

FACULTAD DE
LETRAS Y CIENCIAS
HUMANAS



PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ

ESPECIALIDAD DE GEOGRAFÍA Y MEDIO AMBIENTE

*ANÁLISIS MULTITEMPORAL DE GLACIARES Y LAGUNAS
GLACIARES EN LA CORDILLERA BLANCA E IDENTIFICACIÓN
DE POTENCIALES AMENAZAS GLOFs*

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

ADERLY ANDRÉS YAP ARÉVALO

Asesor:

FABIAN DRENKHAN

Lima, octubre 2015

RESUMEN

En la actualidad, el cambio climático ha alterado la temperatura, precipitación, humedad y otros indicadores océano atmosféricos globales, lo que incide en el equilibrio de los sistemas glaciares de todo el mundo, pero con mayor sensibilidad en los glaciares tropicales y cuya consecuencia más visible es su derretimiento acelerado.

En las últimas décadas los glaciares han experimentado un retroceso acelerado sin precedentes desde la máxima extensión de la Pequeña Edad de Hielo (LIA). En la Cordillera Blanca, se calcula que desde la LIA hasta la actualidad, la superficie glaciaria se redujo de los 900-850 km² (Georges, 2004) a 484km² (la presente investigación). Esto ha permitido el desarrollo de numerosas lagunas, las cuales son conocidas por su belleza como por las amenazas relacionadas a ellas, una de ellas son las Avenidas Repentinas por Desbordamiento de Lagunas Glaciares (GLOF).

En este trabajo, por medio de modelos basados en los índices de cocientes NDSI (Normalized Difference Snow Index) y NDWI (Normalized Difference Water Index) se identifican y analizan los cambios en los glaciares y lagunas glaciares ocurridos en la Cordillera Blanca durante los años 2004-2014, obteniendo como resultados el incremento en 5.36 km² de la superficie lagunar, lo que representa 10% de ganancia, y la disminución de 31 km² de la superficie glaciaria, que representa una pérdida de 6%. Además, en esta investigación se identificaron 24 lagunas nuevas, de las cuales 17 son de origen glaciario y 7 de origen antrópico (actividad minera).

Así mismo, según criterios descritos en el presente trabajo, se evalúa y plantea la posibilidad de identificar lagunas que podrían representar una potencial amenaza de GLOF (Avenidas Repentinas Ocasionadas por Lagunas Glaciares, por sus siglas en inglés), de manera que, de las 812 lagunas identificadas en el área de estudio, 99 podrían ser consideradas una potencial amenaza, esto es un poco más del 12% de las lagunas identificadas, información que puede servir de insumo a futuros trabajos e investigaciones que profundicen más los temas relacionados a la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) y particularmente los riesgos relacionados a GLOFs.

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Mapa de ubicación del área de estudio	7
Figura 2: Correlación entre balance de masa glaciar anual (Oct. - Sep.) y SST promedio de los meses de Oct.-Abr. en la región El Niño 3.4.....	9
Figura 3: Variación diaria y anual de la temperatura del aire y su relación con la latitud.....	17
Figura 4: Distribución de los glaciares en los trópicos	17
Figura 5: Regímenes de los glaciares tropicales.	18
Figura 6: Subsistemas del sistema glaciar.....	19
Figura 7: Tipos de lagunas glaciares según su posición en el glaciar. Laguna marginal a la izquierda y laguna proglaciar a la derecha.	20
Figura 8: Tipos de lagunas glaciares según el material por el que está formado el dique.....	21
Figura 9: Interacciones de los conceptos de Riesgos de Desastres	26
Figura 10: Escenas GeoCover y SRTM versión 4 en el área de estudio.	29
Figura 11: Malla cuadriculada para ensayo comparativo de métodos de ortorrectificación.	31
Figura 12: Flujo de trabajo en el ModelBuilder para detectar glaciares.....	34
Figura 13: Flujo de trabajo en el ModelBuilder para detectar lagunas.	35
Figura 14: Procedimiento esquemático de Gestión de Riesgo de GLOF.....	36
Figura 15: Esquema del proceso de identificación de las potenciales amenazas.....	37
Figura 16: Parámetros establecidos para identificar la potencial amenaza de GLOF.....	37
Figura 17: Variación de la superficie glaciar en la Cordillera Blanca.....	41
Figura 18: Superficie glaciar por cuencas hidrográficas para los tres años analizados.	41
Figura 19: (a) Laguna nueva por represamiento de río; (b) Reservorios/pozas para actividad minera.....	42
Figura 20: Distribución de superficies lagunares por rangos de áreas y número de lagunas.	44
Figura 21: Distancia de lagunas a centros poblados según porcentajes.....	46
Figura 22: Distancia de lagunas por rangos a superficies glaciares.....	48
Figura 23: Laguna 365 en contacto directo con el glaciar.	49
Figura 24: Laguna 346 en el año 2003 y 2013.	50
Figura 25: Zonas de sombra de difícil detección. (1) Confusión hielo-sombra; (2) Confusión hielo-sombra-laguna; (3) Confusión laguna-hielo.	51
Figura 26: Lagunas secas entre los años 2009-2014.....	54
Figura 27: Dos lagunas ubicadas aguas arriba de campos agrícolas.	55

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1: Cordilleras estudiadas por la UGRH y años de registro	3
Tabla 2: Listado de GLOFs en la Cordillera Blanca.....	24
Tabla 3: Características de imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI.....	28
Tabla 4: Imágenes Landsat seleccionadas	28
Tabla 5: Umbrales definidos para detectar superficies glaciares y lagunas.....	32
Tabla 6: Umbrales establecidos para detectar lagunas entre los 4500 m ² y 13500 m ²	33
Tabla 7: Resultados del ensayo de calidad de métodos de corrección geométrica.....	39
Tabla 8: Cambios de la superficie glaciar en la Cordillera Blanca desde la Pequeña Edad de Hielo.	40
Tabla 9: Superficies glaciares en porcentajes por cuencas hidrográficas para los tres años analizados.	41
Tabla 10: Distribución altitudinal de los glaciares en la Cordillera Blanca.....	42
Tabla 11: Superficies y cantidad de lagunas en la Cordillera Blanca.....	42
Tabla 12: Superficies lagunares por rangos de áreas.	43
Tabla 13: Distribución altitudinal de las lagunas.....	44
Tabla 14: Número de lagunas según rangos altitudinales de pisos ecológicos.	44
Tabla 15: Distribución de lagunas según cuencas y subcuencas hidrográficas.....	45
Tabla 16: Distancia de lagunas a centros poblados.	46
Tabla 17: Listado de lagunas a menos de 1km de distancia de algún centro poblado que se encuentran en el canal de drenaje del potencial GLOF.....	47
Tabla 18: Lagunas a menos de 200 m de distancia hacia algún glaciar.	48
Tabla 19: Lagunas que al menos duplicaron su área durante los años 2004-2014.....	49
Tabla 20: Lagunas nuevas formadas en el periodo 2004-2014.....	50
Tabla 21: Anomalías en la temperatura superficial del mar (SST) en la región El Niño 3.4.	52

ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1: Índice de Desarrollo Humano en los distritos dentro del área de estudio.....	e
Anexo 2: Lagunas identificadas como potencial amenaza.....	h



LISTA DE ABREVIACIONES

ACC – Adaptación al Cambio Climático
 ANA – Autoridad Nacional del Agua
 AR – Assessment Report (elaborado por el IPCC)
 CGIAR - Consultative Group on International Agricultural Research
 DEM – Digital Elevation Model
 EIRD – Estrategia Internacional para la Reducción de Desastres
 ELA – Equilibrium Line Altitude
 ENSO – El Niño Southern Oscillation
 FoG – Fluctuations of Glaciers
 GIS – Geographic Information System
 GLIMS – Global Land Ice Measurements from Space
 GLOF – Glacial Lake Outburst Flood
 GTN-G – Global Terrestrial Network for Glaciers
 GRD – Gestión de Riesgo de Desastres
 IDH – Índice de Desarrollo Humano
 INDECI – Instituto Nacional de Defensa Civil
 INEI – Instituto Nacional de Estadística e Informática
 INGEMMET – Instituto Nacional Geológico Minero Metalúrgico
 IPCC – Intergovernmental Panel on Climate Change
 ITCZ – Intertropical Convergence Zone
 L1T – Level 1 Standard Terrain Correction
 LIA – Little Ice Age
 NDSI – Normalized Difference Snow Index
 NDWI – Normalized Difference Water Index
 NSIDC – National Snow and Ice Data Center
 OLI – Operational Land Imager
 ONERN – Oficina Nacional de Recursos Naturales
 ONG – Organización no Gubernamental
 ONI – Oceanic Niño Index
 PBI – Producto Bruto Interno
 PNUD – Programa de Naciones Unidas para el Desarrollo
 PUCP – Pontificia Universidad Católica del Perú
 RMS – Root Mean Square
 SERNANP – Servicio Nacional de Áreas Natulares Protegidas
 SRTM – Shuttle Radar Topography Mission
 SST – Sea Surface Temperature
 TM – Thematic Mapper
 UGRH – Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos
 UNEP – United Nations Environment Programme
 UNFCCC – United Nations Framework Convention on Climate Change
 UTM – Universal Transversal de Mercator
 WGI – World Glacier Inventory
 WGMS – World Glacier Monitoring Service

ÍNDICE

RESUMEN.....	i
ÍNDICE DE FIGURAS	ii
ÍNDICE DE TABLAS	iii
ÍNDICE DE ANEXOS	iv
LISTA DE ABREVIACIONES	v
ÍNDICE	vi
1 INTRODUCCIÓN.....	1
2 PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS.....	3
2.1 Problemática.....	3
2.2 Hipótesis.....	4
2.3 Objetivos.....	4
2.4 Justificación de la Investigación.....	5
3 ÁREA DE ESTUDIO	6
3.1 Ubicación.....	6
3.2 Características Físico-naturales y Socioeconómicas.....	6
3.2.1 Geología y Geomorfología	6
3.2.2 Clima.....	7
3.2.3 Hidrografía.....	9
3.2.4 Vegetación.....	10
3.2.5 Características Socioeconómicas	10
4 ESTADO DEL ARTE	12
4.1 Investigación Global sobre Glaciares y Lagunas en el Marco del Cambio Climático .	12
4.2 Inicios de Estudios Glaciológicos en la Cordillera Blanca.....	12
4.3 Monitoreo e Inventarios de Lagunas y Glaciares en la Cordillera Blanca	13
5 MARCO TEÓRICO	16
5.1 Conceptos Generales de Glaciología.....	16
5.1.1 Glaciares Tropicales.....	16
5.1.2 Balance de masa glaciar	18
5.1.3 Lagunas Glaciares.....	19
5.2 Impactos del Cambio Climático en Glaciares Tropicales en la Cordillera Blanca	21
5.3 Gestión del Riesgo de Desastres	25
6 METODOLOGÍA	28
6.1 Recolección de Imágenes Satelitales e Información Cartográfica.....	28
6.2 Pre-procesamiento de imágenes satelitales	30
6.3 Aplicación de índices de detección de nieve (NDSI), de detección de lagunas (NDWI) y elaboración de modelo semi-automatizado de detección de lagunas y glaciares.....	31
6.4 Cálculo de parámetros de lagunas.....	36
7 RESULTADOS	39
7.1 Resultados del ensayo de calidad de ortorrectificación y del proceso de aplicación de modelos semi-automatizados	39

7.2	Resultados de superficies glaciares y superficies de lagunas.	39
7.3	Resultados de los parámetros para identificar lagunas de potencial amenaza	46
8	DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES	51
8.1	Discusión y recomendaciones en relación a los resultados de superficies glaciares y lagunares.	51
8.2	Discusión y recomendaciones en relación a los parámetros para identificar lagunas de potencial amenaza.	54
9	CONCLUSIONES	57
	Bibliografía.....	a
	ANEXOS.....	e



1 INTRODUCCIÓN

Con alrededor de 1200 km², el Perú posee la mayor superficie de glaciares tropicales a nivel global, aproximadamente el 71%, de la cual la Cordillera Blanca abarca el 29%, esto representa aproximadamente el 43% de la superficie glaciar en el Perú (Rabatel, et al., 2013, p. 82; UGRH, 2014, p. 6).

En estas áreas de alta montaña se distribuyen y desarrollan numerosos ecosistemas de alto valor ecológico, económico, social y cultural, de los cuales dependen un gran número de poblaciones y sirven de soporte de subsistencia para una gran variedad de especies en gran parte endémicas. Además, como regulador hídrico, la importancia de cuencas glaciadas se evidencia particularmente en la época seca y no solo se limita a las zonas cabeceras del río sino también aguas abajo, por ejemplo en la vertiente árida del Océano Pacífico (Drenkhan, et al., 2015).

En la actualidad, el cambio climático, reflejado en alteraciones de la temperatura, precipitación, humedad, entre otros, incide en el equilibrio de los grandes sistemas globales, entre ellos los océanos, la atmósfera, los glaciares, los ecosistemas de alta montaña y otros; sin embargo, los glaciares tropicales de todo el mundo han sido particularmente sensibles frente a estos impactos y la situación a futuro es poco favorable, ya que incluso sin más cambios en el clima la tendencia a la pérdida de masa glaciar se mantendría por años o décadas, dado el tiempo de respuesta retrasada de varios glaciares (Vaughan, et al., 2013, p. 342).

En la Cordillera Blanca, el cambio climático ha llevado a la disminución de la superficie glaciar, desde la Pequeña Edad de Hielo (LIA, por sus siglas en inglés) a mediados del siglo XIX, donde el área glaciar se redujo aproximadamente de 900-850 km² a menos de 528 km² para inicios del siglo XXI (UGRH, 2012; Carey, et al., 2012), lo que ha ocasionado, entre otros efectos, la formación de lagunas glaciares y/o el aumento del tamaño de las que ya existían (Richardson & Reynolds, 2000, p. 31; Frey, et al., 2010a, p. 262).

Como consecuencia del retroceso de los glaciares, la evolución de las lagunas glaciares en la Cordillera Blanca han sido de interés debido a que en el transcurso de la historia numerosos desastres relacionados a movimientos de masa han ocurrido y generado pérdidas humanas y económicas (Ames Marquez & Francou, 1995, pp. 50-62; Morales Arnao, 1998, pp. 167-171). En el contexto de cambio climático, la frecuencia y magnitud de desastres relacionados a la inestabilidad de pendientes de roca y hielo, formación y desembalse de lagunas glaciares y avenidas repentinas ocasionadas por desembalse de lagunas glaciares (GLOF, por sus siglas en inglés), podrían incrementarse (Stoffel & Huggel, 2012, p. 248; Worni, et al., 2014, p. 162).

Por el contrario, la evolución de lagunas en zonas de alta montaña también puede representar una oportunidad de adaptación a las nuevas condiciones generadas por el cambio climático. Una de las oportunidades más resaltantes es el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico; por un lado la posibilidad de adecuar proyectos existentes para incrementar su capacidad de producción; y, por otro, la posibilidad de proyectos nuevos en lagunas que se hayan formado en los últimos 10 años o que hayan incrementado su tamaño (Terrier, et al., 2011).

Otra de las oportunidades más resaltantes, teniendo en cuenta que en el futuro la oferta hídrica disminuirá (Casassa, et al., 2007), es el aprovechamiento de las lagunas nuevas como reservorios de agua, ya que podrían convertirse en una de las principales fuentes de abastecimiento durante la época seca y así, intentar suplir el déficit por la reducción de las superficies glaciares. Por último, es una oportunidad para el turismo, hecho que se está haciendo en la actualidad con Pastoruri, la denominada ruta del cambio climático.

Pese a esta situación, la glaciología en el Perú es una disciplina poco estudiada. Hasta la actualidad no hay ninguna universidad en el país que ofrezca carreras o especializaciones en temas relacionados a glaciología, recursos hídricos y/o ecosistemas de alta montaña a pesar de las numerosas implicaciones adversas que contienen los impactos del cambio climático y las crecientes demandas y desafíos en la Gestión del Riesgo de Desastres (GRD) y Adaptación al Cambio Climático (ACC) en la cordillera de los Andes.

Ante esta situación, la presente investigación busca ser un aporte académico mediante el desarrollo de métodos de detección de lagunas y análisis de sus cambios durante el periodo estudiado (2004-2014). Por medio de la aplicación de técnicas de teledetección y uso de Sistemas de Información Geográfica (GIS, por sus siglas en inglés), para la detección de superficies glaciares y lagunares y así contribuir en a la actualización del inventario nacional de lagunas al año 2014. A su vez, esta investigación busca servir de apoyo en la toma de decisiones relacionadas al territorio en la Cordillera Blanca, mediante la inclusión de elementos de la gestión del riesgo, concretamente, la identificación de lagunas glaciares que podrían representar una potencial amenaza, por medio del cálculo de parámetros geométricos de las lagunas y su relación espacial con localidades emplazadas aguas abajo.

2 PROBLEMÁTICA Y OBJETIVOS

2.1 Problemática

A lo largo de la historia, numerosas lagunas glaciares han estado relacionadas con múltiples desastres en el Perú, generando grandes pérdidas humanas y económicas de las cuales se tienen registro desde el siglo XVIII mediante estudios sobre crónicas y documentos históricos (Ames Marquez & Francou, 1995, pp. 58-59; Morales Arnao, 1998).

Por su parte, la intensificación del Cambio Climático en las últimas décadas ha incrementado la formación y desarrollo de lagunas glaciares que podrían ser considerados una potencial amenaza. El rápido retroceso de los glaciares y la inestabilidad de la pendiente que este fenómeno genera incrementan la posibilidad de ocurrencia de avalanchas, lahares, GLOSFs, entre otros.

En la Cordillera Blanca, los GLOF son uno de los principales movimientos en masa que han generado preocupación para la población local y las autoridades. Para poder gestionar y disminuir el riesgo de desastres, se han realizado varios esfuerzos desde la década de 1940. Entre estos figuran varias investigaciones que han llevado a la elaboración de obras para la prevención y mitigación de eventos GLOF, por ejemplo, la construcción de diques, para evitar el desprendimiento abrupto de las lagunas y la elaboración de obras hidráulicas, para controlar el volumen y caudal de las lagunas (Morales Arnao, 1998, pp. 169-171).

