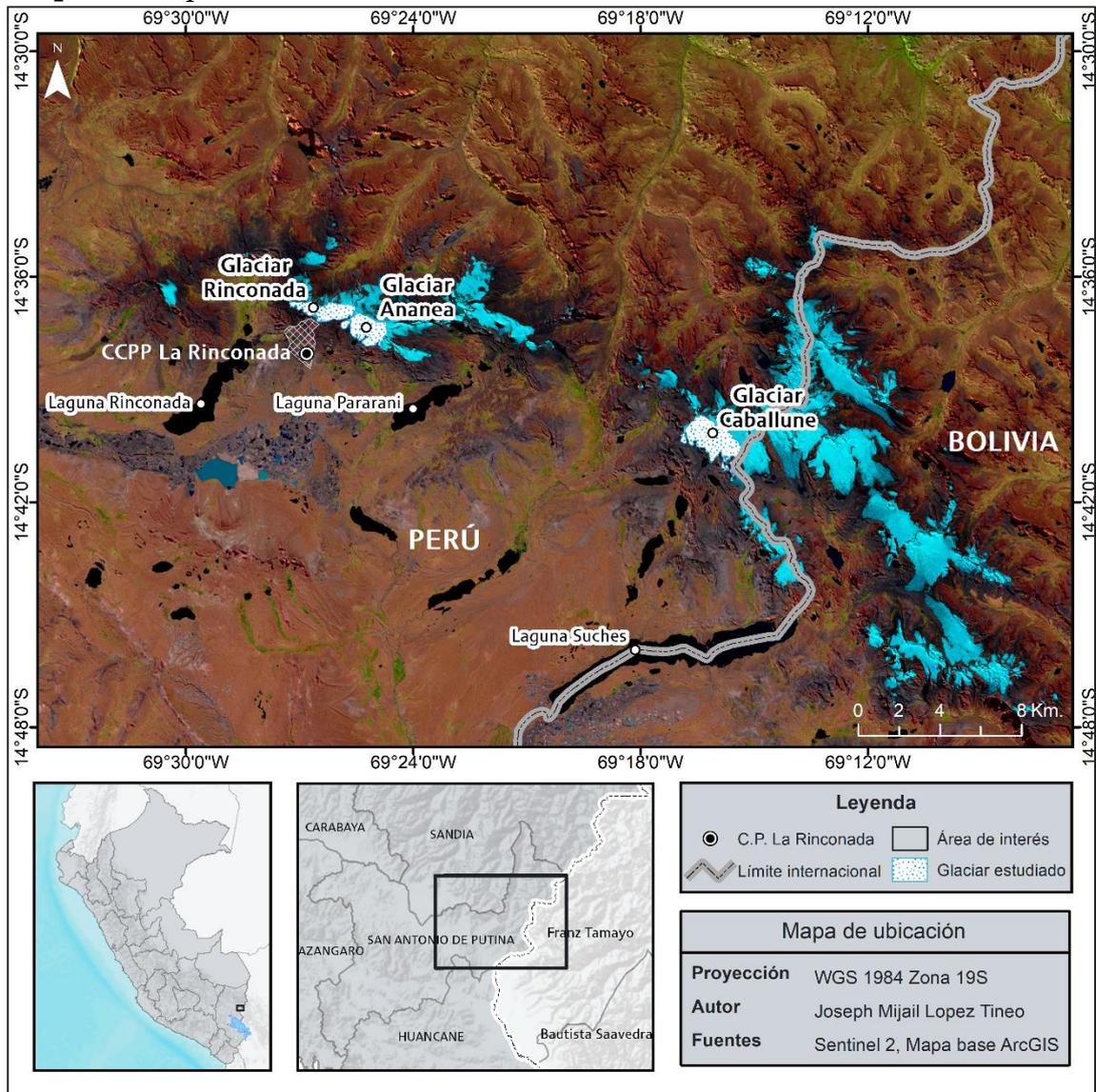
La Cordillera Apolobamba está ubicada en la frontera de Perú y Bolivia. Políticamente comprende a las provincias de San Antonio de Putina, Sandia y Huancané en el departamento de Puno, Perú (INAIGEM, 2018), y por las provincias de Franz Tamayo y Abel Iturralde en el departamento de La Paz, Bolivia (Hoffmann & Weggenmann, 2013). No obstante, en esta investigación solo se considera parte de la Cordillera Apolobamba (Mapa 2.1). La principal área de interés es la unidad glaciaria cercana al centro poblado La Rinconada, conformada por el nevado Ananea (5 869 m s.n.m.) y Rinconada (5 750 m s.n.m.) (INAIGEM, 2018). La otra área de interés es el glaciar Caballune (5 650 m s.n.m.).

Para alcanzar el objetivo de esta investigación, se eligieron tres glaciares ubicados en el lado peruano de la Cordillera Apolobamba. Ello se realizó con el fin de comparar la evolución de la cobertura glaciaria en una zona con presencia de la actividad minera (unidad glaciaria Rinconada y Ananea) con una zona que no está expuesta directamente a la actividad minera (unidad glaciaria Caballune). Se eligió comparar con el glaciar Caballune debido a la cercanía y a que comparten características similares como:

1. Orientación predominante al oeste, influenciadas climáticamente por el Altiplano andino.
2. Morfología similar, los tres glaciares elegidos son de tipo montaña.

- Altitud mínima similar al inicio del periodo de investigación, Rinconada (4 867 m s.n.m.), Ananea (4 875 m s.n.m.) y Caballune (5 027 m s.n.m.).

Mapa 2.1 Mapa de ubicación del área de estudio



Fuente: Elaboración propia con datos Sentinel-2 MSI (Composición: NIR, RED, GREEN)

2.2. Características físicas

La Cordillera de Apolobamba se ubica en la Cordillera Oriental, caracterizada por sus montañas altas con pendientes abruptas. Las cumbres de las montañas sirven como divisorias de aguas, drenando hacia a la vertiente del Titicaca en el lado occidental y a la vertiente del Atlántico en el lado oriental (INAIGEM, 2018). La zona de los nevados sobrepasa elevaciones de 5 000 metros de altitud y su pico más alto es el nevado Chaupi Orco (6 044 m s.n.m) (Veettil et al., 2017). La

Cordillera Oriental se extiende hacia el lado boliviano, donde continúa la Cordillera Apolobamba y la Cordillera Real (Chávez et al., 1996; Hoffmann, 2008). Los picos que se encuentran a mayor altitud y con pendientes pronunciadas tienen escasa cobertura glaciar, mientras que los picos con pendientes más suaves, presentan una mayor cobertura glaciar (Veettil et al., 2017).

Geológicamente, el lado occidental de la cordillera se caracteriza por estar conformada por afloramientos de rocas sedimentarias paleozoicas, donde predominan las areniscas. En contraste, el lado oriental se caracteriza por el afloramiento de rocas sedimentarias conformadas en mayor parte por pizarras (INAIGEM, 2018). En la Cordillera Apolobamba existen minerales económicos como el oro y wolframio, por ello se han instalado campamentos mineros, como La Rinconada y Cerro Lunar de Oro, dedicados a la explotación de vetas de cuarzo y filones de oro (Chávez et al., 1996).

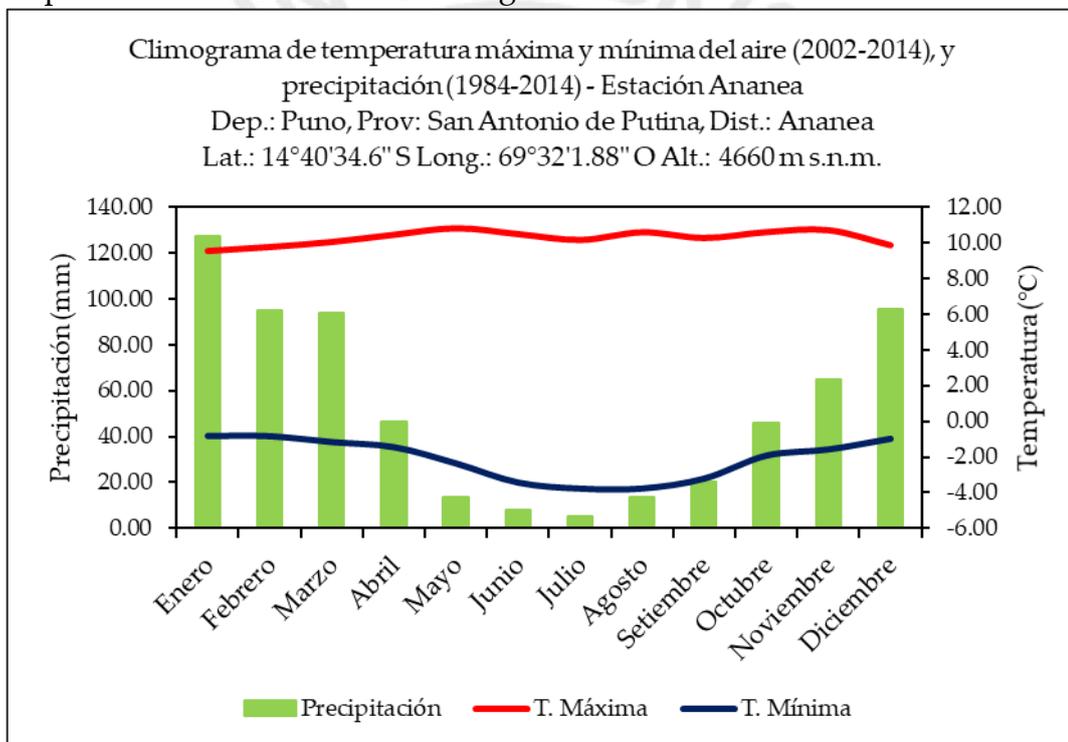
En cuanto a su climatología, la zona de cordillera se caracteriza por tener un clima seco y frío, debido a la altitud y a la barrera que representa la cordillera para el paso de la humedad proveniente del lado oriental (Gobierno Regional de Puno, 2015). En la cordillera se presenta la variación estacional, teniendo un clima semifrío y lluvioso en verano, y frío con lluvias deficientes en otoño e invierno (INAIGEM, 2018). Temporalmente, las precipitaciones se distribuyen de manera desigual, produciéndose mayores precipitaciones en los meses de noviembre a abril y experimentando un descenso en la cantidad de precipitaciones el resto del año (Instituto Nacional de Recursos Naturales [INRENA], 2003).

En la Figura 2.1 se puede observar que hay una estacionalidad marcada en las precipitaciones, debido a que entre octubre y abril (verano austral) se presentan las mayores precipitaciones, llegando a su pico máximo en el mes de enero, donde las precipitaciones sobrepasan los 120 mm. Por otro lado, de mayo a

septiembre (invierno austral) hay una reducción de las precipitaciones, llegando a su pico más bajo en el mes de julio.

De acuerdo al climograma, la zona no presenta una variabilidad mensual marcada. La temperatura máxima varía entre 9.6 °C en el mes de enero y 10.8 °C en el mes de mayo. La temperatura mínima varía entre -0.8 °C en el mes de enero y -3.8 °C en el mes de julio. Aunque si hay una variación altitudinal, debido a que a medida que la altitud aumenta, la temperatura experimenta un descenso (INAIGEM, 2018).

Figura 2.1 Climograma de temperatura máxima y mínima del aire, y precipitación en la estación climatológica de Ananea



Fuente: Elaboración propia con datos de SENAMHI

2.3. Características socioeconómicas

La Cordillera Apolobamba abarca las provincias de San Antonio de Putina, Sandía y Huancané en Perú, y Franz Tamayo y Abel Iturralde en Bolivia (Hoffmann & Weggenmann, 2013; INAIGEM, 2018). El distrito más importante para esta investigación es Ananea, en la provincia de San Antonio de Putina, debido a que en este distrito se ubica el centro poblado minero La Rinconada. La

información demográfica a nivel de centro poblado (CCPP) y a nivel distrital es confusa, debido a que la información oficial (INEI) y la información recogida por investigadores difieren en sus cifras.

Como se puede observar en la Tabla 2.1, las cifras estimadas por investigadores y las cifras oficiales (INEI) son diferentes, por lo que existe incertidumbre en relación a la información y su confiabilidad. Al comparar el número de habitantes del CCPP La Rinconada con el número de habitantes del distrito de Ananea, también se puede apreciar estas diferencias, ya que la información oficial es menor, como se observa en la Tabla 2.2. Ello representa un problema para la investigación, pues genera un panorama incierto, sobre todo al momento de buscar relaciones entre procesos físicos y sociales. A pesar de que la data existente varía considerablemente, esta muestra un panorama general en relación a la importancia de la minería en el área de estudio.

Tabla 2.1 Población estimada en el centro poblado La Rinconada, Puno (2006 – 2019)

Año	Número de habitantes	Población dedicada a minería	Fuente
2006	10 000	-	INGEMMET (2006) ¹
2009	35 000	28 000	Trigos (2008) Goyzueta & Trigos (2009)
2013	82 000	40 000	Loza del Carpio & Ccancapa (2020)
2017	8 924	-	INEI (2018)
2019	70 000	30 000	Arias (2019)

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2 Población del distrito de Ananea (1981-2017)

Año de censo	Hombres	Mujeres	Total	Población dedicada a minería
Censo 1981	1 552	1 155	2 707	518
Censo 1993	5 088	3 364	8 452	-
Censo 2007	11 769	8 803	20 572	6 828
Censo 2017	7321	5 294	12 615	2 750

Fuente: Elaboración propia con base en INEI (1981, 1993, 2007 y 2017)

¹ Solo corresponde a la población del centro poblado Cerro Lunar de Oro, parte de La Rinconada.

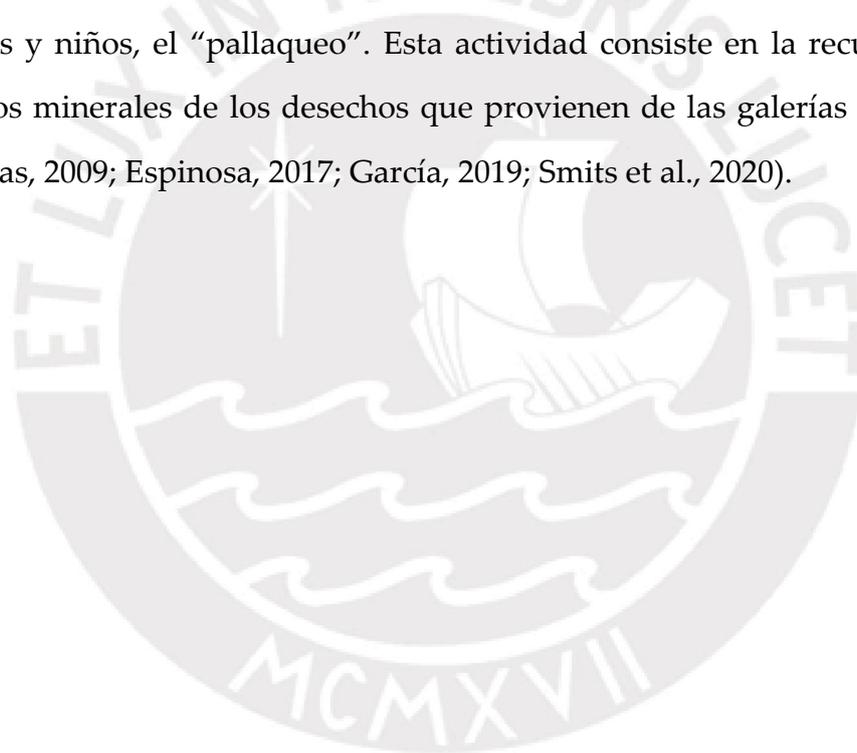
Como se puede observar en las Tablas 2.1. y 2.2, la población estimada en el centro poblado La Rinconada es superior a la que figura en el INEI. Asimismo, se puede observar que la mayor parte de la población se dedica a la actividad minera, sobre todo en las cifras recogidas por investigadores en La Rinconada. A nivel distrital también se puede observar que la actividad minera ocupa un lugar importante dentro de las actividades económicas.

Las diferencias en las cifras obtenidas por investigadores y por el Estado podrían explicarse debido a que el censo solo toma en cuenta a las personas que viven permanentemente en el centro poblado censado. Los centros poblados mineros se caracterizan por la constante movilidad de sus habitantes, esto se debe a que la actividad minera desencadena procesos migratorios, atrayendo temporalmente a trabajadores directos e indirectos (Gonzales, 2017). En el caso de La Rinconada, el flujo migratorio se incrementó a partir de la década de 1990, debido a la crisis económica en la que se encontraba el Perú, sumado a las bajas producciones agropecuarias (Organización Internacional del Trabajo [OIT], 2004). Por lo que este centro minero atrajo especialmente a varones para dedicarse a la explotación minera, de tal modo que La Rinconada se convirtió en una ciudad dormitorio albergando habitantes temporales o “Aves de paso” (INEI, 1995; OIT, 2004).

La situación social en La Rinconada es crítica, debido a que la presencia del Estado es mínima (García, 2019). El centro poblado presenta diversas problemáticas sociales como la prostitución, el asesinato, las desapariciones, entre otros (Espinosa, 2017). Además, carece de servicios básicos como redes de agua potable y alcantarillado (Cuentas, 2009; Espinosa, 2017). Esto genera que las personas vivan en condiciones precarias, que se ve agravado por las condiciones climáticas propias de una zona alta montaña.

La situación legal de las explotaciones mineras en La Rinconada es compleja, debido a las prácticas laborales presentes. El titular minero concesionario de la

zona de La Rinconada es la Corporación Minera Ananea. Esta corporación arrienda la explotación de cada galería a alrededor de 400 contratistas mineros. Estos contratistas, a su vez, subcontratan a los mineros, quienes laboran en condiciones extremas en las galerías. Los mineros son contratados bajo el sistema de “cachorro”, el cual consiste en el trabajo por un periodo de tiempo, por ejemplo un mes, para el contratista, luego de ello tienen unos días para extraer el mineral para beneficio personal (Cuentas, 2009; Espinosa, 2017; García, 2019; Giraldo, 2017). Las labores dentro de las galerías son realizadas mayormente por varones, ya que existe la creencia que las mujeres atraen a la mala suerte (Espinosa, 2017). Por ello, existe otro régimen laboral principalmente para mujeres y niños, el “pallaqueo”. Esta actividad consiste en la recuperación de residuos minerales de los desechos que provienen de las galerías subterráneas (Cuentas, 2009; Espinosa, 2017; García, 2019; Smits et al., 2020).



CAPÍTULO 3

MARCO CONCEPTUAL

En este capítulo se definen los aspectos básicos que caracterizan a los glaciares. Se realiza una descripción somera, debido a que este tema ya ha sido ampliamente descrito por tesis de la especialidad de Geografía y Medio Ambiente PUCP anteriores (ver Guardamino, 2014; Izaguirre, 2021; Yap, 2015). Luego de ello se hace una aproximación a la minería en el Perú con énfasis en la minería informal y sus impactos. Finalmente se realiza una aproximación a los métodos de teledetección para la clasificación de cobertura de suelo con especial atención en la plataforma en la nube Google Earth Engine.

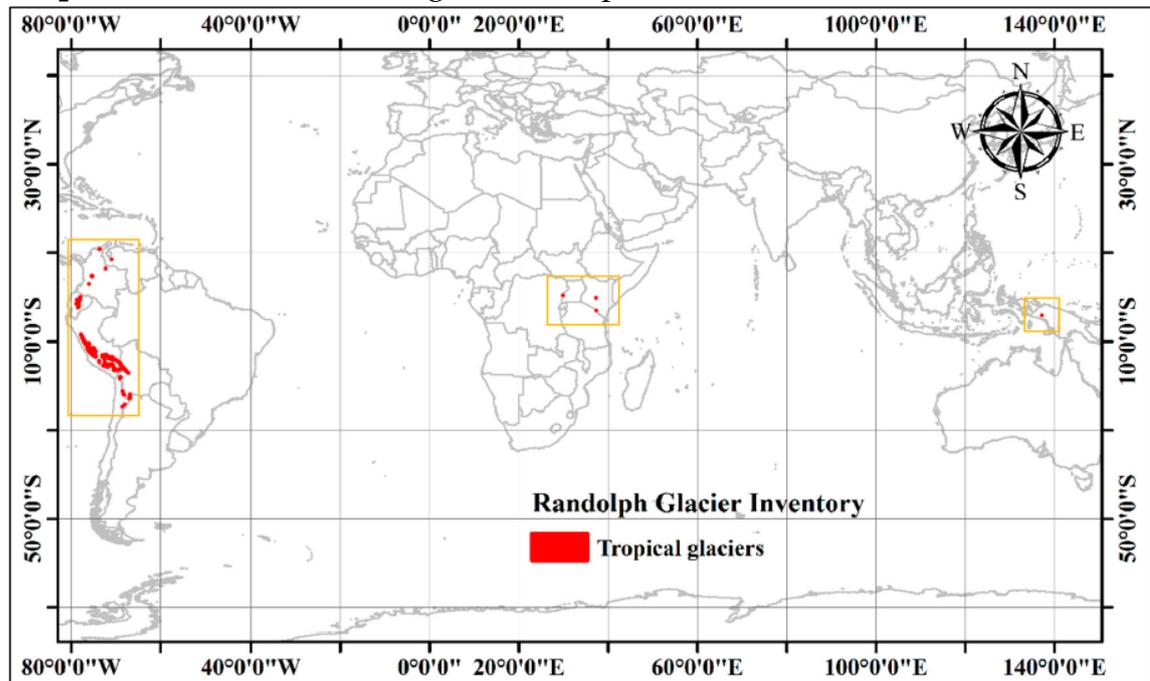
3.1. Fundamentos sobre glaciares tropicales

Un glaciar se define como una masa de hielo originada sobre la superficie terrestre, debido a procesos de acumulación, compactación y recristalización de la nieve (Tarbuck & Lutgens, 2010). La formación y permanencia de los glaciares están determinadas por dos procesos: la acumulación y la ablación. La masa glaciar experimenta un incremento cuando predomina el proceso de acumulación. Por el contrario, se produce una pérdida de la masa glaciar cuando predomina la ablación (Strahler, 1997; Tarbuck & Lutgens, 2010). Cuando se alcanza un equilibrio entre ambos procesos, el balance glaciar resulta cero. Es decir, el glaciar mantiene un estado de estabilidad (Huddart & Scott, 2010).

En los Andes se encuentran los glaciares tropicales, los cuáles se distribuyen entre el trópico de Cáncer y Capricornio, de ahí su nombre, encontrándose también en el este de África y Australasia (Veettil & Kamp, 2019) (Mapa 3.1). Más del 99 % (2 337.55 km²) de los glaciares tropicales se encuentran en los Andes sudamericanos, distribuidos entre Venezuela (0.79 km²), Colombia (66.19 km²), Ecuador (123.9 km²), Perú (1 602.96 km²), Bolivia (531.58 km²), en el norte de Chile (11.81 km²) y el norte de Argentina (0.32 km²) (Veettil & Kamp, 2019). En la región andina, el Perú es el país que cuenta con la mayor cantidad de glaciares

tropicales, con alrededor del 70 % (Comunidad Andina, 2013; Veettil & Kamp, 2019).

Mapa 3.1 Distribución de los glaciares tropicales



Fuente: Veettil & Kamp (2019)

En la región andina los glaciares se dividen en siete subregiones de acuerdo a su latitud y condiciones climáticas (para mayor detalle ver Dussaillant et al., 2019). Los glaciares peruanos se encuentran en la región tropical externa, caracterizados por presentar una estacionalidad muy marcada en sus precipitaciones (Dussaillant et al., 2019; Veettil & Kamp, 2019). Esta condición determina la importancia de los glaciares para la región tropical externa, pues, si bien durante todo el año hay una entrada de agua de deshielo a las cuencas glaciares, es durante la época de estiaje que el aporte relativo es mayor. Esto se debe a que la principal fuente hídrica para las cuencas glaciares en época de estiaje es el agua proveniente del deshielo, ya que las precipitaciones son mínimas o incluso nulas (Veettil & Kamp, 2019). Los glaciares representan una reserva hídrica que se destinada a diversas aplicaciones humanas, entre las que incluyen el suministro de agua para consumo doméstico, la producción agrícola, la generación de energía, así como valores culturales asociados, como las divinidades

simbolizadas por los picos glaciares en la cultura andina (Drenkhan, 2016; Drenkhan et al., 2015).

3.2. La minería en el Perú

El Perú es considerado como un país tradicionalmente minero, debido a los abundantes minerales que se encuentran en su territorio. La minería es uno de los principales sectores que aporta considerablemente a la economía nacional, ya que el Perú es el sexto productor de oro, el tercer productor de plata y el segundo productor de cobre a nivel mundial (Dammert, 2020). Las exportaciones mineras representan más de la mitad de las exportaciones nacionales (Dammert, 2020; Giraldo & Vasquez, 2019). En términos de PBI, el sector minero nacional tuvo un crecimiento promedio anual de 4.7 % en las últimas dos décadas, favorecido por el alza de los precios de los metales, lo que se refleja en el aporte de este sector en 12.9 % al PBI nacional (Ccama et al., 2019).

La actividad minera es una fuente de generación de divisas y, que, desde la década de los noventa, con cambio de Constitución, fue uno de los motores de crecimiento económico del país (Banco Mundial, 2021; Glave & Kuramoto, 2007; Ministerio de Energía y Minas [MINEM], 2022). El ambiente propicio para la inversión y el alto precio de los minerales consolidó al Perú, a partir de la segunda mitad del siglo xx, como un país atractivo para la actividad minera (Glave & Kuramoto, 2007; MINEM, 2022). Sin embargo, este crecimiento tuvo fluctuaciones, debido, principalmente, a la variabilidad del precio de los metales. A finales de la década de los setenta, minerales como el oro y la plata alcanzaron precios récord, 800 y 20 dólares la onza, respectivamente. Empero, a partir de 1981 el precio decayó drásticamente, impactando en el sector minero (Glave & Kuramoto, 2007).

Hacia la década de los noventa se experimentó una de las mayores crisis mineras, debido a factores como el precio de los minerales, y, sobre todo, a la crisis económica en la que se encontraba el Perú. A partir del gobierno de Alberto

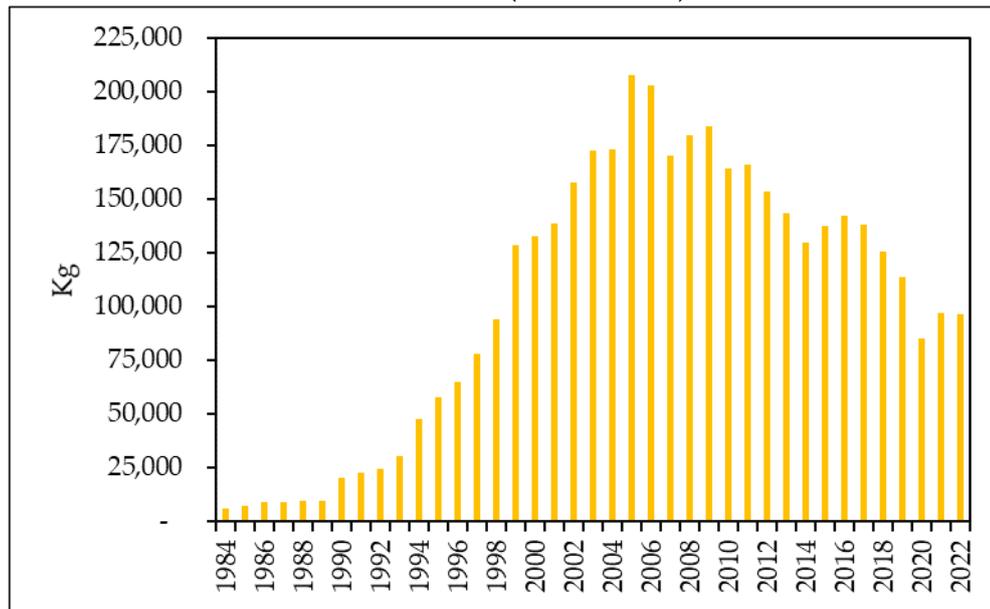
Fujimori el contexto minero cambió con un proceso de inversión privada y privatización, debido la implementación de políticas de atracción de capital, y la liquidación de las empresas mineras nacionales (Banco Mundial, 2021; Glave & Kuramoto, 2007). Estas medidas tuvieron un impacto positivo y, desde esa década, el sector minero ha experimentado un gran crecimiento y consolidándose como una de las principales actividades económicas en el Perú.

El oro y la plata fueron los metales que tuvieron mayor crecimiento durante las últimas cuatro décadas (ver Figura 3.1 y 3.2). En el caso del oro, pasó de producirse 6 969 kilogramos en el año 1985 a 97 674 kilogramos en el año 2022, llegando a su pico en 2005 con 208 002 kilogramos. La expansión en la producción de oro fue impulsada por el aumento en el valor del oro y por la implementación de un renovado marco regulatorio en la década de los noventa. Este marco facilitó la iniciación de operaciones mineras de gran magnitud, como Yanacocha y Pierina (Glave & Kuramoto, 2007).

Sin embargo, durante la última década se han experimentado diversos conflictos sociales ligados al sector minero que han ocasionado la paralización temporal de operaciones mineras como Yanacocha, Cuajone y Las Bambas. A estos conflictos se le suma el agotamiento de las reservas minerales de las operaciones mineras. Por ejemplo, Yanacocha pasó de producir de noventa a ocho millones de gramos entre los años 2005 y 2021. Además, la incertidumbre política también sería una de las causas del descenso de la producción, al retrasar proyectos de expansión y exploración minera (Instituto Peruano de Economía, 2022).

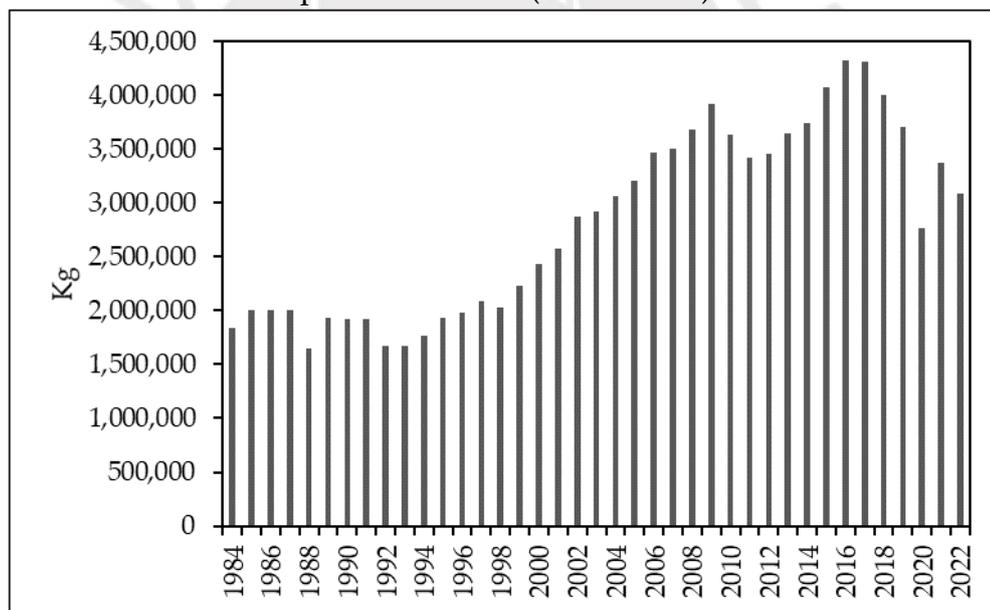
La plata pasó de producirse 2 010 756 kilogramos en 1985 a 3 083 036 en 2022, llegando a su pico en 2016 con 4 329 180 kilogramos. La producción de plata ha mantenido una tendencia sostenida a partir de 1993, luego de experimentar una caída en la década de los ochenta. La producción de este mineral fue favorecida principalmente por las inversiones de empresas de mediana minería (Glave & Kuramoto, 2007).

Figura 3.1 Producción de oro en el Perú (1984 – 2022)



Fuente: Elaboración propia con datos de MINEM (2023)

Figura 3.2 Producción de plata en el Perú (1984 – 2022)



Fuente: Elaboración propia con datos de MINEM (2023)

Por su naturaleza legal, la minería se divide en minería formal, minería informal y minería ilegal. La minería formal es aquella que cumple todas las disposiciones presentes en el Texto Único Ordenado de la Ley General de Minería (D.S. N° 014-92-EM). Por su parte, la minería informal se define en D.L. N° 1105 - 2017 y se caracteriza por ser una actividad minera que se lleva a cabo sin el uso de equipo y maquinaria adecuados para las tareas del pequeño productor minero o la

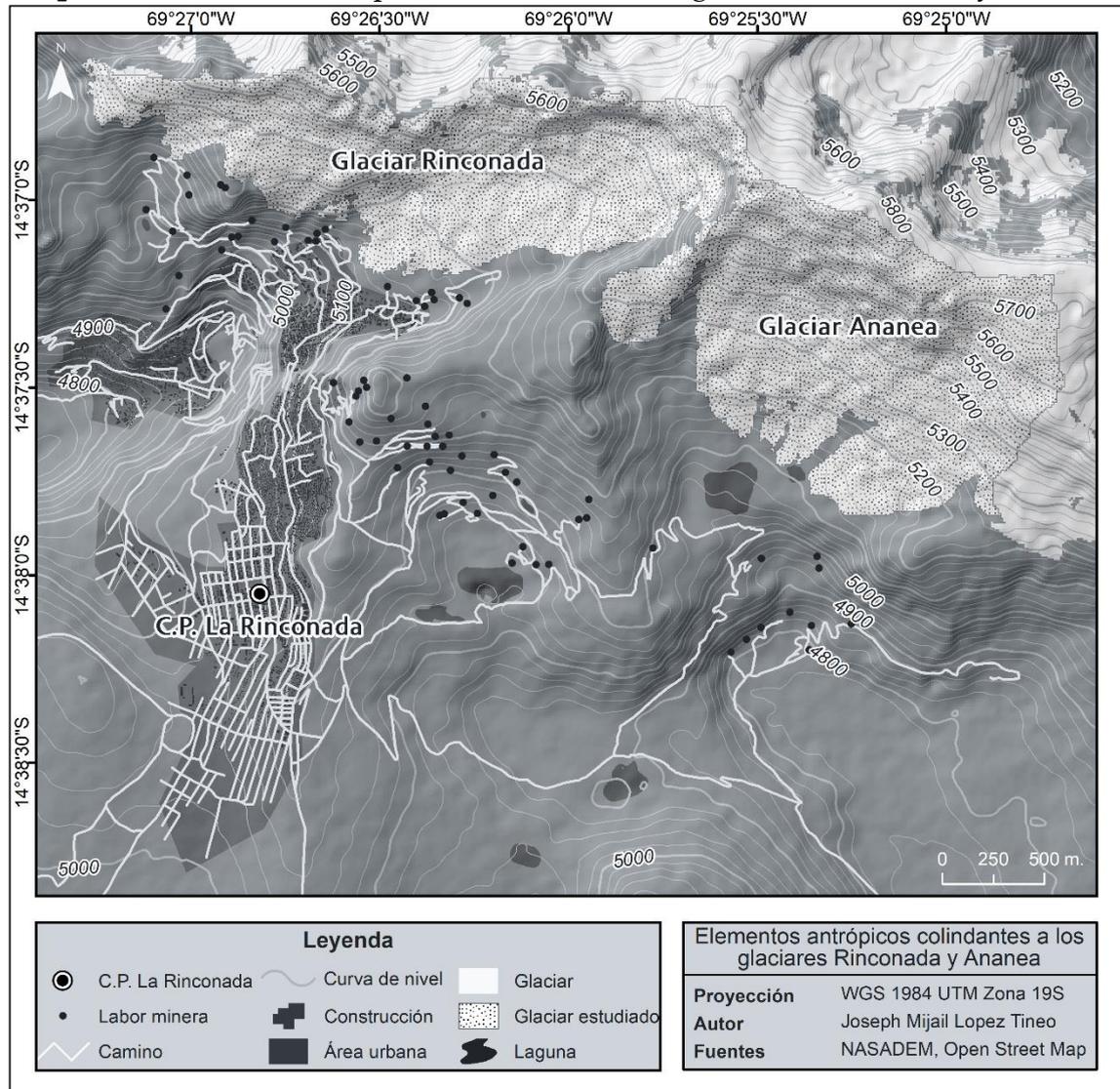
minería artesanal. Además, se considera informal si no cumple los requisitos técnicos, administrativos o socioambientales en áreas que no están prohibidas para la actividad minera. Por otro lado, la minería ilegal se define como aquella actividad minera que no cumple con los requerimientos técnicos, administrativos o socioambientales que regulan la actividad minera, o que se realiza en áreas donde la actividad minera está prohibida, como las riberas de los ríos, las zonas de amortiguamiento, las Áreas Naturales Protegidas, entre otros.

Como se mencionó en la Subsección 2.3, el estado legal de las explotaciones mineras en La Rinconada es compleja debido al sistema de arriendo que existe. En general se podría entender que se trata de minería formal, ya que la Compañía Minera Ananea tiene la concesión por parte del Estado. Sin embargo, esta arrienda las galerías a otros contratistas y estos a su vez contratan a otras personas para la explotación. De este modo existe un sistema complejo entre lo formal e informal. El tipo de minería cercana a glaciares en La Rinconada es de explotación subterránea o galerías (Cuentas, 2009) (ver Mapa 3.2). Sin embargo, más alejado de la zona glaciar también se practica la minería a cielo abierto, donde se extrae el oro de depósitos aluviales (Martinez, 2022).

La explotación subterránea en La Rinconada se caracteriza por realizarse de manera convencional. El macizo rocoso se perfora con equipos como compresoras, perforadoras, barrenos integrales y de broca, así como dinamita para la voladura y extracción del mineral (Cuentas, 2009). El material extraído es trasladado mediante carros mineros, remolcados por locomotoras o impulsados por los propios mineros hacia campos de depósito en la superficie. Posterior a ello, el material es llevado con camiones a las plantas de beneficio, donde el mineral se reduce de tamaño con las “chancadoras” para luego pasar por un sistema de recuperación del mineral mediante un proceso de amalgamación con mercurio o un proceso de cianuración (Cuentas, 2009). El material extraído también llega a ser procesado de manera artesanal mediante la amalgamación.

Para este proceso se utilizan los quimbaletes o molinos, que pulverizan el material con la ayuda de aguay finalmente, se recupera el oro con el uso de mercurio (Cuentas, 2009; Espinosa, 2017).

Mapa 3.2 Elementos antrópicos colindantes a los glaciares Rinconada y Ananea



Fuente: Elaboración propia

Nota. El número de labores mineras o galerías no es definitivo, ya que solo se han mapeado las labores que se pueden identificar a primera vista. Por lo tanto, es posible que existan muchas más labores no detectadas.

3.3. Plataforma Google Earth Engine

Uno de los principales problemas técnicos relacionado a la teledetección es la adquisición, almacenamiento y procesamiento de datos, pues requieren de supercomputadoras capaces de procesar datos que pueden llegar a pesar

gigabytes o petabytes a escala planetaria (Gorelick et al., 2017; Qu et al., 2021). Este problema técnico ha sido una de las limitantes al momento de trabajar con datos pesados o grandes, los llamados “Big Data”, o áreas de interés extensas como países, continentes o a nivel global (Ponganan et al., 2021; Z. Zhang et al., 2021). Los datos usados en teledetección se consideran “Big Data” debido al crecimiento exponencial de su cantidad, al aumento de su diversidad y complejidad, que pueden llegar a superar la capacidad de almacenamiento e informática (Ma et al., 2015). Sin embargo, con el surgimiento de plataformas basadas en la nube, estos problemas técnicos se reducen considerablemente.

Las plataformas basadas en la nube se han desarrollado debido a la virtualización de la tecnología, trabajando en la nube con procesadores más potentes y de mayor almacenamiento. Ello se debe a que este tipo de plataformas utilizan diferentes servidores, ubicados en diferentes partes, que pueden brindar una mayor capacidad computacional (Eurich et al., 2011; Moclan, 2016).

Una plataforma basada en la nube que se ha expandido rápidamente es Google Earth Engine (GEE). Esta plataforma está basada en JavaScript, un lenguaje de programación empleado para la creación de scripts en la web, destacado por su notable flexibilidad y maleabilidad (Lebresne et al., 2009). Adicionalmente, GEE tiene la capacidad de utilizar una Interfaz de Programación de Aplicaciones (API, por sus siglas en inglés) en Python. GEE facilita el acceso a recursos informáticos de alto rendimiento para el procesamiento de grandes datos geoespaciales, incluyendo observaciones de diferentes satélites como Landsat y Sentinel, variables ambientales, climáticas, cobertura del suelo y datos socioeconómicos (Gorelick et al., 2017). GEE, al ser una plataforma basada en la nube, divide los procesamientos en diferentes CPUs, por lo que su potencial técnico llega a resolver problemas relacionados a los largos periodos de procesamiento y las limitaciones de almacenamiento (Z. Zhang et al., 2021).

El acceso GEE se realiza a través de una API por medio de internet, y se controla en un Entorno de Desarrollo Integrado (IDE, por sus siglas en inglés) basado en la web que permite la creación y visualización rápida de modelos desarrollados (Gorelick et al., 2017). Además, GEE posee un catálogo de datos públicos muy amplio con productos geoespaciales de diferentes instituciones como el Servicio Geológico de Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés), la Agencia Espacial Europea (ESA, por sus siglas en inglés), entre otras, las cuales brindan archivos MODIS, Landsat 1-9, Sentinel 1-3 y 5, productos de cobertura terrestre, datos geofísicos, ambientales y socioeconómicos, que datan de hace más de 40 años (Xu et al., 2021; Zeng et al., 2020). El catálogo de GEE se encuentra en constante actualización, con un promedio de aproximadamente 6 000 escenas al día provenientes de las misiones activas. Además, ofrece la posibilidad a los usuarios de cargar sus propios datos privados a la plataforma y compartirlos con otros usuarios (Gorelick et al., 2017).

En los últimos años la utilización de GEE ha experimentado un incremento significativo, atribuible a las múltiples ventajas que esta plataforma ofrece. Entre las ventajas destacadas de la plataforma se encuentran las siguientes: es gratuita y solo requiere de una conexión a internet para su uso. Posee una gran capacidad de almacenamiento y amplia disponibilidad de datos espaciales. Permite el procesamiento de grandes bases de datos o “Big Data”. Además, ofrece la posibilidad de compartir scripts, archivos y repositorios con otros usuarios de la plataforma.

CAPÍTULO 4

ESTADO DEL ARTE

4.1. Los glaciares en la Cordillera Apolobamba

Las investigaciones relacionadas a glaciares han aumentado durante las últimas décadas, debido a la importancia para la oferta de agua y, a la vez, los impactos significativos que se experimentan en aspectos como la seguridad hídrica, la producción de energía, la sostenibilidad de ecosistemas de montaña y la generación de riesgos asociados al retroceso glaciar (Colonia et al., 2017; Drenkhan, 2016; Seehaus et al., 2019; Veettil & Kamp, 2019). El retroceso glaciar es un tema importante en el Perú, considerando que el 70 % de los glaciares tropicales (1 118 km²) se distribuyen en este país (INAIGEM, 2018, 2021; Veettil & Kamp, 2019). Sin embargo, existe una gran disparidad en relación a las investigaciones realizadas en las diferentes cordilleras glaciadas, siendo la Cordillera Blanca la más estudiada. Esta cordillera constituye la cordillera tropical más alta y extensa del mundo, con alrededor del 40 % de la superficie glaciar del Perú (449.7 km²) (Autoridad Nacional del Agua [ANA], 2019; INAIGEM, 2021; Seehaus et al., 2019). El interés por estudiar la Cordillera Blanca radica en su importancia y su historial de eventos de desborde de lagunas glaciares (GLOF, por sus siglas en inglés). Por ejemplo, el evento GLOF de 1941 desencadenado por el desborde de la laguna Palcacocha que ocasionó la muerte de 4 000 personas (Carey, 2005; Morales Arnao & Santiago Martel, 2017).

Sin embargo, otras cordilleras glaciadas en el Perú, tales como Apolobamba (ver Mapa 2.1), han sido menos estudiadas, debido principalmente a que es la cordillera más alejada, sureste del Perú y noroeste de Bolivia (Hoffmann & Weggenmann, 2013). Tal situación genera un vacío importante para la comprensión de los impactos en los glaciares ubicados en esta cordillera compartida entre Perú y Bolivia, y las posibles consecuencias para los sistemas

socio-ecológicos aguas abajo (Cook et al., 2016; Hoffmann & Weggenmann, 2013; INAIGEM, 2018; Veettil et al., 2017).

Este rasgo binacional de la Cordillera Apolobamba genera que sea más desafiante realizar investigaciones, sobre todo al realizar comparaciones de los resultados. Esto se debe a que por un lado, algunas investigaciones suelen tomar como área de estudio solo el lado boliviano de la Cordillera Apolobamba (Hoffmann, 2008; Hoffmann & Weggenmann, 2013; Kougkoulos et al., 2018; Veettil, Bremer, et al., 2016). Por otro lado, investigaciones como como Colonia et al. (2017), Cook et al. (2016), Veettil et al. (2017) consideraron como área de estudio a la Cordillera Apolobamba en su totalidad. Las investigaciones son aún más escasas si solo se considera el lado peruano. Por ejemplo, INAIGEM (2018) y Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH, 2014) elaboraron el inventario de glaciares peruanos con años base de 2010 y 2016 respectivamente. Por su parte, Cuadros-Amanqui (2014) investigó la evolución de la superficie glaciar del nevado Ananea entre 1985 y 2010 (ver subsección 4.1.2).

Los enfoques tomados en cuenta por los diversos autores al momento de delimitar el área de estudio, genera que los resultados sean poco comparables, ya que la escala del área de estudio varía en gran medida.

4.1.1. Líneas de investigación

Los estudios sobre glaciares en la Cordillera Apolobamba se han orientado hacia los riesgos que conlleva el retroceso glaciar, relacionado con la aparición de nuevas lagunas glaciares y a la posibilidad de eventos GLOF (Cook et al., 2016; Hoffmann & Weggenmann, 2013; Kougkoulos et al., 2018). En el lado boliviano de la cordillera existen antecedentes de eventos GLOF, como lo ocurrido en el 2009. Dicho año una laguna glaciar drenó sus aguas como resultado del desprendimiento de hielo, afectando a la comunidad de Keara (Hoffmann & Weggenmann, 2013). Del mismo modo, se han realizado esfuerzos para inventariar las lagunas glaciares existentes. Por un lado, ANA (2014) identificó

que en el lado peruano de la Cordillera Apolobamba existía un total de 110 lagunas glaciares hasta el 2014. Por su parte, Guardamino et al. (2019) proyectaron la posible aparición de 17 lagunas glaciares futuras, basado en el modelamiento del lecho glaciar, la existencia de depresiones y considerando el retroceso glaciar en las siguientes décadas. Asimismo, Veettil et al. (2017) encontraron que en 1985 existían 274 lagunas glaciares en la cordillera Apolobamba (Perú-Bolivia), y para el 2015, el número aumentó a 442 lagunas. La situación es preocupante, debido a que las lagunas glaciares observados crecen rápidamente, por lo que existe la posibilidad de un desborde en el futuro.

Otra línea de investigación relaciona la influencia de eventos climáticos como El Niño-Oscilación del Sur (ENOS) y la Oscilación Decadal del Pacífico (ODP) con el retroceso glaciar. Las modificaciones, en las temperaturas del aire y las precipitaciones, provocadas por estos eventos tienen un impacto considerable sobre los glaciares, debido a que en épocas de El Niño se ha observado un retroceso más rápido de los glaciares, que incluso se magnifica cuando El Niño se presenta en la fase cálida de la ODP (Souza da Rocha et al., 2019; Veettil, Bremer, et al., 2016). Estos cambios provocados por ambos eventos climáticos han mostrado sus efectos en la hidrología de ríos alimentados por glaciares en la cuenca del Madeira, ya que se evidenció que durante eventos Niño y ODP, el caudal aumentaba debido al rápido derretimiento de los glaciares causado por las modificaciones en las temperaturas y precipitaciones (Souza da Rocha et al., 2019). Sin embargo, aún existen incertidumbres sobre el impacto real del ENOS en los glaciares, debido a que los impactos oscilan latitudinalmente. En el ENOS de 1982/1983, considerado el de mayor magnitud, en el Altiplano se registraron anomalías negativas en las precipitaciones, mientras que en regiones del norte, las precipitaciones estuvieron por encima del promedio (Vuille et al., 2008).

4.1.2. Evolución de la cobertura glaciar

En la Tabla 4.1 se observa la evolución de la superficie glaciar en la Cordillera Apolobamba. Primero se muestra la superficie total (Perú + Bolivia), la cual indica que, en 40 años, la superficie se ha reducido alrededor del 50 %, de 239.9 km² en 1975 a 117.9 km² en 2015. El lado peruano de la cordillera muestra una reducción similar, ya que entre 1970 (81.12 km²) y el 2016 (39.63 km²) la superficie glaciar se redujo en alrededor del 50 %. A escala local, el nevado Ananea, en el lado peruano de la cordillera, redujo su superficie glaciar alrededor del 24 % en un periodo de 25 años, 1985 (40.96 km²) y 2010 (30.94 km²).

Tabla 4.1 Superficie glaciar en la Cordillera Apolobamba

Área de estudio	Año	Área estimada (km ²)	Fuente
Cordillera Apolobamba - Perú + Bolivia	1975	239.9	Veettil et al. (2017)
	1985	195.3	Veettil et al. (2017)
	1995	161.3	Veettil et al. (2017)
	2005	152.9	Veettil et al. (2017)
	2015	117.9	Veettil et al. (2017)
	1986	269.5 ± 27.0	Cook et al. (2016)
	2014	146.3 ± 14.6	Cook et al. (2016)
	Cambio Total		93.6 (39 %)
Cordillera Apolobamba - Perú	1970	81.12	Hidrandina S.A (1989)
	1975	83.12	INAIGEM (2018)
	1997	55.16	CONAM (2001)
	2010	44.51	UGRH (2014)
	2016	39.63	INAIGEM (2018)
	Cambio Total		41.5 (51 %)
Nevado Ananea	1985	40.96	Cuadros-Amanqui (2014)
	1998	34.71	Cuadros-Amanqui (2014)
	2010	30.94	Cuadros-Amanqui (2014)
	Cambio Total		10 (25 %)

Fuente: Elaboración propia

Estas investigaciones demuestran que la Cordillera Apolobamba ha mantenido una tendencia de retroceso negativa muy fuerte, especialmente los glaciares

ubicados en zonas bajas. Entre 1975 y 2015, el 93 % de los glaciares ubicados por debajo de los 5 000 m s.n.m. desaparecieron (Veettil et al., 2017) y se estima que los glaciares de esta cordillera desaparecerían completamente en la segunda mitad del siglo XXI (INAIGEM, 2018).

4.2. Impactos de la minería en zonas glaciares

Las investigaciones se han enmarcado en el contexto de cambios en el sistema climático, sin embargo, se ha estudiado muy poco los impactos que puedan llegar a tener otros factores de presión, como la minería, desarrolladas cerca o directamente sobre los glaciares.

Los casos de explotaciones mineras cerca a glaciares son poco conocidos en el Perú. Algunas minas ubicadas relativamente cerca a glaciares en el Perú son: la mina Antamina y Pierina, ubicadas a unos 20 y 10 kilómetros de los glaciares Huantsan y Vallunaraju en la Cordillera Blanca, la mina Toromocho, ubicada a unos 10 km del glaciar Rajuntai en la Cordillera Central (Gilardoni et al., 2022), y finalmente, el área de estudio de esta investigación, La Rinconada. Esta ha recibido mayor atención, debido a su cercanía al glaciar Auchita, parte baja del glaciar Rinconada (Gilardoni et al., 2022), y a su condición de urbe ubicada a mayor altitud en el mundo (Andina, 2019).

Las investigaciones que se enfocan en el impacto de la minería en glaciares son escasas. En el caso de la Rinconada, los estudios existentes suelen tener como tema principal los impactos sobre la salud y la contaminación del medioambiente. Trigos (2008) y Goyzueta & Trigos (2009) estudiaron la exposición de las personas a la contaminación proveniente de la explotación minera y de las condiciones de vida en el centro poblado La Rinconada. Loaiza & Galloso (2008), Matamet & Bonotto (2019), Loza Del Carpio & Ccancapa (2020) estudiaron los impactos de la minería en la calidad del medio ambiente en La Rinconada. Estas investigaciones encontraron altas concentraciones de metales tóxicos como arsénico y mercurio en las fuentes de agua cercanas, como la laguna

Rinconada y arroyos colindantes, y también en la cuenca baja del Ramis, cerca de la desembocadura en el Lago Titicaca.

La actividad minera en zonas de alta montaña generan la contaminación de las fuentes de agua superficial y subterránea, y la disminución de los caudales, producto del uso del agua en los procesos mineros y la generación de aguas contaminadas con metales tóxicos (Molina, 2011; Vergara-Buitriago & Rodríguez-Aparicio, 2021). Por ejemplo, la exposición de sulfuros a la superficie genera reacciones de oxidación y producen aguas ácidas cargadas de metales pesados que impiden el crecimiento normal de las plantas (Vergara-Buitriago & Rodríguez-Aparicio, 2021). Esto afecta directamente la capacidad productiva del suelo y los sistemas productivos tradicionales de la zona (Giraldo, 2017; Molina, 2011).

Uno de los impactos más visibles de la minería en zonas de alta montaña es la modificación del paisaje. Ello debido a la remoción del suelo para la extracción de los minerales (Giraldo, 2017; Giraldo & Vasquez, 2019). Palacios & Lundberg (2006) identificaron que en la zona del proyecto minero Yanacocha, Cajamarca, se experimentó un cambio drástico del paisaje. Esto se debe a que, entre 1993 y 2000, el área de estudio cambió drásticamente, debido a que paisaje dominado por pastos naturales se redujo de 77.1 % a 9.8 % del área total en dicho periodo, mientras el área minera se expandió en el mismo periodo de 5.8 % a 48 %.

El impacto de la actividad minera en los glaciares ha sido poco estudiado, por lo que es difícil estimar el impacto real y hallar la correlación entre la actividad minera y los cambios en la extensión glaciaria. Los principales impactos ligados a la minería cerca a glaciares se asocian con la producción de residuos, provenientes de la explotación (Jamieson et al., 2015) y de la infraestructura necesaria para su funcionamiento, como carreteras, campamentos, entre otros (H. A. Fernández & Ferrando, 2018; Rey-Coquais, 2021). El material extraído, que es depositado sobre los glaciares, genera que el flujo normal entre en desequilibrio,

debido al peso extra que reciben. Esto ocasiona que el glaciar se desestabilice y desplace a una velocidad mayor, lo que genera que su balance sea negativo (Evans et al., 2016; Jamieson et al., 2015). Sin embargo, la interacción entre el material residual y los glaciares puede tener un aspecto positivo. Esto se debe a que la cubierta formada sobre el hielo/nieve puede actuar como un aislante térmico, y de este modo, reducir la fusión del hielo y aumentar la longevidad del glaciar (Arenson et al., 2015).

Brenning & Azócar (2010) estudiaron el impacto de los proyectos mineros, Pascua-Lama, Los Bronces, Codelco División Andina entre otros, sobre los glaciares rocosos de los Andes de Chile. Llegaron a la conclusión de que las intervenciones mineras en este tipo de glaciares pueden ocasionar su colapso, la degradación del permafrost y la inestabilidad de los glaciares, producto de los efectos geotérmicos y geoquímicos. Además, señalan que el agua almacenada puede llegar a contaminarse, como resultado del drenaje ácido de mina. Por su parte, H. A. Fernández & Ferrando (2018) estudiaron los glaciares rocosos de la cabecera del río Putaendo en Chile, llegando a la conclusión que los glaciares rocosos están siendo removidos para poder acceder a los yacimientos mineros, lo que afecta la recarga de los glaciares.

Otro impacto ligado a la actividad minera es la emanación de polvo, a raíz del paso de vehículos, las explosiones, la molienda y demás actividades, que pueden llegar a depositarse en la superficie glaciar (Rey-Coquais, 2021). En ambientes glaciares, la cobertura de la superficie con partículas es perjudicial debido a que estas partículas son agentes que pueden alterar la tasa de ablación al reducir el albedo de la superficie y generar el aumento de la temperatura superficial, lo que conlleva el aumento de la tasa de deshielo (Arenson et al., 2015; Gilardoni et al., 2022). Las partículas que se depositan sobre la nieve y los glaciares generan un oscurecimiento de las superficies, aumentando la absorción de energía (Cereceda-Balic et al., 2020; Cereceda-Balic et al. 2022; Barandun et al. 2022).

Cereceda-Balic et al. (2020) midieron la concentración del carbón negro en la atmósfera y la superficie de los glaciares Olivares Alfa y Glaciar Bello, el primero se encuentra cerca de dos minas a tajo abierto, mientras el segundo no tiene actividades antropogénicas cerca. La conclusión a la que llegaron es que hubo mayor concentración de carbón negro en Olivares Alfa, relacionado a la actividad minera, asimismo, el Glaciar Bello presentó mayor reducción de su superficie.

4.3. Políticas de conservación y protección glaciar

4.3.1. Avances en la protección de glaciares en Argentina y Chile

El impacto de la minería sobre los glaciares ha tenido mayor interés en Argentina y Chile a raíz de los problemas surgidos con el proyecto minero binacional Pascua-Lama. Este megaproyecto binacional impulsado desde el 2001 por la empresa Barrick Gold Corporation buscaba la explotación de una mina a tajo abierto para poder extraer, principalmente, oro y plata (Brenning & Azócar, 2010; Urkidi, 2010). Sin embargo, el proyecto empezó con problemas, debido a que el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) presentado en 2001 preveía la remoción de campos de nieve (Brenning & Azócar, 2010). El plan contemplaba el traslado de 10 hectáreas de glaciares a una zona que contara con características geológicas y geomorfológicas similares (F. Li, 2018). Sin embargo, por problemas políticos y económicos, el proyecto fue paralizado hasta 2004, año en el que se presentó un nuevo EIA el cual fue rechazado la sociedad civil. Finalmente, el proyecto fue aprobado en 2006, pero se prohibió la remoción de los tres campos de nieve (Brenning & Azócar, 2010).

En Chile, Pascua-Lama fue el caso más conocido por ser un proyecto binacional, pero existen otros proyectos mineros que han causado la pérdida de varios glaciares, principalmente rocosos. Casos como la mina Sur-Sur, (División Andina de Codelco), la mina los Bronces (Anglo American) y la mina Antofagasta Mineral (Pelambres), han ocasionado la pérdida de glaciares rocosos en las cuencas de los ríos Aconcagua, Maipo y Choapa, afectando la disponibilidad

hídrica de las principales zonas urbanas de Chile (Chile Sustentable, 2013). La pérdida de los glaciares rocosos en Chile representó un problema grave para la población asentada en la parte baja, debido a que los glaciares rocosos son reservorios de agua muy importantes para zonas áridas y semiáridas como los Andes de Chile (Brenning & Azócar, 2010). Finalmente, esto llevó a la generación de conflictos entre la población y la empresa minera, teniendo como protagonistas a la población del valle de Huasco, los cuales eran los principales afectados. La remoción de glaciares propuesto en el proyecto Pascua-Lama y la alteración de los glaciares rocosos en la cuenca alta los afectaba directamente, debido a que ello podría representar la disminución de la disponibilidad hídrica, afectando sus medios de vida (Cortez & Maillet, 2018; Li, 2018).

En 2008, en el contexto de conflictos con la megaminería en Argentina, se aprueba la Ley 26418, Ley de Presupuestos Mínimos Ambientales de Protección de los Glaciares y Ambiente Periglacial, que buscaba la protección de los glaciares y el ambiente periglacial, de todo tipo de actividad humana que pueda generar impactos negativos (Isla, 2016). No obstante, esta ley fue vetada por el poder Ejecutivo semanas después de ser aprobada, debido a que otorgaba un estatus legal a los glaciares y ambientes periglaciares que afectaba directamente los intereses económicos de la industria minera (Basaure, 2020; Isla, 2016). Finalmente, en 2010, se aprueba la nueva Ley de Glaciares, Ley 26639, Ley de Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial, convirtiendo a Argentina en el primer país del mundo en tener una ley para la protección de glaciares.

El conflicto de Pascua-Lama en Chile, que inicialmente involucraba a las comunidades situadas en la cuenca baja del proyecto minero, acabó por expandirse a nivel nacional e internacional. Esto se debió a que el conflicto trascendió a la población en general y al ámbito político chileno (Cortez & Maillet, 2018; Herrera & Segovia, 2019). A raíz de este conflicto, Chile buscó la

aprobación de una ley para la protección de sus glaciares. En el año 2006, se introdujo el Proyecto de Ley sobre Protección de Glaciares, cuyo objetivo era establecer regulaciones para la protección de los glaciares con el propósito de garantizar la seguridad hídrica. Esta iniciativa fue discutida en diversas instituciones chilenas, sin embargo, a pesar de ingresar al Parlamento, no se tramitó en ese momento (H. A. Fernández & Ferrando, 2018).

En el 2014, se presentó el proyecto de ley, que busca la protección y preservación de glaciares, sus ambientes glaciares y periglaciares y que regula y prohíbe las actividades que puedan realizarse en ellos, pero, aún no ha logrado aprobarse. Sin embargo, el contexto desafiante de Chile, relacionado a la megasequía que afectó a las regiones más pobladas de este país entre 2010 y 2019 (Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia, 2015, 2022), hizo que la legislación ambiental entre como tema de importancia nacional (A. Fernández et al., 2021).

Al igual que en Argentina, el principal problema que obstaculizó su aprobación fue el conflicto de intereses y el poder que las empresas tienen sobre los poderes estatales, que se ve reflejado en la priorización de políticas de fomento a la inversión extranjera (Urkidi, 2010). Por otro lado, un problema que incidió en la demora de la aprobación del proyecto de la ley de protección de glaciares fue la falta de claridad en la definición de lo que es un glaciar, ya que existen de diversos tipos y con características diferentes. El problema se materializó al no contemplar dentro de la definición de glaciar a los glaciares rocosos, glaciares cubiertos por detritos, los ambientes periglaciares y el tamaño mínimo de un glaciar (A. Fernández et al., 2021; H. A. Fernández, 2017). El proyecto de ley buscaba proteger solo una parte de los glaciares chilenos existentes, que en gran medida eran los que se encontraban al sur, dentro del Sistema de Áreas Silvestres Protegidas, dejando de lado los glaciares de la zona semiárida del norte de Chile (H. A. Fernández, 2017). Asimismo, el proyecto de ley presentado no establecía mecanismos para la preservación de glaciares, sino solo la restricción de

cualquier tipo de actividad humana que pueda generar impactos negativos sobre estos (H. A. Fernández & Ferrando, 2018).

Tanto en Argentina como en Chile se ha seguido la línea lógica de restringir las actividades cerca a glaciares y ambientes periglaciares, sin embargo, no se han contemplado medidas para la mitigación o prevención de peligros de origen glaciar desencadenados por el cambio climático (Iribarren Anacona et al., 2018). A pesar de estas limitaciones, las iniciativas legislativas en Argentina y en Chile son pioneras en la protección de glaciares frente al impacto antrópico directo. No obstante, tanto en Argentina como en Chile la falta de claridad en los términos técnicos para definir lo que es y lo que no es un glaciar han causado problemas para su implementación. Un ejemplo de ello es el caso de los científicos argentinos del Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA). En el año 2016, la Asamblea Jáchal no se Toca (AJNST) realizó una denuncia pública contra el IANIGLA por establecer que el tamaño mínimo de los glaciares a inventariar sería de una hectárea. Posteriormente, diversas ONGs y Asambleas Socioambientales presentaron nuevas denuncias contra el IANIGLA. La causa de estas denuncias radicaba en que se consideraba que este límite no ofrecía protección a todos los glaciares y que, al fijar este umbral, se estaba beneficiando a empresas mineras como Barrick Gold (A. Fernández et al., 2021; Rojas & Wagner, 2021).

4.3.2. El estado legal de la conservación de glaciares en el Perú

En el Perú aún no se cuenta con una ley específica que tenga como objetivo la protección de los glaciares, pero sí existen mecanismos legales que incluyen el estudio y la protección de glaciares y ecosistemas de alta montaña (ver Tabla 4.2). El primer mecanismo es la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos (2009). Específicamente el Artículo 173 aborda el tema de los glaciares, pero no para su protección, sino para su estudio y monitoreo, con fines de determinar el impacto del cambio climático sobre estos. Asimismo, el Artículo 89 de esta Ley señala que

se deben desarrollar estrategias y planes para la prevención y adaptación a los efectos del cambio climático, y realizar análisis de vulnerabilidad de las fuentes de agua, entre ellos, los glaciares. Esto mismo se señala en el Artículo 3 de la Ley Marco Sobre Cambio Climático (2018), primera Ley de Cambio Climático en América Latina (Ministerio del Ambiente [MINAM], 2018), en el cual se manifiesta que se deben implementar acciones con fines de protección, conservación y restauración de ecosistemas frágiles, como los glaciares y ecosistemas de montaña, con el fin de asegurar la prestación de los servicios ecosistémicos.