En la actualidad, la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) viene realizando esfuerzos con diferentes instituciones públicas y privadas (Gobiernos Regionales, universidades nacionales e internacionales, ONGs, entre otros), para poder hacer frente al problema. Uno de los resultados del trabajo de la UGRH es el Inventario Nacional de Lagunas y Glaciares (UGRH, 2012), que posee un registro de 16 de las 19 cordilleras que conforman el país (Ver Tabla 1).

Tabla 1: Cordilleras estudiadas por la UGRH y años de registro

N°	Cordillera	Año base
1	Blanca	2003
2	Huallanca	2007
3	Huayhuash	2007
4	Raura	2007
5	Huagoruncho	2009
6	La Viuda	2007
7	Central	2007
8	Huaytapallana	2009
9	Chonta	2009
10	Urubamba	2009
11	Vilcabamba	2009
12	La Raya	2010
13	Vilcanota	2009
14	Carabaya	2009
15	Apolobamba	2010
16	Volcánica	2009

Para el caso de la Cordillera Blanca, el inventario de lagunas tiene como año base el 2003, lo que es un problema si se tiene en cuenta que el derretimiento de los glaciares, en mayor medida generado por el cambio climático, está provocando el aumento del volumen de agua de las lagunas existentes y también está dando origen a lagunas que antes no existían. En este sentido, la dinámica de los glaciares y lagunas en el contexto del cambio climático, demanda un creciente monitoreo continuo en el tiempo, con la finalidad de poder identificar las potenciales amenazas y gestionar los riesgos de desastres para las localidades de la Cordillera Blanca.

Ante esta situación surgen algunas interrogantes que necesitan ser resueltas. Por un lado están las preguntas que contribuyen a la actualización del inventario elaborado por la UGRH y son la base para el análisis de esta investigación, como por ejemplo ¿cuánto han cambiado las superficies de las lagunas desde el 2003 hasta el 2014?, ¿cuántas lagunas nuevas hay actualmente?, ¿cómo detectar de forma rápida y precisa estas lagunas? Y; por otro lado, los cuestionamientos que incluyen componentes del riesgo como ¿qué características geométricas/geográficas podrían convertir a las lagunas en potenciales amenazas?, ¿cuáles son las lagunas que podrían ser consideradas como potenciales amenazas de eventos GLOF?

Esta investigación se enfoca en resolver estas interrogantes mediante el uso de herramientas de teledetección y GIS, muy potentes para acercarse a sitios remotos y de difícil acceso como el área de estudio de esta investigación, la Cordillera Blanca.

2.2 Hipótesis

En el contexto de impactos del cambio climático y ante la sensibilidad de los ecosistemas de alta montaña y de los glaciares tropicales, el derretimiento de los glaciares en la Cordillera Blanca ha favorecido el incremento de la superficie y cantidad de lagunas glaciares. A su vez, la evolución de las lagunas sumado al derretimiento de los glaciares han generado que algunas de las lagunas puedan representar una potencial amenaza de GLOF para las localidades asentadas aguas abajo, en el canal de drenaje.

2.3 Objetivos

Objetivo General:

- Identificar los cambios en las lagunas glaciares y glaciares que podrían representar una potencial amenaza de eventos GLOF para las localidades ubicadas aguas abajo en el canal de drenaje de las lagunas glaciares de la Cordillera Blanca durante los años 2004, 2009 y 2014, mediante la aplicación de una metodología semi-automatizada de detección de lagunas glaciares y análisis de cambios lagunares.

Objetivos específicos:

- Desarrollar una metodología semi-automatizada para la detección de lagunas glaciares, superficies glaciares y análisis de cambios lagunares mediante herramientas de teledetección y GIS.

- Determinar parámetros geométricos y geográficos de las lagunas glaciares en la Cordillera Blanca que permitan identificar las lagunas glaciares que podrían ser una potencial amenaza de GLOF.

2.4 Justificación de la Investigación

Esta investigación se justificó por varias razones. Primero, porque en el contexto actual de retroceso acelerado de los glaciares por el Cambio Climático, es imperativo realizar un monitoreo continuo de glaciares y lagunas glaciares con la finalidad de identificar potenciales amenazas que pongan en riesgo a poblaciones, ecosistemas, actividades económicas, entre otros, y realizar las medidas necesarias para una adecuada Gestión del Riesgo de Desastres.

Segundo, porque genera información de lagunas glaciares adicional a la del Inventario de Lagunas y Glaciares de la Cordillera Blanca elaborado por la UGRH (2014) en un periodo más reciente, ya que en este inventario de lagunas, para la Cordillera Blanca se tiene como año base el 2003, lo que deja un vacío de 11 años, que es abarcada en esta investigación.

Tercero, porque tanto la metodología de esta investigación puede ser replicada y/o mejorada para el monitoreo continuo de superficies glaciares y lagunares, así como también el uso de los resultados para futuras investigaciones.

Cuarto, porque las lagunas glaciares son un recurso importante que es aprovechado por diferentes sectores de la sociedad, tanto como suministro de agua para el consumo de muchas localidades, así como para el soporte de las diferentes actividades económicas que dependen de ella como, por ejemplo, la agricultura tradicional y agroindustria, las industrias, la minería, entre otras, que se llevan a cabo en las partes altas de las cuencas durante la época seca.

Cabe destacar que la formación y evolución de las lagunas glaciares son una gran oportunidad para el aprovechamiento del potencial hidroeléctrico, ya que presentan las condiciones geográficas, represas naturales ubicadas en partes altas, favorables para esta actividad.

Por último, porque es un aporte adicional para el desarrollo del tema glaciológico en el Perú, contribuyendo a la visibilidad de la temática e investigación en la PUCP (Pontificia Universidad Católica del Perú) y academia peruana.

3 ÁREA DE ESTUDIO

Para que los resultados de esta investigación puedan ser comparables y analizables objetivamente, se ha utilizado la misma área de estudio (Ver Figura 1) que la UGRH empleó en su Inventario de Lagunas de la Cordillera Blanca (2012).

3.1 Ubicación

La Cordillera Blanca está ubicada entre las coordenadas 7°41'31" a 10°10'57" latitud sur y 76°54'57" a 78°18'1" longitud oeste, dentro de la zona tropical exterior (ver 5.1.1). Se prolonga a 30° en dirección noroeste, desde el nevado Rajutuna hasta el nevado Pelagatos, con una longitud lineal de 210 km (Ver Figura 1). Es la cordillera nevada más extensa en longitud y elevada de las 19 que existen en el Perú (UGRH, 2012).

El área de estudio es el mismo empleado por la UGRH, esta comprende una superficie aproximada de 16,073 km² y se extiende a las vertientes del Pacífico y del Atlántico, ya que actúa como divisoria continental. Sin embargo, el área de análisis es mucho menor (aproximadamente 800 km²), ya que está restringida al área donde se encuentran los glaciares, lagunas y los centros poblados cercanos a estos.

Los límites son, al oeste con la Cordillera Negra y al este con el río Marañón, mientras que de norte a sur ocupa el territorio del Callejón de Huaylas. También posee una variedad altitudinal que va desde los 500 hasta los 6768 m.s.n.m. (UGRH, 2014).

Desde el punto de vista político administrativo, el 85% del área de estudio se encuentra en la región de Ancash, mientras que el otro 15% en La Libertad. Espacialmente, abarca 17 provincias: 15 del departamento de Ancash y 2 del departamento de La Libertad. Además, comprende un total de 96 distritos: 83 pertenecientes al departamento de Ancash y 13 a La Libertad.

3.2 Características Físico-naturales y Socioeconómicas

3.2.1 Geología y Geomorfología

Las rocas de la Cordillera de los Andes se caracterizan por una sucesión estratigráfica casi continua desde el Neoproterozoico hasta el Cuaternario (entre ~1000 Ma y ~10 ka). Estas rocas incluyen metamorfitas, sedimentitas marinas y continentales, rocas intrusivas, plutónicas y volcánicas, las que son tapizadas por una cobertura irregular de depósitos aluviales, glaciofluviales y lacustres (Cobbing, 1996).

La actividad tectónica y magmática dominó durante el Cenozoico (~65.5 Ma atrás), siendo este el periodo de mineralización de la Cordillera Blanca y la Cordillera Negra. Ya para el Cenozoico tardío se produce un intervalo de erosión que produce la peneplanización de la superficie de puna, que alcanza su máxima expresión a fines del Mioceno y comienzos del Plioceno (Wilson, et al., 1967, p. 93).

sus siglas en inglés), la ubicación de la Cordillera Blanca con respecto a la Zona de Convergencia Intertropical (ITZC, por su sigla en inglés), la cuenca amazónica como área fuente de humedad para las precipitaciones y el efecto orográfico sobre la temperatura y la precipitación (Úbeda & Palacios, 2008, p. 33).

En el lado occidental, las aguas frías disminuyen la temperatura media del aire (menos de 10°C que en la vertiente amazónica), lo que genera el fenómeno de inversión térmica que inhibe la condensación y formación de precipitación en la costa, particularmente en la época seca (Mayo-Octubre), impidiendo que la humedad penetre tierra adentro y ascienda hacia los Andes (Úbeda & Palacios, 2008, p. 33; Vuille, 2013).

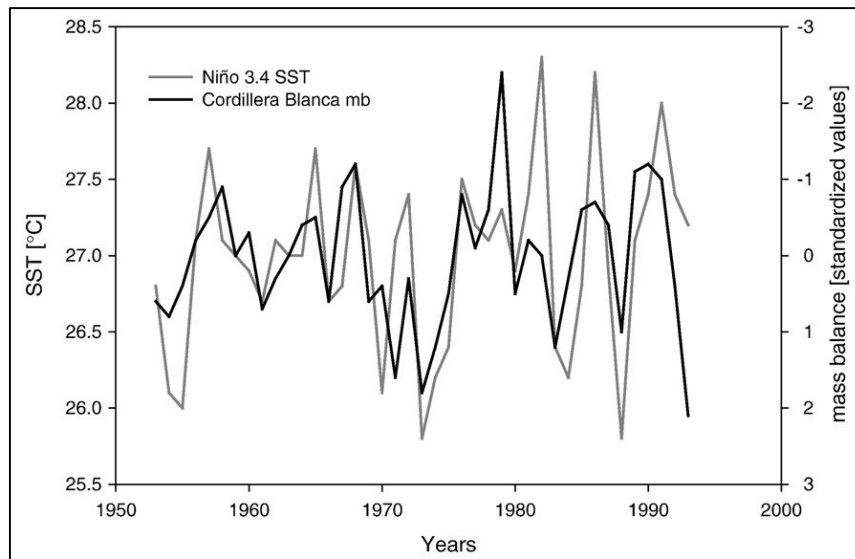
En cambio, la abundante humedad transportada desde el Atlántico tropical por los vientos del este, generan condiciones muy húmedas y elevadas tasas de precipitaciones en la cuenca amazónica. En la época de verano austral, los vientos propician la entrada de humedad hacia los Andes, lo que da como resultado una estación lluviosa característica en el Perú entre los meses de Noviembre y Abril, que llegan a tener entre 500 y 800 mm/año (Úbeda & Palacios, 2008, p. 35; Vuille, 2013).

Por otro lado, el efecto orográfico de la cordillera hace que la temperatura disminuya de manera proporcional a medida que se asciende altitudinalmente. Del mismo modo para la precipitación, los valores pluviométricos tienden a disminuir conforme se alejan de la cuenca del Amazonas, lo que a escala local representa variaciones importantes en el clima en contraste al clima regional (Úbeda & Palacios, 2008, p. 35).

Estas características conjuntas definen la configuración media de las condiciones climáticas en la Cordillera Blanca; sin embargo, existen variaciones interanuales relacionadas a la ocurrencia del fenómeno ENSO con recurrencia e intensidad variable. Por lo general, durante El Niño ocurre un incremento en la temperatura del mar y exceso pluviométrico en la costa norte peruana, mientras que en el altiplano de Bolivia y el sur del Perú ocurre un déficit en la precipitación, sequías y mayor derretimiento glaciar, lo que contribuye directamente a la formación de lagunas. Por otro lado, durante La Niña la situación es inversa, el balance de masa glaciar pasa por una anomalía positiva y la superficie glaciar aumenta. En Vuille, et al. (2008a) se mostró la fuerte correlación existente entre el balance de masa glaciar y la SST en la región El Niño 3.4 (Figura 2). (Vuille, et al., 2008a; Vuille, 2013).

No obstante, aún no se comprende los determinantes principales que generan el ENSO, también debido a limitaciones relacionadas a registros de datos insuficientes y de calidad discutible, para lo cual se necesitaría contar con una red de observatorios más representativa, tanto espacial como temporalmente (Úbeda & Palacios, 2008, p. 36; Vuille, et al., 2008a; Vuille, 2013).

Figura 2: Correlación entre balance de masa glaciar anual (Oct. - Sep.) y SST promedio de los meses de Oct.-Abr. en la región El Niño 3.4



3.2.3 Hidrografía

La Cordillera Blanca actúa como una divisoria de aguas entre las dos grandes vertientes hidrográficas, la del Pacífico y del Atlántico. En el flanco Oeste aporta a la cuenca del río Santa, que drena sus aguas al océano pacífico, mientras que al Este aporta a la intercuenca del Alto Marañón, que desemboca en el Marañón y posteriormente en el océano atlántico, estas son las dos cuencas en la que se distribuye gran parte del área de estudio; por otro lado, al Sur y en menor medida, aporta a la cuenca del río Pativilca.

El río Santa nace en la laguna de Conococha y recibe el aporte de 548 glaciares, recorre el Callejón de Huaylas, llega al Valle del río Santa y desemboca en el océano Pacífico. Por otra parte, el río Pativilca tiene como principal tributario al río Pischcaragra y recibe el aporte de 10 glaciares de la Cordillera Blanca. Por último, el río Marañón se alimenta de dos grandes subcuencas, la de los ríos Yanamayo y Puchca y recibe el aporte de 197 glaciares (UGRH, 2014).

El sistema hidrográfico de la Cordillera Blanca está conformado por una superficie de glaciares de aproximadamente 528 km², distribuidos en los 14 sistemas glaciares que existen en el área. Además, cuenta con más de 29 km² de lagunas y recorren 23 ríos principales dentro del área de estudio (UGRH, 2014).

La superficie glaciar de la Cordillera Blanca cumple el rol de almacenamiento de agua durante todo el año, abastece el caudal de los ríos mediante la escorrentía por fusión de hielo, beneficiando a las poblaciones, actividades y ecosistemas ubicados aguas arriba, pero sobre todo, es de vital importancia durante la época seca (Vergara, et al., 2007, p. 261).

3.2.4 Vegetación

La variabilidad altitudinal de la Cordillera Blanca ha permitido que existan diversas zonas de vida. De las 104 clasificaciones de zonas de vida que existen en el mundo, el Perú cuenta con 84, de las cuales 11 se encuentran en la Cordillera Blanca (SERNANP, 2011, p. 68).

La variabilidad altitudinal, configuración orográfica, factores bioclimáticos, entre otros, han permitido la formación de diferentes tipos de ecosistemas en distintas elevaciones, estos albergan una gran variedad de especies, muchas de ellas endémicas (Mostacero León, 1996; Villanueva Ramírez, 2011, p. 13).

La capacidad adaptativa de la flora a las condiciones medioambientales extremas, como por ejemplo, gran rango de elevación, alta variabilidad termal diaria, temperaturas debajo del punto de congelación, radiación solar pronunciada, entre otros, han permitido la existencia de una gran diversidad de plantas.

El primer estudio de flora más completo del área fue elaborado por David Smith (1988), identificando 104 familias, 339 géneros y 799 especies de plantas vasculares. Posteriormente, los encargados del Parque Nacional Huascarán, quienes tienen la labor de actualizar los datos de riqueza de flora, registraron 114 familias, 374 géneros y 901 especies (SERNANP, 2011, p. 82).

Sobre la fauna, su distribución está directamente relacionada con la altitud y las comunidades vegetales existentes; sin embargo, la fauna ha sido muy poco estudiada y los estudios que existen se han concentrado dentro del Parque Nacional Huascarán (Proyecto Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático, 2009, p. 38).

El registro de la fauna existente hace énfasis en vertebrados; sin embargo, los macro invertebrados son un grupo importante del cual se tienen muy pocos datos. De este modo, se tienen identificadas un total de 241 especies, en su mayoría aves (210), seguida por mamíferos (25), reptiles (4) y anfibios (2) (SERNANP, 2011, p. 82).

3.2.5 Características Socioeconómicas

Dentro del área de estudio existen 3989 localidades, de las cuales 13 son capitales de provincia, 73 capitales de distrito y 3902 centros poblados, todos estos albergan alrededor de 523321 personas. Los cinco centros poblados con mayor cantidad de habitantes son Huaraz, Centenario, Huamachuco, Caraz y Yungay, ellos albergan a casi el 29% de toda la población asentada dentro del área de estudio (INEI, 2007).

Otra característica importante de la población dentro del área de estudio es que la mayoría vive en áreas rurales, casi el 55%. Esta proporción es más acentuada para los distritos del departamento de La Libertad con un 68.14%, mientras que en los distritos del departamento de Ancash la población que vive en áreas rurales representa el 52.88% (INEI, 2007).

Por otro lado, respecto a las actividades económicas, las más importantes son los servicios, la minería, la agricultura, el turismo y la generación de energía. Sin embargo, la actividad que

demanda mayor cantidad de mano de obra es la agrícola (27% de la mano de obra) y entre los años 1994-2012, la superficie irrigada en la región Ancash se ha incrementado en más de 44% (Villanueva Ramírez, 2011, p. 17; Drenkhan, et al., 2015).

Para el 2013, las actividades que aportaban más al PBI de la región Ancash son la minería (43%) y el sector servicios (12%), que considera a la pesca, transporte y almacenamiento, hospedaje y restaurantes, electricidad y agua, y telecomunicaciones (IPE, 2015); mientras que para la región La Libertad, las actividades que más aportan a su PBI son la minería (19%), servicios (19%), dentro de los cuales se considera la administración pública y defensa, hospedaje y restaurantes, telecomunicaciones, pesca, y electricidad y agua, y el sector manufactura (16%) (IPE, 2015a).