Por su parte la Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña (PNGYEM), que se encuentra en elaboración, tiene la finalidad de establecer un marco estratégico que guíe las intervenciones en este tipo de ecosistemas. Esta política se está elaborando teniendo como base los objetivos prioritarios de la seguridad hídrica, la seguridad de las personas, la mitigación ante el efecto del cambio climático y el fortalecimiento de las cadenas de valor en zonas de montaña (INAIGEM, 2023). Esta política se fortalece con las Contribuciones Nacionalmente Determinadas (NDC, por sus siglas en inglés) que el Perú viene adoptando. Una medida de adaptación referido a glaciares es la implementación de Sistemas de Alerta Temprana (SAT) ante peligros de origen glaciar (Ministerio de Agricultura [MINAGRI] & MINAM, 2018). Esta medida es tomada con el fin de afrontar los peligros y riesgos de cambios en el sistema climático.

Sin embargo, las iniciativas contenidas en las leyes y políticas mencionadas giran alrededor de los impactos del cambio climático en los glaciares y ecosistemas de montaña, y no se menciona directamente el impacto de actividades humanas sobre estos y cómo protegerlos. Donde sí se establece una relación entre glaciares y actividades humanas es en el Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera (DS N° 042-2017-EM). En el Artículo 28 se manifiesta que el titular minero debe evitar la perforación de áreas cercanas a

glaciares y, en caso no sea posible, adoptar medidas de contingencia para evitar afectaciones. Asimismo, el Artículo 37 señala que, si el proyecto minero se encuentra a menos de 100 metros de distancia de una zona glaciaria, se deberá contar con la opinión técnica favorable del INAIGEM, quien evaluará el impacto que se podría generar en este tipo de ecosistemas. Pese a ello, aún no se cumplen estas disposiciones, y se desarrolla minería muy cerca a zonas glaciares, como en La Rinconada.

En febrero de 2021 se presentó el proyecto de Ley que protege las Cabeceras de Cuencas, Subcuencas y Fortalece la Sostenibilidad Financiera del Sistema Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado - SINANPE (Proyecto de Ley 7211-2020-CR). Esta ley buscaba declarar la intangibilidad de las cabeceras de cuencas cuando las aguas superficiales y subterráneas sean afectadas, en su cantidad y calidad por la acción directa de actividades humanas en las zonas altas, limitando e impidiendo su uso por las poblaciones. En octubre de 2021 se presentó un nuevo proyecto de ley con la misma lógica de protección de cabeceras de cuenca. El proyecto de ley que modifica la Ley N° 29338, Ley de Recursos Hídricos, modificada por la Ley N° 30640, y declara la intangibilidad de las cabeceras de cuenca. Esta ley busca reconocer las cabeceras de cuencas como zonas vulnerables, por lo que no se debería otorgar ningún derecho para su uso, disposición o vertimiento. Asimismo, dispone la anulación de las concesiones mineras vigentes y prohíbe la realización de cualquier tipo de actividad minera a una distancia menor a 30 kilómetros de cualquier cuerpo de agua.

Estos dos últimos proyectos de ley se aproximan más a la Ley de Glaciares de Argentina (2010) y el proyecto de Ley de Glaciares de Chile. Pues al buscar proteger las cabeceras de cuencas, se protege de manera explícita los glaciares, los cuales se ubican en estas cabeceras. Sin embargo, a pesar de los avances mostrados a nivel nacional, se evidencia que no se cumplen las leyes establecidas y no se respeta la intangibilidad de estas zonas.

Tabla 4.2 Iniciativas legales para la conservación y protección de glaciares y ecosistemas de montaña en el Perú

Año	Nombre	Abordaje	Estado
2009	Ley de Recursos Hídricos	<ul style="list-style-type: none"> - Estudio y monitoreo de glaciares - Desarrollo de planes y estrategias contra efectos del cambio climático - Realizar análisis de vulnerabilidad de las fuentes de agua 	Implementado
2015	Contribuciones Nacionalmente Determinadas	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar Sistemas de Alerta Temprana (SAT) ante peligros de origen glaciar 	En proceso
2017	Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera	<ul style="list-style-type: none"> - Evitar la perforación de áreas cercanas a glaciares - Adoptar medidas de contingencia para evitar afectaciones - Contar con la opinión técnica del INAIGEM si la labor minera se encuentra a menos de 100 metros 	Implementado
2018	Ley Marco Sobre Cambio Climático	<ul style="list-style-type: none"> - Implementar acciones de protección, conservación y restauración de ecosistemas frágiles, como glaciares y ecosistemas de montaña 	Implementado
2020	Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña	<ul style="list-style-type: none"> - Asegurar la contribución de los ecosistemas de montaña para la provisión de agua - Asegurar la contribución de los ecosistemas de montaña para la seguridad de las personas - Asegurar la contribución de los ecosistemas de montaña para la mitigación al cambio climático - Fortalecer las cadenas de valor sostenibles basadas en la biodiversidad de las montañas" 	En proceso
2021	Ley que protege las Cabeceras de Cuencas, Subcuencas y Fortalece la Sostenibilidad Financiera del SINANPE	<ul style="list-style-type: none"> - Declarar la intangibilidad de las cabeceras de cuencas si las aguas superficiales y subterráneas se ven afectadas, en su cantidad y calidad, por la acción directa de actividades humanas en las zonas altas 	En proceso
2021	Proyecto de ley que modifica la Ley de Recursos Hídricos	<ul style="list-style-type: none"> - Declarar la intangibilidad de las cabeceras de cuenca por ser zonas ambientalmente vulnerables. - Anular concesiones mineras vigentes y prohibir la realización de cualquier tipo de actividad minera a una distancia menor a 30 kilómetros de cualquier cuerpo de agua." 	En proceso

Fuente: Elaboración propia

4.4. Análisis del cambio de cobertura de suelo con Google Earth Engine

Durante los últimos años se han logrado importantes avances en las plataformas de procesamiento de grandes datos espaciales. El surgimiento de GEE, como una plataforma en la nube, ha posibilitado que se trabajen con grandes bases de datos (Ponganan et al., 2021; Z. Zhang et al., 2021). Con GEE, ya no es necesario descargar datos cartográficos y satelitales, ya que se puede acceder a ellos directamente a través de un repositorio – Earth Engine Data Catalog, que se encuentra alojado en esta plataforma (Qu et al., 2021).

GEE además de ser gratuita, ofrece un gran potencial para resolver problemas asociados a los largos periodos de tiempo en el procesamiento de la información (Z. Zhang et al., 2021). Esto se debe a que la potencia computacional, el almacenamiento y los tiempos de procesamiento son las principales limitaciones de los softwares tradicionales de escritorio (Qu et al., 2021), tales como ArcGIS, QGIS, entre otros. GEE supera estas limitaciones, especialmente cuando se trabaja con series de tiempo y áreas de estudio amplias. Además, GEE permite que otros investigadores puedan llevar a cabo investigaciones similares al compartir códigos, repositorios y archivos de interés (Piao et al., 2021; Qu et al., 2021; Z. Zhang et al., 2021).

GEE proporciona métodos para la clasificación basada en píxeles, entre ellos, algoritmos de aprendizaje automático (Machine Learning - ML) (Srinet et al., 2020). ML es una técnica eficiente para el análisis de datos, incluyendo los datos de observación de la Tierra. ML facilita la clasificación de los píxeles de las imágenes satelitales en las categorías que el usuario determine, obteniendo resultados satisfactorios al realizar mapeos de la cobertura del suelo (Google Developers, 2023). El aprendizaje supervisado es una de las técnicas de ML que consiste en hacer predicciones basadas en datos de entrada reales, realizando clasificaciones de los datos en categorías (clasificación) o prediciendo resultados (regresión) (Gong, 2022).

La clasificación supervisada, que es una parte del aprendizaje supervisado, se utiliza ampliamente en la teledetección para la clasificación de la cobertura terrestre. Esta técnica emplea datos observados reales como insumo, los cuales son entrenados para llevar a cabo la clasificación de manera automática (Ponganan et al., 2021; Zeng et al., 2020).

Uno de los algoritmos que se emplea en la clasificación supervisada es Random Forest (RF). Este algoritmo ha ganado popularidad en la clasificación de imágenes satelitales debido a la precisión de sus clasificaciones y la rapidez de su procesamiento. Además, destaca por su habilidad para integrar datos provenientes de diversas fuentes, manejar grandes volúmenes de datos, su insensibilidad a valores atípicos y su eficiente rendimiento. RF tiene la capacidad de trabajar con grandes bases de datos y mediante el uso de los árboles de decisión es capaz de identificar las variables más importantes para la predicción del modelo. (Belgiu & Drăgut, 2016; Roteta & Oliva, 2020; Xu et al., 2021). RF es un método de clasificación de aprendizaje automático que se basa en diversos árboles de decisión, generados por subconjuntos de datos aleatorios. Cada árbol generado por el conjunto de características emite un voto, de modo que el resultado final depende de los resultados de clasificación de la mayoría de árboles individuales (Breiman, 2001; Cutler et al., 2012; Xu et al., 2021).

Un análisis de 349 artículos desarrollados con GEE en la última década muestra que Random Forest es el algoritmo más frecuente utilizado para la clasificación de imágenes satelitales (Phan et al., 2020). Este algoritmo se ha aplicado para la detección de diversas coberturas como expansión de áreas dedicadas a la explotación minera a pequeña escala. Por ejemplo, Nyamekye et al. (2021) mapearon los cambios en áreas de minería artesanal a pequeña escala en Ghana utilizando algoritmos de aprendizaje automático y aprendizaje profundo, como redes neuronales artificiales, Random Forest, Máquina de Vector de Soporte y Redes Neuronales Convolucionales Basadas en Píxeles. El resultado al que

llegaron es que los cuatro algoritmos fueron versátiles al clasificar las coberturas. Por su parte, Cao et al. (2020) y Z. Zhang et al. (2021) utilizaron el algoritmo Random Forest en la plataforma Google Earth Engine para mapear áreas urbanas en China. Ambas investigaciones concluyeron que este algoritmo de aprendizaje en máquina clasifica de manera precisa las coberturas de suelo con 90 % de exactitud final en ambos casos. Sin embargo, para llegar a resultados robustos, recomiendan utilizar métodos de optimización para mejorar la precisión de la clasificación, como el uso de series temporales, tener en cuenta factores climáticos (Cao et al., 2020) y también usar funciones reductoras como la media (Z. Zhang et al., 2021).

GEE y Random Forest también se han utilizado para la detección de cambios en el uso y cobertura del suelo para áreas extensas y periodos prolongados. Por ejemplo, Phan et al. (2020), Piao et al. (2021) y Zeng et al. (2020) utilizaron esta plataforma en la nube y el algoritmo Random Forest para mapear los cambios en las coberturas de Mongolia, Corea del Norte y Sudáfrica. Las investigaciones realizadas concluyen que Random Forest es un algoritmo robusto y que clasifica las coberturas con gran exactitud, en algunos casos por encima del 95 %. Por su parte Roteta & Oliva (2020) utilizaron Random Forest para mapear las áreas quemadas en Chile. Ellos obtuvieron un mapa de áreas quemadas con una precisión mayor a la que llegó la clasificación de la Corporación Nacional Forestal de Chile.

Ochochoque (2017) utilizó el algoritmo Random Forest en GEE para mapear las áreas de expansión de minería ilegal en la región de Madre de Dios. Los resultados a los que llegó fue que entre 1990 y 2016, el área perdida de bosque por la expansión de la minería ilegal fue de 32 km². Asimismo, concluyó que el algoritmo Random Forest es efectivo para ser usado en estudios multitemporales de cambio de cobertura de suelo.

Los resultados de los mapeos de coberturas de suelo utilizando el algoritmo Random Forest muestran ser robustos, y son favorecidos si son trabajados en plataformas como GEE, debido a que poseen grandes bases de datos satelitales que incluyen los archivos MODIS, Landsat, Sentinel, productos de cobertura terrestre, datos geofísicos, ambientales y socioeconómicos, que datan de hace más de 40 años (Xu et al., 2021; Zeng et al., 2020).



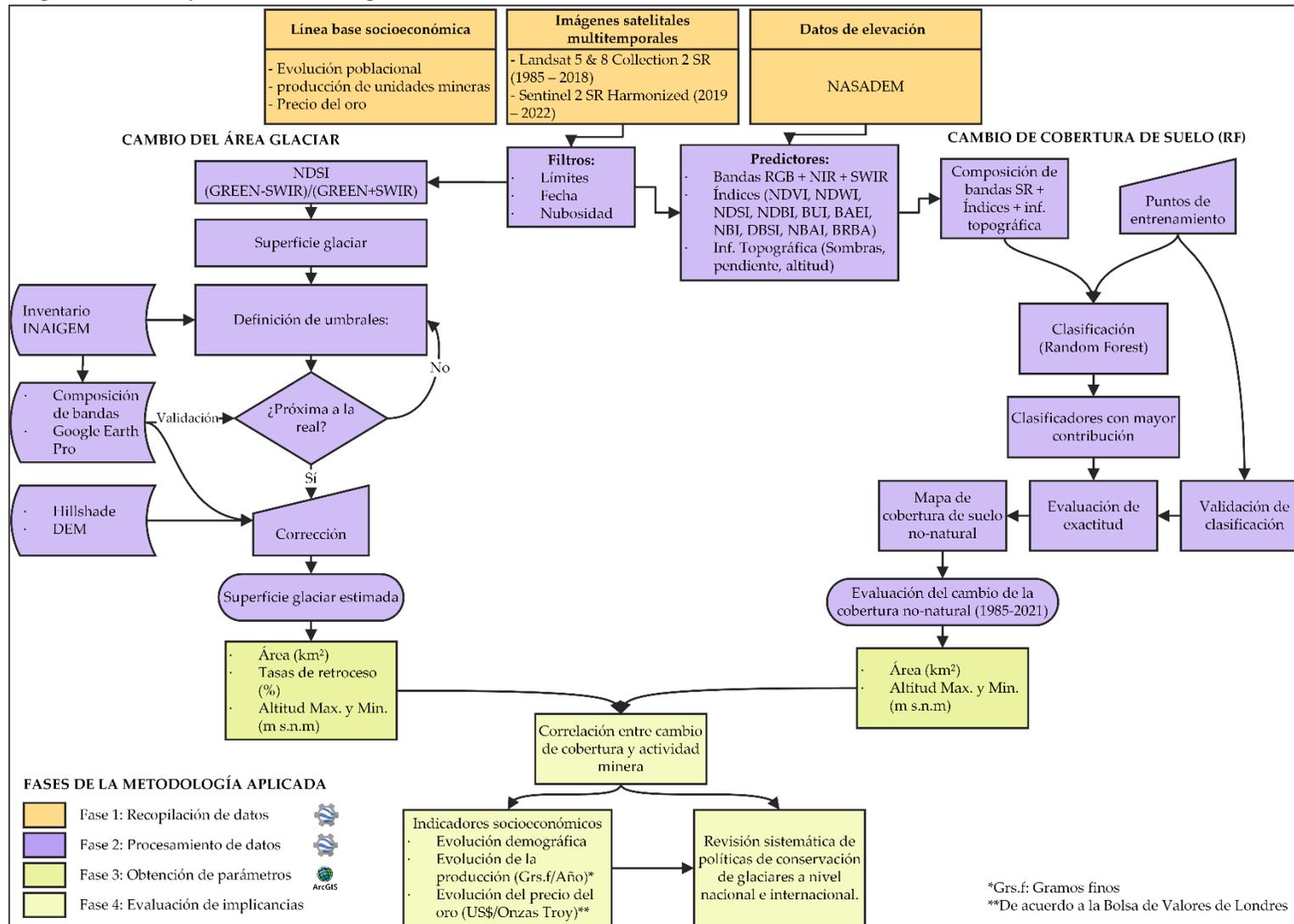
CAPÍTULO 5

METODOLOGÍA

La metodología aplicada en esta tesis consta de 4 fases (ver Figura 5.1). En la primera fase se realizó la recopilación de datos cartográficos, satelitales y socioeconómicos. Esta información recolectada será utilizada para estimar la evolución de la superficie glaciaria en las dos áreas de estudio (ver Mapa 2.1) y estimar el cambio de la cobertura del suelo desencadenado por la actividad minera cerca de la superficie glaciaria en La Rinconada. Esta información servirá para comparar los cambios en la cobertura glaciaria y cobertura no-natural con indicadores socioeconómicos ligados a la actividad minera. De este modo, se busca analizar si existe un patrón de correlación que permita estimar el impacto de la minería en los glaciares colindantes al centro poblado minero La Rinconada.

La segunda fase comprende el procesamiento de los datos obtenidos. El procesamiento fue realizado en su totalidad en la plataforma GEE. Para la estimación de la superficie glaciaria se usó el Índice Diferencial de Nieve Normalizado (NDSI). Mientras que para estimar el cambio de cobertura no natural (cambios derivados de la actividad minera, incluyendo la urbanización y las áreas degradadas) se hizo una clasificación supervisada mediante el algoritmo de aprendizaje automático Random Forest (RF). La tercera fase comprende la obtención de parámetros del cambio en la superficie glaciaria y en la cobertura no-natural. Esto se realizó con el fin de analizar los cambios físicos y ligarlos con los cambios socioeconómicos, de manera que permita estimar el impacto de la minería sobre los glaciares.

Figura 5.1 Diagrama de flujo de la investigación



5.1. Recopilación de datos

5.1.1. Información espacial

La escala temporal de la tesis abarca un periodo de 38 años, desde 1985 hasta el 2022. Aunque no se realizó el mapeo de la cobertura glaciar de los años 2002 y 2012, debido a la no disponibilidad de imágenes satelitales. A pesar de ello, se interpolaron los valores de estos años con valores anteriores para mantener la serie temporal continua. Se eligió 1985 como periodo inicial, debido a la disponibilidad de imágenes satelitales, ya que en marzo de 1984 se lanza el satélite Landsat 5 con los sensores Multiespectral Scanner System (MSS) y Thematic Mapper (TM), quedando fuera de servicio en 2013 (USGS, 2021b).

Para completar el periodo de estudio 2013 - 2018 se decidió usar las imágenes del satélite Landsat 8, el cual fue lanzado el 2013 con el sensor Operational Land Imager (OLI) (USGS, 2021b). Finalmente, para completar el periodo 2019 - 2022, se decidió usar las imágenes del satélite Sentinel-2, debido a que presenta una mejor resolución espacial en comparación a Landsat (ESA, 2021) (ver Tabla 5.1).

Tabla 5.1 Características de las imágenes Landsat 5 TM, 8 OLI (Colección 2) y Sentinel-2

	Resolución espectral	Resolución espacial (m)	Resolución temporal	Resolución radiométrica	Calidad
Landsat 5 TM	7	Bandas 1-5 y 7 Banda 6	30 120	16 días	8 bits
Landsat 8 OLI	11	Bandas 1-7 y 9 Banda 8 Bandas 10 y 11	30 15 100	16 días	16 bits
Sentinel 2 MSI	13	Bandas 2-4 y 8 Bandas 5-7, 8a y 11 y 12 Bandas 1, 9 y 10	10 20 60	5 días	12 bits

Fuente: Elaboración propia con base en ESA (2021) y USGS (2021a)

Las imágenes satelitales para el periodo de estudio se encuentran alojadas dentro del Earth Engine Data Catalog (<https://developers.google.com/earth-engine/datasets>). Se accedió a estos Datasets desde el Earth Engine Code Editor (<https://code.earthengine.google.com/>). Se optó por utilizar esta plataforma

debido a que facilita el trabajo con grandes cantidades de datos, además de realizar todo el procesamiento en la nube (Qu et al., 2021; Z. Zhang et al., 2021) (para mayor detalle ver Subsecciones 3.3 y 4.4). Para el periodo 1985 – 2018 se optó por usar la Colección 2 de Landsat Tier 1, la cual incluye la corrección radiométrica Bottom of Atmosphere (BOA) de reflectancia superficial (SR), y de la temperatura superficial (TR) (USGS, 2021a). En términos sencillos, BOA es la corrección atmosférica de los efectos de dispersión y absorción ocasionados por las partículas atmosféricas (Chen et al., 2018; Young et al., 2017). Otra mejora que se realizó en esta colección fue la mejora en la precisión geométrica por medio del restablecimiento de los puntos de control terrestre (para mayor detalle de las mejoras ver (USGS, 2021a). Para el periodo de estudio 2019 – 2022, se decidió usar la Colección Harmonized de Sentinel-2 MSI, con corrección Nivel-2A.

Para la elección de las imágenes se tomó en cuenta el periodo de captura, siendo las más idóneas las imágenes capturadas durante la temporada seca en invierno austral (mayo a septiembre), aunque hubo años en los que se eligió otros meses debido a que las imágenes de mayo a septiembre contenían nieve fresca o un porcentaje alto de nubosidad (ver Anexo 1). Ello a causa de que es más probable que las imágenes en este periodo se encuentren sin la presencia de nieve estacional, la cual puede llevar a clasificaciones erróneas sobreestimando la superficie glaciar (Drenkhan et al., 2018; Veettil et al., 2017). De este modo se puede realizar una delimitación de la superficie glaciar más próxima a la real.

Para la obtención de información topográfica se decidió utilizar el Modelo Digital de Elevación (DEM, por sus siglas en inglés) NASADEM el cual es la versión más reciente y el nuevo producto de elevación estándar de la NASA. Este producto también se encuentra disponible en el catálogo de datos de GEE. El NASADEM se basa en la Shuttle Radar Topography Mission (SRTM), corregido con datos de otros productos como las mediciones de elevación de superficie del satélite de elevación de hielo, nubes y tierra (ICESat), puntos de control del altímetro láser

de geociencia (GLAS) de la NASA, productos estereoscópicos del ASTER GDEM (Buckley, 2020). El NASADEM tiene una resolución espacial de 30 metros y cubre la superficie terrestre entre 60°N y 56°S de latitud, que representa alrededor del 80 % de la superficie terrestre total (NASA JPL, 2020).

5.1.2. Indicadores socioeconómicos indirectos

Relacionar el impacto de la minería en el retroceso glaciar es desafiante, debido a que no existe una base extensa de estudios para poder atribuir el impacto de esta actividad sobre los glaciares. Además, como se mencionó en la Subsección 4.2, son pocas las investigaciones sobre minería y su impacto en los glaciares, y con un alcance limitado, por lo que no se tiene antecedentes metodológicos robustos. Por ello, en esta investigación se decidió usar indicadores socioeconómicos indirectos, de este modo, establecer correlaciones mediante ensayos estadísticos entre el cambio en la cobertura de suelo no-natural con el desarrollo de los indicadores socioeconómicos elegidos. Los indicadores socioeconómicos indirectos elegidos son la evolución poblacional/expansión urbana, la producción de las unidades mineras en el área de estudio y la evolución internacional del precio del oro. Se eligieron estos indicadores debido a que la evolución de estos indicadores puede llegar a tener relación con la minería y, sobre todo, son indicadores de fácil acceso.

Las evidencias han demostrado que sí hay una relación entre la evolución poblacional/expansión urbana y la actividad minera. En China, se experimentó la expansión urbana de la zona de Pingshuo de 174.2 ha a 1 164.8 ha entre 1986 y 2013, debido al desarrollo minero. Uno de los factores desencadenantes fue la generación de empleo, lo cual atrajo a población aledaña, dedicada en un principio a actividades agrarias, hacia los centros mineros (X. Zhang et al., 2016). Ello generó un incremento poblacional, y esto a su vez, la expansión del área urbana. A estos procesos de interacción entre minería y urbanización Bryceson & MacKinnon (2012) llaman “urbanización mineralizada”, que definen como el

impacto de los ciclos de auge y crisis de producción de los minerales y materias primas en el crecimiento urbano.

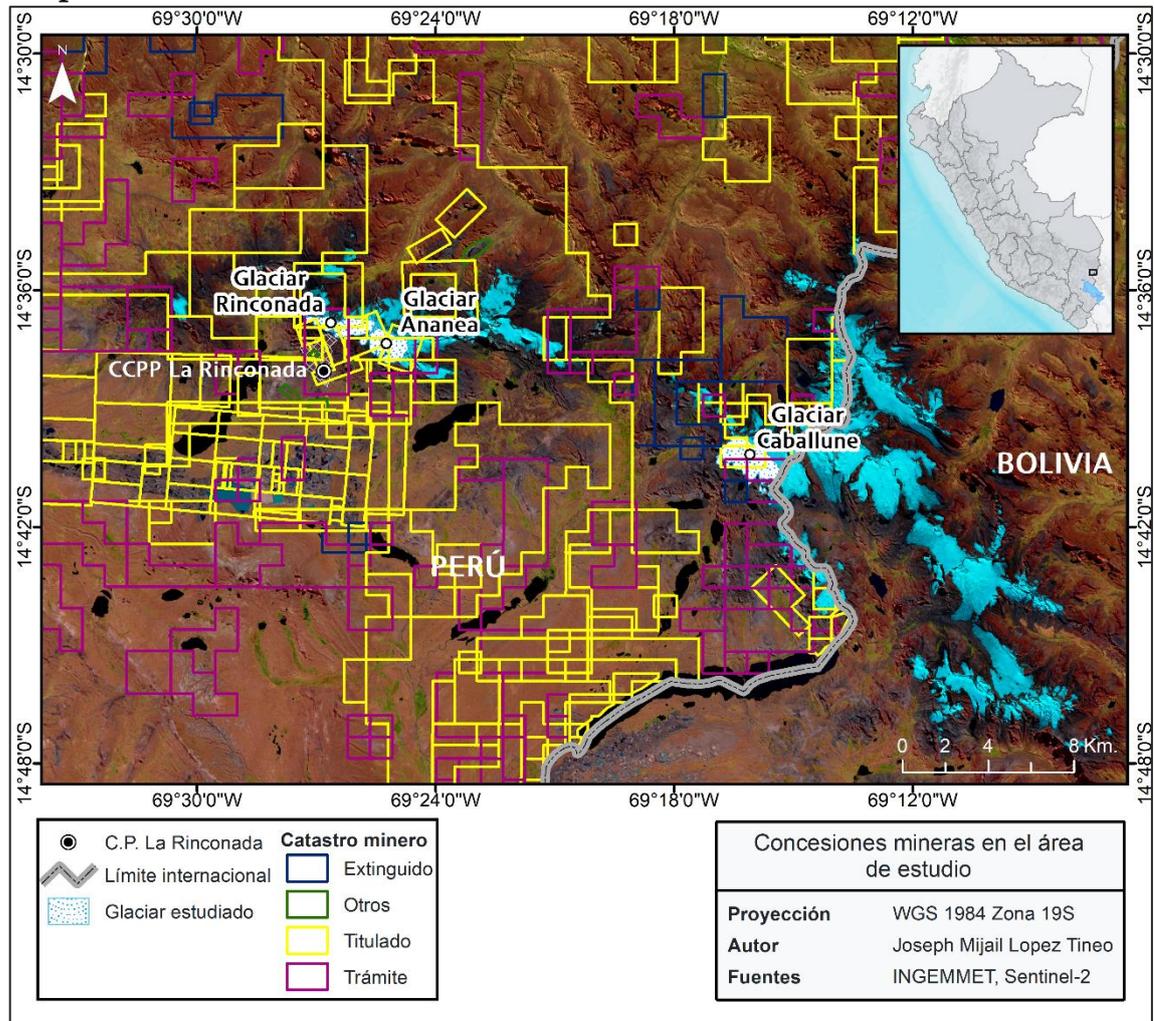
El rápido aumento del precio de las materias primas ha tenido un efecto estimulante sobre el tamaño de la población y el crecimiento de las zonas urbanas. En Australia, las ciudades mineras Kalgoorlie-Boulder, Port Hedland y Karratha-Dampier, la expansión del sector minero, debido a la alta demanda de materias primas entre 1999 y 2008, contribuyó al crecimiento poblacional (Lawrie et al., 2011). Por su parte, Giraldo (2017) y Giraldo & Vasquez (2019) encontraron que, el principal motivo que influye en la expansión o contracción de la explotación minera informal, en la cuenca media del Ramis en Puno, fue la variación internacional del precio del oro. Esto debido a que la expansión del área minera coincidió con el periodo en que el precio del oro llegó a su pico, entre 2009 y 2013.

La información demográfica se obtuvo de los Censos Nacionales de Población de 1981, 1993, 2007 y 2017 (INEI, 1981, 1993, 2007, 2017). La información demográfica se descargó a nivel distrital y también a nivel de los centros poblados de La Rinconada y Cerro Lunar de Oro, centros poblados mineros ubicados cerca del área glaciar. La información de producción minera en el área de estudio se obtuvo del MINEM, el cual cuenta con estadística mensual de producción a nivel de Unidades Mineras desde el 2001 hasta la actualidad (MINEM, 2023). Es fundamental mencionar que los datos de este indicador son estimaciones, debido a que la información solo está disponible para concesiones mineras formales que operan en el área de estudio. Sin embargo, como se mencionó en la Subsección 3.2, la situación laboral y legal de la minería en La Rinconada es intrincada, atribuido al complejo sistema de subcontrataciones existente.

En el registro de producción de oro del MINEM figuran los datos de la Unidad Minera Ana María, perteneciente a la Corporación Minera Ananea S.A, la cual tiene concesionada gran parte del área de estudio (ver Mapa 5.1). En este registro

figura información desde el 2001 hasta el 2022 (MINEM, 2023). Por último, la información de los precios del oro se obtuvo del Banco Central de Reserva del Perú (BCRP), el cual cuenta con datos mensuales desde el 2000 hasta el 2022 (BCRP, 2023).

Mapa 5.1 Concesiones mineras en el área de estudio



Fuente: Elaboración propia

5.2. Procesamiento de datos

5.2.1. Cambio anual de la cobertura glaciar

Para la delimitación de la superficie glaciar se utilizó el método NDSI, el cual permite hacer una discriminación espectral de la nieve y hielo de otros tipos de cobertura (Drenkhan et al., 2018; A. V. Kulkarni et al., 2002; Silverio & Jaquet, 2005). Para ello, se utiliza las bandas de infrarrojo de onda corta (SWIR) y la banda verde. Esto se debe a que la reflectancia de la nieve/hielo es alta en la banda

verde y baja en la banda SWIR (Drenkhan et al., 2018; A. V. Kulkarni et al., 2002). La alta reflectancia de la nieve/hielo en el espectro visible se debe a las múltiples refracciones de la luz que incide sobre estas coberturas. Mientras que la absorción es muy alta en la banda SWIR, lo que genera que la reflectancia sea baja en esta banda (A. V. Kulkarni et al., 2002). Esta metodología ha demostrado ser robusta para la delimitación de glaciares libres de escombros y utiliza las bandas visible e infrarrojo de onda corta (SWIR). La fórmula del NDSI es la siguiente:

$$NDSI = \frac{(Banda_{visible} - Banda_{infrarrojo})}{(Banda_{visible} + Banda_{infrarrojo})}$$

Debido a que el Landsat 5 no tiene la banda SWIR, esta se reemplazó con la banda de infrarrojo cercano (NIR). Las fórmulas para las diferentes imágenes se detallan en la Tabla 5.2.

Tabla 5.2 Bandas usadas en el NDSI de acuerdo a los satélites.

Satélite	Bandas	Fórmula
Landsat 5	GREEN (Banda 2) y NIR (Banda 5)	$NDSI = \frac{(Banda\ 2 - Banda\ 5)}{(Banda\ 2 + Banda\ 5)}$
Landsat 8	GREEN (Banda 3) y SWIR (Banda 6)	$NDSI = \frac{(Banda\ 3 - Banda\ 6)}{(Banda\ 3 + Banda\ 6)}$
Sentinel-2	GREEN (Banda 3) y SWIR (Banda 11)	$NDSI = \frac{(Banda\ 3 - Banda\ 11)}{(Banda\ 3 + Banda\ 11)}$

Fuente: Elaboración propia con base en Silverio & Jaquet (2005) y Veettil et al. (2018)

A pesar de mostrar resultados robustos, este método tiene limitaciones que deben ser corregidas. La delimitación de la superficie glaciar en zonas de alta montaña es desafiante, debido a las pendientes pronunciadas y las sombras existentes (Veettil, 2018). A pesar de ello, Silverio & Jaquet (2005) encontraron que los valores del NDSI son similares para zonas expuestas al sol y también para las zonas que se encuentran en sombra, por lo que esta metodología es robusta para delimitar la superficie glaciar.

Asimismo, la delimitación se puede dificultar debido a que la reflectancia de la nieve y hielo puede variar en función de la cantidad de impurezas y la película de agua sobre la superficie de los glaciares (Veettil, Ruiz Pereira, et al., 2016). Por

ello, se recomienda usar umbrales bajos, para de este modo incluir la mayor parte del hielo glaciar que podría estar cubierto por partículas de polvo u otras (Paul et al., 2013). Por ejemplo, Drenkhan et al. (2018) utilizaron umbrales de NDSI en la cuenca Vilcanota-Urubamba entre 0.30 – 0.41 para imágenes Landsat 5 TM y 0.65 – 0.80 para imágenes Sentinel-2 MSI. Por su parte, (Veettil et al., 2017, 2018) utilizaron imágenes Landsat 5 TM con umbrales de NDSI de 0.5 – 0.6 en la Cordillera Apolobamba. Del mismo modo, Veettil & Simões (2019) utilizaron umbrales entre 0.45 – 0.55 para la misma región.

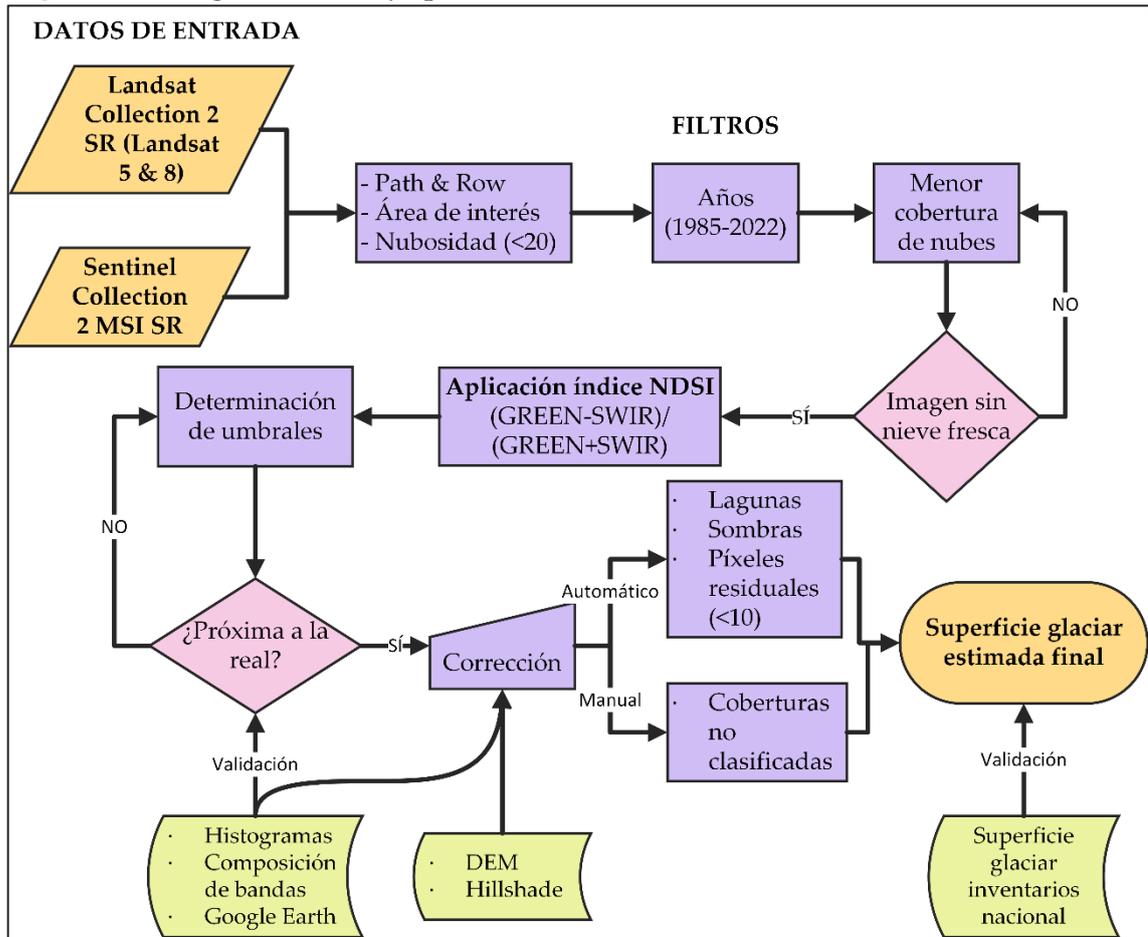
La selección del umbral es un reto, debido a que, si el umbral es pequeño, existe la posibilidad de clasificar lagunas congeladas u otros tipos de coberturas como glaciares. Por el contrario, si se establece un umbral alto, existe la posibilidad de subestimar los límites del glaciar y dejar fuera algunas zonas cubiertas por partículas finas (Veettil, 2018). Para disminuir estos errores de esta clasificación semiautomática y fortalecer el método, es necesario la edición manual, de modo que se puedan fusionar o descartar áreas residuales, eliminar áreas clasificaciones erróneas como nubes o cuerpos de agua y agregar glaciares cubiertos por escombros, que pudieron no haber sido identificados (Drenkhan et al., 2018). Para ello, es necesario utilizar fuentes de validación, como el inventario de glaciares, el cual fue elaborado por el INAI GEM en 2018 y 2020.

Procedimiento para el cálculo del NDSI en GEE

El flujo metodológico para el cálculo del NDSI se resume en la Figura 5.2. El primer paso fue seleccionar las colecciones de imágenes Landsat 5 & 8 SR y Sentinel-2 Colección 2. Luego de ello se aplicó el filtro Path & Row, para obtener solo las imágenes que componían el área de estudio. Luego de ello se aplicó el filtro “Bounds” para recortar las imágenes al área de estudio. Como siguiente paso se aplicó un primer filtro de nubosidad (<20 %) a las colecciones, para de este modo obtener imágenes sin ruido de nubes que alteren la clasificación. Seguidamente, se aplicó el filtro “Date” para obtener las imágenes entre 1985 y

2022. Seguido a ello se aplicó el filtro para elegir automáticamente la imagen con menos nubosidad, y se procedió a la visualización de cada imagen para asegurar que contaran con la calidad necesaria. En caso de que la imagen seleccionada tuviera un porcentaje alto de nubes o la presencia de nieve fresca, se procedió a seleccionar la imagen de forma manual.

Figura 5.2 Diagrama de flujo para el cálculo de NDSI en GEE



Fuente: Elaboración propia

Después de tener la selección final de las imágenes se prosiguió con la creación de la función para el cálculo del NDSI, que luego fue aplicado a cada una de las imágenes. Seguidamente se aplicó los umbrales para cada año (ver Anexo 1), para ello se probaron varios umbrales y se consideró la distribución de píxeles en un histograma, una composición de bandas y la visualización de imágenes en Google Earth (para los años disponibles).

Luego de tener esta primera clasificación se continuo con las correcciones semiautomáticas. El primer paso consistió en detectaron sombras que pudieran haber dejado áreas sin clasificación. Para ello se utilizó un “hillshade” con los valores de ángulo solar y azimut de cada imagen. Con ello se pudo visualizar que había parte extensas que no fueron clasificadas debido a las sombras. Teniendo en cuenta ello, se hizo máscaras de sombras de manera manual, para luego agregar estas áreas a la clasificación.

La siguiente máscara aplicada fue para eliminar lagunas, sobre todo a las imágenes de Sentinel 2, ya que la clasificación con el NDSI no distinguió entre glaciares y lagunas. Para ello se utilizó el Índice Diferencial de Agua Normalizado (NDWI, por sus siglas en inglés), que mostró una óptima diferenciación entre glaciares y lagunas. Para el caso de las imágenes de Landsat 5, había zonas de aguas degradadas que se clasificaron como glaciar, se intentó aplicar el índice NDWI, sin embargo, no funcionó debido a que no discriminaba estas aguas contaminadas y los glaciares de manera correcta. Por esta razón, se decidió realizar una máscara manual para eliminar estos cuerpos de agua. Luego de ello se aplicó una máscara buffer para eliminar nieve residual, para ello se utilizó la clasificación glaciar del año 1985 con un buffer de 200 metros.

Seguido de ello, se convirtió el archivo ráster de la clasificación a shapefile para poder agregar un campo de “Área” (ha) y poder filtrar píxeles residuales de manera automática. Para ello, se utilizó un umbral de 10 píxeles en las imágenes Landsat 5 & 8 y un umbral de 0.9 ha en las imágenes Sentinel 2. Finalmente se exportaron los resultados para la corrección manual en caso ser necesario y calcular los parámetros establecidos.

5.2.2. Cambio multitemporal de la cobertura no-natural

Los impactos de la minería sobre los ecosistemas se pueden estimar por medio del cambio en la cobertura del suelo. Giraldo (2017) y Giraldo & Vasquez (2019) estimaron el impacto de la minería en la cuenca alta del río Ramis, en la provincia

de San Antonio de Putina, Puno, por medio del Cambio del Uso del Suelo. Los autores demostraron que las tasas de mayor cambio se dieron cuando el sector minero experimentó su mayor auge en las últimas décadas. Sin embargo, esta metodología fue usada en una zona de minería de llanura aluvial, por lo que los cambios en el uso de suelo por acción de la actividad minera se podían distinguir fácilmente. El caso del área de estudio de esta tesis es diferente, debido a que el tipo de minería presente es por socavón, por lo que los impactos son más difíciles de evidenciar.

Por ello, para poder correlacionar el impacto minero en el retroceso glaciar se hizo una clasificación de la cobertura de suelo no-natural entre 1985 y 2022. De este modo, es posible estimar cómo ha variado en extensión el suelo no-natural (centro poblado, carreteras, equipamiento minero, entre otros) y establecer correlaciones con el retroceso glaciar. Para ello, se usó el clasificador supervisado Random Forest Smile (Statistical Machine Intelligence and Learning, v1) el cual es una adaptación de Random Forest disponible en GEE.

Smile es un sistema de aprendizaje rápido y automático que cuenta con un gran conjunto de algoritmos de aprendizaje automático, interpolación, visualización, entre otros, en JAVA y SCALA (H. Li, 2023a, 2023b). En aprendizaje automático, Smile agrupa algoritmos de clasificación, regresión, selección, agrupamiento, búsqueda de vecino más cercano, aprendizaje de secuencias, entre otros (H. Li, 2023a, 2023b), lo que lo hace un motor de aprendizaje completo.

Random Forest es uno de los algoritmos más usados para clasificar la cobertura de suelo debido a que solo se necesita optimizar dos parámetros, el número de árboles (*n_{tree}*) y el número de variables por nivel (*m_{try}*) (Phan et al., 2020), además de las ventajas mencionadas en la Subsección 4.4.

a. Variables de entrada

Las variables predictoras son usadas como datos de entrada. Estas son las encargadas de predecir la categoría a la que pertenece cada una de las muestras (Piao et al., 2021). Para esta investigación se utilizaron 22 variables predictoras, entre bandas, índices espectrales e información topográfica (Tabla 5.3).

Tabla 5.3 Variables predictoras para la clasificación de cobertura no-natural

Nombre	Fórmula
Índice diferencial de vegetación normalizado (NDVI)	$\frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Índice diferencial de agua normalizado (NDWI)	$\frac{NIR - BLUE}{NIR + BLUE}$
Índice diferencial de nieve normalizado (NDSI)	$\frac{GREEN - SWIR}{GREEN + SWIR}$
Índice diferencial de superficie construida normalizado (NDBI)	$\frac{SWIR - NIR}{SWIR + NIR}$
Índice de superficie construida (BUI)	$\frac{SWIR1 - NIR}{SWIR1 + NIR} - \frac{NIR - RED}{NIR + RED}$
Índice de extracción de superficie construida (BAEI)	$\frac{RED + 0.3}{GREEN + SWIR1}$
Nuevo índice de superficie construida (NBI)	$\frac{RED - SWIR}{NIR}$
Índice de suelo desnudo seco (DBSI)	$\frac{(SWIR1 - GREEN)}{(SWIR1 + GREEN)}$
Índice normalizado de superficie construida (NBAI)	$\frac{[(SWIR2 - SWIR1)/GREEN]}{[(SWIR2 + SWIR1)/GREEN]}$
El coeficiente de banda para la superficie construida (BRBA)	$\frac{RED}{SWIR1}$
Elevación	m s.n.m
Pendiente	Grados
Orientación	Grados

Fuente: Elaboración propia

b. Datos para las muestras de entrenamiento y validación

En condiciones idóneas, las áreas de entrenamiento y validación deberían ser recogidas en campo. Sin embargo, debido a la poca accesibilidad del área de estudio de esta investigación y los costos que representa, se decidió optar por otros mecanismos. Todas las áreas de entrenamiento y validación se recogieron mediante la interpretación visual de imágenes Landsat 5 & 8 y Sentinel 2 y también imágenes disponibles en Google Earth Pro. Este tipo de metodología ha

sido ampliamente aplicada en investigaciones anteriores (Phan et al., 2020). En la mayoría de casos el tamaño de las muestras está limitado por la disponibilidad de recursos para la recogida de datos (Stehman & Foody, 2019). Una fórmula utilizada para saber el tamaño de la muestra es la siguiente:

$$n = \frac{z^2 p(1 - p)}{d^2}$$

Donde:

- n es el número de muestras por clase,
- $z = 1.645$ o 1.96 para un intervalo de confianza de 90 y 95 % respectivamente. La puntuación z es una métrica estadística que determina cuántas desviaciones estándar se encuentra un valor con respecto a la media (Riley, 2017).
- d es la semiamplitud deseada del intervalo de confianza y
- p representa la exactitud global prevista en caso de muestreo aleatorio simple.

La elección del valor de “ d ” varía de acuerdo a la importancia que se le asigna a cada clase. De este modo, una clase prioritaria podría tener un “ d ” más bajo, es decir un intervalo más estrecho para dicha clase, mientras que una clase menos importante podría tener un “ d ” más alto. De acuerdo a Stehman & Foody (2019), en la fase de planificación no se conoce la exactitud global, por lo que el valor de “ p ” se elige de manera discrecional. Para los fines de esta investigación, se decidió tomar $z = 1.96$, que es una medida estándar en estadística que indica que el 95 % de los valores sitúan dentro de un rango de ± 1.96 en la puntuación z , es decir, estos valores están a no más de dos desviaciones estándar del valor medio (ESRI, 2021). Asimismo, un valor $p = 0.8$, ya que se prevé tener una exactitud global por encima del 80 %.

Para esta investigación se decidió dividir la cobertura del suelo en siete clases, tomando como base las clases existentes en el mapa de cobertura del suelo

(MINAM, 2015). Los resultados del tamaño de la muestra por clase se describen a continuación.

Tabla 5.4 Tamaño de muestras por clase

Clase	Urbano	Suelo desnudo	Glaciar	Laguna	Humedal	Pajonal	Área degradada
d	0.04	0.045	0.45	0.045	0.05	0.05	0.04
n	384.16	303.54	303.54	303.54	245.86	245.86	384.16

Fuente: Elaboración propia. d = semiamplitud del intervalo de confianza. n = número de muestras por clase

Se debe aclarar que solo las seis primeras clases están incluidas en el mapa de cobertura de suelo del MINAM (2015). La clase “área degradada” es una clase propuesta para esta investigación. Esta clase incluye a los depósitos de material residual proveniente de las galerías mineras, las zonas de explotación minera a cielo abierto y los relaves mineros.

Como se observa en la Tabla 5.4 se dio prioridad a las clases “urbano” y “área degradada” debido a que lo que buscamos es mostrar el cambio de cobertura no natural ligado a minería en la zona colindante a La Rinconada. Del total de áreas de entrenamiento recogidas, el 80 % fueron destinadas como datos de entrenamiento para la ejecución del algoritmo y el 20 % restante fueron utilizados como datos de validación. Se realizó esta división tomando en consideración estudios como Cao et al. (2020) y Piao et al. (2021), los cuales consideraron dicha proporción adecuada para evaluar los modelos de clasificación.

c. Clasificación de la cobertura de suelo no-natural

Los clasificadores que se basan en el aprendizaje automático han demostrado ser útiles para la identificación de patrones en características espaciales complejas (Piao et al., 2021). El algoritmo de clasificación supervisada Random Forest ha demostrado rendir de manera idónea para la clasificación de la cobertura de suelo. Este algoritmo ha mostrado buenos resultado debido a su análisis eficiente y otras ventajas como el tratamiento de numerosas variables con diferentes

características y su poca sensibilidad al ruido, como valores atípicos y el sobre entrenamiento (Piao et al., 2021).

Random Forest utiliza el embolsamiento (*bagging*) de las variables predictoras y los datos de entrenamiento para crear subconjuntos de variables para cada árbol de decisión (Breiman, 2001; Zeng et al., 2020). Cada árbol de decisión se juzga en función de las variables predictoras y las muestras de entrenamiento, prediciendo la categoría a la que pertenece cada una de las muestras (Piao et al., 2021). En un principio los modelos se ejecutaron con 100 árboles de decisión, sin embargo, para afinar el modelo se buscó el número árboles que brindara la mayor exactitud al modelo. El número de árboles elegido cambió en cada uno de los modelos y se resumen en la Tabla 5.5.

Tabla 5.5 Número de árboles de decisión (*n_{tree}*) utilizados en los modelos (1985 – 2022)

Año	Número de árboles	Exactitud
1985	195	0.948
1990	140	0.908
1995	20	0.964
2000	85	0.933
2005	135	0.947
2010	195	0.948
2015	55	0.945
2020	160	0.961
2022	195	0.975

Fuente: Elaboración propia

d. Evaluación de exactitud

Para esta investigación se utiliza una estrategia de validación aplicada en tres pasos. El primer paso de validación es la inspección visual con el fin de comparar el resultado con imágenes de alta resolución y composiciones de bandas, de este modo se busca identificar errores de clasificación. El segundo paso de validación es por medio de una matriz de confusión, que incluye la exactitud global (OA),

exactitud del usuario (UA), exactitud del productor (PA) y coeficientes kappa (K).

- **Matriz de confusión**

La matriz de confusión permite visualizar las predicciones correctas e incorrectas de cada clase de una clasificación utilizando datos referenciales, de modo que permite detectar la confusión entre píxeles o áreas erróneamente clasificadas (A. Kulkarni et al., 2020; Tiwari, 2022). La matriz de confusión tiene como salida cuatro posibles resultados (ver Figura 5.3), los verdaderos positivos (VP), correspondientes al recuento de valores positivos que fueron clasificados correctamente. Los verdaderos negativos (VN) son el recuento de las predicciones negativas verdaderas. Los falsos positivos (FP) son las predicciones clasificadas como positivos, pero que en realidad son negativos, es decir, pertenecen a otra clase. Los falsos negativos (FN) son las predicciones clasificadas como negativos, pero que en realidad son positivos, es decir, el modelo predijo que no pertenecían a una clase, cuando en realidad sí pertenecían (A. Kulkarni et al., 2020; Tiwari, 2022).

- **Exactitud global (OA)**

La exactitud global indica qué proporción de los datos de referencia se clasificaron correctamente (Humboldt State University, 2019; Stehman & Foody, 2019). Para calcular la exactitud global se suma las predicciones clasificadas correctamente y se dividen entre el total predicciones, es decir:

$$OA = \frac{VP + VN}{VP + VN + FP + FN}$$

Figura 5.3 Matriz de confusión

		Data de referencia	
		Positivo	Negativo
Data predicha	Positivo	VP	FP
	Negativo	FN	VN

Fuente: Elaboración propia con base en Tiwari (2022)

- **Exactitud del usuario (UA)**

La exactitud del usuario es la métrica de exactitud que considera el punto de vista del usuario del mapa. La UA indica los sitios correctamente clasificados divididos entre el número total de sitios clasificados (Humboldt State University, 2019; Olofsson et al., 2014; Puzzi et al., 2023). La UA se calcula dividiendo el total de clasificaciones correctas de la clase i entre el total de las clasificaciones (Humboldt State University, 2019). Tomando como ejemplo la Figura 5.3 el cálculo sería:

$$UA = \frac{VP}{VP + FP}$$

- **Exactitud del productor (PA)**

La exactitud del productor es la exactitud del mapa considerando en punto de vista del creador del mapa. La PA indica los sitios de referencia correctamente clasificados divididos entre el total de sitios de referencia (Humboldt State University, 2019; Puzzi et al., 2023). La PA se calcula dividiendo el número de píxeles de referencia de una clase clasificados correctamente entre el total de píxeles de referencia de esa clase (Humboldt State University, 2019). Tomando como ejemplo la Figura 5.3 el cálculo sería:

$$PA = \frac{VP}{VP + FN}$$

- **Coeficiente Kappa (K)**

El coeficiente Kappa mide el rendimiento de la clasificación en comparación a una asignación aleatoria de los valores, es decir, mide si la concordancia de la clasificación es mejor que una concordancia al azar. El coeficiente K puede oscilar entre -1 y 1, un valor cercano a 0 indica que la clasificación no es mejor ni peor que la asignación aleatoria. Un valor negativo indica que la clasificación es peor en comparación a una asignación aleatoria. Un valor cercano a 1 indica que la clasificación es mejor en comparación a la asignación aleatoria (Humboldt State University, 2019; Puzzi et al., 2023)

e. Importancia de variables

Luego de entrenar el modelo de Random Forest, se puede conocer cuáles son las variables que tienen mayor importancia en la clasificación. Este paso es necesario debido a que sabiendo cuáles son las variables más importantes se puede refinar el modelo, de modo que el modelo sea más eficiente (Martínez, 2021). Para extraer las variables con mayor importancia de los modelos se estableció un umbral de posición de relevancia de diez. Es decir, las variables que no superen este umbral son considerados como menos importantes, por lo tanto, son separadas (ver Figura 6.2 y Anexo 2).

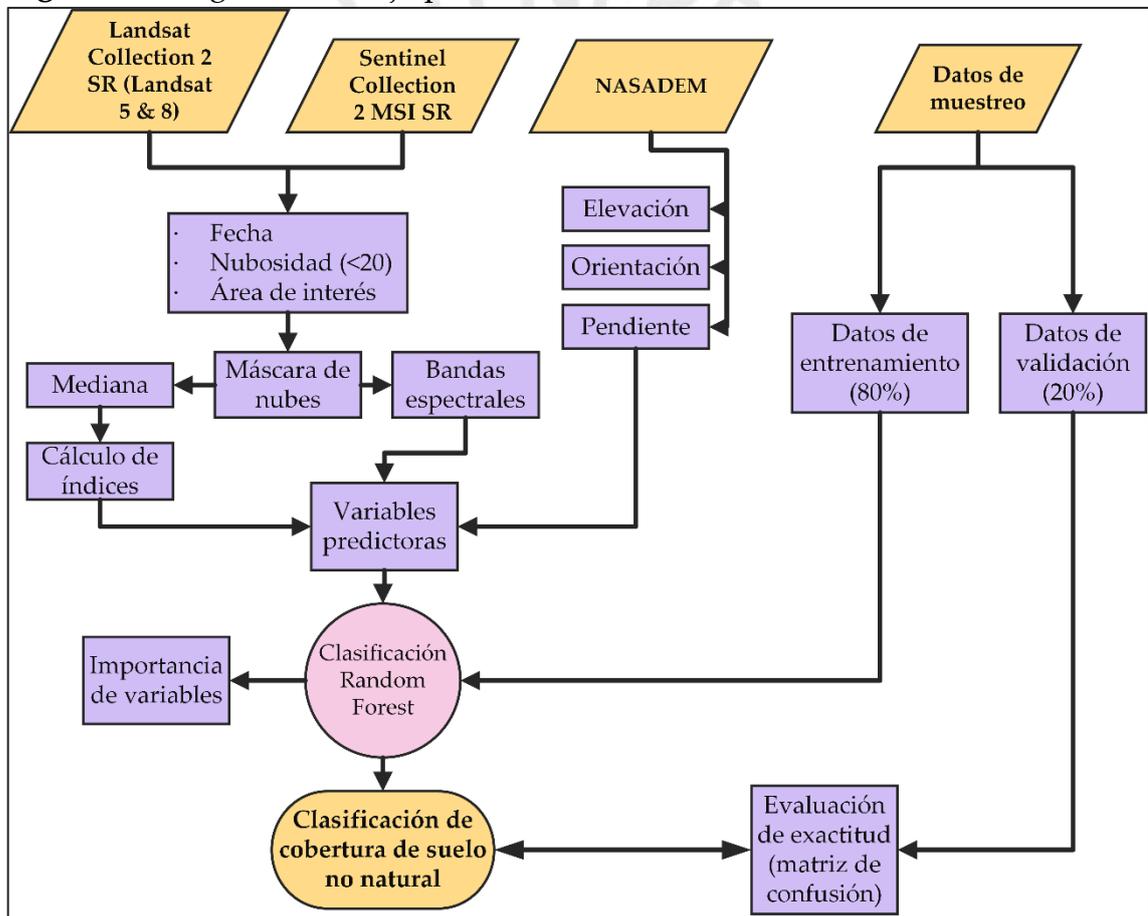
f. Procedimiento

Teniendo en cuenta la teoría detrás de RF y los datos de entrada definidos, se continuó con el procesamiento de datos, resumido en la Figura 5.4. El primer paso fue seleccionar los años de estudio, para este caso se eligieron los años 1985, 1990, 1995, 2000, 2005, 2010, 2015, 2020 y 2022. Ello se realizó en el fin de tener un análisis temporal detallado. Se aplicaron filtros básicos como "Date", "Cloud" y "Bounds" para tener imágenes de calidad. En los años en las que hubiera varias imágenes disponibles se aplicó el reductor "Median", para de este modo tener una imagen compuesta de calidad y se aplicó una máscara de nubes a la

colección. Sin embargo, eso solo fue posible aplicar a los años 1995, 2010 y 2022, debido a que para los demás años muchas de las imágenes contenían nubosidad en exceso que cubría el área de estudio.

Una vez teniendo las imágenes finales para cada año, se agregaron las variables topográficas elevación, orientación y pendientes provenientes del NASADEM. Luego de ello se continuó con el cálculo de los índices de bandas (ver Tabla 5.3). Teniendo todas las variables en el modelo se prosiguió a juntarlas en una sola capa, para que cumplan el rol de variables predictoras del modelo.

Figura 5.4 Diagrama de flujo para el cálculo de la cobertura de suelo



Fuente: Elaboración propia

Luego de ello se mezclaron las clases de las muestras y se dividieron 80 % como datos de entrenamiento del modelo y el 20 % restante como datos de validación. Teniendo todos los datos de entrada del modelo se prosiguió a ejecutarlo, considerando el número de árboles de decisión descrito en la Tabla 5.5. Luego de

obtener la clasificación se continuó con la visualización de las variables, para de este modo, conocer la importancia de cada una de ellas para el modelo. Para extraer las variables más importantes se utilizó un gráfico de burbujas que permitió comparar la posición de importancia de las variables de dos modelos (por ejemplo, los modelos de 1985 y 1990). Para ello, se ordenó las variables de acuerdo a su posición de importancia y el tamaño de cada burbuja se calculó elevando al cuadrado la posición media de ambos modelos (ver subsección 6.2.3).

Seguido a ello se ejecutó nuevamente el modelo con los datos de validación para conocer la exactitud de las clasificaciones realizadas. Finalmente, se extrajo la matriz de confusión para analizar los datos de la clasificación y calcular las métricas de exactitud mencionadas anteriormente.

5.3. Obtención de parámetros

La obtención de parámetros se realizó con el fin de cuantificar los cambios en la superficie glaciar y en la cobertura no natural en el periodo de estudio. Los parámetros calculados para la evolución de la cobertura glaciar fueron el área (km²), la tasa de retroceso (%) y la altitud (m s.n.m.). Los parámetros calculados para el cambio de cobertura no natural fueron el área (km²) y la altitud (m s.n.m.).

El área glaciar y de cobertura no natural son los resultados principales del modelo con el índice NDSI y con Random Forest. Para hallar el área se convirtió ambos resultados de formato ráster a vector, de este modo se creó un nuevo campo en sus propiedades para de este modo hallar el área que representa la cobertura glaciar y no-natural. Este parámetro es importante debido a que se pueden realizar correlaciones entre el retroceso glaciar y el aumento de la cobertura no-natural, de manera que se puedan establecer las correlaciones con el impacto minero.

La tasa de retroceso glaciar se obtuvo comparando los cambios en el área de la superficie glaciar durante el periodo de estudio. Este parámetro es importante

debido a que se pueden encontrar periodos en los que el retroceso glaciar se experimentó a una mayor velocidad, logrando coincidir con los periodos de expansión minera.

La altitud (m s.n.m) se obtuvo uniendo la capa vectorial de superficie glaciar y el cambio de cobertura no natural con el NASADEM. De este modo se obtuvo la ubicación de glaciares por debajo de 5 000 m s.n.m., de 5 000 a 6 000 m s.n.m. y glaciares ubicados por encima de los 6 000 m s.n.m. Esto mismo se aplica a la cobertura no natural, para identificar si la actividad minera ha escalado altitudinalmente, acelerando el retroceso glaciar. Con este parámetro se buscó identificar la evolución de línea límite de la cobertura glaciar y no natural, que podría ser uno de los indicadores más visibles del impacto minero sobre los glaciares de La Rinconada.

Como se mencionó en la Subsección 2.1 se eligieron tres glaciares para poder compararlos dos expuestos directamente a la actividad minera (Glaciar Rinconada y Ananea) y otro que no está expuesto directamente a la minería (Caballune). Por lo que obtener estos parámetros de área y retroceso altitudinal es importante para hipotetizar la posible relación entre minería y aceleración del retroceso glaciar.

5.4. Evaluación de implicancias

Una vez teniendo la cuantificación de los parámetros de cobertura glaciar y cobertura no-natural se prosiguió a realizar ensayos estadísticos de correlación entre estas variables y los indicadores socioeconómicos elegidos. Estos ensayos se realizaron mediante el coeficiente de correlación de Pearson. Este coeficiente mide el grado de asociación lineal de al menos dos variables cuantitativas de distribución normal (Dagnino, 2014; Hernández et al., 2018; Roy et al., 2019). La fórmula del coeficiente de correlación de Pearson es:

$$r_{xy} = \frac{cov(x, y)}{\sigma_x \cdot \sigma_y}$$

Donde:

- $\text{cov}(X, Y)$ es la covarianza entre X and Y
- $\sigma_x \cdot \sigma_y$ es la desviación estándar de X y la desviación estándar de Y (Profillidis & Botzoris, 2019).

El coeficiente de correlación de Pearson se representa con una "r" y puede situarse entre +1 y -1. Si el valor es cercano a +1, esto indica que hay una relación fuerte positiva, y si el valor es cercano a -1, indica que hay una relación fuerte en direcciones opuestas entre las variables (Hernández et al., 2018). Si el valor es cercano a ± 1 esto indica una mayor fuerza de asociación entre las variables (Roy et al., 2019). Si el resultado es 0, significa que las variables no están relacionadas linealmente, lo que indica que el comportamiento de las variables no se relaciona (Hernández et al., 2018; Roy et al., 2019).

No obstante, es necesario señalar que una correlación entre dos variables no necesariamente implica causalidad (Dagnino, 2014; Hernández et al., 2018). Es decir, el cambio en una variable no necesariamente provoca el cambio en la otra variable. Las variables que presentan una correlación fuerte pueden estar influenciadas por diversas circunstancias o, incluso, es posible que su relación sea completamente al azar (Hernández et al., 2018).

CAPÍTULO 6

RESULTADOS

En este capítulo se describen los resultados obtenidos en esta investigación. Para una mejor comprensión, los resultados están divididos en tres secciones. En la primera parte se describen los resultados del cambio anual de cobertura glaciar (1985 – 2022). En la segunda parte se describen los resultados obtenidos del cambio multitemporal de cobertura no-natural, enfatizando cambios desencadenados por la actividad minera en La Rinconada y zonas colindantes. Finalmente, en la tercera parte se describen los resultados obtenidos de las correlaciones estadísticas entre los cambios anuales de cobertura glaciar, cambios de la cobertura de no-natural y los indicadores socioeconómicos.

6.1. Cambio anual de la cobertura glaciar (1985 – 2022)

6.1.1. Cambios en la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba

Durante el periodo de estudio los glaciares en la Cordillera Apolobamba mostraron una tendencia de retroceso casi continuo, aunque hubo años en los cuales la superficie glaciar mostró un ligero aumento (ver Tabla 6.1). Entre 1985 y 2022 la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba se redujo alrededor del 43 % (161.4 km² a 92.1 km²) con una tasa anual media de 1.1 %. Los cambios anuales en la cobertura glaciar se resumen en la Tabla 6.1 y Figura 6.1.