Respecto al desarrollo de la población, según el IDH del año 2012, todos los distritos dentro del área de estudio poseen un índice menor a 0.5 (Ver Anexo 1); es decir, un índice de desarrollo bajo. Además, aproximadamente 38 de los 96 distritos poseen un índice muy bajo, por debajo de 0.25. Estos valores muy por debajo del promedio responden a una realidad en la que solo 8 de los distritos poseen ingresos superiores a 500 soles, siendo el sueldo mínimo vital 750 soles, y solo 17 distritos superan el 50% de población con secundaria completa (PNUD, 2013).

Estas características vuelven vulnerables a las poblaciones frente a las consecuencias del cambio climático y los eventos extremos, ya que disminuye su capacidad de respuesta ante fenómenos como el derretimiento acelerado, las inundaciones, avalanchas, entre otros (PNUD, 2014, pp. 5-6).

4 ESTADO DEL ARTE

4.1 Investigación Global sobre Glaciares y Lagunas en el Marco del Cambio Climático

Los primeros registros de mediciones de glaciares datan desde el siglo XVII, pero los estudios científicos modernos desde mediados del siglo XX (Cuffey & Paterson, 2010, p. 2). Los estudios de recopilación de información de cambios en los glaciares (superficie, volumen, retroceso o avance del glaciar, entre otros) se empezaron a realizar en 1894, con la fundación de la Comisión Internacional de Glaciares en el 6º Congreso Internacional de Geología que se realizó en Zurich, Suiza. En la actualidad, las labores de colección, publicación de información estandarizada, distribución y registro de cambios en los glaciares son realizadas por el WGMS (World Glacier Monitoring Service, por sus siglas en inglés), gracias a sus colaboradores en varios países del mundo (WGMS/UNEP, 2008, p. 11).

El WGMS junto al National Snow and Ice Data Center (NSIDC) y sus instituciones cooperantes, GLIMS, WGI y FoG (Ver lista de abreviaciones) forman parte de la Global Terrestrial Network for Glaciers (GTN-G), que cuenta con una base de datos con registros de glaciares, lagunas glaciares, entre otros, de varias regiones del mundo, obtenidos por medio de mediciones en campo, así como de datos derivados de sensores remotos y que están disponibles al público (WGMS/UNEP, 2008, p. 14).

Además, las investigaciones sobre glaciares y su relación con el clima han sido bien documentadas, tanto en estudios paleoclimáticos, así como los relacionados al cambio climático. La institución que actualmente se encarga de la producción y recopilación de la información relacionada al cambio climático es el Panel Intergubernamental para el Cambio Climático (IPCC), que hasta la fecha ha elaborado cinco Informes de Evaluación (AR 1-5) que abarcan la base física e impactos, vulnerabilidad, adaptación y mitigación relacionados al cambio climático (WGMS/UNEP, 2008; IPCC, 2013).

4.2 Inicios de Estudios Glaciológicos en la Cordillera Blanca

A nivel regional-local, los estudios de sistemas glaciares en los Andes tropicales cuentan con diferentes limitaciones; primero, relacionadas a la poca disponibilidad de datos históricos por la falta de estaciones de medición; segundo, la calidad de los datos existentes, ya que en muchos casos no son homogéneos y carecen de calibración y registro en diferentes épocas (datos incompletos); tercero, la falta de registros de parámetros climáticos y glaciológicos in situ por la difícil accesibilidad y los recursos económicos que demanda; y, por último, la falta de modelos climáticos acordes a las condiciones físicas de los Andes tropicales, ya que las condiciones locales tienen mucha influencia sobre el clima (Vuille, et al., 2008, p. 80; Kaser & Osmaston, 2002, p. 15).

A pesar de dichas limitaciones se han podido realizar numerosas investigaciones y, particularmente, la Cordillera Blanca ha sido una de las cordilleras glaciadas más estudiadas de la zona tropical, tanto por su majestuosidad y turismo, por amenazas y desastres relacionados, que han sido registrados a lo largo de la historia, así como por su importancia como fuente de

abastecimiento de agua para las diferentes actividades de la región, por ejemplo, consumo humano, agricultura, minería, energía, entre otros (Vergara, et al., 2007, p. 261; Vuille, et al., 2008, pp. 80-81; Carey, 2010). A continuación, se realiza un breve recuento de los estudios de glaciares y lagunas en la Cordillera Blanca.

Las primeras exploraciones importantes en la Cordillera Blanca llevadas a cabo por el Club Alpino austroalemán, el cual no solo se preocupó por realizar ascensiones, sino también investigaciones, principalmente en temas geografía, glaciología y topografía (Ames Marquez & Francou, 1995; Morales Arnao, 1998, p. 155).

Por su parte, el Estado peruano empezó a mostrar preocupación como consecuencia del aluvión ocurrido en diciembre de 1941, evento en el cual casi la tercera parte de la ciudad de Huaraz fue destruida, delegando en 1942 al Instituto Geológico del Perú para que se encargara del estudio de las causas e identificación de las lagunas en la Cordillera Blanca y elaborar proyectos de mitigación; en ese contexto se creó la Comisión de Lagunas de la Cordillera Blanca (Morales Arnao, 1998, p. 155; UGRH, 2012, p. s/n).

Entre 1945 y 1972, la Corporación Peruana del Santa y la Oficina Regional de Electricidad, precursores en la investigación glaciológica a nivel institucional, financiaron varios estudios que permitieron obtener una serie de reportes sobre glaciares, geología glacial y lagunas glaciares (Ames Marquez & Francou, 1995; Morales Arnao, 1998, p. 156).

Posteriormente, entre los años 1966 a 1986 se creó un departamento especial de estudios de glaciares con el objetivo principal de realizar estudios glaciológicos en la Cordillera Blanca y la planificación de proyectos de construcción para la prevención de catástrofes relacionadas a GLOF. Posteriormente, estas investigaciones se extenderían a escala nacional, generando el primer inventario de glaciares y lagunas el año 1988 (Morales Arnao, 1998, p. 156).

Por su parte, el departamento de estudios de glaciares pudo mantenerse a lo largo del tiempo; aunque tuvo varias interrupciones relacionadas al cambio de instituciones a la que esta unidad estaba adscrita, entre ellas la Corporación Peruana del Santa, HIDRANDINA, ELECTROPERÚ S.A. y el INGEMMET. Sin embargo, desde 1999, llamada desde ese entonces UGRH, pasó a ser parte del INRENA hasta el 2008. Posteriormente, gracias a la creación de la ANA, la UGRH pasó a formar parte de ella y continúa hasta la actualidad (UGRH, 2012, p. s/n).

4.3 Monitoreo e Inventarios de Lagunas y Glaciares en la Cordillera Blanca

El primer inventario de glaciares y lagunas glaciares fue elaborado por la Comisión de Control de Lagunas de la Cordillera Blanca y completado por la oficina de Glaciología y Seguridad de Lagunas, a cargo de ELECTROPERÚ. En 1992, después de haberse ampliado el área de estudio y mejorado las técnicas para la identificación de lagunas, se logra culminar el inventario con toda la información recopilada hasta esa fecha. (UGRH, 2012, p. s/n).

El inventario de ELECTROPERÚ se elaboró teniendo como insumos fotografías aéreas del año 1970, con las cuales se logró el registro de 627 lagunas mayores a 4,000 m² y 723.4 km² de superficie glacial. Por otro lado, el año 1980, la Oficina Nacional de Evaluación de Recursos

Naturales (ONERN) elaboró un inventario de lagunas y represamientos con fines de determinar el potencial energético y productivo en el país y para identificar las lagunas de potencial amenaza de desborde, en aquella investigación se lograron identificar 630 lagunas dentro de la cuenca del río Santa (UGRH, 2012, p. s/n).

Actualmente, la Cordillera Blanca cuenta con un inventario de lagunas y glaciares elaborado por la UGRH que fue publicado el año 2010 (vuelto a publicar el 2014 en el marco del inventario nacional, pero sin mayores cambios) en base a 13 imágenes satelitales de ASTER y 2 SPOT-5, (15 y 10 m resolución espacial, respectivamente), de los años 2001-2003 y 2006; siendo el año con mayor cobertura el del 2003 (UGRH, 2012, p. s/n).

En este inventario se identificaron las lagunas por medio de interpretación visual y digitalización directa, teniendo como base combinaciones de bandas espectrales para delimitar con claridad el contacto agua-tierra, de este modo se lograron identificar 1902 lagunas, de las cuales se registraron 830, ya que se excluyeron aquellas que no cumplían la unidad mínima cartografiada de 5000 m². Sin embargo, las lagunas registradas representan el 96.5% del área lagunar total identificadas, por ello, es una muestra representativa. Del mismo modo, para la identificación de los glaciares se empleó un método automatizado (Normalized Difference Snow Index - NDSI), con el que se lograron identificar 755 glaciares en 14 sistemas glaciares con un área mínima cartografiada de 5000 m², que cubren un área de 527.6 km² (UGRH, 2012, p. s/n).

En la actualidad, las mediciones en glaciares y lagunas se obtienen por medio de métodos directos (mediciones in situ) e indirectos (fotografías aéreas e imágenes satelitales). Entre los métodos directos están las mediciones de distancias y áreas en las lenguas y partes elevadas del glaciar y el balance anual de masa, y volúmenes de glaciares y lagunas, por ejemplo mediante métodos de batimetría (Kaser, et al., 2003, pp. 21-26).

Por otro lado, entre los métodos indirectos, las herramientas y técnicas de teledetección y GIS han sido un apoyo muy importante. La identificación de lagunas y glaciares mediante la digitalización manual es considerada uno de los métodos más exactos para delimitar glaciares y lagunas; además, ha permitido el acceso a lugares remotos en los que la necesidad de recursos económicos en trabajo de campo hubiera sido necesaria. Sin embargo, la digitalización manual no es una buena alternativa cuando se trata de análisis multitemporal o cuando el área de estudio es bastante grande, puesto que consume mucho tiempo y además requiere un alto grado de experiencia del operador (Burns & Nolin, 2014, p. 165).

Es por ello que además de la digitalización manual se utilizan métodos (semi)automatizados para la detección de glaciares y lagunas según las características espectrales de estos objetos en la imagen digital, haciendo uso de técnicas de índices y cocientes de bandas que llevan a un resultado similar de precisión pero con menor tiempo en la ejecución comparándolos con la digitalización manual (Bajracharya & Mool, 2009, p. 81; Burns & Nolin, 2014, pp. 165-166).

Por otra parte, los métodos (semi)automatizados poseen dificultades relacionadas a la resolución espacial y temporal limitada de las imágenes satelitales (al menos distribuidas de forma gratuita,

como por ejemplo Landsat), a la confusión de objetos en la clasificación, entre otros. Sin embargo, existen numerosas investigaciones sobre glaciares y lagunas glaciares en las que se utilizan estos métodos, conjuntamente con análisis de modelos de elevación digital, y se han obtenido resultados satisfactorios (Huggel, et al., 2002; Huggel, et al., 2002a; McKillop & Clague, 2007; Bajracharya & Mool, 2009; Frey, et al., 2010; Frey, et al., 2010a; Hanshaw & Bookhagen, 2014; Burns & Nolin, 2014).



5 MARCO TEÓRICO

5.1 Conceptos Generales de Glaciología

En este punto se definen los conceptos más importantes sobre los glaciares y se realiza una breve descripción de sus características, como por ejemplo, el balance de masa glaciar, proceso de gran importancia para la existencia, tanto de los glaciares como de las lagunas glaciares, elementos clave de esta investigación.

5.1.1 Glaciares Tropicales

Los glaciares son masas espesas de hielo glaciar que se originan por medio de acumulación, compactación y recristalización de la nieve. Estas masas de hielo están formadas por cristales de hielo, nieve (0.1 g/cm^3), neviza o firn (0.6 g/cm^3), agua, aire y detritos de rocas que se acumulan en una masa de nieve durante muchos años, se compactan y se convierten en glaciar ($0.8\text{-}0.9 \text{ g/cm}^3$) (Tarbuck & Lutgens, 2005, p. 506; Carenas, et al., 2014, p. 310).

Además, son sistemas dinámicos que poseen un tipo de movimiento al que se le denomina flujo y al igual que cualquier otro líquido fluye hacia abajo (Tarbuck & Lutgens, 2005, pp. 510-511). El movimiento del glaciar puede ejercer gran erosión sobre el terreno, al tener una gran capacidad para transportar sedimentos y arrastrar bloques de gran tamaño. Prueba de ello son los paisajes que en la actualidad son rastros de la época del Pleistoceno ($\sim 10 \text{ ka}$ atrás), el periodo glacial más reciente (Tarbuck & Lutgens, 2005, p. 514).

Los glaciares existen en diferentes regiones del mundo en donde la tasa de acumulación es mayor que la de derretimiento; por lo general, esta condición ocurre en lugares de altitudes y latitudes elevadas y en partes occidentales de los continentes (Huddart & Stott, 2010, p. 504).

Desde el punto de vista glaciológico, los glaciares tropicales son aquellos que por su ubicación cumplen con las siguientes tres características: la primera, que se ubiquen dentro de los trópicos (23.5° N/S), donde la insolación es relativamente constante; la segunda, que la variación de la temperatura media diaria sea de igual a mayor a la temperatura media anual (Ver Figura 3); y, por último, que se encuentre dentro de la Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ), donde la humedad es mayor que en latitudes medias y altas (ver límites en Figura 4) (Kaser, 1995, p. 272; 1999, pp. 93-94; Kaser & Osmaston, 2002, p. 17)

En consecuencia, se puede encontrar glaciares tropicales en los Andes de Suramérica, en las montañas más altas de África y Nueva Guinea, y en las montañas Carstensz en Indonesia. Sin embargo, el 99% de ellos se encuentran en los Andes (Ver Figura 4), especialmente en el Perú con aproximadamente 71% del total mundial, de los cuales el 29% se encuentra en la Cordillera Blanca con un área de 528 km^2 (UGRH, 2014, p. s/n).

Por otro lado, mientras el régimen glaciar en latitudes medias se caracteriza por tener dos estaciones térmicas muy marcadas, una fría (invierno) donde predomina la acumulación y otra calida (primavera-verano) donde predomina la ablación, en los trópicos se pueden identificar dos zonas pluviales con regímenes claramente diferenciados: la zona tropical interior, donde las

precipitaciones persisten durante todo el año con dos ligeros incrementos relacionados al paso de la ITZC; y, la zona tropical exterior, con dos periodos diferenciados, uno húmedo, cuándo las altas tasas de acumulación predominan frente a las de ablación; y otro seco, cuándo predomina la ablación en niveles bajos y la acumulación es nula (Ver Figura 5) (Kaser, 1999, p. 93; Kaser & Osmaston, 2002, p. 25).

Figura 3: Variación Diaria y Anual de la Temperatura del Aire y su relación con la Latitud (Kaser & Osmaston, 2002, p. 21)

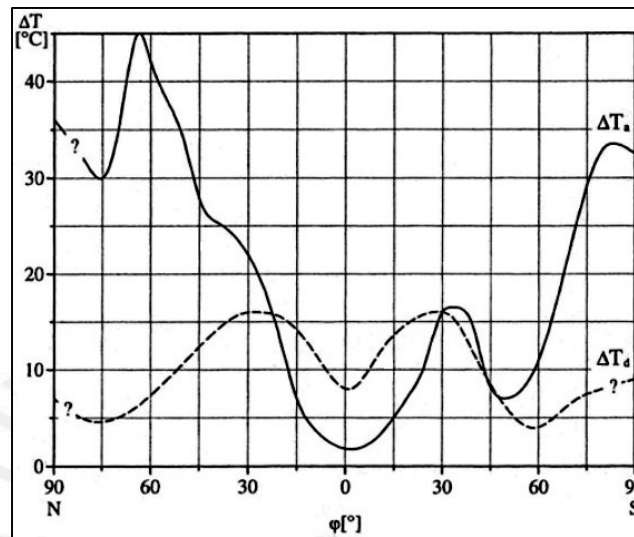
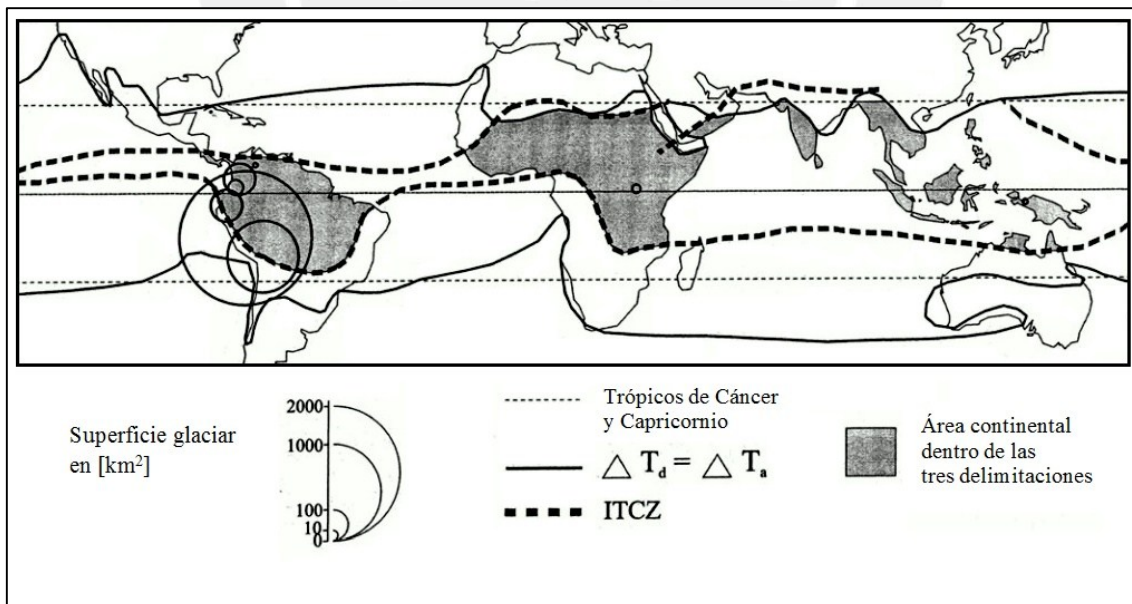


Figura 4: Distribución de los Glaciares en los Trópicos (Kaser & Osmaston, 2002, p. 20) mod.