Durante los años 1988 y 2001 se observa un aumento significativo de la cobertura glaciar, a pesar de que la tendencia general a largo plazo es a retroceso. Esto se debe a que las imágenes de ambos años presentaban nieve fresca que no se pudo eliminar, debido a que no se logró distinguir los límites entre los glaciares y zonas cubiertas por nieve fresca. Ello se puede afirmar con certeza, debido que, al comparar con el año posterior, la cobertura glaciar mostró una reducción fuerte, -20.3 % entre 1989 – 1990, y -17.5 % entre 2001 – 2003. Este aumento atípico en la cobertura glaciar de los años 1988 y 2001 podría estar relacionado con la ocurrencia de fenómenos climáticos, como La Niña (ver Subsección 7.1).

Como se mencionó en la Subsección 5.1.1, no se realizó el mapeo de la cobertura glaciar de los años 2002 y 2012 debido a que no existen imágenes con la calidad requerida. Por esta razón, la cobertura glaciar de estos años se calculó interpolando el valor con datos de cobertura glaciar de años anteriores, 1985 – 2001 y 2003 – 2011 para los años 2002 y 2012 respectivamente.

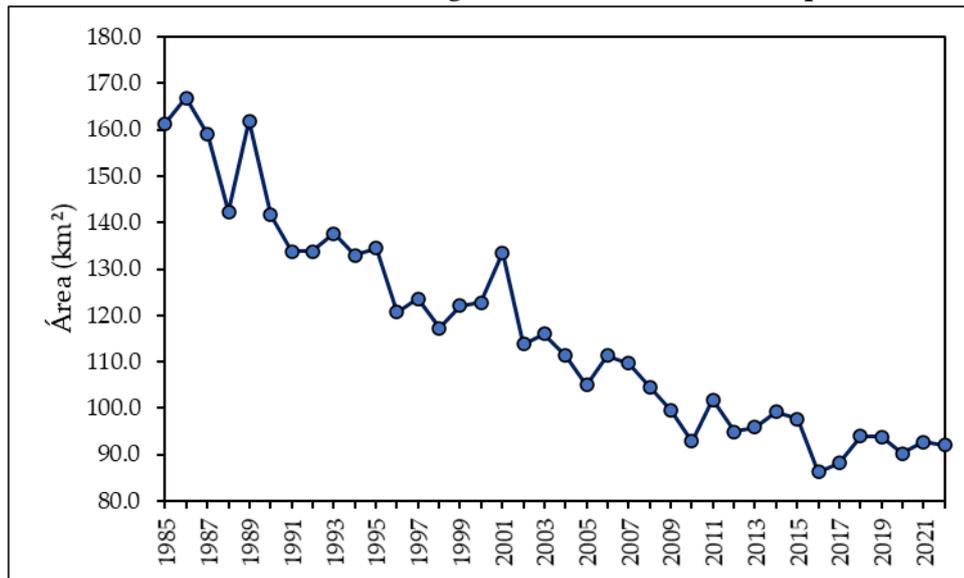
Tabla 6.1 Cambios anuales en la cobertura glaciar de la Cordillera Apolobamba (1985 – 2022)

Año	Área (km ²)	Cambio (%)	Año	Área (km ²)	Cambio (%)
1985	161.4	-	2005	105.0	-5.7
1986	166.9	3.4	2006	111.3	6.1
1987	159.0	-4.7	2007	109.6	-1.5
1988	142.3	-10.5	2008	104.5	-4.7
1989	161.9	13.8	2009	99.6	-4.8
1990	141.6	-12.5	2010	92.8	-6.8
1991	133.9	-5.5	2011	101.8	9.7
1992	133.8	0	2012 ^b	95.0	-6.8
1993	137.6	2.9	2013	95.9	1.0
1994	133.0	-3.4	2014	99.2	3.4
1995	134.5	1.1	2015	97.7	-1.5
1996	120.8	-10.2	2016	86.2	-11.7
1997	123.6	2.4	2017	88.2	2.3
1998	117.3	-5.1	2018	94.0	6.5
1999	122.1	4.1	2019	93.9	-0.1
2000	122.8	0.5	2020	90.2	-3.9
2001	133.5	8.7	2021	92.7	2.7
2002 ^a	113.9	-14.7	2022	92.1	-0.7
2003	116.0	1.9	Cambio total	69.4	43
2004	111.3	-4.0			

Fuente: Elaboración propia

Nota. ^{a,b} Corresponden a datos interpolados. Los valores en color rojo corresponden a disminución por encima del 10 %. Los valores en color azul corresponden al aumento por encima del 10 %.

Figura 6.1 Evolución de la cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba



Fuente: Elaboración propia

6.1.2. Cambios en la cobertura glaciar (Glaciares Rinconada, Ananea y Caballune)

Como se mencionó en el Subsección 2.1, para esta investigación se eligieron tres glaciares con el fin de ser comparados. Los glaciares Rinconada y Ananea, expuestos a la actividad minera en La Rinconada y el glaciar Caballune, el cual no está expuesto directamente a la minería.

Entre 1985 y 2022, el glaciar Rinconada se redujo alrededor del 35 % (298 a 193 ha), el glaciar Ananea alrededor del 27 % (285 a 208 ha) y el glaciar Caballune alrededor del 30 % (531 a 368 ha). Al igual que la Cordillera Apolobamba, estos glaciares muestran una tendencia general al retroceso, aunque también hay años en los que se observa un ligero aumento en la cobertura glaciar, como se muestra en la Tabla 6.2. En términos generales el glaciar Caballune pierde mayor cantidad de superficie glaciar (163 ha), mientras que los glaciares Rinconada y Ananea pierden 105 y 77 ha respectivamente. Sin embargo, para poder ser comparados se tiene que ver cuánto representa la pérdida a su cobertura final, de este modo se puede observar que el Glaciar Rinconada sufrió una mayor reducción de su superficie (35 %), luego Caballune (30 %) y finalmente Ananea (27 %). Como se observa en el Mapa 2.1, el Glaciar Rinconada es el que se encuentra más cerca de

la zona de explotación minera de La Rinconada, ya que las galerías se concentran en la parte baja de este glaciar.

Como se mencionó en el apartado anterior, durante 1989 y 2001 las imágenes presentaban nieve fresca, por lo que la superficie glaciar de la Cordillera Apolobamba mostró un aumento no normal. Este aumento no sucede en los glaciares estudiados, debido a que los resultados de ambos años mantienen la tendencia de retroceso.

Tabla 6.2 Cambios anuales en los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune

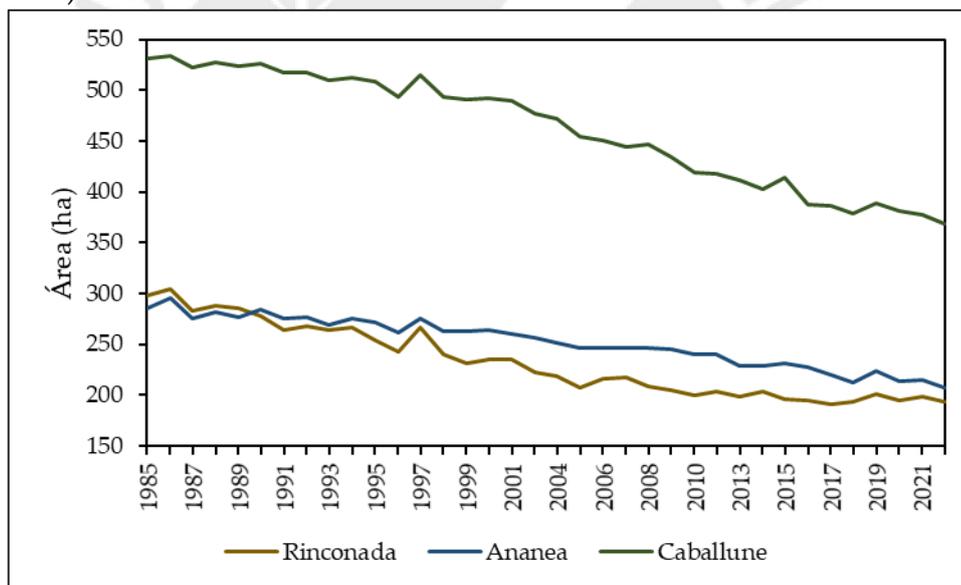
Año	Área glaciar (ha)			Cambio glaciar (%)		
	Rinconada	Ananea	Caballune	Rinconada	Ananea	Caballune
1985	298.2	284.9	531.3	-	-	-
1986	303.8	295.6	533.4	1.8	3.8	0.4
1987	283.0	275.8	522.9	-6.8	-6.7	-2.0
1988	288.0	282.0	527.0	1.8	2.3	0.8
1989	284.9	276.0	523.3	-1.1	-2.1	-0.7
1990	277.9	284.6	526.2	-2.5	3.1	0.6
1991	263.5	275.9	517.6	-5.2	-3.1	-1.6
1992	267.7	276.0	517.0	1.6	0.1	-0.1
1993	263.5	269.0	509.3	-1.6	-2.5	-1.5
1994	266.7	274.8	511.9	1.2	2.1	0.5
1995	254.2	271.1	508.1	-4.7	-1.3	-0.7
1996	242.9	261.0	493.6	-4.4	-3.7	-2.9
1997	266.4	274.8	515.2	9.7	5.3	4.4
1998	239.7	262.7	493.6	-10.0	-4.4	-4.2
1999	230.9	263.1	490.8	-3.7	0.2	-0.6
2000	234.5	264.0	491.6	1.6	0.3	0.2
2001	234.6	260.1	489.5	0	-1.5	-0.4
2003	222.6	255.9	477.1	-5.1	-1.6	-2.5
2004	218.8	251.6	471.6	-1.7	-1.7	-1.2
2005	207.2	246.3	454.3	-5.3	-2.1	-3.7
2006	216.0	246.0	450.6	4.2	-0.1	-0.8
2007	217.0	246.2	444.6	0.5	0.1	-1.3
2008	209.0	245.9	446.7	-3.7	-0.1	0.5
2009	204.7	245.1	434.0	-2.1	-0.3	-2.8
2010	199.5	240.2	419.3	-2.6	-2.0	-3.4
2011	203.7	240.0	418.2	2.1	-0.1	-0.3
2013	198.6	229.2	411.9	-2.5	-4.5	-1.5

Año	Área glaciar (ha)			Cambio glaciar (%)		
	Rinconada	Ananea	Caballune	Rinconada	Ananea	Caballune
2014	203.1	229.0	403.2	2.3	-0.1	-2.1
2015	195.4	230.9	413.4	-3.8	0.8	2.5
2016	195.0	227.9	387.7	-0.2	-1.3	-6.2
2017	191.1	219.6	386.8	-2.0	-3.6	-0.2
2018	193.5	212.4	378.4	1.3	-3.3	-2.2
2019	201.2	223.3	388.4	4.0	5.1	2.6
2020	194.6	213.4	381.5	-3.3	-4.4	-1.8
2021	198.3	215.3	377.8	1.9	0.9	-1.0
2022	193.0	207.8	368.4	-2.7	-3.5	-2.5
Total	105.2	41.1	162.9	-35.3	-27	-30.6

Fuente: Elaboración propia

Nota. Los valores en color rojo corresponden a disminución por encima del 5 %. Los valores en color azul corresponden al aumento por encima del 5 %.

Figura 6.2 Evolución de la cobertura glaciar (glaciares Rinconada, Ananea y Caballune)



Fuente: Elaboración propia

Los cambios altitudinales de los glaciares estudiados se resumen en la Tabla 6.3. Los resultados indican que la superficie glaciar por debajo de los 5 100 m s.n.m. de los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune desaparecieron durante el periodo de estudio. El glaciar que experimentó un mayor retroceso en términos de altitud fue Rinconada, debido a que entre 1985 y 2022 retrocedió 266 metros. El segundo glaciar que experimentó un mayor retroceso fue Ananea, con 227

metros y finalmente, el glaciar Caballune fue el que menos retrocedió altitudinalmente con 124 metros en el mismo periodo de tiempo. Sin embargo, se debe considerar que los tres glaciares estudiados no iniciaron con la misma altitud, ya que Caballune inició alrededor los 5 000 m s.n.m., mientras Rinconada y Ananea alrededor de los 4 850 m s.n.m.

Tabla 6.3 Cambio altitudinal del terminus glaciar en los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune

Año	Altitud mínima (m s.n.m.)		
	Rinconada	Ananea	Caballune
1985	4 867	4 875	5 027
2022	5 133	5 102	5 151
Elevación	266	227	124

Fuente: Elaboración propia

En la Tabla 6.4 se observa el año en el que la superficie de los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune desaparece de acuerdo a rangos altitudinales. El primer glaciar en perder superficie en todos los rangos altitudinales es Rinconada, glaciar más cercano a actividades mineras. Luego de ello sigue el glaciar Ananea, y finalmente, el glaciar Caballune, que es el glaciar que no está expuesto directamente a la actividad minera.

Tabla 6.4 Año de retroceso de los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune

Altitud (m s.n.m.)	Año de reducción		
	Rinconada	Ananea	Caballune
<4 900	1995	1998	-
<4 950	1999	2001	-
<5 000	1999	2001	-
<5 050	2001	2005	2006
<5 100	2009	2010	2013

Fuente: Elaboración propia

6.2. Cambio multitemporal de la cobertura no-natural (1985 – 2022)

El análisis multitemporal de cambios de cobertura no-natural se realizó entre 1985 y 2022, con un intervalo de 5 años. Ello se realizó con el fin de tener resultados detallados para analizar los cambios ocurridos en el área de influencia del centro poblado minero La Rinconada.

6.2.1. Cambios de la cobertura urbana y área degradada

Durante el periodo de estudio, el área de la cobertura urbana ha mostrado una tendencia a la expansión. En la Tabla 6.5 se pueden observar los cambios que ha experimentado la cobertura urbana desde 1985, año en el que no existía cobertura urbana en el área de estudio. Sin embargo, a partir de 1990 se empieza a distinguir zonas urbanas, tanto en la zona de la actual La Rinconada, como en la zona del actual pueblo de Ananea, ubicado al oeste de La Rinconada. El periodo donde se experimentó un mayor crecimiento fue entre 2005 y 2010, ya que se experimentó un crecimiento de 51.4 ha (36.3 – 87.6 ha). Desde el 2010, se ha experimentado un crecimiento acelerado, creciendo para el 2022 más del doble del área existente en 2010 (87.6 – 202.2 ha).

El área degradada por la minería muestra una tendencia similar al área urbana, ya que hay una expansión de su superficie. Sin embargo, el área degradada producto de la actividad minera recién se logró distinguir a partir de la clasificación realizada en el año 2010, mientras que el área urbana fue desde 1990. En términos de superficie, el área degradada ha experimentado un crecimiento acelerado, debido a que en el 2005 no se distinguía áreas afectadas por la minería. Sin embargo, en el 2010 el área afectada tenía una extensión de 1 774.1 ha, lo que indica un crecimiento acelerado en un periodo menor a 5 años. Este crecimiento del área degradada coincide con el periodo que experimentó mayor crecimiento el área urbana (2005 – 2010). Sin embargo, esto no indica que el área degradada apareció en el año 2010, sino que es durante el periodo 2005 – 2010 que el área degradada empieza a expandirse. Tener la escala de estudio de cada 5 años podría crear malinterpretaciones, sin embargo, este tema es revisado con mayor detalle en la Subsección 7.2, en el cual se señala que el área degradada se comienza a detectar a finales del 2005.

Desde el 2010, el área degradada por la minería ha continuado expandiéndose, para el 2022 creció 1 615 ha (1 774.1 – 3 389.1). Esto indica que la actividad minera ha venido creciendo durante la última década, afectando la cobertura natural.

Tabla 6.5 Cambios en la cobertura no-natural cerca de la Rinconada

Año	Cobertura no natural (ha)		Cambio (%)	
	Urbano	Área degradada	Urbano	Área degradada
1985	-	-	-	-
1990	16.7	-	-	-
1995	20.0	-	20.0	-
2000	34.0	-	70.3	-
2005	36.3	-	6.6	-
2010	87.6	1 774.1	141.6	-
2015	126.7	2 208.2	44.6	24.5
2020	175.5	2 712.3	38.5	22.8
2022	200.2	3 389.1	14.1	25.0

Fuente: Elaboración propia

6.2.2. Cambios altitudinales de la cobertura urbana y área degradada

Los cambios altitudinales de la cobertura no-natural ligado a minería se resumen en la Tabla 6.6. Los resultados muestran que la cobertura urbana ha escalado altitudinalmente, llegando a zonas ocupadas por glaciares. En 1990 las zonas urbanas llegaban hasta los 4 900 m s.n.m., por debajo de los límites glaciares. Sin embargo, a partir de este año las zonas urbanas continuaron escalando altitudinalmente, llegando en 2022 hasta los 5 319 m s.n.m. Esto significa que entre 1990 y 2022, la zona urbana ascendió alrededor de 400 metros. Asimismo, la altitud mínima también cambió, en 1990 llegaban a 4 688 m s.n.m. y en 2022 descendió hasta los 3 930 m s.n.m. Esto indicaría que han aparecido nuevas zonas urbanas a menores altitudes.

El área degradada por la actividad minera también muestra un ascenso altitudinal, ya que, en el 2010, la altitud máxima era de 5 089 m s.n.m. y en el 2022, ascendió hasta los 5 782 m s.n.m. Esto indica que entre 2010 y 2022, el área degradada por la actividad minera ascendió 693 metros. En relación a la altitud mínima, los resultados muestran que también hay un descenso altitudinal de las

áreas degradadas, debido a que en 2010 el límite se encontraba en 4 118 m s.n.m. mientras que, en el 2022, se encontraba en 3 940 m s.n.m. Esto indicaría que hay una mayor degradación de los suelos producto de la actividad minera.

Tabla 6.6 Cambios altitudinales de la cobertura no-natural cerca de la Rinconada

Año	Altitud (m s.n.m.)			
	Urbano		Área degradada	
	Mínima	Máxima	Mínima	Máxima
1985	-	-	-	-
1990	4 688	4 900	-	-
1995	4 671	5 155	-	-
2000	4 647	5 156	-	-
2005	4 670	5 192	-	-
2010	4 336	5 272	4 118	5 089
2015	4 310	5 275	4 112	5 429
2020	3 942	5 292	3 795	5 530
2022	3 930	5 319	3 940	5 782

Fuente: Elaboración propia

6.2.3. Importancia de variables de clasificación

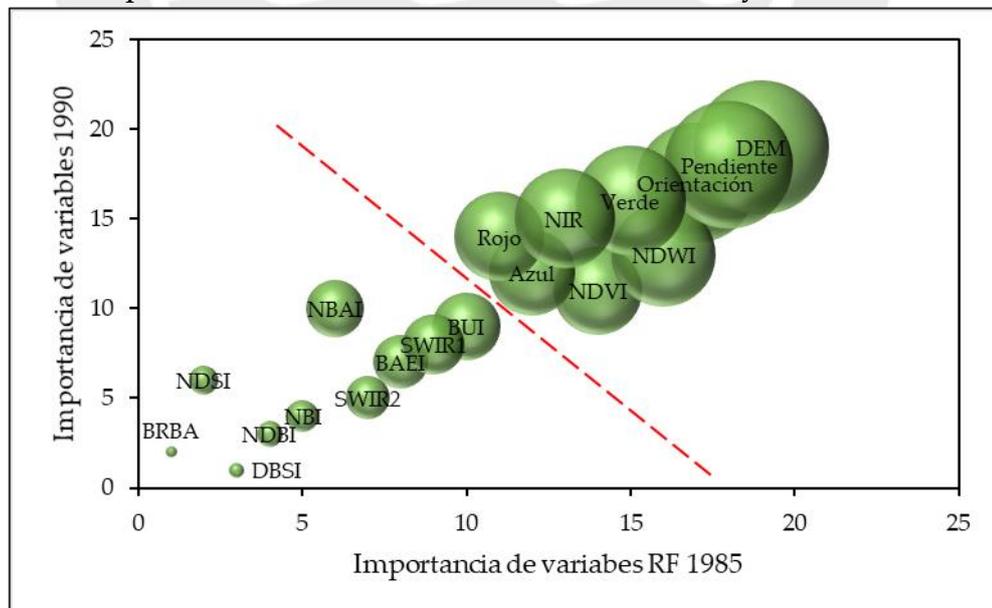
Los resultados del modelo de cambio de uso de suelo con RF muestran que la variable predictora más importante fue la “elevación”. Esta variable fue la más importante para cada año en el que se usó el modelo RF. Luego de ello las variables más importantes fueron la “orientación” y las “pendientes”. Esto indica que las variables topográficas son las más importantes para el modelo. Estos resultados se pueden justificar considerando que el área de estudio de esta investigación es una región de montaña, donde las características geográficas son variables, encontrando desde zonas llanas, hasta zonas muy escarpadas.

Posterior a las variables topográficas, las bandas “RGB” fueron las variables más relevantes para los modelos. Seguido a ello, los índices de bandas NDVI y NDWI se posicionaron como las variables con mayor importancia. Ello posiblemente se deba a que el área de estudio se caracteriza por la presencia de numerosos cuerpos de agua y vegetación. Como se puede observar en el Anexo 2, los índices

para detección de áreas urbanas no mostraron ser altamente importantes para los modelos. Esto puede ser debido a que no hay una diferenciación clara entre clases similares, como, por ejemplo, entre áreas urbanas y suelo desnudo, o entre áreas urbanas y áreas degradadas. Por esta razón, los índices para la detección de áreas urbanas no mostraron ser altamente importantes para el modelo.

Es notable que en las clasificaciones de los años 2020 y 2022 el índice de detección de zona urbana NBAI tiene una mayor importancia (ver Anexo 2.4), solo por debajo de “elevación”. Esto se podría explicar por longitudes de onda de los sensores, ya que las longitudes de onda del SWIR1 y SWIR2 de Sentinel-2 son más estrechos que los de Landsat 5 & 8, pudiendo diferenciar a mayor detalle los tipos de cobertura terrestre. Como se mencionó en la Subsección 6.2.3, para esta investigación se estableció un umbral de posición de importancia de diez para considerar a las variables más significativas para los modelos. Este umbral está simbolizado por la línea discontinua de color rojo en la Figura 6.3. La importancia de variables de los otros modelos se puede visualizar en el Anexo 2.

Figura 6.3 Importancia de variables de los modelos 1985 y 1990



Fuente: Elaboración propia con base en Martínez (2021)

Nota. Posición de importancia de las variables predictoras. El eje X pertenece a la posición de importancia de variables del año 1990, en el eje Y, del año 1990. El tamaño de las burbujas es el cuadrado del promedio de la posición en ambos años.

6.2.4. Evaluación de la exactitud de la clasificación

La inspección visual del resultado de las clasificaciones no mostró errores significantes. Para conocer a mayor detalle la exactitud de las clasificaciones se utilizaron las métricas OA, UA, PA y K, elaboradas a partir de una matriz de confusión con los datos de validación. En la Tabla 6.7 se muestran los resultados de la evaluación de exactitud del modelo final, es decir, eliminando las variables predictoras que no alcanzaron el nivel de importancia de diez en cada modelo.

Tabla 6.7 Evaluación de exactitud de la clasificación

Año	Clase	UA (%)	PA (%)	OA (%)	K (%)
1985	Suelo desnudo	92.19	99.32		
	Glaciar	99.90	99.69		
	Lagunas	90.22	94.86	95.28	93.66
	Humedal	96.54	91.36	(94.79)	(93.01)
	Pajonal	97.71	92.11		
1990	Suelo desnudo	89.81	81.24		
	Glaciar	97.41	99.39		
	Lagunas	98.32	92.79	90.67	86.98
	Humedal	98.71	91.60	(90.84)	(87.18)
	Pajonal	90.27	94.21		
	Urbano	6.43	52.94		
1995	Suelo desnudo	93.83	95.41		
	Glaciar	98.61	98.83		
	Lagunas	89.44	93.33	96.61	94.54
	Humedal	99.45	82.75	(96.39)	(94.19)
	Pajonal	97.78	98.31		
	Urbano	53.33	50.00		
2000	Suelo desnudo	90.01	96.81		
	Glaciar	99.95	98.77		
	Lagunas	99.26	97.27	93.30	90.93
	Humedal	75.71	88.39	(93.33)	(90.99)
	Pajonal	94.88	84.90		
	Urbano	39.22	75.86		
2005	Suelo desnudo	94.59	89.43		
	Glaciar	99.57	99.71		
	Lagunas	96.36	98.06	94.73	92.99
	Humedal	98.82	96.26	(94.67)	(99.90)
	Pajonal	82.40	91.48		
	Urbano	90.91	52.63		

Año	Clase	UA (%)	PA (%)	OA (%)	K (%)
2010	Suelo desnudo	90.34	93.46		
	Glaciar	99.59	96.94		
	Lagunas	98.01	96.51		
	Humedal	56.71	89.93	92.72	87.91
	Pajonal	97.68	91.55	(94.77)	(91.15)
	Urbano	100.00	86.90		
	Área degradada	69.26	95.42		
2015	Suelo desnudo	78.54	94.72		
	Glaciar	95.08	97.15		
	Lagunas	98.98	98.29		
	Humedal	97.74	84.54	93.41	89.34
	Pajonal	98.23	92.96	(94.46)	(91.01)
	Urbano	93.69	80.00		
	Área degradada	92.27	92.39		
2020	Suelo desnudo	95.21	96.83		
	Glaciar	100.00	99.98		
	Lagunas	99.58	99.75		
	Humedal	70.43	93.46	95.52	93.94
	Pajonal	96.52	93.93	(96.10)	(94.71)
	Urbano	96.50	74.59		
	Área degradada	95.72	90.60		
2022	Suelo desnudo	96.16	97.79		
	Glaciar	100.00	99.89		
	Lagunas	99.94	99.67		
	Humedal	82.62	95.51	97.05	95.54
	Pajonal	99.00	97.26	(97.52)	(96.31)
	Urbano	54.94	61.84		
	Área degradada	91.40	91.02		

Fuente: Elaboración propia

Nota. UA = Exactitud del usuario; PA = Exactitud del productor; OA = Exactitud global; K = Índice Kappa. Los valores entre paréntesis representan la exactitud del modelo con todas las variables predictoras.

Como se observa en la tabla anterior, en la mayoría de casos la exactitud del usuario y productor está por encima del 90 %. Incluso, hay ciertas clases que tienen una exactitud cercana o igual 100 %. Por ejemplo, la clase “glaciar” tiene una UA y PA por encima del 96 % en todos los modelos. Por otro lado, la clase “urbano” tuvo los valores de exactitud más bajo en la mayoría de modelos. En el

modelo de 1990 se registró la UA más baja en esta clase, pues la exactitud fue de 6 %. Las posibles razones se discuten en la Subsección 7.3.

Los modelos desarrollados tuvieron un OA por encima del 90 %, es decir, más del 90 % de los datos de validación utilizados se encontraban ubicados correctamente en las clases predichas por la clasificación. El 90 % es un porcentaje alto de exactitud, esto indica que el modelo tuvo un rendimiento óptimo. Esto mismo se señala con el coeficiente Kappa, ya que su valor supera el 86 % en todos los modelos, lo que sugiere que la clasificación tiene una concordancia muy buena en comparación con una distribución aleatoria de los datos.

6.3. Correlaciones entre cambios de cobertura de suelo y actividad minera

Como se mencionó en la Subsección 5.4, el objetivo de cuantificar las variaciones en la superficie glaciaria y cambios en la cobertura no-natural provocados por la minería en La Rinconada, fue ensayar correlaciones entre estas variables e indicadores socioeconómicos. De esta manera, se busca determinar si existe una relación directa entre la minería y la aceleración del retroceso glaciario.

Para lograr este objetivo se hizo una correlación de variables utilizando el coeficiente de Pearson. Los resultados de las correlaciones se pueden observar en las Tablas 6.8, 6.9 y 6.10. Como se vio en la Subsección 5.4, el coeficiente de Pearson mide el grado de asociación entre dos variables y mientras el valor sea más cercano a ± 1 , la asociación es más fuerte.

Tabla 6.8 Correlaciones de la variable área glaciaria

	Variable	Producción minera	Precio del oro	Población
Área glaciaria	Correlación de Pearson	-0.406	-0.844	-0.946
	Significancia Bilateral	0.094	0.00**	0.054

Fuente: Elaboración propia. Nota. ** Nivel de confianza al 99 %

Tabla 6.9 Correlaciones de la variable área Urbana

Variables		Área Glaciar	Área degradada	Precio del oro	Producción minera
Área Urbana	Correlación de Pearson	-0.777	0.978	0.957	-0.456
	Significancia Bilateral	0.023*	0.022*	0.011*	0.544

Fuente: Elaboración propia. Nota. * Nivel de confianza al 95 %

Tabla 6.10 Correlaciones de la variable área degradada

Variables		Área glaciar	Precio del oro	Producción minera
Área degradada	Correlación de Pearson	-0.796	0.838	-0.87
	Significancia Bilateral	0.204	0.367	0.328

Fuente: Elaboración propia

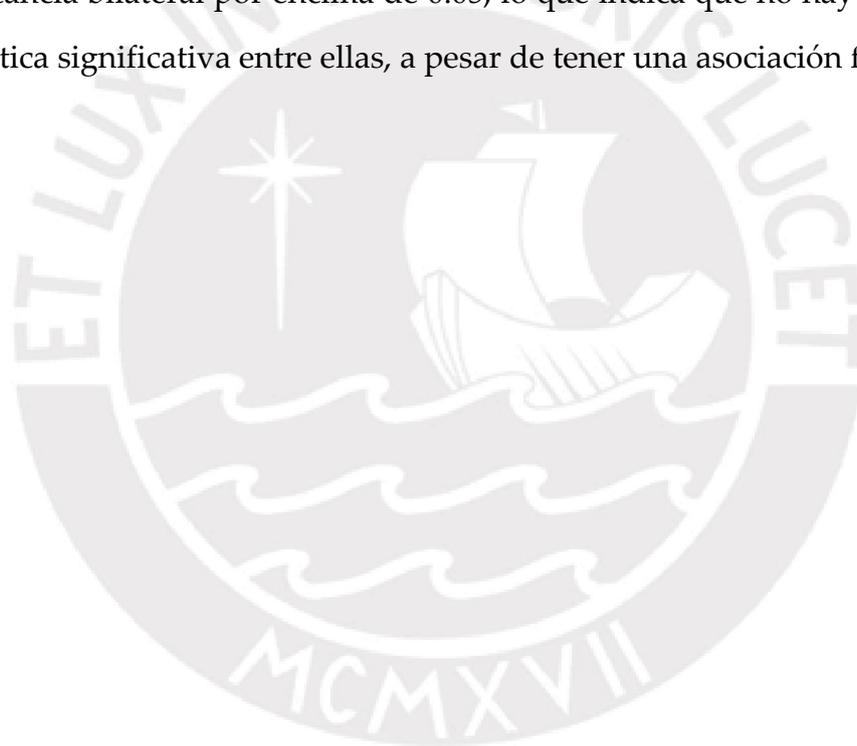
En el caso de la correlación entre las variables área glaciar y precio del oro, el p-valor es -0.844, lo que quiere decir que es una relación inversa. Esto significa que mientras los valores de una de las variables aumentan, la otra disminuye. En este caso el precio del oro aumenta con los años mientras que el área glaciar disminuye en extensión. Esta misma relación inversa se presenta en la correlación de las variables área urbana y área glaciar, debido a que el área urbana aumenta con los años, mientras el área glaciar disminuye.

En el caso de las correlaciones entre las variables área urbana y área degradada, y área urbana y precio del oro, muestran una relación positiva fuerte, debido que el coeficiente está cerca al +1. Es decir, el área urbana y el área degradada aumentan a la vez, por lo que se tiene una correlación positiva.

Sin embargo, tener una asociación fuerte con el coeficiente de Pearson no significa necesariamente que haya causalidad entre las variables estudiadas. Para conocer si existe una significancia estadística entre las variables se usa la significancia bilateral o “valor p”. La significancia bilateral está definida como la probabilidad de obtener un resultado que sea igual o más extremo que el que se ha observado realmente (Dahiru, 2011). La significancia bilateral varía entre 0 y 1, si el valor de la significancia es menor a 0.05 significa que hay una relación

significativa entre las dos variables (nivel de confianza de 95 %). Por otra parte, si el valor es menor a 0.01 significa que hay una relación muy significativa (nivel de confianza de 99 %). Los niveles de significancia de las variables correlacionadas se muestran en las Tablas 6.8, 6.9 y 6.10.