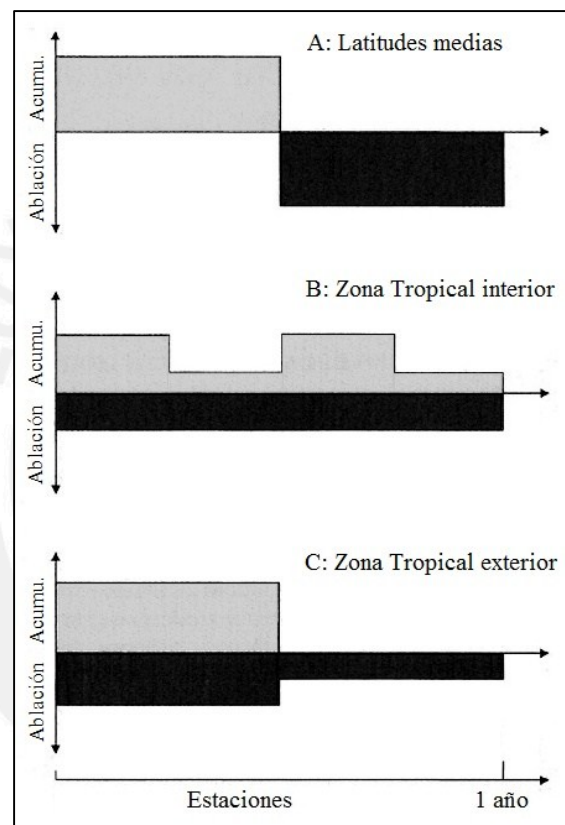


En la zona tropical exterior, la estación húmeda va desde el mes de Noviembre a Abril, periodo en los que prevalecen las condiciones tropicales, mientras que el periodo seco va desde Mayo a Octubre, cuándo las condiciones climáticas se asemejan a las condiciones subtropicales. Esto se debe a que existe una ligera variación de la temperatura, de 1° a 2° C más alta entre los

meses de Octubre a Marzo, durante el verano húmedo, que durante los meses secos entre Mayo y Septiembre; sin embargo, esta variación sigue siendo poco significativa en comparación a lo que ocurre en latitudes medias, es decir, por encima de los 30° (Garreaud, 2009, p. 6; Rabatel, et al., 2013, pp. 82-83).

La Cordillera Blanca pertenece al régimen de la zona tropical exterior, junto a los demás glaciares peruanos y los bolivianos, mientras que los glaciares que pertenecen al régimen de la zona tropical interior se encuentran en Ecuador, Colombia y Venezuela (Kaser, 1999; Rabatel, et al., 2013, p. 83).

Figura 5: Regímenes de los Glaciares Tropicales (Kaser & Osmaston, 2002, p. 25) mod.



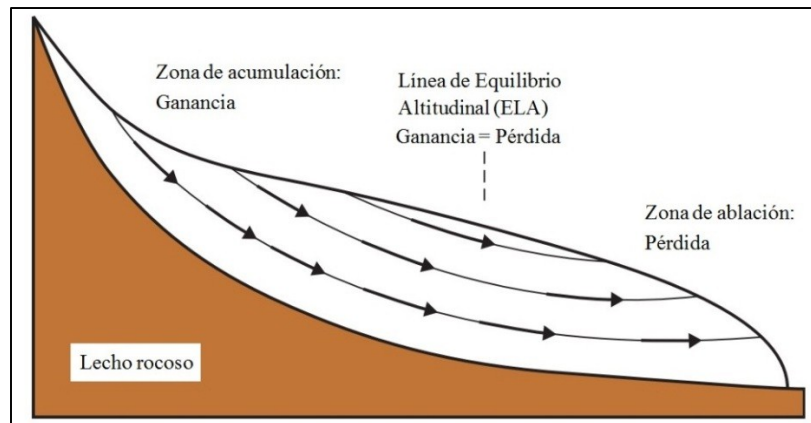
5.1.2 Balance de masa glaciar

Según Huddart & Stott (2010, p. 504), se puede dividir el sistema glaciar en dos subsistemas, el subsistema de acumulación y el de ablación, ambos están separados mediante una línea conceptual llamada línea de equilibrio o ELA que representa el límite altitudinal entre ambos subsistemas y donde la acumulación es igual a la ablación durante el año (Ver Figura 6).

El término balance de masa glaciar se utiliza para denominar al balance existente entre la ganancia y la pérdida neta de un glaciar (UNEP, 2007, p. 104), donde la ganancia se refiere a ingresos por acumulación y por consiguiente un aumento del área del glaciar (balance de masa positivo); y la pérdida, referido a egresos mediante procesos de ablación, lo que significa disminución (balance de masa negativo); por otro lado, cuando la tasa de ablación y acumulación son iguales el glaciar está en equilibrio.

El balance de masa evalúa los cambios que se generan tanto en las ganancias como en las pérdidas, ya que debido a ello el área, volumen y forma del glaciar van a variar en el tiempo. Así, el estudio de balance de masa evalúa estos cambios con el fin de comprender los procesos que están involucrados (Cuffey & Paterson, 2010, p. 91).

Figura 6: Subsistemas del Sistema glaciar (Huddart & Stott, 2010, p. 504) mod.



En el subsistema de acumulación predominan todos los procesos en los que la nieve, neviza (firn) y hielo se agregan al glaciar, mientras que en el subsistema de ablación aquellos en los que el hielo se remueve; como por ejemplo, fusión, sublimación, desmembramiento (calving), avalanchas, entre otros (Huddart & Stott, 2010, p. 504; Cuffey & Paterson, 2010, p. 91).

Por otro lado, la línea de equilibrio responde al clima característico y a la geometría del terreno; por lo tanto, la altitud en la que se encuentra no es una constante para todos los glaciares (Huddart & Stott, 2010, p. 510). Tampoco se debe confundir la ELA con la isoterma de 0°C , ya que no necesariamente van a coincidir; por ejemplo, en zonas tropicales la ELA está ligeramente por debajo de la isoterma de 0°C (Kaser & Osmaston, 2002, p. 30).

Los estudios del balance de masa son importantes porque la disminución o el aumento de la masa glaciar pueden revelar tendencias locales, como la probabilidad de desaparición de un glaciar, hasta algunas tendencias mundiales, como el aumento sobre el nivel del mar. Además, los estudios de balance de masa mensual y anual pueden mostrar los cambios importantes relacionados con el flujo del hielo y su impacto en la disponibilidad de recursos hídricos (Cuffey & Paterson, 2010, p. 92; UNEP, 2007, p. 104).

5.1.3 Lagunas Glaciares

Los procesos de erosión y sedimentación glaciar dan origen a una serie de paisajes y formas geomorfológicas muy particulares. Uno de estos paisajes son las lagunas glaciares.

Cuando los glaciares retroceden, muchas veces dejan a su paso condiciones topográficas para la formación de lagunas, tales como depresiones o cuencas en el terreno, así como represamientos naturales, tanto por el mismo hielo como por derrubio glaciar (diques morrénicos). Estas depresiones y represamientos, pueden ser recargadas directamente

mediante precipitación y la escorrentía sucesiva por derretimiento o desprendimiento de hielo glaciar, dando origen a lagunas glaciares.

Huddart y Stott (2010, p. 521) utilizan la clasificación de lagunas glaciares en función a su posición en el glaciar (Figura 7), de esta manera se tienen las lagunas marginales, aquellas que están adyacentes al glaciar y pueden estar represadas por el mismo glaciar o por topografía empinada; lagunas proglaciares, aquellas que se encuentran frente al margen glaciar, dónde la condiciones topográficas permiten el represamiento; y lagunas subglaciares, grandes lagunas que están debajo de la capa de hielo (existen en la Antártida y Groenlandia). Siguiendo esta misma lógica de clasificación, también existen las lagunas supraglaciares, aquellas que se encuentran sobre el glaciar y son represadas por ellos mismos (Adam, et al., 2014, p. 238).

Figura 7: Tipos de lagunas glaciares según su posición en el glaciar. Laguna marginal a la izquierda y laguna proglaciar a la derecha.



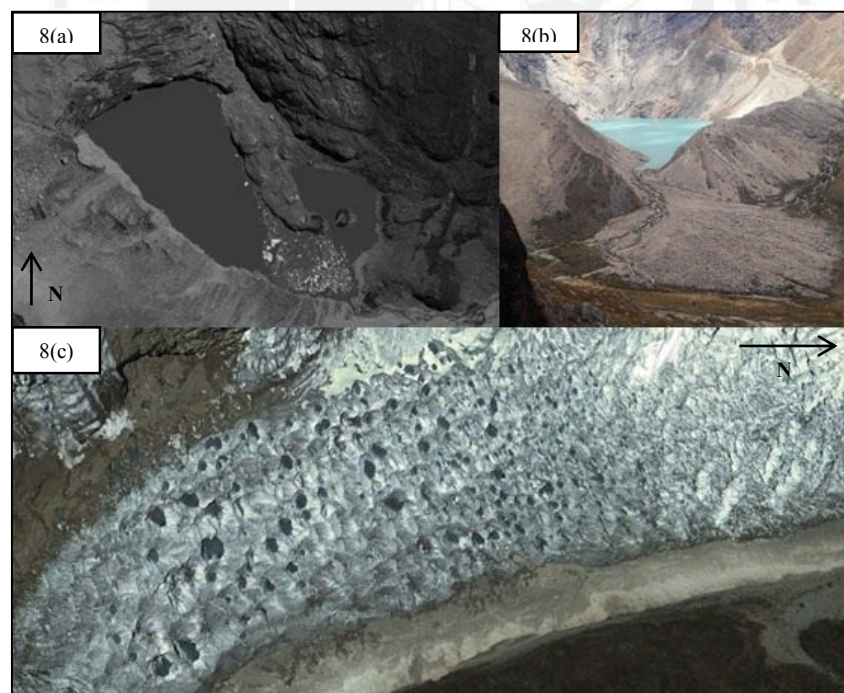
Por otro lado, Concha (1957, pp. 89-93) clasifica las lagunas glaciares en base al material el cual está formado el dique que las contiene, obteniendo así tres tipos de lagunas:

- Lagunas represadas por lecho rocoso: estas lagunas se forman en depresiones excavadas por erosión glaciar cuando el glaciar se retira. Son consideradas como las de mayor estabilidad dado que su dique está formado por roca sólida, por lo que no representan un escenario de desembalse repentino. Dentro de este tipo de lagunas, se distinguen entre las que están en contacto directo con un glaciar y las que no, siendo las primeras potencialmente peligrosas por la probabilidad de que ocurra un desprendimiento glaciar y genere ondas de desplazamiento. Las lagunas represadas por lecho rocoso son las más comunes en la Cordillera Blanca, pero su tamaño no es significativo; solo algunas superan los 10^6 m³. Hoy en día, se están formando nuevas lagunas de este tipo, sobretodo en valles colgados entre los 4600 y 5000 msnm. Un ejemplo de laguna que ha tenido un rápido crecimiento es la laguna sin nombre ubicada por debajo de la ladera oriental del macizo Chopicalqui (6354 m.s.n.m.) en el nevado Huascarán, cuyo tamaño se ha duplicado del 2003 al 2011 (Figura 8, a).
- Lagunas represadas por morrenas: estas lagunas se forman detrás de morrenas luego del retroceso del glaciar. Son potencialmente peligrosas debido a que el dique está formado por material no consolidado, y, por lo general, suelen estar en contacto directo con un glaciar.

Dentro de este tipo de lagunas, se diferencia otras categorías según dos criterios principalmente: pendiente de la morrena, lo que refleja la posibilidad de derrumbe del dique; y el contacto directo o no con un glaciar, lo que refleja la probabilidad de que un desprendimiento glaciar termine ocasionando el derrumbe de la morrena. Las lagunas de mayor volumen en la Cordillera Blanca son ejemplos de lagunas represadas por morrenas, p. e. Laguna Jancarurish ($12,322 \times 10^6 \text{ m}^3$) (Figura 8, b); Laguna Rajucolta ($17,546 \times 10^6 \text{ m}^3$) y Laguna Palcacocha ($17,325 \times 10^6 \text{ m}^3$); cabe resaltar que los tres casos han provocado GLOFs.

- Lagunas represadas por hielo: son consideradas como las más inestables. Se reconocen diferentes categorías de lagunas según su posición en el glaciar: marginal, proglaciar, subglaciar y supraglaciar (clasificación de Huddart y Stott). En la Cordillera Blanca solo se presentan lagunas supraglaciares, numerosas en cantidad pero que no tienen un tamaño significativo (104 m^3) (Figura 8, c); estas resultan del derretimiento de la superficie glaciar que evoluciona directamente a una lengua glaciar. La unión de pequeñas lagunas supraglaciares pueden generar una de mayor tamaño, pero la inestabilidad del dique de hielo reduce las posibilidades para el desarrollo de una laguna supraglaciar de tamaño significativo. En caso la lengua glaciar esté rodeado por morrenas, la unión de lagunas supraglaciares puede llevar a la formación de una laguna represada por morrenas.

Figura 8: Tipos de lagunas glaciares según el material por el que está formado el dique



5.2 Impactos del Cambio Climático en Glaciares Tropicales en la Cordillera Blanca

Según la UNFCCC, el cambio climático se refiere al cambio del clima global generado directa o indirectamente por la influencia de las actividades humanas (desde la Era Industrial XVIII). También agrega que este cambio inducido por el hombre se adiciona a la variabilidad natural que presenta el sistema climático (UNFCCC, 1992, p. 3; IPCC, 2013, p. 1450). Este cambio en el

clima debe ser identificable mediante métodos estadísticos y variar sobre la variabilidad natural; además, debe persistir por largos periodos de tiempo, decenios, siglos o milenios (IPCC, 2014, p. 5).

El cambio climático se ha podido registrar gracias a que existen mediciones de temperatura y otras variables a escala global registradas desde mediados del siglo XIX, en los inicios de la era instrumental. Sin embargo, los registros más completos y diversos se tienen desde 1950. Es a partir de esa década que se han observado cambios innegables en el sistema climático, con un nivel de certeza muy alto; muchos de estos cambios no tienen precedentes en los últimos decenios e incluso milenios, como por ejemplo, el sucesivo calentamiento de la atmósfera, aumento de gases de efecto invernadero, calentamiento de la superficie de los océanos, la pérdida de hielo de la criósfera, el aumento del nivel del mar, entre otros (IPCC, 2013, pp. 2-9).

Para el caso de los glaciares, según el Quinto Informe de Evaluación (AR5) del IPCC (2013, p. 319) y en base a múltiples mediciones glaciológicas a nivel global, casi todos los glaciares del mundo han seguido disminuyendo en área y masa glaciaria. Esta afirmación posee un grado de confianza muy alto debido al incremento de registros e inventarios de glaciares con métodos in situ y derivados de técnicas de teledetección.

Los glaciares, en especial los glaciares tropicales, han mostrado una gran sensibilidad a las alteraciones climáticas. Representan un indicador muy apropiado de clara visibilidad de su reacción a los impactos del cambio climático. Esta reacción puede estar asociada al crecimiento del glaciar como a su derretimiento. En la actualidad, este hecho ha generado varias interrogantes sobre las posibles causas directas y consecuencias, ya que la primera gran preocupación que surge está relacionada a los recursos y sistemas que están basados en el suministro de agua de origen glaciario (Coudrain, et al., 2005, p. 925; Casassa, et al., 2007, p. 1; WGMS/UNEP, 2008, pp. 12-13; Vaughan, et al., 2013, p. 335; Drenkhan, et al., 2015, p. s/n).

En muchas de las cadenas montañosas de todo el mundo los glaciares están desapareciendo como respuesta al aumento de temperatura atmosférica de las últimas décadas. Se tiene registro de más de 600 glaciares desaparecidos en los Alpes, la Patagonia, África, Asia, los Andes Tropicales, etc. y la tendencia continúa; tal es así, que es muy probable que las cadenas montañosas sigan perdiendo área glaciaria, así como glaciares completos, como por ejemplo, la desaparición del Chacaltaya en Bolivia el año 2010 y se pronostica que en primer lugar los glaciares pequeños ($\leq 1 \text{ km}^2$) cuya altitud máxima sea menor a 5400 m.s.n.m. desaparecerán en una o dos décadas (Vaughan, et al., 2013, p. 340; Rabatel, et al., 2013, p. 90).

La Cordillera Blanca es el área glaciaria mejor documentada de los glaciares tropicales y cuenta con datos de fluctuaciones para los glaciares Yanamarey, Uruashraju, Broggi, Gajap y Pastoruri desde finales de 1940 y mediciones de balance de masa desde 1970 para los glaciares Broggi, Uruashraju, Yanamarey, información que ha servido de base para monitorear el retroceso glaciario (Rabatel, et al., 2013, p. 84). Por otro lado, Kinzl (1969) informó que durante fines del siglo XIX el retroceso glaciario avanzó rápidamente; no obstante, durante la primera mitad del siglo XX el proceso desaceleró, con un ligero avance en la década de 1920. Luego, entre las décadas de

1930 y 1940 el retroceso se aceleró nuevamente; seguidamente, entre 1950 y 1970 el retroceso volvió a desacelerar, para luego acelerar con más fuerza en las últimas décadas, hasta el punto de superar el ritmo alcanzado por la LIA, pero a escalas decadales (Rabatel, et al., 2013, p. 87). El área glaciar de la Cordillera Blanca ha retrocedido desde la LIA hasta la actualidad en más de 40% aproximadamente, con un retroceso más marcado en las últimas décadas (UGRH, 2014, p. s/n; Schauwecker, et al., 2014, p. 86).

Las consecuencias del retroceso glaciar en los Andes pueden ser perjudiciales desde diferentes puntos de vista, como por ejemplo, escases de suministro de agua para consumo humano, agricultura, industria, hidroenergía y desastres naturales relacionados a la dinámica de los glaciares.