El nivel de significancia bilateral más alto que se halló fue en la correlación entre área glaciario y el precio del oro, dado que obtuvo un valor por debajo de 0.01. Asimismo, las variables área urbana y área glaciario, área urbana y área degradada, y área urbana y precio del oro tuvieron una significancia bilateral menor a 0.05, pero mayor a 0.01. Las demás variables ensayadas obtuvieron valores de significancia bilateral por encima de 0.05, lo que indica que no hay una relación estadística significativa entre ellas, a pesar de tener una asociación fuerte.



CAPÍTULO 7

DISCUSIÓN

En este capítulo se analizan los hallazgos obtenidos en esta investigación. Se comienza con el análisis del cambio anual de la cobertura glaciar, comparando los resultados con investigaciones previas. Posteriormente, se analizan las variaciones de la cobertura-no natural, enfatizando la evolución de la zona urbana y la zona degradada como resultado de la actividad minera en La Rinconada. De este modo, se analiza la posibilidad de correlacionar la evolución glaciar con impactos mineros, para de esta manera, evaluar si estos fenómenos tienen una relación directa. Seguido a ello, se analiza el alcance de los modelos NDSI y RF para el estudio de impactos mineros sobre glaciares. Finalmente, luego de revisar los hallazgos principales de esta investigación, se analiza la relevancia de implementar una agenda ambiental para la conservación y protección de los glaciares peruanos frente al desarrollo de actividades humanas de alto impacto como la minería.

7.1. Evolución anual de la cobertura glaciar

Uno de los problemas ligados a esta investigación fue la falta de información cuantificada de la superficie glaciar en la Cordillera Apolobamba. En la Subsección 4.1.2 se enfatizó la dificultad que representa comparar los resultados de las investigaciones de cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba. Esto se debe a dos factores, la poca literatura científica sobre este tema y las variaciones en las escalas espaciales utilizadas en investigaciones previas.

Uno de los objetivos de esta investigación es actualizar de manera detallada la información cuantificable de la superficie glaciar de la Cordillera Apolobamba. Para lograr ello, es necesario comparar los resultados encontrados con investigaciones previas. A pesar de las diferencias en metodologías y datos empleados, se prevé que los resultados muestren una tendencia similar.

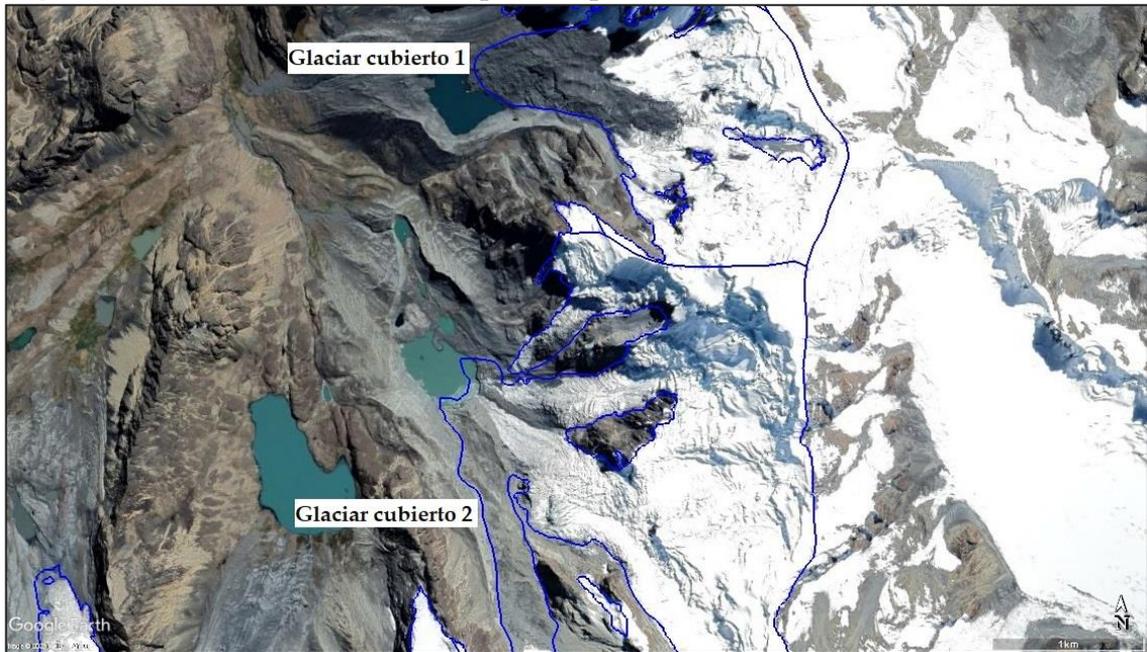
Tal como se mencionó en la Subsección 2.1, el área de estudio de esta investigación comprende una porción de la Cordillera Apolobamba, abarcando la totalidad de la región peruana y la zona norte de la región boliviana. Los resultados de esta investigación muestran que en 1985 la superficie glaciaria de la zona de estudio era de 161.4 km² y que para el 2022, se redujo hasta los 92.1 km², lo que representa una reducción de alrededor del 43 %, con una tasa promedio anual de 1.1 %. Esta tendencia también es hallada por Veettil et al. (2017), quienes encontraron que entre 1985 y 2015 los glaciares de la Cordillera Apolobamba (Perú y Bolivia) se redujeron en alrededor del 40 % (195.3 km² a 117.9 km²) con una tasa promedio anual de 1.3 %. Cook et al. (2016) observaron una tendencia similar para toda la Cordillera Apolobamba. Entre 1986 – 2014 documentaron una reducción de la superficie glaciaria de 150.2 km², lo que equivale alrededor del 50 % con una tasa promedio anual de 1.6 %. Por su parte el inventario del INAIGEM (2018), que cuantificó la superficie glaciaria de la Cordillera Apolobamba solo del lado peruano, encontró que entre 1975 (83.12 km²) y 2016 (39.63 km²), la Cordillera Apolobamba perdió 43.5 km², que representa alrededor del 52 % (tasa promedio anual de 1.2 %). Como se observa en los datos descritos, las tasas promedio anuales de esta investigación e investigaciones anteriores son similares.

Para comparar los resultados de cobertura glaciaria de esta investigación con el inventario del INAIGEM (año base 2016), se recortó el shapefile de la clasificación de cobertura glaciaria del año 2016 a los límites del Perú, resultando en un total de 37 km². Esta diferencia de alrededor 2 km² se atribuye principalmente a que el INAIGEM pudo clasificar los glaciares cubiertos por escombros (INAIGEM, 2017) (ver Figura 7.1), mientras que la metodología empleada en esta investigación solo permitió clasificar glaciares blancos.

A escala de las unidades glaciares elegidas, Rinconada, Ananea y Caballone, los resultados de la clasificación de cobertura glaciaria mostraron cifras similares a las

halladas en el inventario del INAIGEM (2018) (ver Tabla 7.1). La diferencia existente se atribuye al margen de error de la metodología empleada, tanto en la selección del umbral como en la división las unidades glaciares. Esto se debe a que en esta investigación se dividieron las unidades glaciares considerando el límite de las microcuencas, teniendo cierto margen de error debido a la escala empleada.

Figura 7.1 Glaciares cubiertos mapeados por el INAIGEM



Fuente: Google Earth, INAIGEM (2018)

Tabla 7.1 Comparación de la extensión de los glaciares Rinconada, Ananea y Caballune con el inventario nacional, año base 2016

	Resultados de esta investigación (ha)	Inventario INAIGEM (ha)
Rinconada	195	191
Ananea	227.9	224
Caballune	387.7	387.85
Total	810.6	802.85

Fuente: Elaboración propia con datos de INAIGEM (2018)

El objetivo por el cual se eligió estas unidades glaciares fue de comparar su evolución y de esta manera, conocer si los glaciares influenciados por la actividad minera (Rinconada y Ananea) tuvieron un retroceso más rápido que el glaciar Caballune (sin influencia minera directa). Los resultados indican que el glaciar

Rinconada experimentó la mayor disminución de superficie en términos relativos, ya que entre 1985 y 2022 su superficie se redujo aproximadamente un 35 % (298.2 ha a 193 ha). Es seguido por el glaciar Caballune, con una reducción de alrededor del 30 % (531.3 ha a 368.4 ha), y finalmente el glaciar Ananea, que se redujo alrededor del 27 % (284.9 ha a 207.8 ha) durante el mismo periodo.

Es interesante notar que el glaciar Rinconada, que es el que se encuentra más cerca de la zona de explotación minera, tuvo la mayor pérdida de superficie. Sin embargo, el Glaciar Ananea, colindante al glaciar Rinconada tuvo una pérdida menor que el glaciar Caballune, que está más alejado y sin influencia directa de actividad minera. Esto puede indicar que efectivamente hay una relación entre minería y retroceso glaciar, sin embargo, esta relación es poco fuerte, debido a que las diferencias porcentuales son mínimas, e incluso, el glaciar Ananea tuvo una menor pérdida relativa que el glaciar Caballune.

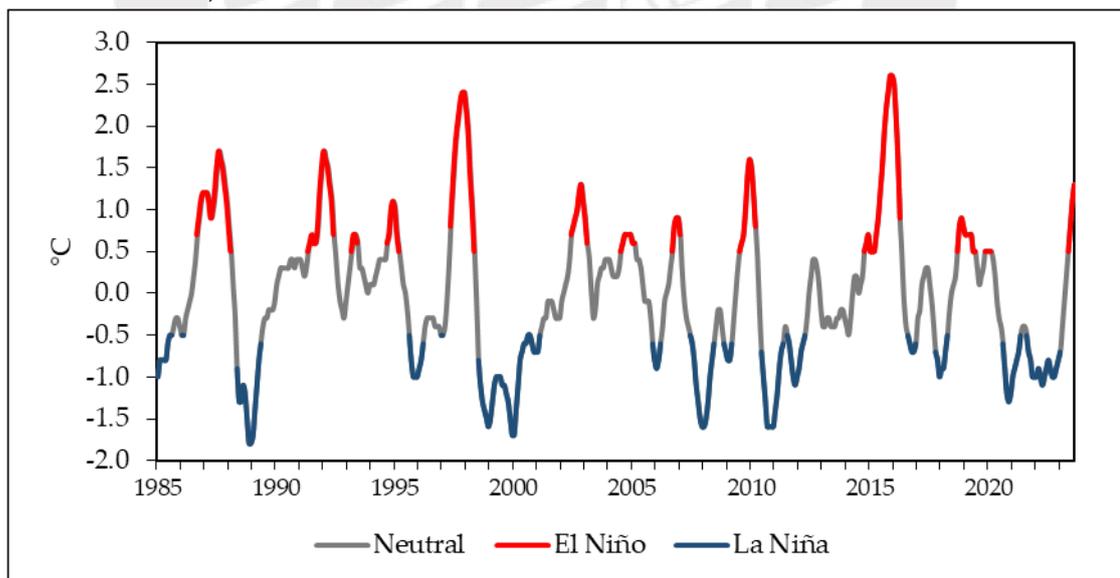
A pesar de que la tendencia general de la Cordillera Apolobamba es a un retroceso rápido, 43 % de pérdida en 38 años, se experimentaron años en los que hubo un ligero aumento de la cobertura glaciar. Esto puede tener dos posibles causas, primero, que sea debido al margen de error de la metodología empleada, y, segundo y más importante, debido a la variabilidad natural. Si bien se han observado cambios en el sistema climático a escala mundial, estos cambios varían regional y temporalmente (IPCC, 2021b). La variabilidad anual podría generar que se experimenten estos aumentos ligeros en la superficie glaciar, a pesar de tener una tendencia general al retroceso.

Además de la variabilidad anual, la variabilidad decadal, producida por la fase cálida y fría del ENOS, también podría ser uno de los factores por los que se presentan algunos cambios en la superficie glaciar. A pesar de que se tiene evidencia limitada sobre el impacto real de eventos como el ENOS sobre los glaciares, se ha encontrado que durante la fase cálida del ENOS los glaciares de la Cordillera Apolobamba han experimentado un retroceso más rápido (Souza

da Rocha et al., 2019; Veettil, Bremer, et al., 2016). Entre los años 2015 – 2016 la superficie glaciaria estudiada se redujo en aproximadamente 12 %, uno de los porcentajes más altos del periodo de estudio. Este dato es interesante debido a que entre 2015 y 2016 se presentó el ENOS fase El Niño en magnitud “Fuerte” (Instituto Geofísico del Perú, 2023).

En los años 1989 y 2001 se encontraron datos anómalos, debido a que la superficie glaciaria aumentó en alrededor 14 % y 9 % entre 1988 – 1989 y 2000 – 2001 respectivamente. La razón de esta anomalía se atribuye a la acumulación de nieve fresca en las imágenes procesadas. Al realizar una comparación visual con imágenes de años contiguos se pudo observar que los límites inferiores de la cobertura glaciaria no cambiaron, por lo que se presume que hubo una mayor acumulación de nieve fresca en altitudes mayores. Además, este aumento en la superficie glaciaria se puede atribuir a la ocurrencia de eventos climáticos (ver Figura 7.2).

Figura 7.2 Episodios cálidos y fríos basados en el umbral de $\pm 0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$, Índice del Niño Oceánico, Niño 3.4



Fuente: Elaboración propia con datos de NOAA (2023)

Ello se debe a que entre 1988 – 1989 y 2000 – 2001 se registraron datos por debajo del umbral de $-0.5\text{ }^{\circ}\text{C}$ para el Índice del Niño Oceánico (ONI, por sus siglas en

inglés). Estas anomalías en las temperaturas indican que durante esos años ocurrió el fenómeno de La Niña, impactando positivamente en el aumento de la superficie glaciar. Aunque no se tiene evidencia suficiente para estimar el impacto de eventos climáticos, los datos hallados en esta investigación indicarían que sí hay una relación entre El Niño/La Niña y la evolución glaciar en la Cordillera Apolobamba.

7.2. Evolución multitemporal de la cobertura no-natural

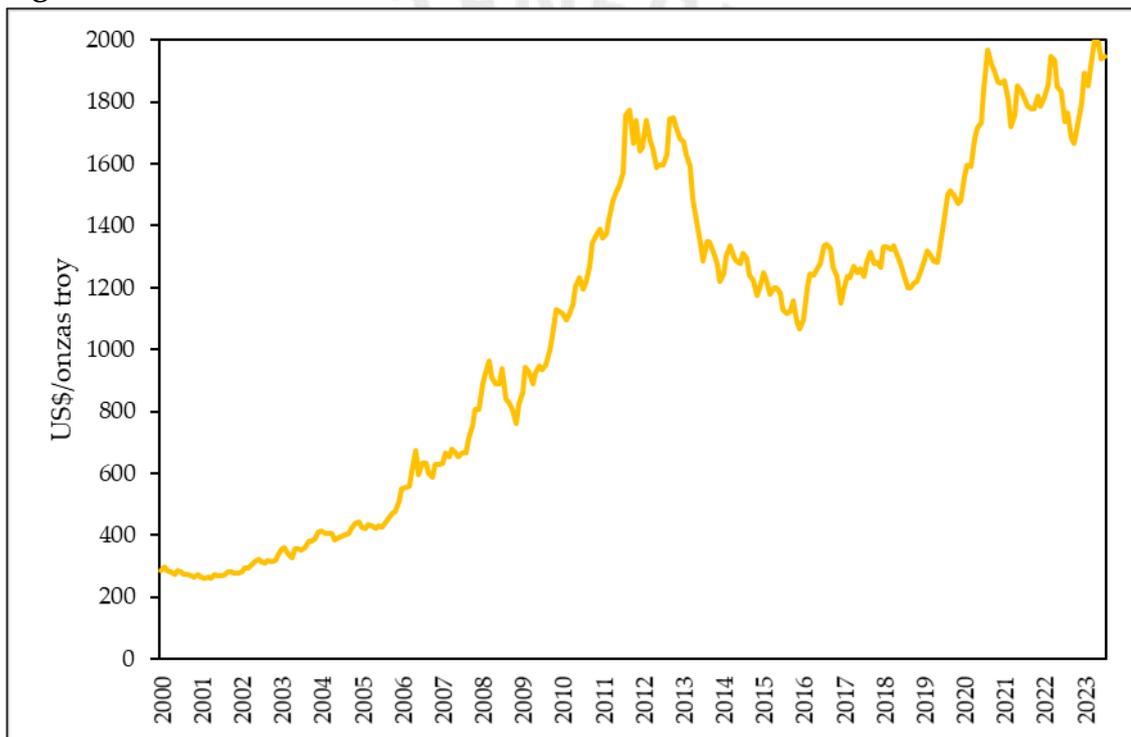
El área urbana, en la zona colindante a La Rinconada, se empezó a distinguir en la clasificación del año 1990, y desde entonces, ha mantenido una tendencia a expandirse. Este resultado va acorde a la información existente, pues, si bien La Rinconada tiene antecedentes de explotación de galerías mineras en las primeras décadas del siglo xx (Oppenheim & Spann, 1946), es a partir de 1990 que hay mayor presencia minera, debido al flujo migratorio desencadenado por la crisis económica (OIT, 2004).

Desde 1990, el área urbana cercana a La Rinconada continuó expandiéndose, ocupando 200.2 ha en 2022. Sin embargo, esta expansión no fue lineal, ya que se experimentaron periodos de crecimiento lento (1990 – 2005) y rápido (2005 – 2022) (ver Tabla 6.5 y Mapa 7.1). Entre 2005 y 2010 se experimentó la mayor expansión, 51.4 ha, lo cual coincide con el periodo en el que el precio del oro empezó a elevarse (ver Figura 7.3). A partir del 2010, el área urbana continuó creciendo a un ritmo acelerado. Esta correlación se comprobó estadísticamente en la Subsección 6.3, ya que ambas variables mostraron tener una correlación positiva, es decir, ambas variables mostraron un crecimiento con los años.

Esta correlación es coherente, tal como se observó en la Subsección 5.1.2, dado que el precio de los metales ejerce un efecto estimulante en el crecimiento urbano y poblacional. Esto probablemente sea deba a que un mayor número de personas se dedican a la actividad minera, atraídos por los altos precios de los minerales. Además, se encontró una correlación negativa significativa entre las variables

área urbana y área glaciár. Ello indicaría que a medida que el área urbana crecía, el área glaciár disminuía. Esta relación se puede identificar en el Mapa 7.1, ya que se puede observar que a medida que el área urbana crece, la zona glaciár cercana se reduce. Sin embargo, afirmar que el retroceso glaciár es resultado de la expansión urbana sería puramente conjetural, se necesitarían más evidencias para tener una certeza absoluta. No obstante, los datos de superficie glaciár y área urbana y el patrón espacial muestran que el crecimiento urbano sí podría tener relación con el retroceso glaciár.

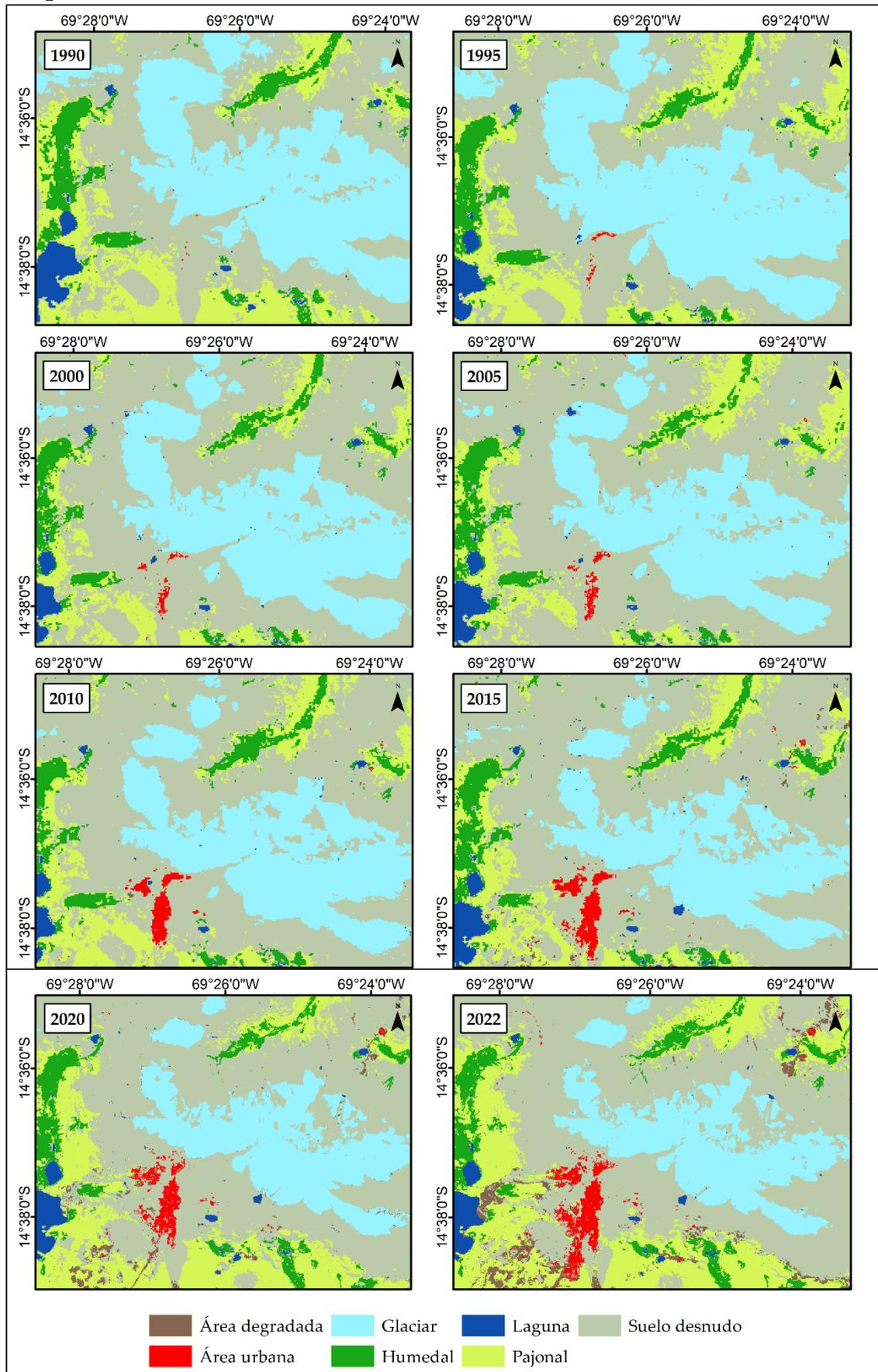
Figura 7.3 Precio mensual del oro 2000 – 2023



Fuente: Elaboración propia con datos del BCRP (2023)

Como se mencionó en la Subsección 6.2.1, el área degradada, producto de la actividad minera en La Rinconada, se distinguió en la clasificación de cobertura del año 2010, clasificaciones anteriores no mostraban estas áreas. Sin embargo, esto no quiere decir que recién en el 2010 aparecen las áreas degradadas, sino que nuestros resultados muestran eso debido a la escala temporal usada, cada 5 años.

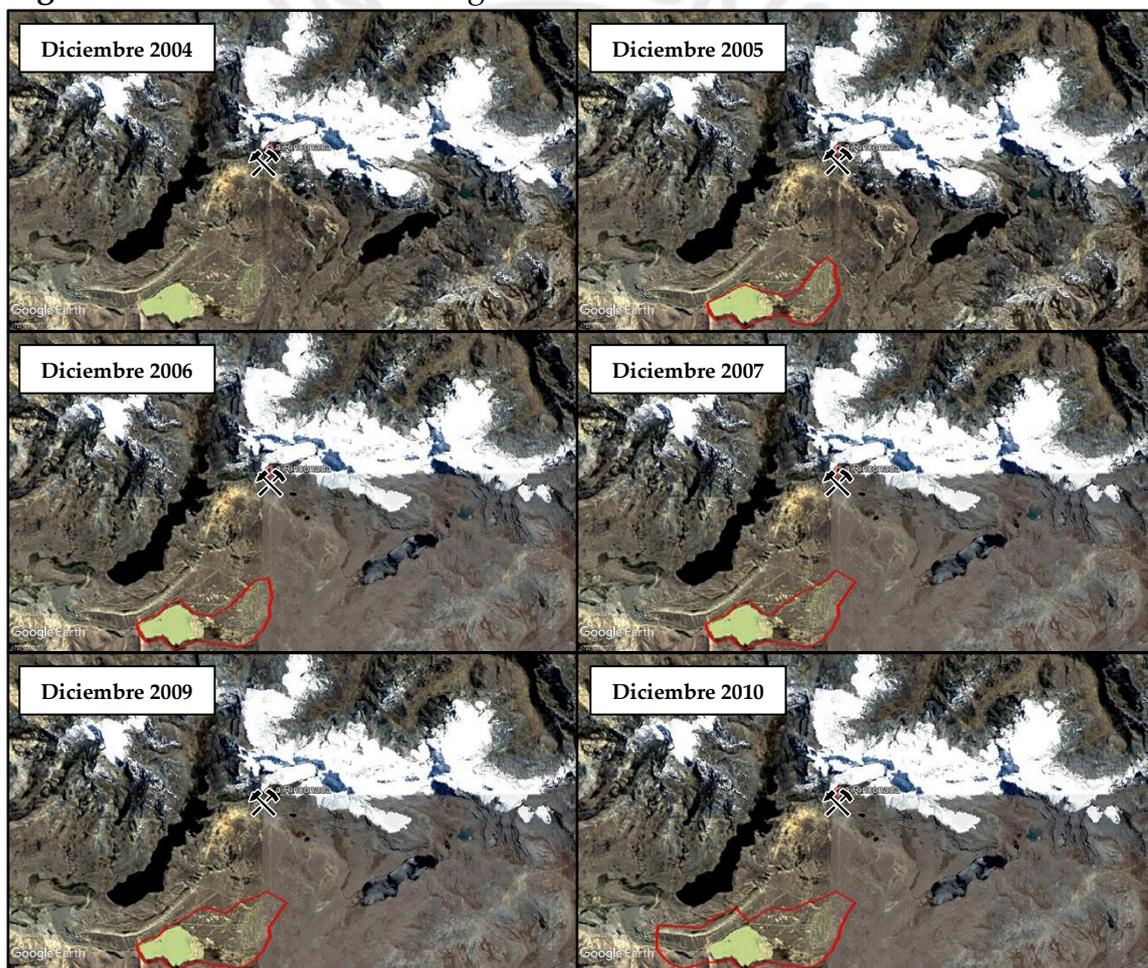
Mapa 7.1 Evolución de la cobertura de suelo en La Rinconada (1990 – 2022)



Fuente: Elaboración propia

Al revisar imágenes en Google Earth (ver Figura 7.4) se pudo observar que el área degradada recién es distinguible a finales del 2005. En la imagen anterior no se puede observar zonas degradadas que pudieran ser clasificadas. La clasificación de cobertura del año 2005 se realizó con una imagen del mes de junio, por ello, la clasificación de este año no muestra áreas degradadas, que recién aparecen en la clasificación del 2010. No obstante, como se observa en la Figura 7.4, el área degradada empieza a expandirse a finales del 2005. En 2010 el área degradada cercana a la Rinconada ocupaba 1 774.1 ha y para el 2022 se expandió casi el doble (3 389.1 ha).

Figura 7.4 Evolución del área degradada 2004 – 2010



Fuente: Elaboración propia con imágenes de Google Earth.

Nota. Las imágenes fueron capturadas en el mes de diciembre de cada año. La zona degradada por la actividad minera está delimitada por una línea de color rojo.

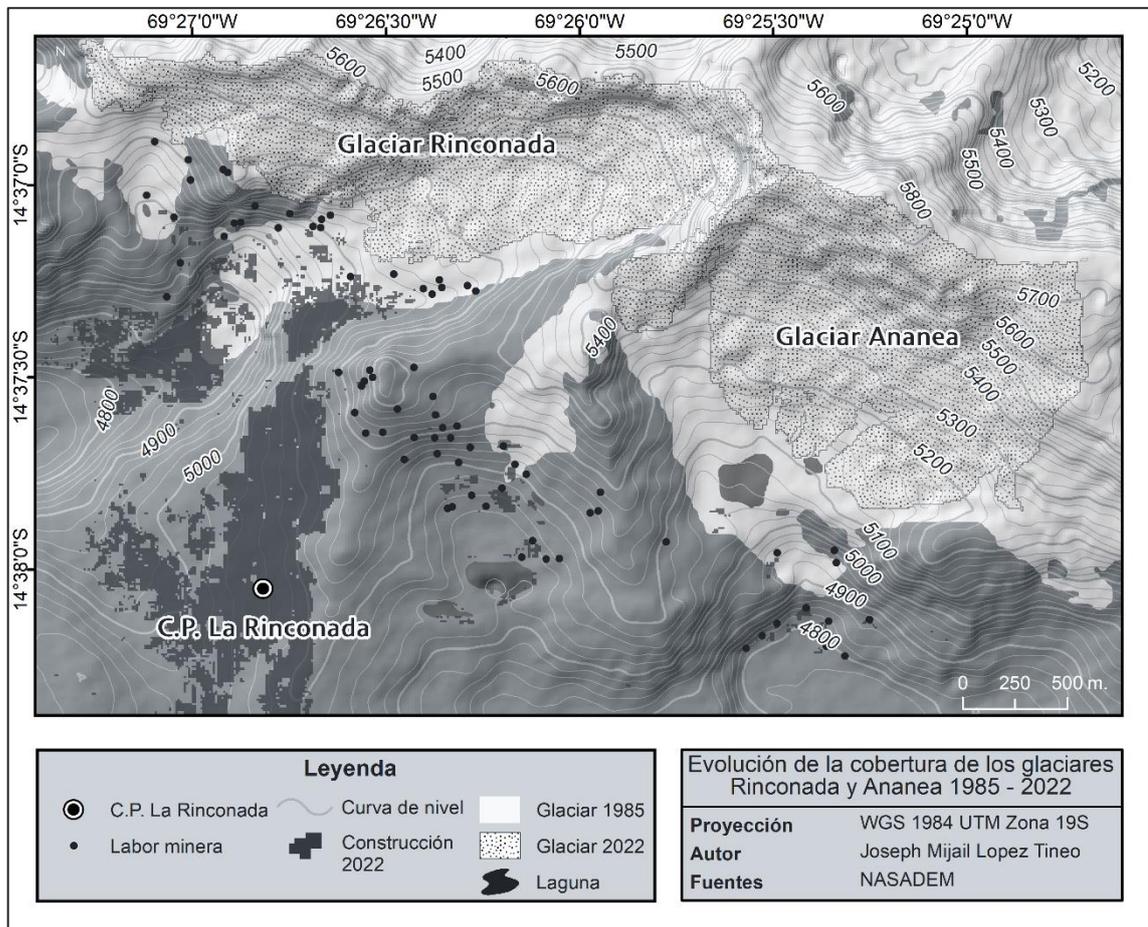
La aparición y crecimiento del área degradada coincide con el periodo en el que el precio del oro empieza a aumentar, así como, con el periodo en el que el área urbana tuvo su mayor expansión relativa (2005 – 2010). Esto podría indicar que el alto valor del oro sería una de los desencadenantes de los cambios en la cobertura del suelo no-natural en la zona colindante a La Rinconada. Sin embargo, en estos sistemas puede haber un efecto retraso. Es decir, cuando el precio del oro aumenta, con el tiempo se puede observar un incremento de la actividad, seguido por un crecimiento poblacional y finalmente, una degradación ambiental.

Estadísticamente, solo área degradada y el área urbana mostraron tener una correlación significativa (ver Subsección 6.3) de manera positiva, es decir, ambas variables mostraron un crecimiento con años. Esto es coherente, ya que, si el área urbana se expande debido al incremento de la población, es probable que el área degradada también aumente. Esto se debe a que las actividades realizadas por la población se intensifican, lo que puede tener un impacto mayor en el medio ambiente.

La expansión del área urbana y área degradada es de importancia para esta investigación debido a que se relacionan con el retroceso glaciar en la zona cercana a La Rinconada. Como se vio en la Subsección 6.2.2, el área urbana y área degradada escalaron altitudinalmente, alcanzando zonas que antes estaban cubiertas por glaciares (ver Mapa 7.1 y Mapa 7.2). Además, en el Mapa 7.2 se observa que las labores mineras actuales se ubican en zonas en las que en 1985 estaban cubiertas por glaciares. La cuestión radica en determinar cómo sucedió este proceso. Si el retroceso glaciar ocurrió inicialmente y luego las áreas urbanas, degradadas y labores mineras ocuparon el espacio liberado. O, por otro lado, si el crecimiento de las áreas urbanas y degradadas y, la apertura de labores mineras provocó directamente la pérdida glaciar, debido a la remoción de masas de hielo para su expansión. Lo que es más probable, es que estos fenómenos

puedan ser el resultado de efectos combinados, es decir, que varíen de acuerdo a periodos o procesos específicos.