Las lagunas glaciares de alta montaña han sido y son de mucho interés debido a su ubicación, ya que se encuentran en lugares de altitudes elevadas donde podrían drenar repentinamente y crear inundaciones aguas abajo, perjudicando asentamientos, ecosistemas y el desarrollo de actividades.

Entre los diferentes tipos de amenazas estrechamente relacionadas al retroceso de los glaciares están las avalanchas, flujos de glaciares, aluviones, lahares, GLOFs, entre otros, que pueden causar daños personales, materiales, económicos y naturales. Se denomina GLOF a la liberación catastrófica e imprevista de agua de lagunas glaciares provocada por el desembalse de lagunas glaciares (Richardson & Reynolds, 2000, pp. 32-33).

Estos movimientos en masa poseen una gran capacidad de transporte de detritos, puede durar desde horas a días y los impactos geomorfológicos pueden alcanzar desde decenas hasta cientos de kilómetros aguas abajo (Richardson & Reynolds, 2000, p. 33).

Los GLOFs son fenómenos complejos por estar relacionados con otros eventos geomorfodinámicos que desencadenan la ruptura del dique o el desborde de la laguna. Richardson & Reynolds (2000) distinguen dos tipos de dinámica de movimientos de pendiente asociados a la desglaciación: la directa, ocasionada por avalanchas de nieve y hielo por desglaciación y la indirecta, que surge como consecuencia secundaria de alguna formación o proceso glaciar, por ejemplo, ruptura de un dique morrénico, avalanchas de rocas, entre otros. Estos dos tipos de movimientos representan el 80% de los desencadenantes de GLOFs en la Cordillera Blanca, 45% atribuidos a los directos y 35% a los indirectos. El 20% restante son desencadenados por terremotos u olas de inundaciones de lagunas ubicadas aguas arriba (Richardson & Reynolds, 2000, p. 32; Haeberli, et al., 2013, pp. 167-169; Adam, et al., 2014, p. 232).

En la Cordillera Blanca se han registrado eventos GLOFs desde 1702 (Ver Tabla 2), muchos de ellos han sido catastróficos y han sido la principal motivación para la realización de investigaciones en la zona, con la finalidad de entender el fenómeno y realizar acciones de prevención o reducción de riesgos (Ames Marquez & Francou, 1995, pp. 56-58; Morales Arnao, 1998, p. 169).

Tabla 2: Listado de GLOFs en la Cordillera Blanca (Liboutry, et al., 1977; Ames Marquez & Francou, 1995; Morales Arnao, 1998)

Lugar	Descripción de evento	Daños	Fecha
Huaraz	Flujos de lodo	Destruyó parte de la ciudad de Huaraz	04/03/1702
Huaraz	Terremoto, avalancha de hielo y flujos.	Ocasionaron daños en la ciudad de Huaraz. Aprox. 1500 personas desaparecidas y 300 personas perdieron la vida	06/01/1725
Yungay	Avalancha del nevado Huandoy.	Flujos que destruyeron la ciudad de Ancash, ocasionando la pérdida de 1500 vidas.	06/01/1725
Huaraz	Deslizamientos y flujos.	Daños en centro poblado Monterrey, destruyendo viviendas y campos de cultivo. Desaparecieron 11 personas.	10/02/1869
Huaraz	GLOF en la ciudad de Macashca.	Se reportaron varias personas muertas. Se rompió el dique la laguna Rajucolta.	24/06/1883
Yungay	Avalancha de hielo del Huascarán.	Afectó a los centros poblados de Shacsha Y Ranrahirca.	22/01/1917
Bolognesi	Aluvión de la laguna Solteracocha en la cuenca del Paclón	-	14/03/1932
Carhuaz	Aluvión de la laguna Arteza dentro de la quebrada Ulta.	Daños y pérdidas materiales.	20/01/1938
Pallasca	Aluvión de la laguna Magistral.	Afectó la ciudad de Conchucos con daños materiales menores.	1938
Bolognesi	Aluvión de la laguna Suerococha que impactó con el río Pativilca.	Causó daños en campos agrícolas y en la ciudad de Sarapo	20/04/1941
Huaraz	Aluvión de la laguna Palcacocha.	Daños en ciudad de Huaraz. Murieron aprox. 5000 personas.	13/12/1941
Huari	Aluvión de las lagunas Ayhuinaraju y Carhuacocha ocasionado por una avalancha de hielo del nevado Huantsán.	Causó 300 pérdidas humanas y sepultó ruinas incaicas.	17/01/1945
Huaylas	Aluvión de la laguna Jancarurish en la cuenca Los Cedros.	Destruyó la central hidroeléctrica del Cañón del Pato, la carretera y parte de las líneas del ferrocarril Chimbote-Huallanca.	20/10/1950
Huaylas	Aluvión de la laguna Artesoncocha sobre la laguna Parón.	Ocasionó la subida del nivel de agua de la laguna Parón.	27/07/1951
Huaylas	Aluvión de la laguna Artesoncocha sobre la laguna Parón y subida del nivel de agua	Ocasionó la subida del nivel de agua de la laguna Parón.	29/10/1951
Huaraz	Aluvión de la laguna Miluacocha en la quebrada Ishinca.	Ocasionó daños menores.	06/11/1952
Huaraz	Deslizamiento de la morrena de la laguna Tullparaju.	Ocasionó el desborde de la laguna, más no aluvión.	1953
Huaraz	Deslizamientos y flujos de la laguna Tullparaju.	Se registraron daños menores.	08/12/1959
Yungay	Avalanchas y aluviones del nevado Huacarán Norte.	Alrededor de 4000 muertos, 9 ciudades destruidas con daños importantes hasta el río Santa.	10/01/1962
Huari	Avalancha de hielo del Nevado San Juan sobre la laguna Tumarina. Desencadenó el desborde de la laguna y posterior aluvión.	Murieron 10 personas y daños materiales.	19/12/1965
Yungay	Avalancha de hielo y roca del Nevado Huascarán Norte por consecuencia de un sismo.	Afectó seriamente la ciudad de Yungay y Ranrahirca. Hubo aproximadamente 23000 muertos.	31/05/1970
Yungay	Avalancha de hielo y roca del Nevado Huascarán Norte por consecuencia de un sismo sobre las lagunas Llanganuco.	Ocasionó la muerte de 14 miembros de la expedición checoslovaca y otros daños materiales.	31/06/1970
Huaraz	Pequeña avalancha del nevado Tocllaraju sobre la laguna Milluacocha.	Ocasionó daños materiales.	31/08/1982

Yungay	Pequeña avalancha del nevado Huascarán Norte. Avalancha de hielo que alcanzó el río Santa y generó daños materiales	Avalancha de hielo que represó el río Shacsha, generó daños materiales.	16/12/1987
Yungay	Pequeña avalancha del nevado Huascarán Norte.	Avalancha de hielo que alcanzó el río Santa y generó daños materiales.	20/01/1989
Pallasca	Desembalse de laguna La Encantada y Tipampa.	Ocasionó la caída del puente y la desaparición de tres personas.	2012

5.3 Gestión del Riesgo de Desastres

El riesgo es la probabilidad de sufrir consecuencias perjudiciales o pérdidas esperadas (muertes, lesiones, propiedad, medios de subsistencia, interrupción de actividad económica o deterioro ambiente) resultado de interacciones entre amenazas naturales o antropogénicas, condiciones de vulnerabilidad y exposición (EIRD, 2008; INDECI, 2010; Oppenheimer, et al., 2014).

La literatura actual sobre los riesgos del cambio climático destaca que no se dan únicamente por circunstancias externas generadas por cambios en el sistema climático a los que las sociedades responden, sino más bien son el resultado de interacciones complejas entre sociedades, ecosistemas y los riesgos generados por el cambio climático (Oppenheimer, et al., 2014, p. 1050).

El riesgo es la interacción de tres componentes principales (Figura 9), que son los siguientes: las amenazas, referidas a los efectos del cambio climático sobre los sistemas geofísicos; la vulnerabilidad, que se refiere principalmente a las características de los sistemas humanos o socio-ecológicos; y, la exposición, referida a la variabilidad climática y eventos extremos a los que está sometido un sistema (Oppenheimer, et al., 2014, p. 1050; PNUD, 2014, p. 6).

La amenaza se refiere a la probabilidad de un evento perjudicial, que puede ser un fenómeno natural o uno inducido por el hombre, a causar lesiones, daños materiales e inclusive la muerte; También, puede perjudicar las actividades socioeconómicas y/o degradar el ambiente. (EIRD, 2008; INDECI, 2010; Oppenheimer, et al., 2014, p. 1048). Está conformado por perturbaciones, picos que van más allá de la variabilidad normal de un sistema, como por ejemplo un evento El Niño fuerte; y estresores, que son presiones continuas y que van incrementando lentamente, por ejemplo el derretimiento de los glaciares (Turner II, et al., 2003, p. 8074).

Existen diferentes tipos de amenazas en función a su origen, p. e. biológicos, sociales, tecnológicos, entre otros. Sin embargo, en esta investigación, cuando se menciona amenaza se está haciendo referencia a aquellos relacionados a los impactos del cambio climático, específicamente las amenazas de ocurrencia de fenómenos GLOFs.

La vulnerabilidad hace referencia a la propensión, predisposición o susceptibilidad física, económica, política, social y ambiental que posee un individuo o una comunidad de ser afectada o de sufrir efectos adversos. Este es un concepto bastante complejo debido a que involucra una serie de elementos que interactúan entre sí. La vulnerabilidad toma en cuenta tres dimensiones: exposición, sensibilidad y capacidad adaptativa (INDECI, 2010; Oppenheimer, et al., 2014; PNUD, 2014).

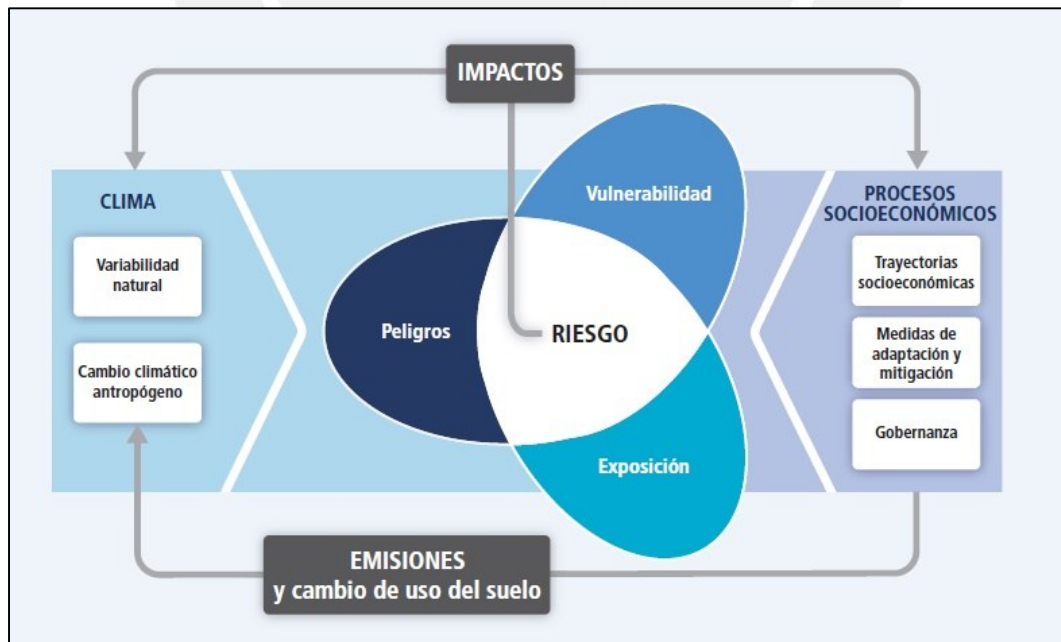
La exposición se refiere al sometimiento de un sistema frente a alguna amenaza. Sin embargo, no solo se refiere a la exposición frente a alguna amenaza, sino también reside en la sensibilidad y la capacidad de adaptativa que un individuo o sistema experimenta frente a tales amenazas, de este modo, se toma en cuenta cómo los sistemas atenúan o amplifican los impactos, mostrando cada caso en particular un distinto grado de exposición (Turner II, et al., 2003, p. 8074).

La sensibilidad es el grado o nivel de afectación que una especie o sistema puede sufrir, ya sea de manera adversa o benéfica (IPCC, 2014a, p. 1772). Es consecuencia de las interrelaciones existentes entre las condiciones humanas, por ejemplo capital humano, instituciones, dotaciones, estructuras económicas, entre otros; y, condiciones medioambientales, como por ejemplo el tipo de suelo, estructura y funciones de los ecosistemas, entre otros (Turner II, et al., 2003, p. 8077)

Por otro lado, la capacidad adaptativa es la capacidad, valga la redundancia, que tienen los sistemas, las instituciones, los seres humanos y otros organismos para hacer frente a eventos perjudiciales, aprovechar las oportunidades y responder a las consecuencias (IPCC, 2014a, p. 1772).

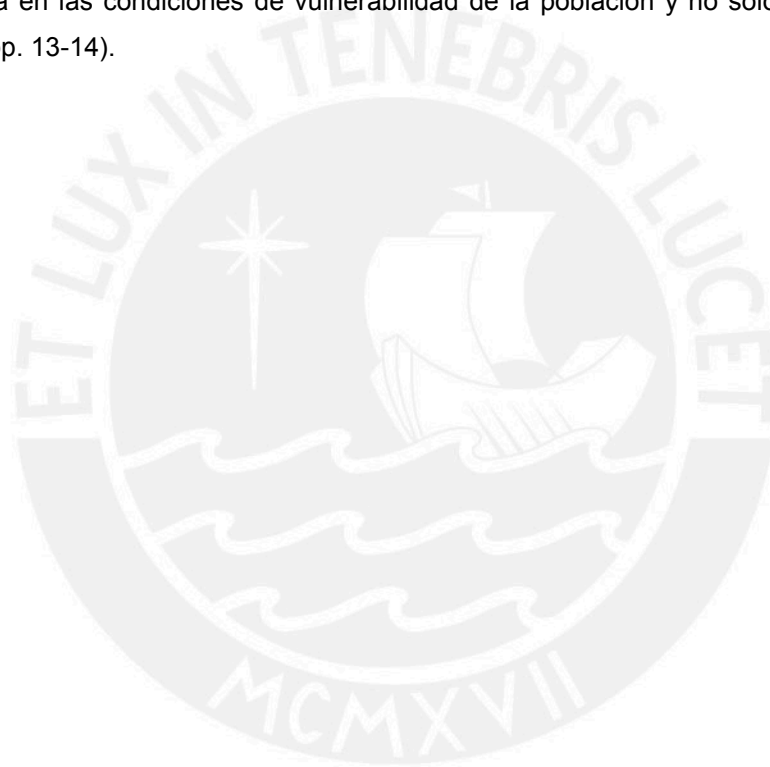
Según el IPCC (2014), la exposición se refiere a la presencia, tanto de personas, suministros, especies, ecosistemas, servicios, recursos, infraestructura, activos económicos, sociales o culturales en lugares que podrían ser afectados de manera adversa. Por ejemplo, una localidad estará más expuesta frente a otra si se encuentra emplazada más cerca de una potencial amenaza.

Figura 9: Interacciones de los Conceptos de Riesgos de Desastres (Oppenheimer, et al., 2014, p. 1046)



La gestión del riesgo de desastres es un proceso social en el que se diseñan, ejecutan y evalúan estrategias, planes y políticas que tiene por finalidad prevenir o reducir los factores del riesgo y/o sus consecuencias, así como incrementar y fortalecer la capacidad de respuesta a estas consecuencias (Ulloa, 2011; Alianza Clima y Desarrollo, 2012; IPCC, 2014a). El diseño de los instrumentos de gestión debe basarse en la investigación científica y el registro de las informaciones, los que van a permitir identificar, evaluar y caracterizar los riesgos a los que estarían expuestos los grupos sociales.

Anteriormente, el concepto que se manejaba era el de administración y manejo de los desastres, el cual se centraba en la ocurrencia del desastre en sí, y en torno a este se planificaban todas las actividades a realizar antes, durante y después de ocurrido el evento adverso. En cambio, el concepto actual de gestión del riesgo tiene una concepción más dinámica, integral y proactiva, pues se centra en las condiciones de vulnerabilidad de la población y no solo en el desastre (Ulloa, 2011, pp. 13-14).



6 METODOLOGÍA

Debido a que la problemática se materializa en un área bastante amplia (800 km² aprox.) y que el análisis de lagunas es multitemporal, en tres periodos diferentes, se estableció que sería necesario la utilización de técnicas de teledetección y herramientas GIS con el fin de aplicar un método automatizado y robusto que permita identificar lagunas, con un alto grado de exactitud, y calcular parámetros espaciales de manera rápida y precisa. Para lograrlo se establecieron cuatro etapas de trabajo, que se describen a continuación.

6.1 Recolección de Imágenes Satelitales e Información Cartográfica

Para la selección de imágenes satelitales del área de estudio se recurrió a la base de datos de imágenes de los sensores Landsat 5 TM y 8 OLI que posee el Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS, por sus siglas en inglés). Estos están disponibles de manera gratuita y poseen una resolución espacial, espectral, radiométrica y temporal conveniente para los objetivos de esta investigación (Ver Tabla 3).

Tabla 3: Características de imágenes Landsat 5 TM y Landsat 8 OLI (USGS, 2014a; USGS, 2014)

Sensor	Resolución espectral	Resolución espacial		Resolución temporal	Resolución radiométrica
Landsat 5 TM	7 bandas	Bandas 1-5 y 7	30 metros	16 días	8 bits
		Banda 6	120 metros		
Landsat 8 OLI	11 bandas	Bandas 1-7 y 9	30 metros	16 días	16 bits
		Banda 8	15 metros		
		Bandas 10 y 11	100 metros		

Se seleccionaron escenas de los sensores Landsat 5 Thematic Mapper (TM) para los años 2004 y 2009 y Landsat 8 Operational Land Imager (OLI) para el 2014 (Ver Tabla 4). Las escenas fueron seleccionadas teniendo tres criterios. El primero era el periodo en que fueron tomadas las imágenes, siendo los meses entre Junio y Septiembre los más adecuados, esto debido a que en este periodo es la temporada seca en la Cordillera Blanca y las imprecisiones relacionadas a nieve estacional son mínimas, por ende la delimitación de glaciares y lagunas se hace más precisa.

Tabla 4: Imágenes Landsat seleccionadas

Fecha	Sensor	Código	Path	Row	Cobertura de nubes (%)	Calidad
12/07/2014	8 OLI	LC80080662014193LGN00	8	66	5	9
12/07/2014	8 OLI	LC80080672014193LGN00	8	67	27	9
01/08/2014	8 OLI	LC80090652014216LGN00	9	65	5	9
28/06/2009	5 TM	LT50080662009179CUB00	8	66	12	9
28/06/2009	5 TM	LT50080672009179CUB00	8	67	41	9
02/07/2008	5 TM	LT50090652008184CUB00	9	65	16	9
13/05/2004	5 TM	LT50080662004134CUB00	8	66	7	9
29/05/2004	5 TM	LT50080672004150CUB00	8	67	27	9
10/07/2005	5 TM	LT50090652005191CUB00	9	65	11	9

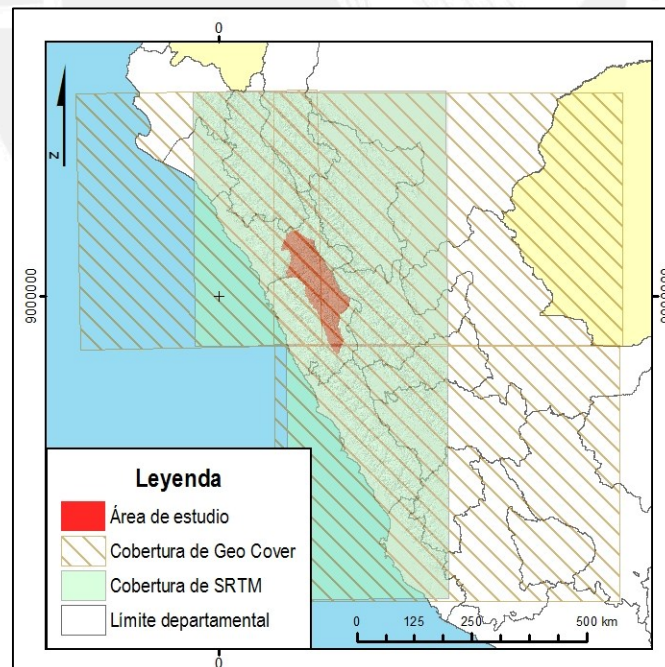
El segundo criterio que se tomó en cuenta fue que las imágenes seleccionadas cuenten con el nivel de corrección L1T (Level 1 Standard Terrain Correction) y nivel de calidad 9; es decir, el mejor nivel de corrección y calidad que la USGS ofrece y que indican que las imágenes tienen un primer proceso de corrección geométrica y radiométrica.

Por último, que las escenas seleccionadas posean el menor porcentaje de cobertura de nubes sobre el área de estudio, ya que con ello se evitan los errores en los valores de los píxeles debido al bajo contenido de humedad en la atmósfera en esa época.

Adicional a las imágenes Landsat, se seleccionaron tres escenas de la colección Orthorectified Landsat Enhanced Thematic Mapper Plus Imagery (Ver Figura 10) de la colección GeoCover, disponibles de forma gratuita por la Universidad de Maryland, para el proceso de ortorrectificación.

Por otro lado, para la información de elevación se utilizó el modelo digital de elevación SRTM versión 4, Shuttle Radar Topography Mission (Ver Figura 10), de resolución espacial de 90 metros y disponibles de forma gratuita por el Consorcio de Información Espacial del CGIAR (Consortium of International Agricultural Research Centers). Se eligió el SRTM en lugar de los aster GDEM, también disponibles de manera gratuita y de mejor resolución espacial (30 metros), debido a que el DEM del SRTM es generado en base a radar y es más preciso en comparación al Aster G-DEM, generado por estereoscopía.

Figura 10: Escenas GeoCover y SRTM versión 4 en el área de estudio



Además, se adquirió una capa en formato shapefile de delimitación de cuencas (Pfafstetter) hasta el nivel 7, proporcionado por la ANA. Por otro lado, para el caso de centros poblados, se utilizó una capa de puntos en formato shapefile, elaborada por el INEI.

6.2 Pre-procesamiento de imágenes satelitales

Con el fin de reducir distorsiones geométricas provocadas por la curvatura de la tierra, ángulo de inclinación del sensor, entre otros, se realizó la ortorrectificación de las escenas Landsat 4-5 TM y 8 OLI. Para ello, se estandarizaron las proyecciones geográficas, dado que las imágenes Landsat 4-5 TM, las imágenes GeoCover y las escenas del SRTM tenían proyecciones diferentes. De ese modo, se estableció transformar las proyecciones de todos los insumos al datum UTM WGS 1984 en la zona 18 Sur con la herramienta Project del software ArcGIS10.1. Además, se elaboraron mosaicos de las imágenes GeoCover y de las escenas SRTM con la finalidad de facilitar su manipulación en el proceso de ortorrectificación. Esto se realizó con la herramienta Mosaic, también del software ArcGIS 10.1.

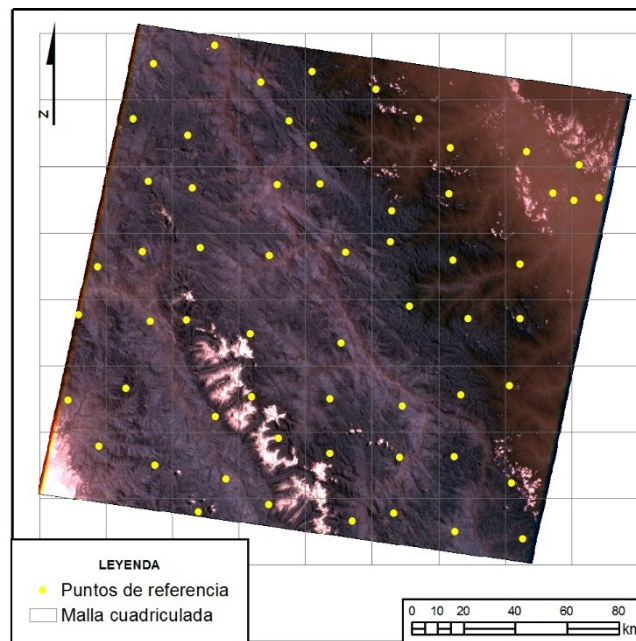
En base a las imágenes GeoCover, se colocaron manualmente alrededor de 120 puntos de control por imagen Landsat para el proceso de ortorrectificación. Este proceso se realizó utilizando la herramienta Control Points del software ERDAS IMAGINE 2013

De manera complementaria a la ortorrectificación manual, se aplicó la herramienta *AutoSync*, también del software ERDAS IMAGINE 2013, un método para alinear una imagen con otra ortorrectificada de manera automatizada mediante numerosos puntos de jale (*tie points*) creados por el sistema, con la finalidad de comparar los resultados y elegir el mejor método de ortorrectificación.

Por ello, para poder seleccionar el mejor método de ortorrectificación, se elaboró un ensayo comparativo de las escenas con distintos modos de ortorrectificación: el primero, la ortorrectificación manual con los 120 puntos de control; el segundo, la ortorrectificación automática con el uso de la herramienta *AutoSync*; y, por último, la utilización de ambos métodos de manera combinada; es decir, la aplicación de la herramienta *AutoSync* a la imagen ortorrectificada manualmente.

Para poder comparar la calidad de los resultados, se elaboró una malla cuadrículada en la que se distribuyeron 60 puntos de referencia fácilmente identificables, tanto en la imagen Landsat como en la GeoCover (Ver Figura 11). Luego, se colocaron los mismos puntos en las imágenes con los 3 diferentes métodos de ortorrectificación aplicados y, posteriormente, se determinó el error RMS (Root Mean Square). El error RMS se pudo obtener extrayendo las coordenadas de los puntos de referencia a un block de notas, que luego fueron introducidos a la herramienta *Georeferencing* del software ArcGIS 10.1.

Figura 11: Malla cuadriculada para ensayo comparativo de métodos de ortorrectificación



6.3 Aplicación de índices de detección de nieve (NDSI), de detección de lagunas (NDWI) y elaboración de modelo semi-automatizado de detección de lagunas y glaciares

Si bien esta investigación está enfocada en identificar las superficies lagunares y sobre todo aquellas que podrían ser consideradas como una potencial amenaza, también se consideró importante delimitar las superficies glaciares para poder analizar la relación existente entre el deshielo de los glaciares y el aumento de las superficies lagunares o la formación de lagunas nuevas.

Por ello, una vez definidas las imágenes a utilizar, se procedió a identificar las áreas glaciares y lagunares en la Cordillera Blanca, para ello se aplicaron el Índice de Diferencia Normalizada de Nieve y el Índice de Diferencia Normalizada de Agua (NDSI y NDWI, por sus siglas en inglés, respectivamente).

EL NDSI fue calculado con la herramienta *Raster Calculator*, del software ArcGIS 10.1, siguiendo una ecuación que combina la banda verde (Green) y la de infrarrojo cercano de onda corta (SWIR):

$$\text{NDSI} = (\text{Banda Green}) - (\text{Banda SWIR}) / (\text{Banda Green}) + (\text{Banda SWIR})$$

Del mismo modo, para el NDWI se aplicó el índice descrito por Huggel et al. (2002) a todas las imágenes que cubrían el área de estudio (Figura 13, a), el cual consiste en la combinación de la banda infrarroja cercana (NIR) y la banda azul (BLUE), como en la siguiente ecuación:

$$\text{NDWI} = (\text{Banda NIR}) - (\text{Banda Blue}) / (\text{Banda NIR}) + (\text{Banda Blue})$$

En ambos procesos se cambiaron los valores de profundidad del pixel convirtiéndolos a valores flotantes (Float); es decir, de píxeles con valores enteros positivos a decimales con valores entre

-1 y 1, con los que se establecieron los umbrales que definirían tanto las superficies de glaciares como las superficies lagunares (Tabla 5).

Tabla 5: Umbrales definidos para detectar superficies glaciares y lagunares

Fecha	Código de imagen	Umbral NDSI	Umbral NDWI
12/07/2014	LC80080662014193LGN00	≥ 0.375	de -0.4 a -0.10
12/07/2014	LC80080672014193LGN00	≥ 0.415	de -0.4 a -0.119
01/08/2014	LC80090652014216LGN00	-	de -0.4 a -0.103
28/06/2009	LT50080662009179CUB00	≥ 0.41	de -0.88 a -0.54
28/06/2009	LT50080672009179CUB00	≥ 0.4	de -0.88 a -0.545
02/07/2008	LT50090652008184CUB00	-	de -0.88 a -0.545
13/05/2004	LT50080662004134CUB00	≥ 0.46	de -0.89 a -0.53
29/05/2004	LT50080672004150CUB00	≥ 0.49	de -0.88 a -0.53
10/07/2005	LT50090652005191CUB00	-	de -0.89 a -0.49

Pese a que estos umbrales discriminan las áreas lagunares y glaciares de las que no lo son, también existen situaciones que hacen variar el rango de reflectividad de las lagunas y glaciares, como por ejemplo, de confusión con zonas de sombras, agua congelada, cantidad de sedimentos de las lagunas, entre otros (Frey, et al., 2010a, p. 267).

Por ello, fue importante la revisión posterior al proceso con el apoyo de otros recursos, como por ejemplo, una capa de sombras (*Hillshade*), que permita identificar de antemano las zonas en las que sea más probable encontrar errores de sombras; una capa de pendientes (*Slope*), que permita identificar superficies planas donde la probabilidad de ubicación de lagunas sea mayor; y, apoyo de Google Earth, que permite verificar superficies lagunares o glaciares mediante sus imágenes de alta resolución.

Una vez definidos los umbrales se utilizó la herramienta *Raster to Polygon*, del software ArcGIS 10.1, para convertir los archivos de formato GRID a shapefile, un formato conveniente para el cálculo de parámetros geográficos individuales por lagunas (área, altitud, perímetro, entre otros). Luego, se aplicó la herramienta *Dissolve*, con la finalidad de combinar los polígonos contiguos que posean el mismo atributo. Después, se fusionaron los resultados de las diferentes imágenes que conforman el área de estudio con la herramienta *Merge*. Finalmente, con la herramienta *Clip*, se realizó un corte para obtener solo los polígonos de glaciares y lagunas que están dentro del área de estudio. Para el caso de los polígonos de superficies glaciares se aplicó un corte adicional con la herramienta *Clip*, en base a una capa de elevación mínima de formación de hielo glaciar, de esta manera se obtuvieron aquellas superficies que estaban por encima de los 4000 msnm.

Ya acotados los resultados al área de estudio, se procedió a filtrar los datos, ya que el shapefile resultante de la conversión de los archivos raster generó un polígono con dos valores: 0, que representa lo que no es superficie glaciar y 1, que sí representa superficie glaciar, del mismo modo se filtraron las superficies lagunares. Por ello, de cada índice se seleccionaron solo los polígonos que sí representaban superficies glaciares y lagunares; este proceso se realizó con la herramienta *Select*.

También, se aplicó un filtro de unidad mínima cartografiable, con el que se eliminaron los polígonos que poseían un área menor a 4500 m² (5 píxeles), tanto para lagunas como para glaciares. Esta fue establecida teniendo en cuenta la unidad mínima cartografiable aplicada por la UGRH para su inventario de lagunas y glaciares. El filtro se realizó mediante la herramienta *Calculate Areas* y, posteriormente, la herramienta *Make Feature Layer*, donde se seleccionaron solo las áreas mayores e iguales a 4500 m².

Para el caso de la capa de superficies glaciares, esta tenía vacíos (Gaps) dentro de muchos de los polígonos, en algunos casos relacionados a nunataks, pero en su mayoría relacionados a sombras. Para superar este problema se aplicó la herramienta *Eliminate Polygon Part*, donde se eliminaron todos los vacíos que el polígono contenía. Posteriormente, en la etapa de revisión y edición manual, se delimitaron aquellas áreas que sí correspondían a nunataks.

Por otro lado, debido a las mayores dificultades para identificar superficies lagunares, se incluyeron filtros adicionales. Para las imágenes del año 2014, se seleccionaron los polígonos de lagunas que se intersectaban con la capa de pendientes menor a 11.3° o 20% (obtenida a partir del SRTM versión 4 y convertida a shapefile), esto se realizó con la herramienta *Select Layer By Location*. Posteriormente, para el filtrado de las capas de superficies lagunares de años anteriores, se utilizó la capa de lagunas del año 2014 para la selección.

Adicionalmente al umbral establecido para las superficies lagunares, se elaboró un ensayo para delimitar aquellas lagunas de menor tamaño. Esto debido a que los umbrales establecidos para detectar lagunas (Tabla 5) se discriminaba muy bien las lagunas profundas y de gran tamaño, mas no detectaba lagunas pequeñas y poco profundas. Este problema no se pudo superar ampliando los umbrales, ya que al hacerlo el error de confusión con sombras aumentaba considerablemente. Por ello, se estableció un umbral que solo aplicaría a lagunas de áreas entre los 4500 m² y 13500 m², entre 5 y 15 píxeles, ver Tabla 6, Figura 13(b) y Figura 13(c), estos se fusionarían, Figura 13(d), para obtener la capa de lagunas del área total

Tabla 6: Umbrales establecidos para detectar lagunas entre los 4500 m² y 13500 m²

Fecha	Código de imagen	Umbral NDWI
28/06/2009	LT50080662009179CUB00	de -0.6 a -0.45
28/06/2009	LT50080672009179CUB00	de -0.6 a -0.46
02/07/2008	LT50090652008184CUB00	de -0.6 a -0.46
13/05/2004	LT50080662004134CUB00	de -0.56 a -0.41
29/05/2004	LT50080672004150CUB00	de -0.57 a -0.42
10/07/2005	LT50090652005191CUB00	de -0.57 a -0.42

Con toda esta secuencia de herramientas se procedió a construir los modelos (Figura 12 y Figura 13) para la aplicación semi-automatizada de detección de lagunas y glaciares. Para ello, se utilizó la herramienta *ModelBuilder* del software ArcGIS 10.1, que permite organizar las herramientas de geoprocésamiento a manera de flujo de trabajo, que luego se aplicarían a las imágenes de los otros años, ajustando los umbrales a las características particulares de cada imagen y volviendo semi-automático el proceso.

Figura 12: Flujo de trabajo en el ModelBuilder para detectar glaciares.
 Elipses azules: insumos (bandas de imágenes satelitales, capa de altitud). Recuadros anaranjados: procesos. Elipses verdes: outputs/inputs. Elipse rojo: Capa de glaciares resultante.