Mapa 7.2 Evolución de la cobertura de los glaciares Rinconada y Ananea 1985 – 2022



Fuente: Elaboración propia

7.3. Alcance de esta investigación

A pesar de las limitaciones de la falta de metodologías validadas para la evaluación de la relación entre minería y retroceso glaciar, esta investigación ha construido una metodología, que puede ser mejorada, para la investigación de este tema. El modelo trabajado con el NDSI demostró ser eficiente, aunque tuvo limitaciones al momento de clasificar glaciares que estaban cubiertos por sombras, por lo que fue necesario elaborar máscaras de manera manual. Asimismo, el NDSI solo logró clasificar glaciares blancos, omitiendo los glaciares cubiertos. Estos problemas pueden ser solucionados con la obtención de datos en

campo, sin embargo, esta metodología se limitó a imágenes satelitales de mediana resolución espacial. Empero, en términos generales el modelo del NDSI tuvo un buen rendimiento, debido a que los resultados hallados no se alejaban de los resultados de investigaciones previas.

El modelo trabajado con el algoritmo RF para la detección de cambios en la cobertura no-natural ligado a minería también demostró ser eficaz. Debido a que tuvo un rendimiento con una exactitud global por encima del 90 % en todos los modelos. RF demostró su versatilidad para trabajar con grandes bases de datos (22 variables predictoras). Además, la metodología empleada permitió encontrar, de manera interactiva, la mayor exactitud del modelo cambiando el número de árboles de decisión (ntree). A pesar de todas estas bondades del modelo trabajado, existe un margen para la optimización de esta metodología, principalmente debido a la ausencia de datos de campo utilizados tanto para el entrenamiento del modelo como para su validación. Asimismo, en el modelo de RF no se aplicó ninguna técnica para la reducción de la autocorrelación espacial, por lo que los resultados podrían estar influenciados por ello. Por esta razón, podría ser que la exactitud global sobrepasa el 90 % en todos los modelos.

El NDSI y RF se realizaron con el objetivo de correlacionar los resultados con indicadores socioeconómicos ligados a la minería (Subsección 5.1.2), con el propósito de determinar si existe una relación entre retroceso glaciar y la minería en La Rinconada. La elección de estos indicadores fue, en cierta medida, arbitraria, ya que no se tienen antecedentes que evalúen esta relación de manera estadística. Sin embargo, al ensayar las correlaciones se halló que sí existe una relación entre impactos mineros, representados por estos indicadores, y el retroceso glaciar. Si bien mostró ser una metodología funcional para este tema, se puede mejorar más, para de este modo tener una mayor certeza en la relación de estos procesos. Para ello, es necesario tener estas variables con un número mayor de datos.

La disponibilidad de datos fue una de las limitantes de esta metodología, ya que, por ejemplo, se contó con pocos datos de la variable “población”, debido a que solo se tuvo acceso a los datos de los censos, los cuales se realizan cada 10 años en el mejor de los casos. Asimismo, la data de cobertura de suelo no-natural (RF) pudo ser más robusta. Sin embargo, esta metodología se hizo con un rango de cinco años, perdiendo detalle de procesos, como la aparición del área degradada en 2010, cuando en realidad se empezó a distinguir a finales del 2005.

A pesar de estas limitantes, la metodología de esta investigación tuvo un buen rendimiento, que en gran parte se debe a la versatilidad y sencillez de la plataforma GEE. Esto se debe a que permitió trabajar con una escala temporal (38 años) y espacial (Cordillera Apolobamba) amplia. Trabajar de esta misma manera con softwares tradicionales hubiera sido más desafiante, e incluso, es posible que se hubiera tenido que cambiar de escalas. Finalmente, es importante reiterar que la metodología requiere corroboración en campo. Esto permitirá determinar si los glaciares están siendo afectados directamente por la actividad minera, o si existen otros procesos, como la acumulación de carbono negro sobre los glaciares, que podrían influir en la dinámica glaciar.

7.4. Perspectivas sobre la conservación y protección de glaciares peruanos

Investigar el impacto de la minería en el retroceso glaciar es retador, debido a que es un tema poco conocido y del que no se tiene demasiadas evidencias. Sin embargo, los resultados a los que se llegó en esta investigación indican que sí existe una correlación entre impactos mineros y retroceso glaciar. Esta correlación se pudo comprobar estadísticamente en la Subsección 6.3. Este es un hallazgo importante, sabiendo que en el Perú no se tiene evidencia sobre este tema. Es por ello que esta investigación puede dar paso a investigaciones más detalladas sobre esta temática y, sobre todo, dar mayor visibilidad a esta problemática.

Como se vio en la Subsección 4.3, la problemática del impacto de la minería en glaciares viene siendo abordada con mayor interés en Argentina y Chile. Debido a que Argentina ya logró promulgar una ley para la protección de sus glaciares frente a actividades humanas de gran impacto como la minería, y Chile continua este proceso que ya lleva años. Si bien el Perú tiene una normativa que intenta proteger, en cierta medida, ecosistemas frágiles, entre ellos glaciares (ver subsección 4.3.2) estos aún no se han implementado adecuadamente, dejando desprotegidos a los glaciares ante el desarrollo de actividades humanas en sus cercanías.

Por ello, surge la pregunta ¿es necesario una ley para la protección de los glaciares peruanos?, como país el Perú se encuentra atrasado en comparación a Argentina y Chile en este tema. Sin embargo, se puede usar el caso de La Rinconada y los hallazgos de esta investigación para promover una agenda ambiental que contemple una ley dirigida a la protección de zonas glaciares y periglaciares de actividades de gran impacto como la minería. Como se vio en la Subsección 4.3.1, la Ley de Glaciares de Argentina y los intentos de tener una ley similar en Chile partieron de un caso en específico, el proyecto minero binacional Pascua-Lama. Un enfoque similar podría aplicarse en Perú, utilizando el caso de La Rinconada como base para la formulación de una ley análoga.

Sin embargo, para ello es necesario tener más información, por lo que se necesitan más investigaciones sobre el impacto de la minería en el retroceso glaciar en La Rinconada y otras cordilleras glaciadas donde tal vez aún no se han documentado estos procesos. Esto se debe, como se vio en la Subsección 4.1.1, a que aún no se abarca el tema de impactos mineros en el retroceso glaciar dentro de las líneas de investigación en la Cordillera Apolobamba, y en especial en La Rinconada. Esta investigación hace una aproximación de primer orden a esta temática, a pesar de ello, las correlaciones estadísticas sugieren que hay una relación entre indicadores mineros (evolución poblacional, evolución del precio

del oro, evolución del área degradada y crecimiento urbano) y el retroceso glaciar.

Tener esta evidencia es el primer paso para la construcción de una agenda ambiental. Para ello es recomendable tomar los casos de Argentina y Chile, de este modo formular una ley sólida que, en la medida posible, evite problemas técnicos como en Argentina y Chile. Esto es importante, debido a que como se vio en la Subsección 4.3.1, la demora de la aprobación de la Ley de Glaciares en Chile tiene que ver con consideraciones técnicas relacionados a los tipos de glaciares a proteger y el tamaño mínimo de estos. En Argentina el problema de las definiciones llevó a juicio a los investigadores encargados de realizar el inventario de glaciares. Por ello, es necesario que las bases, de una posible Ley de Glaciares en el Perú, sean claras, para de este modo evitar futuros retrasos en su promulgación y problemas legales.

Una Ley de Glaciares en el Perú es necesaria, considerando su importancia para los sistemas socio-ecológicos, y, sobre todo, para prevenir que actividades de gran impacto, como la minería, se establezcan muy cerca a zonas glaciares y periglaciares. Un ejemplo de ello es lo que ocurrió en la Cordillera Vilcanota, donde mineros de La Rinconada establecieron campamentos mineros dentro del Área de Conservación Regional Ausangate (Talledo, 2015). Una ley que fiscalice adecuadamente las actividades humanas cerca a glaciares y zonas periglaciares podría prevenir futuros impactos directos sobre estos ecosistemas, que ya vienen experimentados cambios negativos.

CAPÍTULO 8

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

8.1. Conclusiones

El cambio anual de cobertura glaciar en la Cordillera Apolobamba mostró una tendencia general al retroceso. Entre 1985 y 2022, la cobertura glaciar de esta cordillera se redujo alrededor 69.3 km², que representa el 43 % de la superficie inicial (161.4 km² a 92.1 km²).

A nivel de las unidades glaciares estudiadas, el Glaciar Rinconada, más cercano a la zona de explotación minera tuvo la mayor pérdida relativa (35 %) en comparación al Glaciar Ananea (27 %) y Caballune (30 %). Sin embargo, no se puede atribuir con total certeza este mayor retroceso directamente a la actividad minera en el Glaciar Rinconada, debido a que el glaciar Caballune, el cual no está impactado directamente por minería mostró una reducción mayor a la reducción del Glaciar Ananea, también cercano a la zona de explotación minera (ver Mapa 2.1). Por ello, se tendría que evaluar otros procesos que podrían explicar ello, como la presencia de carbono negro sobre los glaciares.

La cobertura de suelo no-natural experimentó una expansión durante el periodo de estudio. El área urbana se detectó a partir de la clasificación de 1990 y para el 2022, ocupaba 200.2 ha. El área degradada se detectó a partir de la clasificación de 2010, aunque en realidad se puede distinguir desde finales del 2005. En el 2022, el área degradada alcanzó la 3389.1 ha. La expansión del área urbana no fue lineal, ya que hubo un periodo de expansión lenta (1990 – 2005) y expansión rápida (2005 – 2022). El periodo de expansión rápida del área urbana y área degradada coincidió con el periodo en el que el precio del oro empezó a elevarse.

El coeficiente de correlación de Pearson permitió establecer correlaciones entre indicadores mineros indirectos (población, producción minera y precio del oro) y los resultados de la cobertura glaciar y cobertura no-natural. Las variables área

glaciar y precio del oro tuvieron una correlación de -0.844 (nivel de confianza del 99 %), lo que indica una correlación significativa inversa fuerte. Esto mismo se obtuvo entre las variables área urbana y área glaciar, con una correlación de 0.777 (nivel de confianza del 95 %). Las variables área urbana y área degradada, y, área urbana y precio del oro tuvieron correlaciones positivas de 0.978 y 0.957 respectivamente (nivel de confianza del 95 %). Las otras variables ensayadas tuvieron una significancia bilateral por encima de 0.05, lo que indica que no hay una relación significativa entre estas.

En relación al tema legal, Argentina y Chile han mostrado un mayor interés en la protección de sus glaciares. Argentina logró la promulgación de una ley y Chile continúa un largo proceso. A pesar de que en el Perú se tiene normativa para la protección de ecosistemas frágiles, como los glaciares, estos no se han implementado verdaderamente. Por esta razón, es necesario una agenda ambiental que promueva la formulación de una ley para la protección de zonas glaciares y periglaciares. Para ello, es importante tener en cuenta las experiencias de Argentina y Chile, para de este modo, evitar futuras complicaciones.

A nivel técnico, Google Earth Engine demostró ser una buena herramienta para el estudio de glaciares. Las ventajas que ofrece son superiores a las que tienen los softwares tradicionales. Un estudio detallado como este hubiera tomado más tiempo y una mejor capacidad computacional. En el peor de los casos, no se hubiera podido realizar, a menos de que se cambiara las escalas de investigación.

Finalmente, se deben tomar los resultados de esta investigación como referenciales, ya que se empleó una metodología que permitió una estimación de primer orden de los impactos de la actividad minera en el retroceso glaciar. Si bien es una metodología exploratoria, los resultados muestran que sí hay una relación entre ambos temas, por lo que la información contenida en esta investigación es pionera en esta temática a nivel nacional.

8.2. Recomendaciones

Es necesario realizar más investigaciones sobre el tema de impactos mineros en ambientes glaciares, para de esta manera, construir una metodología robusta que permita corroborar dicha relación. En general, la Cordillera Apolobamba ha sido poco estudiada, por lo que no se tiene demasiada información sobre las problemáticas locales. Por esta razón, se necesitan mayores esfuerzos para cubrir estos vacíos de conocimiento.

Si bien esta investigación se centró en analizar la relación entre impactos mineros y retroceso glaciar, se deben realizar investigaciones complementarias que analicen otras temáticas. Por ejemplo, la formación de lagunas glaciares, modelamiento de inundaciones provocadas por eventos GLOF, evaluaciones de riesgo del centro poblado La Rinconada, debido a que se ubica muy cerca al límite glaciar y lagunas recién formadas. Asimismo, se deben realizar investigaciones sobre la concentración de carbón negro sobre los glaciares y otros temas relacionados.

Esta investigación no realizó una validación en campo, por lo que en futuras investigaciones sería ideal obtener datos en campo para la validación de los resultados. Además, una corroboración en campo permitiría conocer si los glaciares están siendo afectados físicamente por la actividad minera adyacente y conocer otros procesos presentes, como podría ser la presencia de carbono negro sobre los glaciares.

Se recomienda usar la plataforma GEE para la investigación de otras zonas glaciares. El modelo construido para esta investigación se podría optimizar más, para obtener mejores resultados y cubrir el área glaciar en su totalidad, incluyendo zonas de sombras difíciles de clasificar. Asimismo, GEE demostró ser de utilidad para métodos de aprendizaje automático y Random Forest ser un algoritmo con gran exactitud para la clasificación de la cobertura terrestre. Para futuras investigaciones se recomienda probar nuevas variables predictoras, para

luego optimizar el modelo eligiendo las variables más significativas para el modelo.

Los resultados de esta investigación son una primera aproximación a los impactos mineros en el retroceso glaciar. Desde el planteamiento, se buscó dar mayor visibilidad a esta problemática, puesto que no se le ha dado la importancia necesaria. En base a ello, se recomienda construir una agenda climática que busque la promulgación de una ley para la protección de zonas glaciares y periglaciares en el Perú ante actividades humanas de gran impacto, como la minería.



BIBLIOGRAFÍA

- Agencia Espacial Europea. (2021). *Sentinel-2 Mission Guide*. ESA.
<https://sentinels.copernicus.eu/web/sentinel/missions/sentinel-2/>
- Andina. (2 de mayo de 2019). Puno: centro poblado La Rinconada es una de las urbes más extremas del planeta. *Andina*. <https://andina.pe/agencia/noticia-puno-centro-poblado-rinconada-es-una-las-urbes-mas-extremas-del-planeta-750306.aspx>
- Arenson, L. U., Jakob, M., & Wainstein, P. (2015). Effects of Dust Deposition on Glacier Ablation and Runoff at the Pascua-Lama Mining Project, Chile and Argentina. En G. Lollino, A. Manconi, J. Clague, W. Shan, & M. Chiarle (Eds.), *Engineering Geology for Society and Territory* (Vol. 1, pp. 27–32). Springer International Publishing. https://doi.org/10.1007/978-3-319-09300-0_6
- Autoridad Nacional del Agua. (2014). *Inventario nacional de glaciares y lagunas*. ANA. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/199>
- Autoridad Nacional del Agua. (2019). *Retroceso glaciar en la Cordillera Blanca 1948 - 2018*. ANA. <https://hdl.handle.net/20.500.12543/3770>
- Banco Central de Reserva del Perú. (2023). *Oro - LME (US\$ por onzas Troy)*. BCRP.
<https://estadisticas.bcrp.gob.pe/estadisticas/series/mensuales/resultados/PN01654XM/html>
- Banco Mundial. (2021). *Diagnóstico del sector minero: Perú*. Banco Mundial.
<https://documents1.worldbank.org/curated/en/463211632474174919/pdf/Peru-Mining-Sector-Diagnostic.pdf>
- Basaure, I. M. (2020). Reflexiones en torno a la constitucionalidad de la Ley de Glaciares de la República Argentina. *Ars Iuris Salmanticensis*, 8, 115–137.

- <https://revistas.usal.es/index.php/ais/article/view/23854>
- Belgiu, M., & Drăgut, L. (2016). Random forest in remote sensing: A review of applications and future directions. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 114, 24–31. <https://doi.org/10.1016/j.isprsjprs.2016.01.011>
- Bernex, N., & Tejada, M. (2010). *Cambio climático, retroceso glaciar y gestión integrada de los recursos hídricos*. Sociedad Geográfica de Lima.
http://www.gwp.org/Global/GWP-SAm_Files/Publicaciones/Varios/2011-Cambio-Climatico.pdf
- Breiman, L. (2001). Random Forests. *Machine Learning*, 45(1), 5–32.
<https://doi.org/10.1023/A:1010933404324>
- Brenning, A., & Azócar, G. F. (2010). Minería y glaciares rocosos: impactos ambientales, antecedentes políticos y legales, y perspectivas futuras. *Revista de Geografía Norte Grande*, 47, 143–158. <https://doi.org/10.4067/S0718-34022010000300008>
- Bryceson, D., & MacKinnon, D. (2012). Eureka and beyond: Mining's impact on African urbanisation. *Journal of Contemporary African Studies*, 30(4), 513–537.
<https://doi.org/10.1080/02589001.2012.719376>
- Buckley, S. (2020). *NASADEM: Creating a New NASA Digital Elevation Model and Associated Products*. Earth Data.
<https://www.earthdata.nasa.gov/esds/competitive-programs/measures/nasadem>
- Cao, X., Gao, X., Shen, Z., & Li, R. (2020). Expansion of Urban Impervious Surfaces in Xining City Based on GEE and Landsat Time Series Data. *IEEE Access*, 8, 147097–147111. <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.3013640>
- Carey, M. (2005). Living and dying with glaciers: People's historical vulnerability to avalanches and outburst floods in Peru. *Global and*

- Planetary Change*, 47, 122–134.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2004.10.007>
- Ccama, F., Ramírez, W., & Mucho, R. (2019). Importancia de la minería y la agricultura en la economía peruana. *Cátedra Villarreal*, 7(1), 27–39.
<https://doi.org/10.24039/cv201971329>
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2015). *La megasequía 2010-2015: Una lección para el futuro*. www.cr2.cl/megasequia
- Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia. (2022). *La megasequía 2010-2019: Una lección para el futuro*. <https://www.cr2.cl/megasequia/#1513261493356-46f91b32-de7d>
- Cereceda-Balic, F., Ruggeri, M. F., & Vidal, V. (2020). Glacier retreat differences in Chilean central Andes and their relation with anthropogenic black carbon pollution. *2020 IEEE Latin American GRSS & ISPRS Remote Sensing Conference (LAGIRS)*, 401–406. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3-W12-2020-401-2020>
- Chávez, A., Salas, G., Cuadros, J., & GutiérrezEdgar. (1996). *Geología de los cuadrángulos de Putina y La Rinconada, hojas: 30-x y 30-y – [Boletín A 66]*. INGEMMET. <https://hdl.handle.net/20.500.12544/188>
- Chen, J., Li, Y., Ma, Q., Shen, X., Zhao, A., & Li, J. (2018). Preliminary evaluation of sentinel-2 bottom of atmosphere reflectance using the 6SV code in Beijing area. *International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS)*, 7760–7763. <https://doi.org/10.1109/IGARSS.2018.8517598>
- Chile Sustentable. (2013). *Glaciares y Minería: Continúa la Destrucción de los Glaciares*. Chile Sustentable.
<http://www.chilesustentable.net/publicacion/glaciares-y-mineria/>
- Colonia, D., Torres, J., Haeberli, W., Schauwecker, S., Braendle, E., Giraldez, C.,

- & Cochachin, A. (2017). Compiling an Inventory of Glacier-Bed Overdeepenings and Potential New Lakes in De-Glaciating Areas of the Peruvian Andes: Approach, First Results, and Perspectives for Adaptation to Climate Change. *Water*, 9(5), 336. <https://doi.org/10.3390/w9050336>
- Comunidad Andina. (2013). *Glaciares de los Andes Tropicales: Víctimas del cambio climático*. Comunidad Andina.
- Cook, S. J., Kougkoulos, I., Edwards, L. A., Dortch, J., & Hoffmann, D. (2016). Glacier change and glacial lake outburst flood risk in the Bolivian Andes. *The Cryosphere*, 10(5), 2399–2413. <https://doi.org/10.5194/tc-10-2399-2016>
- Cortez, M., & Maillet, A. (2018). Trayectoria multinivel de una coalición promotora e incidencia en la agenda política nacional. El caso del conflicto de Pascua Lama y la ley de glaciares en Chile. *Colombia Internacional*, 94, 3–25. <https://doi.org/10.7440/colombiaint94.2018.01>
- Cuadros-Amanqui, B. (2014). Evolución De La Cobertura Glaciar Del Nevado Ananea entre 1985-2010. *Revista Científica Investigación Andina*, 14(2), 57–67. <http://repositorio.uancv.edu.pe/handle/UANCV/2682>
- Cuentas, M. (2009). *Evaluación cualitativa del impacto ambiental generado por la actividad minera en La Rinconada Puno* [Tesis de maestría, Universidad de Piura]. <https://hdl.handle.net/11042/1482>
- Cutler, A., Cutler, D. R., & Stevens, J. R. (2012). Random Forests. En C. Zhang & Y. Ma (Eds.), *Ensemble Machine Learning* (pp. 157–175). Springer US. https://doi.org/10.1007/978-1-4419-9326-7_5
- Dagnino, J. (2014). Correlación. *Revista Chilena de Anestesia*, 43(2), 150–153. <https://revistachilenadeanestesia.cl/PII/revchilanestv43n02.15.pdf>
- Dahiru, T. (2011). P-Value, a true test of statistical significance? a cautionary note. *Annals of Ibadan Postgraduate Medicine*, 6(1), 21–26.

- <https://doi.org/10.4314/aipm.v6i1.64038>
- Dammert, A. (2020). La Importancia del sector Minero para el Perú. *Journal of Economics Finance and International Business*, 4(1), 33–40.
<https://doi.org/10.20511/jefib.2020.v4n1.841>
- De Echave, J. (2016). La minería ilegal en Perú. *Nueva Sociedad*, 263, 131–144.
<https://biblat.unam.mx/hevila/Nuevasociedad/2016/no263/11.pdf>
- Drenkhan, F. (2016). En la sombra del Cambio Global: hacia una gestión integrada y adaptativa de recursos hídricos en los Andes del Perú. *Espacio y Desarrollo*, 28, 25–51. <https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201601.002>
- Drenkhan, F., Carey, M., Huggel, C., Seidel, J., & Oré, M. T. (2015). The changing water cycle: climatic and socioeconomic drivers of water-related changes in the Andes of Peru. *Wiley Interdisciplinary Reviews: Water*, 2(6), 715–733. <https://doi.org/10.1002/WAT2.1105>
- Drenkhan, F., Guardamino, L., Huggel, C., & Frey, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, 169, 105–118.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005>
- Dussailant, I., Berthier, E., Brun, F., Masiokas, M., Hugonnet, R., Favier, V., Rabatel, A., Pitte, P., & Ruiz, L. (2019). Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nature Geoscience*, 12(10), 802–808.
<https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5>
- Espinosa, O. (9 de setiembre de 2017). La Rinconada, el ‘dorado’ helado. *El País*.
https://elpais.com/elpais/2017/09/06/planeta_futuro/1504706117_915831.html
- ESRI. (2021). *Z-score*. ESRI. <https://support.esri.com/es-es/gis-dictionary/z-score>
- Eurich, M., Giessmann, A., Mettler, T., & Stanoevska-Slabev, K. (2011). Revenue

- Streams of Cloud-based Platforms: Current State and Future Directions. *17th Americas Conference on Information Systems 2011, AMCIS 2011*, 4. http://aisel.aisnet.org/amcis2011_submissions/302
- Evans, D. J. A., Ewertowski, M., Jamieson, S. S. R., & Orton, C. (2016). Surficial geology and geomorphology of the Kumtor Gold Mine, Kyrgyzstan: human impacts on mountain glacier landsystems. *Journal of Maps*, 12(5), 757–769. <https://doi.org/10.1080/17445647.2015.1071720>
- Fernández, A., MacDonell, S., Somos-Valenzuela, M., & González-Reyes, Á. (6 de julio de 2021). Chile's Glacier Protection Law Needs Grounding in Sound Science. *Eos*, 102. <https://doi.org/10.1029/2021EO160569>
- Fernández, H. A. (2017). Glaciares del semiárido chileno en el contexto de cambio climático y explotación minera. *Espacios*, 7(13), 17. <https://doi.org/10.25074/07197209.13.690>
- Fernández, H. A., & Ferrando, F. J. (2018). Glaciares rocosos en la zona semiárida de Chile: relevancia de un recurso hídrico sin protección normativa. *Cuadernos de Geografía: Revista Colombiana de Geografía*, 27(2), 338–355. <https://doi.org/10.15446/rcdg.v27n2.63370>
- García, L. (2019). *Evaluación socio ambiental de la minería a pequeña escala en Ananea y La Rinconada, Puno: 2000 al 2014* [Tesis de maestría, Universidad Católica de Santa María]. <http://tesis.ucsm.edu.pe/repositorio/handle/UCSM/9534>
- Gilardoni, S., Di Mauro, B., & Bonasoni, P. (2022). Black carbon, organic carbon, and mineral dust in South American tropical glaciers: A review. *Global and Planetary Change*, 213(May), 103837. <https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2022.103837>
- Giraldo, U. F. (2017). *Minería informal en la cuenca alta del Ramis : impactos en el*

- paisaje y evolución del conflicto socio ambiental* [Tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica del Perú].
<http://tesis.pucp.edu.pe/repositorio/handle/123456789/9613>
- Giraldo, U. F., & Vasquez, P. G. (2019). Evaluación y medición de la expansión territorial de la minería informal en la cuenca alta del Ramis, Puno, Perú, usando imágenes satelitales. *Espacio y Desarrollo*, 34, 5–32.
<https://doi.org/10.18800/espacioydesarrollo.201902.001>
- Glave, M., & Kuramoto, J. (2007). La minería peruana: lo que sabemos y lo que aún nos falta saber. In GRADE (Ed.), *Investigación, políticas y desarrollo en el Perú* (pp. 135–181). GRADE.
http://www.grade.org.pe/upload/publicaciones/archivo/download/pubs/LIBROGRADE_INVESTIGACIONPOLITICASDESARROLLO.pdf
- Gobierno Regional de Puno. (2015). *Zonificación Ecológica Económica del departamento de Puno*. GOREPUNO. <https://geoservidor.minam.gob.pe/zee-aprobadas/puno/>
- Gong, D. (2022). *Top 6 Machine Learning Algorithms for Classification*. Towards Data Science. <https://towardsdatascience.com/top-machine-learning-algorithms-for-classification-2197870ff501>
- Gonzales, A. (2017). Minería, formas de urbanización y transformación del espacio en Huamachuco, La Libertad, Perú. *Bulletin de l'Institut Français d'études Andines*, 46 (3), 509–527. <https://doi.org/10.4000/bifea.8968>
- Google Developers. (2023). *Machine Learning in Earth Engine*. Google Developers. <https://developers.google.com/earth-engine/guides/machine-learning>
- Gorelick, N., Hancher, M., Dixon, M., Ilyushchenko, S., Thau, D., & Moore, R. (2017). Google Earth Engine: Planetary-scale geospatial analysis for

- everyone. *Remote Sensing of Environment*, 202, 18–27.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2017.06.031>
- Goyzueta, G., & Trigos, C. (2009). Riesgos de salud pública en el centro poblado minero La Rinconada en Puno, Perú. *Revista Peruana de Medicina Experimental y Salud Pública*, 26(1), 41–44.
http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S1726-46342009000100008&script=sci_arttext
- Guardamino, L. (2014). *Análisis de la evolución de las lagunas de alta montaña en la Cordillera del Vilcabamba (Cusco y Apurímac) mediante métodos de sensoramiento remoto y SIG* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/5896>
- Guardamino, L., Haeberli, W., Muñoz, R., Drenkhan, F., Tacsí, A., & Cochachin, A. (2019). Proyección de Lagunas Futuras en las Cordilleras Glaciares del Perú. In *Autoridad Nacional del Agua*.
<http://repositorio.ana.gob.pe/handle/ANA/3597>
- Hernández, J. D., Espinosa, F., Rodríguez, J., Chacón, J., Toloza, C., Arenas, M., Carrillo, S., & Bermúdez, V. (2018). Sobre el uso adecuado del coeficiente de correlación de Pearson: definición, propiedades y suposiciones. *Archivos Venezolanos de Farmacología y Terapéutica*, 37(5).
<http://hdl.handle.net/20.500.12442/2469>
- Herrera, J., & Segovia, A. (2019). Ley de Protección de Glaciares: el devenir de un conflicto socioambiental. *Investigaciones Geográficas*, 58, 119.
<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2019.52214>
- Hoffmann, D. (2008). Consecuencias del retroceso glaciar en la Cordillera boliviana. *Pirineos*, 163, 77–84. <https://doi.org/10.3989/pirineos.2008.v163.23>
- Hoffmann, D., & Weggenmann, D. (2013). Climate Change Induced Glacier

Retreat and Risk Management: Glacial Lake Outburst Floods (GLOFs) in the Apolobamba Mountain Range, Bolivia. In W. Leal Filho (Ed.), *Climate Change and Disaster Risk Management* (pp. 71–87). Springer.

https://doi.org/10.1007/978-3-642-31110-9_5

Huddart, D., & Scott, T. (2010). *Earth environments: past, present, and future*. Wiley.

Humboldt State University. (2019). *Accuracy Metrics*. GSP 2016 Introduction to Remote Sensing.

http://gsp.humboldt.edu/olm/Courses/GSP_216/lessons/accuracy/metrics.html

Instituto Geofísico del Perú. (2023). *Eventos El Niño y La Niña Costeros*. IGP.

http://met.igp.gob.pe/elnino/lista_eventos.html

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1981). *Censos nacionales 1981: VIII de Población y III de Vivienda*. INEI.

<http://censos.inei.gob.pe/censos1981/redatam/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1993). *Censos nacionales 1993: IX de Población y IV de Vivienda*. INEI.

<http://censos.inei.gob.pe/censos1993/redatam/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (1995). Las migraciones en las ciudades de la región sur. In *Migraciones Internas en el Perú*. INEI.

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib0018/n00.htm

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2007). *Censos nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*. INEI.

<http://censos.inei.gob.pe/Censos2007/redatam/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2017). *Censos nacionales 2017:*

XII de Población y VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas. INEI.

<https://censos2017.inei.gob.pe/redatam/>

Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2018). *Directorio Nacional de Centros Poblados Censos Nacionales 2017: XII de Población, VII de Vivienda y III de Comunidades Indígenas.*

https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1541/index.htm

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2017). *Manual metodológico de inventario nacional de glaciares.*

<https://repositorio.inaigem.gob.pe/server/api/core/bitstreams/88036211-5ecc-461f-8938-71895a8439e1/content>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña. (2018). *EL inventario nacional de glaciares: las cordilleras glaciares del Perú.*

<https://hdl.handle.net/20.500.12543/2623>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

(2021). *Informe de la Situación de los Glaciares y Ecosistemas de Montaña en el Perú 2019.* <https://repositorio.inaigem.gob.pe/handle/16072021/409>

Instituto Nacional de Investigación en Glaciares y Ecosistemas de Montaña.