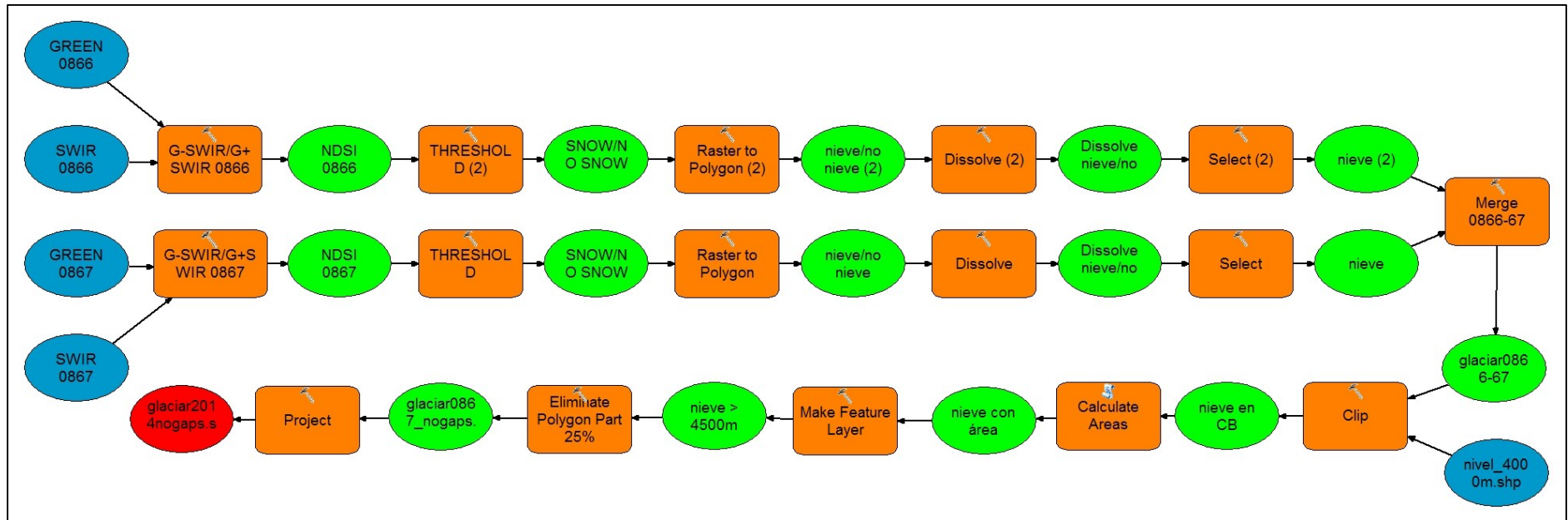
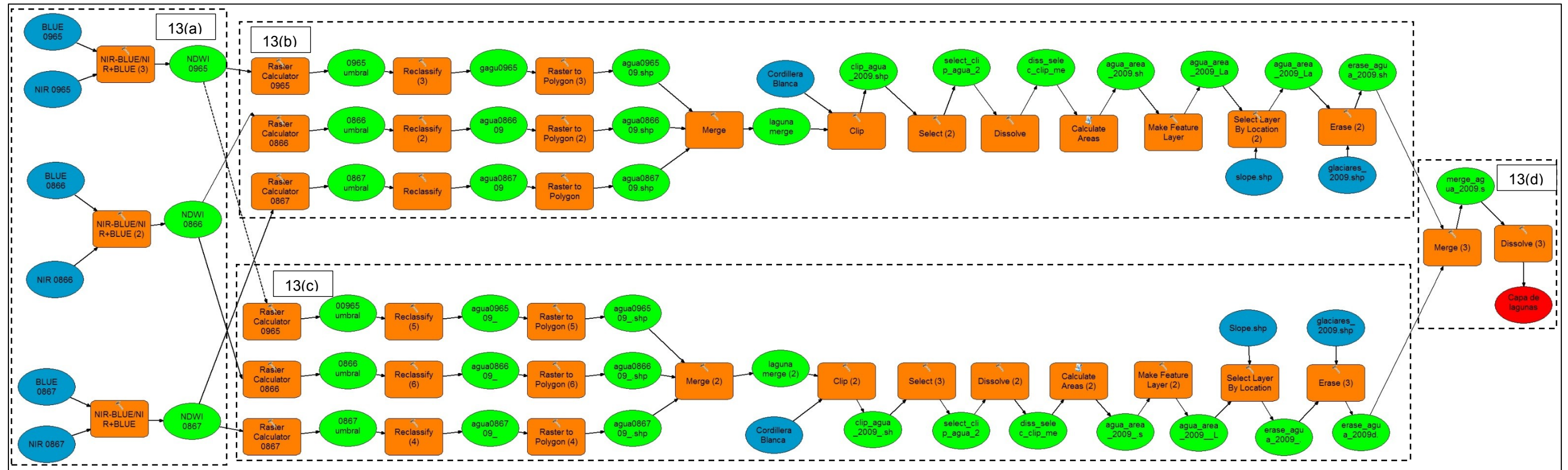


Figura 13: Flujo de trabajo en el ModelBuilder para detectar lagunas: (a) Cálculo de índices NDWI. (b) Proceso para identificar lagunas mayores a 15 píxeles. (c) Proceso para identificar lagunas entre los 5 y 15 píxeles. (d) Fusión de capas con diferentes umbrales. Elipses azules: insumos (bandas de imágenes satelitales, capa de pendientes y de glaciares). Recuadros anaranjados: procesos. Elipses verdes: outputs/inputs. Elipse rojo: Capa de lagunas resultante.



6.4 Cálculo de parámetros de lagunas

En primer lugar, se calcularon las principales características geométricas de las lagunas desde la tabla de atributos mediante *Calculate Geometry*, estas son área y perímetro; del mismo modo, se generaron las coordenadas del centroide de las lagunas. Luego, se calcularon las características topográficas derivadas del DEM SRTM, éstas son: altitud máxima, mínima y media, mediante la herramienta *Add Surface Information*.

Después, se calcularon las características relacionadas a elementos circundantes, estos son las distancias al glaciar y hacia centros poblados. Esto se llevó a cabo con la herramienta *Near*. Además, se vinculó la base de datos de las lagunas con información de límites político-administrativos y de cuencas hidrográficas, esto se realizó con la herramienta *Spatial Join*.

Por otra parte, respecto a los parámetros para identificar la amenaza, Richardson & Reynolds (2000, p. 40), han identificado tres fases para la gestión de amenazas glaciares: la primera, en la que se centra esta investigación, es la identificación de la potencial amenaza; la segunda, el análisis de la amenaza; y, por último, la mitigación de la amenaza.

En esta investigación se tuvo en cuenta la primera fase de la gestión de amenazas glaciares y se adaptó parte del esquema (cuadro rojo en Figura 14) descrito por Emmer et al. (2014, p. 247) a los objetivos de este trabajo (Figura 15), donde los elementos en rectángulos son los que se han insertado a conveniencia de esta investigación.

Figura 14: Procedimiento esquemático de Gestión de Riesgo de GLOF (Emmer, et al., 2014, p. 247) mod.

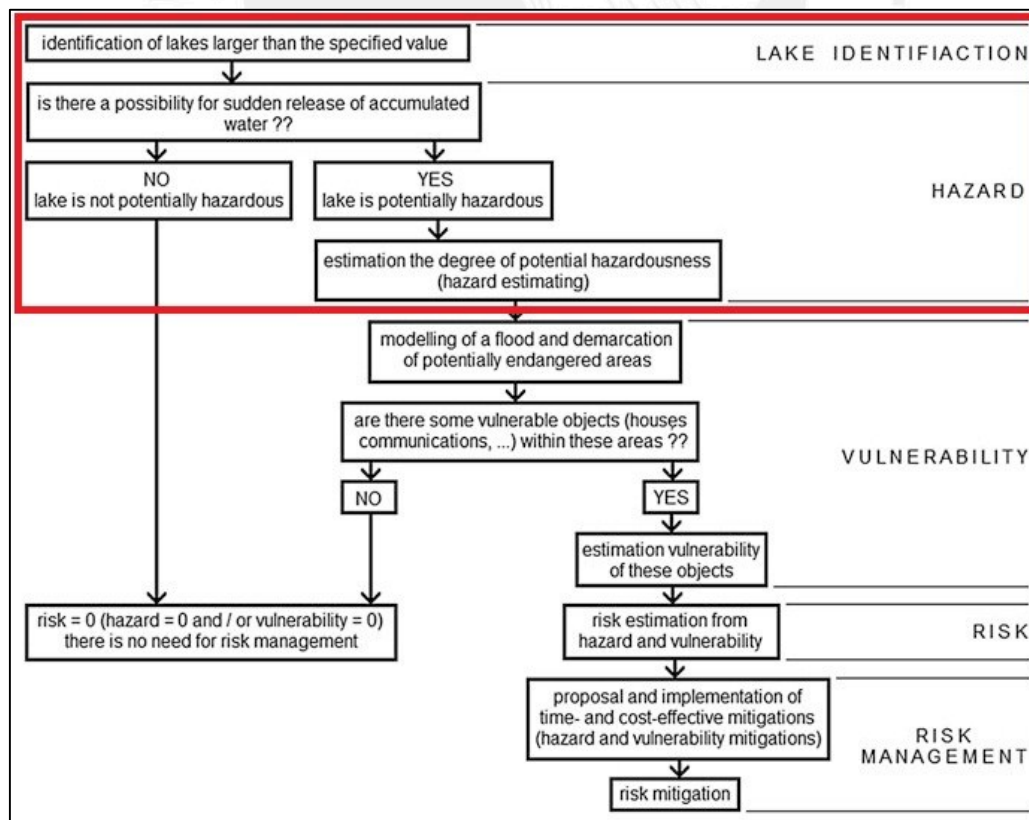
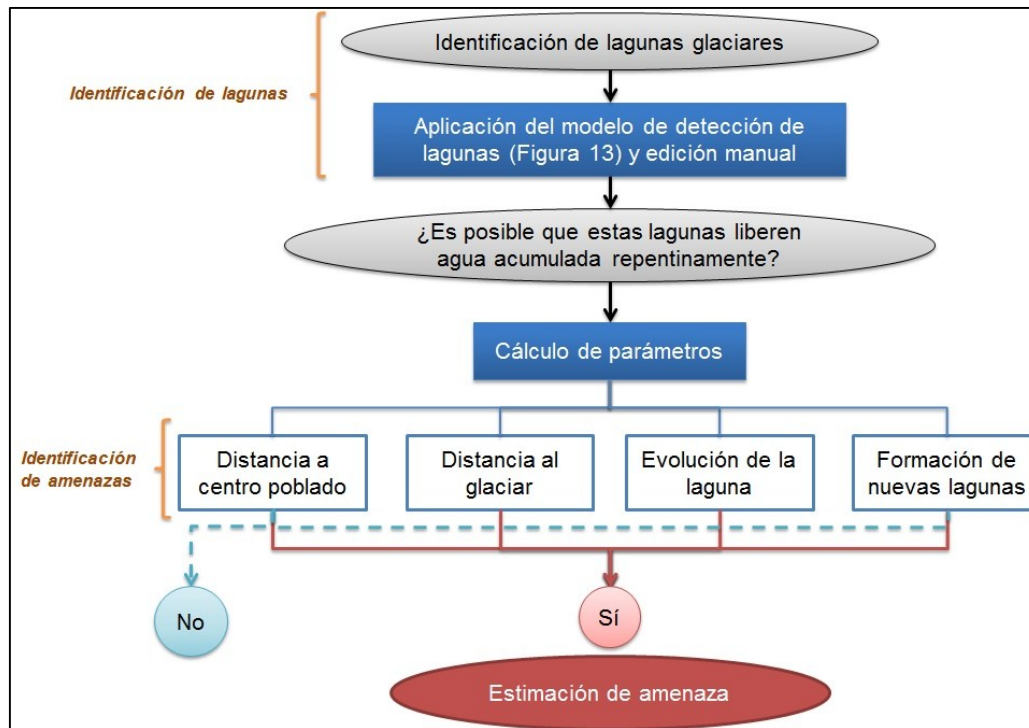
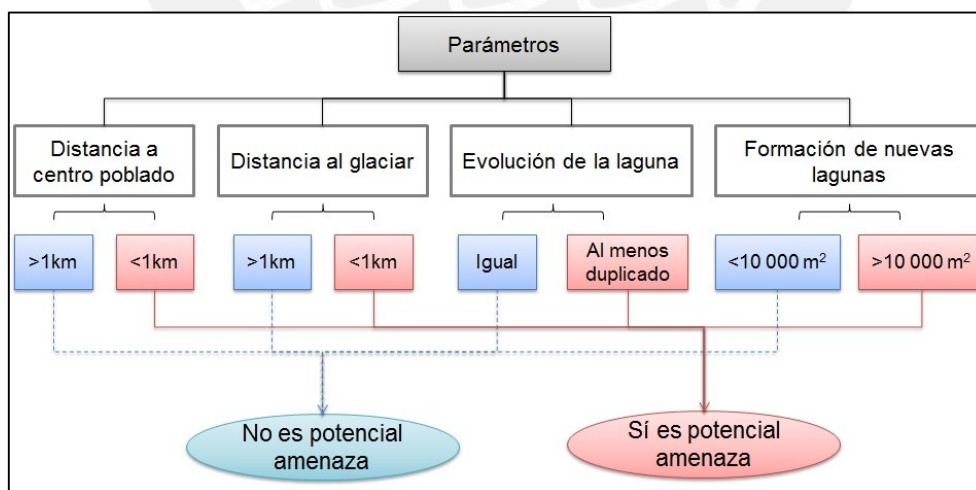


Figura 15: Esquema del proceso de identificación de las potenciales amenazas



Por ello, para el análisis de la potencial amenaza se tuvieron en cuenta las características geográficas y geométricas de las lagunas en el último año de análisis (2014), así como también su evolución en el tiempo; es decir, aumento de la superficie y formación de lagunas nuevas desde el año 2004 hasta el 2014 (Figura 16).

Figura 16: Parámetros establecidos para identificar la potencial amenaza de GLOF



En consecuencia, se consideró la distancia de los centros poblados en relación a las superficies lagunares, calculados por la distancia lineal en metros, teniendo en cuenta que albergan a las personas expuestas a la potencial amenaza. Para ello, se tomó en cuenta solo aquellos centros poblados en los que se registraron habitantes, según el censo del INEI del año 2007, de ese modo se descartaron 407 centros poblados que no tenían habitantes, de los 3989 que existen dentro del área de estudio.

Por otro lado, si bien los impactos de un GLOF pueden ser de varios kilómetros aguas abajo, en este trabajo se consideró un kilómetro con el fin de ser bastante conservador en la consideración de la potencial amenaza. Además, de manera complementaria, se consideró el número de habitantes para poder identificar centros poblados dónde el impacto de un evento GLOF podría ser mayor. Este parámetro se calculó con la herramienta *Near* de ArcGIS 10.1.

Un segundo parámetro fue la distancia de los glaciares a las lagunas (Bajracharya & Mool, 2009). Este parámetro se basa en que, en el contexto de derretimiento acelerado de glaciares por el cambio climático, la probabilidad de pérdida de masa glaciar por calving es mayor, por ende se consideró como distancia máxima 200 metros, ya que mientras más cerca se encuentre una laguna de un glaciar, la posibilidad de que un bloque de hielo caiga sobre esta y pueda ocasionar su desborde y/o un evento GLOF es mayor. Se calculó de igual manera con la herramienta *Near*.

El tercer parámetro está relacionado a la evolución del área de las lagunas en el tiempo (2004-2014), para ello, se tuvo en cuenta el cambio relativo en las superficies lagunares, siendo considerados aquellos cambios en los que por lo menos la superficie lagunar se había duplicado (Guardamino, 2014), esto significa un cambio muy importante en un periodo de solo 10 años. Este criterio se calculó con la herramienta *Spatial Join*, teniendo como base la capa de lagunas del año 2014 y agregándole la información de áreas de las superficies lagunares de los años 2009 y 2004.

Por último, se estableció que las lagunas nuevas, con áreas mayores a 10000 m² también se consideren como lagunas de potencial amenaza, ya que supondría un crecimiento bastante acelerado en un periodo de relativamente corto y su nueva aparición presupone la posibilidad de que no sea conocida ni registrada.

7 RESULTADOS

En el presente capítulo se describen los resultados obtenidos en esta investigación divididos en tres secciones. En la primera sección se desarrollan los resultados obtenidos de la etapa de pre-procesamiento de los insumos; en la segunda sección, se describen los resultados tanto de superficies glaciares como lagunares y; por último, los resultados relacionados al cálculo de parámetros para identificar las lagunas que representan una potencial amenaza de GLOF.

7.1 Resultados del ensayo de calidad de ortorrectificación y del proceso de aplicación de modelos semi-automatizados

Los resultados del ensayo para conocer el método más preciso para la ortorrectificación de las imágenes satelitales se presentan en la Tabla 7.

Tabla 7: Resultados del ensayo de calidad de métodos de corrección geométrica

GeoCover comparada con:	RMS Forward
Imagen original	66.41
Imagen original ortorrectificada manualmente	69.13
Imagen original ortorrectificada con AutoSync	11.66
Imagen ortorrectificada manualmente y con AutoSync	65.25

Estos resultados mostraron que la imagen a la que se le aplicó solo la herramienta *AutoSync* obtuvo mejores resultados que la que fue ortorrectificada de forma manual, siendo considerablemente menor a un pixel (11.66 metros). Sin embargo, al aplicar la herramienta *AutoSync* a las escenas de otros años, el desplazamiento entre años era mayor que el que tenía la imagen Landsat original, por lo que se descartaron los otros métodos instrumentales y se utilizaron las escenas Landsat 4-5 TM con nivel de corrección L1T y 9 de nivel de calidad, sin ningún proceso posterior.

Por otra parte, respecto a la aplicación del modelo semi-automatizado para identificar superficies glaciares, los resultados fueron bastante satisfactorios, ya que el modelo identificó los glaciares con bastante precisión y la etapa de revisión no fue muy extensa. Por el contrario, para la aplicación del modelo semi-automatizado de detección de lagunas se tuvo que invertir mucho tiempo en el establecimiento de umbrales adecuados que disminuyan el error ocasionado por sombras y poca profundidad de varias de las lagunas. Es por ello, que la definición de umbrales diferenciados para lagunas pequeñas y poco profundas ayudó de manera considerable a disminuir el error de sombras que generaba tener umbrales de rangos más amplios.

7.2 Resultados de superficies glaciares y superficies de lagunas.

Una vez seleccionado los mejores insumos para la aplicación de los modelos semi-automatizados, se logró calcular la superficie glaciar en la Cordillera Blanca para el año 2014 en 484.38 km², mostrando una disminución de 8% en relación a los 527.62 km² de superficie glaciar

del inventario de la UGRH en base al año 2003 (UGRH, 2012) y una reducción del 6% en base a lo registrado en esta investigación para el año 2004.

En la Tabla 8 se muestra un recuento de los cambios en la superficie glaciar de la Cordillera Blanca, teniendo en cuenta los trabajos de Georges (2004) para la LIA y los años 1930 y 1990; el trabajo de Ames (1989), para el año 1970, el de Silverio para los años 1987 y 1996 (UGRH, 2014); y, el presente estudio, para los años 2004, 2009 y 2014.