(2023). *Política Nacional de Glaciares y Ecosistemas de Montaña.* INAIGEM. <https://inaigem.gob.pe/web2/politicas/>

Instituto Nacional de Recursos Naturales. (2003). *Estudio Integral de los Recursos Hídricos de la Cuenca del Río Ramis.*

http://www.ana.gob.pe/media/293579/fuentes_agua_superficial_ramis.pdf

Instituto Peruano de Economía. (2022). *Conflictos Sociales costaron más de 1,500 millones a la minería.* IPE. <https://www.ipe.org.pe/portal/conflictos-sociales-costaron-mas-de-s-1-500-millones-a-la-mineria/>

- Iribarren Anacona, P., Kinney, J., Schaefer, M., Harrison, S., Wilson, R., Segovia, A., Mazzorana, B., Guerra, F., Farías, D., Reynolds, J. M., & Glasser, N. F. (2018). Glacier protection laws: Potential conflicts in managing glacial hazards and adapting to climate change. *Ambio*, 47(8), 835–845.
<https://doi.org/10.1007/s13280-018-1043-x>
- Isla, M. L. (2016). El proceso de juridificación de la Ley de Glaciares en las disputas por la Megaminería en Argentina. *Ecología Política*, 51, 103–107.
<https://www.ecologiapolitica.info/?p=6067>
- Izaguirre, M. (2021). *Impactos del retroceso glaciar y disponibilidad hídrica en la subcuenca Llullán-Parón, cuenca del río Santa* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú]. <http://hdl.handle.net/20.500.12404/19667>
- Jamieson, S. S. R., Ewertowski, M. W., & Evans, D. J. A. (2015). Rapid advance of two mountain glaciers in response to mine-related debris loading. *Journal of Geophysical Research: Earth Surface*, 120(7), 1418–1435.
<https://doi.org/10.1002/2015JF003504>
- Kougkoulos, I., Cook, S. J., Edwards, L. A., Clarke, L. J., Symeonakis, E., Dortch, J. M., & Nesbitt, K. (2018). Modelling glacial lake outburst flood impacts in the Bolivian Andes. *Natural Hazards*, 94(3), 1415–1438.
<https://doi.org/10.1007/s11069-018-3486-6>
- Kulkarni, A., Chong, D., & Batarseh, F. A. (2020). Foundations of data imbalance and solutions for a data democracy. In *Data Democracy: At the Nexus of Artificial Intelligence, Software Development, and Knowledge Engineering* (pp. 83–106). Elsevier Inc. <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-818366-3.00005-8>
- Kulkarni, A. V., Srinivasulu, J., Manjul, S. S., & Mathur, P. (2002). Field based spectral reflectance studies to develop NDSI method for snow cover monitoring. *Journal of the Indian Society of Remote Sensing*, 30(1–2), 73–80.

- <https://doi.org/10.1007/BF02989978>
- Lawrie, M., Tonts, M., & Plummer, P. (2011). Boomtowns, resource dependence and socio-economic well-being. *Australian Geographer*, 42(2), 139–164.
<https://doi.org/10.1080/00049182.2011.569985>
- Lebresne, S., Richards, G., Östlund, J., Wrigstad, T., & Vitek, J. (2009). Understanding the dynamics of javascript (abstract). *Proceedings for the 1st Workshop on Script to Program Evolution, STOP'09*, 30–33.
<https://doi.org/10.1145/1570506.1570510>
- León, F. R., & Barrantes, F. (2021). Mining managers' causal attributions of socio-environmental conflicts and intergroup perceptions. *Interdisciplinaria*, 38(2), 25–40. <https://doi.org/10.16888/interd.2021.38.2.2>
- Ley de los Recursos Hídricos. Ley N° 29338 de 2009. 31 de marzo de 2009.
<https://hdl.handle.net/20.500.12543/228>
- Ley Marco Sobre Cambio Climático. Ley N° 30754 de 2018.
<https://sinia.minam.gob.pe/normas/ley-marco-cambio-climatico>
- Li, F. (2018). Moving Glaciers: Remaking Nature and Mineral Extraction in Chile. *Latin American Perspectives*, 45(5), 102–119.
<https://doi.org/10.1177/0094582X17713757>
- Li, H. (2023a). *Smile*. GITHUB. <https://github.com/haifengl/smile>
- Li, H. (2023b). *Smile - Statistical Machine Intelligence and Learning Engine*. GITHUB. <https://haifengl.github.io/index.html>
- Loaiza, E., & Galloso, A. (2008). *Implicancias ambientales por la actividad minera de la zona de Ananea en la cuenca del río Ramis*. INGEMMET.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/352>
- Loza Del Carpio, A. L., & Ccancapa, Y. (2020). Mercurio en un arroyo

- altoandino con alto impacto por minería aurífera artesanal (La Rinconada, Puno, Perú). *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 36(1), 33–44.
<https://doi.org/10.20937/RICA.2020.36.53317>
- Ma, Y., Wu, H., Wang, L., Huang, B., Ranjan, R., Zomaya, A., & Jie, W. (2015). Remote sensing big data computing: Challenges and opportunities. *Future Generation Computer Systems*, 51, 47–60.
<https://doi.org/10.1016/j.future.2014.10.029>
- Martinez, G. (2022). *Formalization, certification, and technology: the complex landscape of artisanal and small-scale gold mining interventions in Peru* [Tesis de doctorado, Colorado School of Mines]. <https://hdl.handle.net/11124/15509>
- Martínez, M. (2021). *Mapping high-mountain wetlands in the Peruvian Andes using Random Forest classification*. Imperial College London.
- Matamet, F. R. M., & Bonotto, D. M. (2019). Sedimentation rates at Ramis River, Peruvian Altiplano, South America. *Environmental Earth Sciences*, 78(6), 230.
<https://doi.org/10.1007/s12665-019-8233-0>
- Ministerio de Agricultura, & Ministerio del Ambiente. (2018). *Acciones del Ministerio de Agricultura y Riego para la adaptación y mitigación frente al cambio climático al año 2030*.
<https://drive.google.com/file/d/1hyaGX3LOGOnJJLuHkTcFL5kkIw77IimK/view>
- Ministerio de Energía y Minas. (2022). *Perú: país minero*. MINEM.
https://www.minem.gob.pe/_detalle.php?idSector=1&idTitular=159&idMenu=sub149&idCateg=159
- Ministerio de Energía y Minas. (2023). *Estadísticas*. MINEM.
http://www.minem.gob.pe/_estadisticaSector.php?idSector=1&idCategoria=10

- Ministerio del Ambiente. (2015). *Mapa de cobertura vegetal*. MINAM.
- Ministerio del Ambiente. (2018). *Presidente Martín Vizcarra promulgó histórica Ley Marco sobre Cambio Climático*. MINAM. minam.gob.pe/cambio-climatico-peru/2018/04/17/presidente-martin-vizcarra-promulgo-historica-ley-marco-sobre-cambio-climatico/
- Moclan, C. (2016). *Teledetección espacial : De los métodos clásicos al " BIG DATA "* [Universidad de Valladolid]. <http://uvadoc.uva.es/handle/10324/22309>
- Molina, J. (2011). Minería en los páramos de Colombia y la construcción de una conciencia ecológica: hacia la búsqueda de la justicia ambiental. *Ecología Política*, 41, 74–81.
- Morales Arnao, B., & Santiago Martel, A. (2017). La Unidad Norte de la Cordillera Blanca y el Cambio Climático. *Revista de Glaciares y Ecosistemas de Montaña*, 2(2), 9–12. <https://doi.org/10.36580/rgem.i2.9-12>
- NASA JPL. (2020). *NASADEM_HGTv001*. Earth Data. https://lpdaac.usgs.gov/products/nasadem_hgtv001/
- NOAA. (2023). *Cold & Warm Episodes by Season*. NOAA. https://origin.cpc.ncep.noaa.gov/products/analysis_monitoring/ensostuff/ONI_v5.php
- Nyamekye, C., Ghansah, B., Agyapong, E., & Kwofie, S. (2021). Mapping changes in artisanal and small-scale mining (ASM) landscape using machine and deep learning algorithms. - a proxy evaluation of the 2017 ban on ASM in Ghana. *Environmental Challenges*, 3, 100053. <https://doi.org/10.1016/j.envc.2021.100053>
- Ochochoque, J. (2017). *Aplicación de la teledetección en el avance de la explotación minera, centro poblado de Malenowski, distrito de Mazuco, región de Madre de Dios* [Universidad Nacional Del Altiplano].

http://repositorio.unap.edu.pe/bitstream/handle/UNAP/9408/Rosa_Enriquez_Yuca.pdf?sequence=1&isAllowed=y

Olofsson, P., Foody, G. M., Herold, M., Stehman, S. V., Woodcock, C. E., & Wulder, M. A. (2014). Good practices for estimating area and assessing accuracy of land change. *Remote Sensing of Environment*, 148, 42–57.
<https://doi.org/10.1016/j.rse.2014.02.015>

Oppenheim, V., & Spann, H. J. (1946). *Investigaciones glaciológicas en el Perú 1944 - 1945*. Instituto Geológico del Perú.
<https://hdl.handle.net/20.500.12544/1867%0A>

Organización Internacional del Trabajo. (2004). *La Rinconada: Realidad Minera Artesanal Emblemática*. OIT.
https://ilo.primo.exlibrisgroup.com/discovery/fulldisplay/alma993765973402676/41ILO_INST:41ILO_V2

Palacios, H., & Lundberg, A. (2006). Análisis del cambio del paisaje en un área minera del Perú. Caso estudio de Yanacocha, Cajamarca. *Espacio y Desarrollo*, 18, 118–144.
<https://revistas.pucp.edu.pe/index.php/espacioydesarrollo/article/view/11374>

Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2021a). Ocean, Cryosphere and Sea Level Change. In *Climate Change 2021: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Sixth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change* (pp. 1211–1362).
<https://doi.org/10.1017/9781009157896.011.1212>

Panel Intergubernamental del Cambio Climático. (2021b). Technical Summary. In *Climate Change and Land: an IPCC special report on climate change, desertification, land degradation, sustainable land management, food security, and greenhouse gas fluxes in terrestrial ecosystems*.

- Paul, F., Barrand, N. E., Baumann, S., Berthier, E., Bolch, T., Casey, K., Frey, H., Joshi, S. P., Konovalov, V., Le Bris, R., Mölg, N., Nosenko, G., Nuth, C., Pope, A., Racoviteanu, A., Rastner, P., Raup, B., Scharrer, K., Steffen, S., & Winsvold, S. (2013). On the accuracy of glacier outlines derived from remote-sensing data. *Annals of Glaciology*, 54(63), 171–182.
<https://doi.org/10.3189/2013AoG63A296>
- Phan, T. N., Kuch, V., & Lehnert, L. W. (2020). Land Cover Classification using Google Earth Engine and Random Forest Classifier – The Role of Image Composition. *Remote Sensing*, 12(15), 2411.
<https://doi.org/10.3390/rs12152411>
- Piao, Y., Jeong, S., Park, S., & Lee, D. (2021). Analysis of Land Use and Land Cover Change Using Time-Series Data and Random Forest in North Korea. *Remote Sensing*, 13(17), 3501. <https://doi.org/10.3390/rs13173501>
- Ponganan, N., Horanont, T., Artlert, K., & Nuallaong, P. (2021). Land Cover Classification using Google Earth Engine’s Object-oriented and Machine Learning Classifier. *2021 2nd International Conference on Big Data Analytics and Practices (IBDAP)*, 33–37.
<https://doi.org/10.1109/IBDAP52511.2021.9552099>
- Portocarrero, C. A. (2011). El cambio climático, la glaciología y los riesgos en la Cordillera Blanca, Ancash - Perú. *Aporte Santiaguino*, 4(2), 208–2015.
https://revistas.unasam.edu.pe/index.php/Aporte_Santiaguino/article/view/547/515
- Profillidis, V. A., & Botzoris, G. N. (2019). Statistical Methods for Transport Demand Modeling. In *Modeling of Transport Demand* (pp. 163–224). Elsevier.
<https://doi.org/10.1016/B978-0-12-811513-8.00005-4>
- Puzzi, A., Dyson, K., Saah, D., & Clinton, N. (2023). *Accuracy Assessment Quantifying Classification Quality*. GEE-TUTORIALS. <https://google-earth->

engine.com/Interpreting-Images/Accuracy-Assessment-Quantifying-Classification-Quality/

Qu, L., Li, M., Chen, Z., & Zhi, J. (2021). A Modified Self-adaptive Method for Mapping Annual 30-m Land Use/Land Cover Using Google Earth Engine: A Case Study of Yangtze River Delta. *Chinese Geographical Science*, 31(5), 782–794. <https://doi.org/10.1007/s11769-021-1226-4>

Régimen de Presupuestos Mínimos para la Preservación de los Glaciares y del Ambiente Periglacial. Ley N° 26 639 de 2010. 30 de setiembre de 2010. <https://www.argentina.gob.ar/ambiente/agua/glaciares/ley>

Reglamento de Protección Ambiental para las Actividades de Exploración Minera. DS N° 042-2017-EM de 2017. 22 de diciembre de 2017. <https://busquedas.elperuano.pe/dispositivo/NL/1600033-2>

Rey-Coquais, S. (2021). De cobre , agua y glaciares en la metrópolis global . El nuevo papel de la mega minería en la gobernanza ambiental de Santiago de Chile. *Revista de Geografía Norte Grande*, 79, 139–161. <https://doi.org/https://doi.org/10.4067/S0718-3402202100020013>

Riley, N. (2017). *How to Report Z-Score Results*. Sciencing. <https://sciencing.com/report-zscore-results-8455518.html>

Rojas, F., & Wagner, L. (2021). Inventario de glaciares en Argentina: polémicas públicas y disputas de sentido. En A. M. França & M. Miraglia (Eds.), *Historia ambiental Argentina-Brasil. Paisaje y patrimonio: impresiones de la historia en el ambiente natural* (pp. 185–232). Teseo.

Roteta, E., & Oliva, P. (2020). Optimization of a Random Forest classifier for burned area detection in Chile using Sentinel-2 data. *The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, XLII-3/W12, 337–342. <https://doi.org/10.5194/isprs-archives-XLII-3->

- Roy, I., Rivas, R., Pérez, M., & Palacios, L. (2019). Correlación: no toda correlación implica causalidad. *Revista Alergia Mexico*, 66(3), 354–360. <https://doi.org/10.29262/ram.v66i3.651>
- Salas-Mercado, D., Belizario-Quispe, G., & Horna-Muñoz, D. (2023). Heavy Metal Pollution Assessment in Lake Rinconada in the Southern Andes, Peru. *Pollution*, 9(2), 477–493. <https://doi.org/10.22059/POLL.2022.346689.1558>
- Seehaus, T., Malz, P., Sommer, C., Lippl, S., Cochachin, A., & Braun, M. (2019). Changes of the tropical glaciers throughout Peru between 2000 and 2016 – mass balance and area fluctuations. *The Cryosphere*, 13(10), 2537–2556. <https://doi.org/10.5194/tc-13-2537-2019>
- Servicio Geológico de Estados Unidos. (2021a). *Landsat Collection 2*. USGS. https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-collection-2?qt-science_support_page_related_con=1
- Servicio Geológico de Estados Unidos. (2021b). *Landsat Satellite Missions*. USGS. <https://www.usgs.gov/landsat-missions/landsat-satellite-missions>
- Silverio, W., & Jaquet, J.-M. (2005). Glacial cover mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) using satellite imagery. *Remote Sensing of Environment*, 95(3), 342–350. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2004.12.012>
- Smits, K. M., McDonald, L., Smith, N. M., Gonzalez, F., Lucena, J., Martinez, G., Restrepo, O. J., & Rosas, S. (2020). Voces Mineras: Clarifying the future of artisanal and small-scale mining collaborations. *Extractive Industries and Society*, 7(1), 68–72. <https://doi.org/10.1016/j.exis.2019.12.003>
- Souza da Rocha, N., Veettil, B. K., Grondona, A., & Rolim, S. (2019). The influence of ENSO and PDO on tropical Andean glaciers and their impact

- on the hydrology of the Amazon Basin. *Singapore Journal of Tropical Geography*, 40(3), 346–360. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12290>
- Srinet, R., Nandy, S., Padalia, H., Ghosh, S., Watham, T., Patel, N. R., & Chauhan, P. (2020). Mapping plant functional types in Northwest Himalayan foothills of India using random forest algorithm in Google Earth Engine. *International Journal of Remote Sensing*, 41(18), 7296–7309. <https://doi.org/10.1080/01431161.2020.1766147>
- Stehman, S. V., & Foody, G. M. (2019). Key issues in rigorous accuracy assessment of land cover products. *Remote Sensing of Environment*, 231. <https://doi.org/10.1016/j.rse.2019.05.018>
- Strahler, A. N. (1997). *Geología física*. Omega.
- Talledo, J. (2015, December 20). Mineros de La Rinconada controlan cerros del Cusco. *El Comercio*. <https://elcomercio.pe/peru/cusco/mineros-rinconada-controlan-cerros-cusco-254908-noticia/>
- Tarbutck, E. J., & Lutgens, F. K. (2010). *Ciencias de la Tierra: una introducción a la geología física* (8th ed.). Pearson.
- Tiwari, A. (2022). Supervised learning: From theory to applications. En R. Pandey, S. Kumar Khatri, N. kumar Singh, & P. Verma (Eds.), *Artificial Intelligence and Machine Learning for EDGE Computing* (Vol. 6, Issue August, p. 128). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2020-0-01569-0>
- Trigos, C. (2008). Caracterización de riesgos de salud pública en el centro poblado minero artesanal La Rinconada, Puno-Perú. *Revista de Investigaciones*, 4(2). <http://www.revistaepgunapuno.org/index.php/investigaciones/article/view/60>
- Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. (2014). *Inventario de Glaciares en el*

Perú. II Actualización. ANA.

http://ponce.sdsu.edu/INVENTARIO_GLACIARES_ANA.pdf

Urkidi, L. (2010). A glocal environmental movement against gold mining:

Pascua–Lama in Chile. *Ecological Economics*, 70(2), 219–227.

<https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2010.05.004>

Veetil, B. K. (2018). Glacier mapping in the Cordillera Blanca, Peru, tropical

Andes, using Sentinel-2 and Landsat data. *Singapore Journal of Tropical*

Geography, 39(3), 351–363. <https://doi.org/10.1111/sjtg.12247>

Veetil, B. K., Bremer, U. F., Florêncio de Souza, S., Maier, É. L. B., & Simões, J.

C. (2016). Influence of ENSO and PDO on mountain glaciers in the outer
tropics: case studies in Bolivia. *Theoretical and Applied Climatology*, 125(3),

757–768. <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1545-4>

Veetil, B. K., Florêncio de Souza, S., Simões, J. C., & Ruiz Pereira, S. F. (2017).

Decadal evolution of glaciers and glacial lakes in the Apolobamba–

Carabaya region, tropical Andes (Bolivia–Peru). *Geografiska Annaler: Series
A, Physical Geography*, 99(3), 193–206.

<https://doi.org/10.1080/04353676.2017.1299577>

Veetil, B. K., & Kamp, U. (2019). Global Disappearance of Tropical Mountain

Glaciers: Observations, Causes, and Challenges. *Geosciences*, 9(5), 196.

<https://doi.org/10.3390/geosciences9050196>

Veetil, B. K., Ruiz Pereira, S. F., Wang, S., Valente, P. T., Grondona, A. E. B.,

Rondón, A. C. B., Rekowsky, I. C., Florêncio de Souza, S., Bianchini, N.,

Bremer, U. F., & Simões, J. C. (2016). Un análisis comparativo del

comportamiento diferencial de los glaciares en los Andes Tropicales

usando teledetección. *Investigaciones Geográficas*, 51, 3–36.

<https://doi.org/10.5354/0719-5370.2016.41215>

- Veetil, B. K., & Simões, J. C. (2019). The 2015/16 El Niño-related glacier changes in the tropical Andes. *Frontiers of Earth Science*, 13(2), 422–429.
<https://doi.org/10.1007/s11707-018-0738-4>
- Veetil, B. K., Wang, S., Simões, J. C., & Ruiz Pereira, S. F. (2018). Glacier monitoring in the eastern mountain ranges of Bolivia from 1975 to 2016 using Landsat and Sentinel-2 data. *Environmental Earth Sciences*, 77(12), 452.
<https://doi.org/10.1007/s12665-018-7640-y>
- Vergara-Buitriago, P. A., & Rodríguez-Aparicio, J. A. (2021). Análisis ambiental de la minería de carbón en el ecosistema estratégico de páramo (Boyacá, Colombia). *Scientia Et Technica*, 26(3), 398–406.
<https://doi.org/10.22517/23447214.24519>
- Vuille, M., Kaser, G., & Juen, I. (2008). Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, 62(1–2), 14–28.
<https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2007.11.003>
- Xu, Y., Wu, W., & Lu, L. (2021). Remote Sensing Mapping of Cage and Floating-raft Aquaculture in China's Offshore Waters Using Machine Learning Methods and Google Earth Engine. *2021 9th International Conference on Agro-Geoinformatics (Agro-Geoinformatics)*, 1–5. <https://doi.org/10.1109/Agro-Geoinformatics50104.2021.9530297>
- Yap, A. (2015). *Análisis multitemporal de glaciares y lagunas glaciares en la Cordillera Blanca e identificación de potenciales amenazas GLOFs* [Tesis de licenciatura, Pontificia Universidad Católica del Perú].
<http://hdl.handle.net/20.500.12404/7268>
- Young, N. E., Anderson, R. S., Chignell, S. M., Vorster, A. G., Lawrence, R., & Evangelista, P. H. (2017). A survival guide to Landsat preprocessing. *Ecology*, 98(4), 920–932. <https://doi.org/10.1002/ecy.1730>

- Zeng, H., Wu, B., Wang, S., Musakwa, W., Tian, F., Mashimbye, Z. E., Poona, N., & Syndey, M. (2020). A Synthesizing Land-cover Classification Method Based on Google Earth Engine: A Case Study in Nzhelele and Levhuvu Catchments, South Africa. *Chinese Geographical Science*, 30(3), 397–409. <https://doi.org/10.1007/s11769-020-1119-y>
- Zhang, X., Bai, Z., Fan, X., Lu, Y., Cao, Y., Zhao, Z., Sun, Q., & Pan, J. (2016). Urban Expansion Process, Pattern, and Land Use Response in an Urban Mining Compositied Zone from 1986 to 2013. *Journal of Urban Planning and Development*, 142(4), 1–14. [https://doi.org/10.1061/\(asce\)up.1943-5444.0000327](https://doi.org/10.1061/(asce)up.1943-5444.0000327)
- Zhang, Z., Wei, M., Pu, D., He, G., Wang, G., & Long, T. (2021). Assessment of Annual Composite Images Obtained by Google Earth Engine for Urban Areas Mapping Using Random Forest. *Remote Sensing*, 13(4). <https://doi.org/10.3390/rs13040748>

ANEXOS

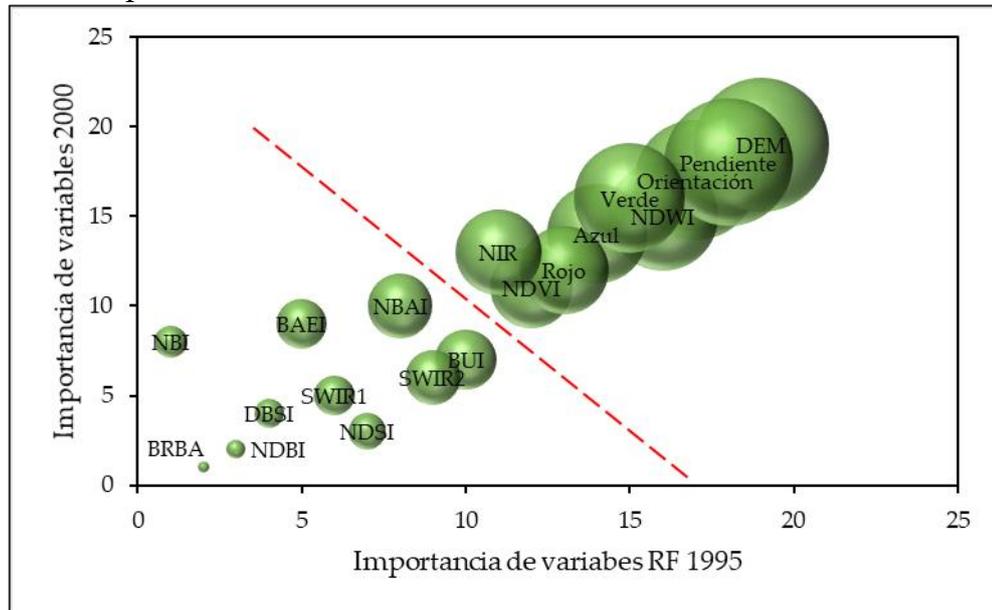
Anexo 1. Características y umbrales de las imágenes utilizadas

Fecha	Sensor	Cobertura de nubes (%)	Umbral NDSI
18/07/1985		18	≥ 0.34
22/08/1986		29	≥ 0.34
18/03/1987		4	≥ 0.33
11/08/1988		6	≥ 0.32
10/05/1989		24	≥ 0.34
2/09/1990		39	≥ 0.33
20/08/1991		48	≥ 0.33
18/05/1992		26	≥ 0.33
6/06/1993		4	≥ 0.33
12/08/1994		0	≥ 0.32
25/04/1995		5	≥ 0.35
30/06/1996		16	≥ 0.33
5/09/1997	Landsat 5	12	≥ 0.33
6/07/1998	TM	21	≥ 0.32
10/08/1999		5	≥ 0.32
28/08/2000		38	≥ 0.33
28/06/2001		5	≥ 0.35
4/07/2003		11	≥ 0.32
4/06/2004		6	≥ 0.34
23/06/2005		34	≥ 0.34
25/05/2006		1	≥ 0.34
3/10/2007		1	≥ 0.32
3/09/2008		13	≥ 0.32
5/08/2009		6	≥ 0.33
24/08/2010		11	≥ 0.33
11/08/2011		14	≥ 0.31
16/08/2013		7.25	≥ 0.29
7/11/2014		12.29	≥ 0.21
9/10/2015	Landsat 8	24.76	≥ 0.29
23/07/2016	OLI	0.63	≥ 0.30
26/07/2017		14.25	≥ 0.29
26/05/2018		6.3	≥ 0.31
6/07/2019		4.41	≥ 0.52
5/07/2020	Sentinel 2	1.3	≥ 0.54
15/07/2021	MSI	1.05	≥ 0.55
15/06/2022		0	≥ 0.52

Fuente: Elaboración propia

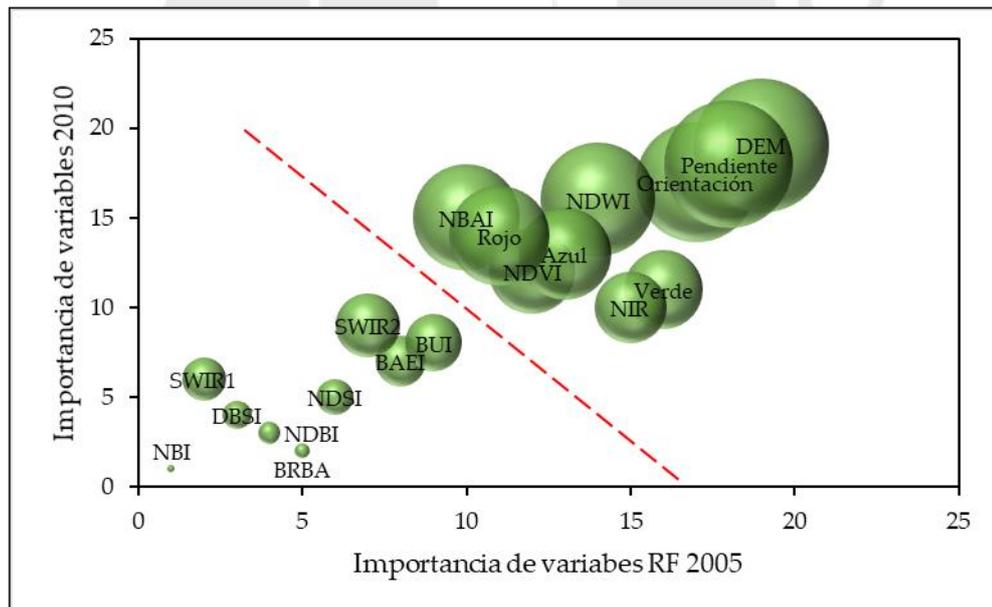
Anexo 2. Importancia de las variables predictoras para el modelo RF

Anexo 2.1 Importancia de variables de los modelos 1995 – 2000



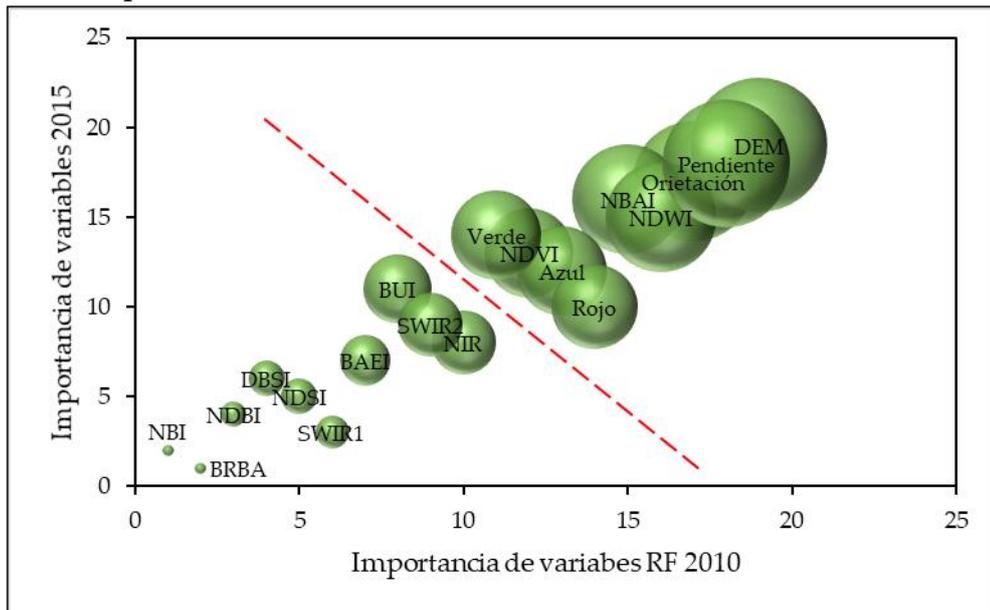
Fuente: Elaboración propia con base en Martínez (2021)

Anexo 2.2 Importancia de variables de los modelos 2005 – 2010



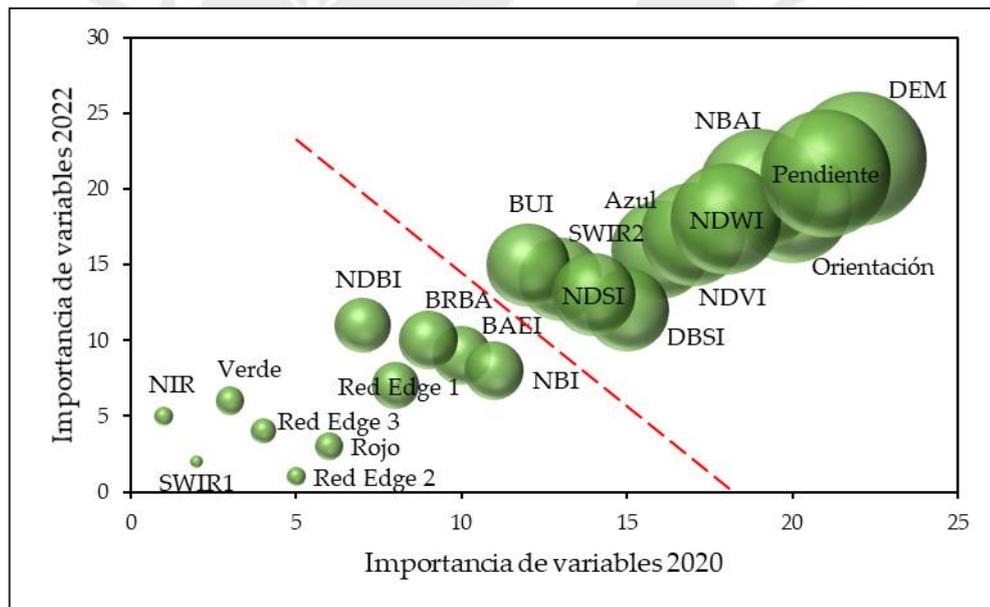
Fuente: Elaboración propia con base en Martínez (2021)

Anexo 2.3 Importancia de variables de los modelos 2010 – 2015



Fuente: Elaboración propia con base en Martínez (2021)

Anexo 2.4 Importancia de variables de los modelos 2020 – 2022



Fuente: Elaboración propia con base en Martínez (2021)

Anexo 3. Códigos de GEE elaborados para esta investigación

Scripts	Descripción
Lopez2023 – NDSI (1985 – 2022)	Refiere al análisis anual de la cobertura glaciar con el método NDSI.
Lopez2023 - RFXXXX	Refiere al script de clasificación de cobertura de suelo con el método Random Forest utilizando todas las variables predictoras.
Lopez2023 – RFXXXX ImpVar	Refiere al script final de clasificación de cobertura de suelo con el método Random Forest, es decir, solo utilizando las variables predictoras más importantes.

Acceso a la carpeta compartida en Google Earth Engine:
https://code.earthengine.google.com/?accept_repo=users/ciber/Lopez2023

Fuente: Elaboración propia