Es importante mencionar, que para calcular el porcentaje de reducción de superficie glaciar desde la LIA y 1930, se tuvo en cuenta el valor más bajo del rango estimado por Georges (2004). Además, se tomó en cuenta el último año de la LIA como referencia temporal para poder determinar el porcentaje de cambio de las superficies glaciares; es decir, el año 1850.

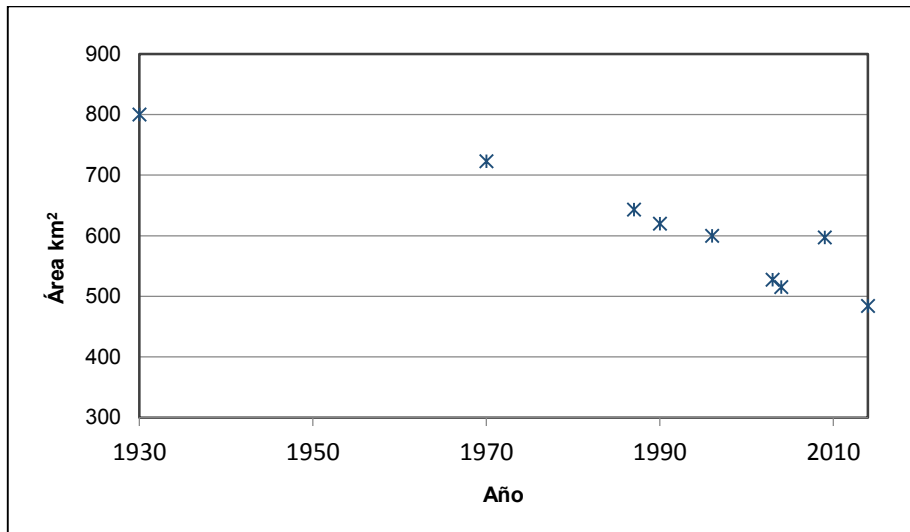
De la comparación de resultados destaca la reducción de superficie glaciar entre los años 1996-2003 como una de las más elevadas, 12% durante un periodo de siete años, fenómeno que coincide con El Niño de 1997-1998. Además, en los años 2004-2009, se registró un aumento aproximado de 16% de la superficie glaciar, fenómeno que coincide con un evento La Niña ocurrido durante los años 2007-2009. Como fue descrito anteriormente, las anomalías registradas en la SST poseen una alta correspondencia con las anomalías en el balance de masa glaciar (Vuille, et al., 2008a).

Tabla 8: Cambios de la superficie glaciar en la Cordillera Blanca desde la Pequeña Edad de Hielo. (1) (Georges, 2004); (2) (Ames, 1989); (3) Silverio en (UGRH, 2014); (4) (UGRH, 2014) y (5) la presente investigación.

Año	Área km ²	Cambio en porcentaje
LIA - 1850 ¹	850-900	-
1930 ¹	800-850	-5.88
1970 ²	723	-9.63
1987 ³	643	-11.07
1990 ²	620	-3.58
1996 ³	600	-3.23
2003 ⁴	528	-12.06
2004 ⁵	515	-2.31
2009 ⁵	597	+15.84
2014 ⁵	484	-18.87

Además, pese a que se logró registrar una fase de balance glaciar positiva en el periodo 2004-2009, se mantiene la tendencia general negativa (Figura 17). Por otro lado, a pesar de que en términos temporales el registro de superficies glaciares no es equidistante, razón por la cual no se puede analizar de forma más detallada los cambios en superficies glaciares antes del año 1987, se puede notar una mayor disminución de superficies glaciar en los últimos 20 años.

Figura 17: Variación de la superficie glaciaria en la Cordillera Blanca



Por otro lado, desde el punto de vista hidrográfico, la mayor proporción de la superficie glaciaria se encuentra en la cuenca del río Santa con 66%, seguido por la cuenca del Marañón con 27% y la cuenca del Pativilca con 0.4% (Tabla 9 y Figura 18). Además, altitudinalmente, las superficies glaciares para el año 2014 se ubicaron entre 4233 y 6733 msnm (Tabla 10). Si bien es cierto que la tendencia es que los glaciares se retiren a zonas más elevadas por el cambio climático, la anomalía registrada para el 2009 altera esa tendencia.

Tabla 9: Superficies glaciares en porcentajes por cuencas hidrográficas para los tres años analizados

Cuenca	Superficie Glaciaria 2004		Superficie Glaciaria 2009		Superficie Glaciaria 2014	
	Área (km²)	Porcentaje (%)	Área (km²)	Porcentaje (%)	Área (km²)	Porcentaje (%)
Santa	356.14	69.10%	415.17	69.54%	338.41	69.86%
Pativilca	2.31	0.45%	2.97	0.50%	1.83	0.38%
Marañón	156.96	30.45%	178.89	29.96%	144.15	29.76%
Total	515.41		597.04		484.38	

Figura 18: Superficie glaciaria por cuencas hidrográficas para los tres años analizados

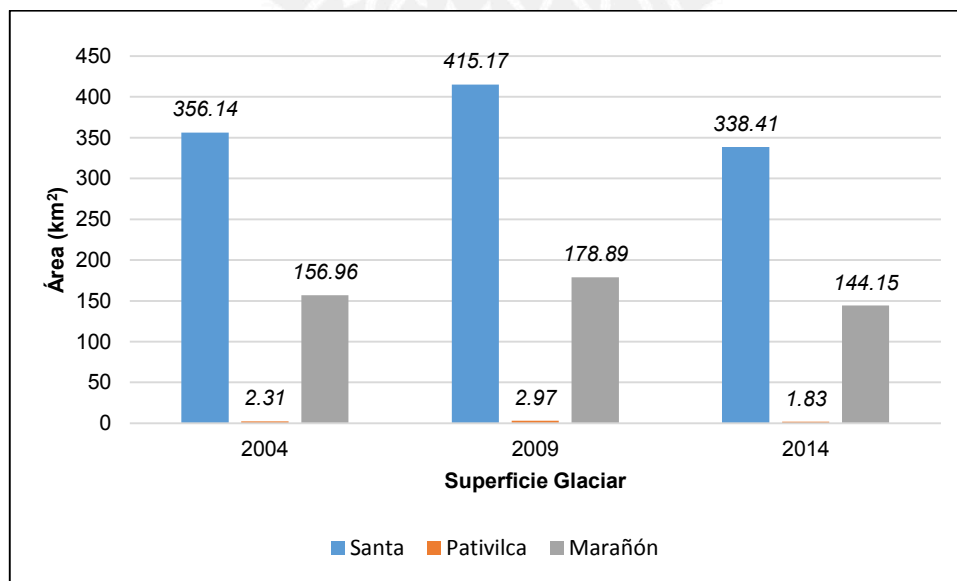


Tabla 10: Distribución altitudinal de los glaciares en la Cordillera Blanca

Año	Altitud mínima (m)	Altitud máxima (m)	Altitud promedio (m)
2003	4249	6701	5128
2004	4223	6733	5263
2009	4204	6733	5238
2014	4233	6733	5278

Con relación a las superficies lagunares, se identificaron un total de 812 lagunas con áreas mayores a 4500 m² en la Cordillera Blanca para el año 2014, que juntas suman 57.9 km² de superficie lagunar (Figura 11). La mayoría de las lagunas se encuentran dentro de las cuencas de los ríos Santa y Marañón, 506 y 270 respectivamente; y, en menor medida en las cuencas de los ríos Crisnejas y Pativilca, 28 y 8 respectivamente.

Las lagunas fueron codificadas con números consecutivos, ya que no se contaba con un registro de toponimia ni con la codificación que la UGRH había utilizado. Por ello, para evitar duplicidad en el registro, se decidió una correlación simple.

Para el año 2004, se identificaron 795 lagunas que ocupaban un total de 52.2 km² (Figura 11), estas son 35 lagunas y 5.1 km² menos que las identificadas en el inventario de lagunas elaborado por la UGRH al año 2003. Pese a usar un área menor como unidad mínima cartografiada la resolución de las imágenes Landsat no permitieron tener el detalle espacial que se consiguió en el inventario elaborado por la UGRH.

Para el año 2009 se identificaron 799 lagunas (Figura 11), de las cuales cinco no estaban incluidas en el inventario de la UGRH; es decir, eran lagunas que se formaron entre los años 2004 y 2009, posterior al inventario. Sin embargo, aún hay una diferencia de 36 lagunas que no fueron posibles de detectar por los problemas descritos anteriormente.

Tabla 11: Superficies y cantidad de lagunas en la Cordillera Blanca

Año	Área km ²	Cantidad
2003	57.6	830
2004	52.6	795
2009	52.2	799
2014	57.9	812

Por otro lado, para el año 2014, de las 812 lagunas identificadas, 24 no estaban incluidas en el inventario de la UGRH (2014). De estas, siete son de origen antrópico, específicamente actividad minera y almacenamiento de agua (Figura 19), y 17 son lagunas formadas naturalmente. También se registró la desaparición de dos lagunas durante el periodo 2009-2014, que pudieron haber desaparecido de forma natural o por intervención del hombre, pero que son casos excepcionales.

Respecto a la variabilidad del tamaño por rangos de áreas, el 48% de las lagunas está entre los 4500 y 20,000 m²; por otro lado, solo el 8% de las lagunas superan los 200,000 m²; sin embargo, estas representan 54% de la superficie total de lagunas en el área de estudio con 31.8 km² (Tabla 12 y Figura 20)

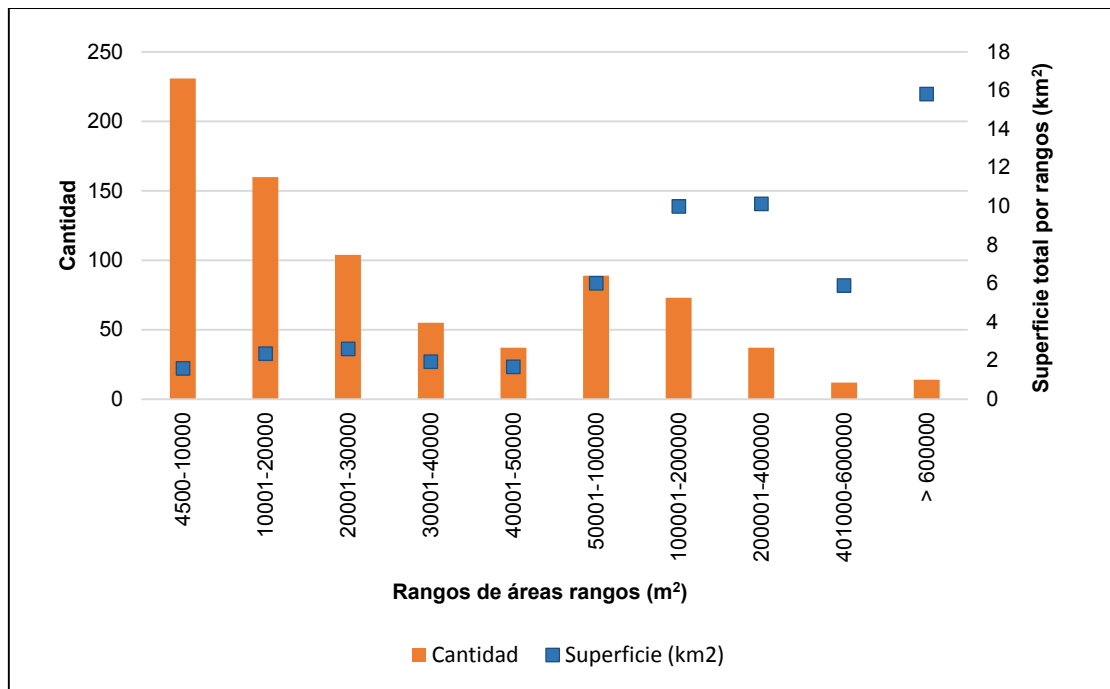
Figura 19: (a) Laguna nueva por represamiento de río; (b) Reservorios/pozas para actividad minera.



Tabla 12: Superficies lagunares por rangos de áreas

Rangos de áreas (m ²)	Cantidad	Porcentaje por cantidad	Superficie total (km ²)	Porcentaje por superficie
4500-10000	231	28.4%	1.58	2.7%
10001-20000	160	19.7%	2.35	4.1%
20001-30000	104	12.8%	2.60	4.5%
30001-40000	55	6.8%	1.93	3.3%
40001-50000	37	4.6%	1.67	2.9%
50001-100000	89	11.0%	6.00	10.4%
100001-200000	73	9.0%	9.99	17.2%
200001-400000	37	4.6%	10.12	17.5%
401000-600000	12	1.5%	5.88	10.2%
> 600000	14	1.7%	15.81	27.3%
TOTAL	812		57.93	

Figura 20: Distribución de superficies lagunares por rangos de áreas y número de lagunas



Por otro lado, respecto a la distribución altitudinal de las lagunas, las podemos encontrar desde los 3019 hasta los 5225 msnm (Tabla 13). Además, según los rangos de elevación de los pisos ecológicos, el mayor número de lagunas se encuentra en la Puna (entre los 4000 y 4800 msnm.); sin embargo, la mayoría de las nuevas lagunas formadas de manera natural, concretamente nueve lagunas, se encuentran en el piso Nival Janca, por encima de los 4800 metros de altitud, lo que muestra una tendencia a la formación de lagunas en lugares más elevados donde el hielo se retira (Tabla 14), tendencia también descrita en Guardamino (2014).

Tabla 13: Distribución altitudinal de las lagunas

Año	Altitud mínima (m)	Altitud máxima (m)
2004	3019	5090
2009	3019	5095
2014	3019	5224

Tabla 14: Número de lagunas según rangos altitudinales de pisos ecológicos

Año	Rangos según pisos altitudinales								Total Cant.
	Quechua (2300-3500)		Suni (3500-4000)		Puna (4000-4800)		Nival Janca (>4800)		
	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	Cant.	%	
2004	18	2.3%	43	5.4%	696	87.5%	38	4.8%	795
2009	18	2.2%	43	5.4%	704	87.9%	36	4.5%	801
2014	20	2.5%	46	5.7%	701	86.3%	45	5.5%	812

A nivel de las grandes unidades hidrográficas, la cuenca del río Santa posee la mayor cantidad y superficie lagunares, con 62% y 71%, respectivamente; sin embargo, la subcuenca que posee la mayor cantidad y superficie de lagunas es la del río Yanamayo, perteneciente a la cuenca del Alto Marañón, con 104 lagunas y alrededor de 5.6 km² de superficie (Tabla 15). El registro de lagunas según subcuencas es información importante porque contribuye a actualizar los inventarios de fuentes agua a un nivel más local y así, conocer la disponibilidad de recursos hídricos para su aprovechamiento.

Tabla 15: Distribución de lagunas según cuencas y subcuencas hidrográficas

Cuenca	Porcentaje por cantidad	Porcentaje por área	Subcuenca	Cantidad	Área (m ²)
Alto Marañón	36.6%	29.1%	Río Yanamayo	104	5,596,185
			Río Puchka	96	4,766,477
			Unidad Hidrográfica 498993	59	1,805,292
			Río Condebamba	28	3,885,844
			Río Chusgón	7	790,977
			Unidad Hidrográfica 498995	3	30,140
Río Santa	62.3%	70.6%	Unidad Hidrográfica 137699	42	4,406,400
			Unidad Hidrográfica 137693	39	5,334,300
			Unidad Hidrográfica 137697	33	1,712,700
			Río Pampas	31	3,136,599
			Unidad Hidrográfica 137649	30	2,646,613
			Unidad Hidrográfica 137645	29	1,683,487
			Río Boca Cabanas	26	2,771,100
			Río Yanayacu	26	2,480,400
			Unidad Hidrográfica 137669	26	1,007,042
			Río Santa Cruz	22	1,715,400
			Unidad Hidrográfica 137695	21	1,107,900
			Qda. Mantashja	20	2,125,800
			Unidad Hidrográfica 137691	16	2,195,082
			Río Quilcayhuanca	16	1,896,300
			Río Piscochaca	16	369,262
			Qda. Honda	15	1,584,000
			Unidad Hidrográfica 137689	15	1,200,600
			Unidad Hidrográfica 137641	15	324,000
			Qda. Coronguillo	10	938,700
			Río Urcón	10	220,500
			Unidad Hidrográfica 137667	7	275,400
			Unidad Hidrográfica 137683	6	519,300
			Río Santiago	6	396,353
			Unidad Hidrográfica 137687	6	110,700
			Río Racuay	5	180,900
			Río Corongo	5	95,400
			Unidad Hidrográfica 137684	4	259,200
			Qda. San Mateo	3	51,300
			Unidad Hidrográfica 137663	2	18,000
			Unidad Hidrográfica 137688	1	59,400
Unidad Hidrográfica 137665	1	23,400			
Río Chungay / Río Chunyay	1	17,100			
Río Negro	1	8,100			
Unidad Hidrográfica 1375	1%	0.2%	Unidad Hidrográfica 137589	8	138,600
Unidad Hidrográfica 1377	0.1%	0.1%	Río Moche	1	44,143
Total				812	57,928,396

Respecto a la relación entre superficies glaciares y lagunares, no es posible correlacionarlos de manera representativa, ya que no se cuenta con los suficientes registros para las superficies lagunares; sin embargo, es la tendencia general es que las superficies lagunares incrementen su área y se formen nuevas lagunas a medida que las superficies glaciares se derriten y retroceden. En el estudio de Guardamino (2014) sobre de la Cordillera Vilcanota, la relación superficies glaciares versus superficies lagunares fue más evidente.

7.3 Resultados de los parámetros para identificar lagunas de potencial amenaza

Por otra parte, en relación a los parámetros para identificar las lagunas de potencial amenaza, se registraron 84 coincidencias de lagunas que se encontraban a 1 km o menos de distancia de algún centro poblado (Tabla 16). Además, el 45% de las lagunas identificadas se encuentran entre los 2 y 5 km de distancia de algún centro poblado, mientras que el 36% a menos de 2 km. Lo que en líneas generales significa que en la Cordillera Blanca gran parte de los centros poblados se ubican cerca a alguna laguna (Figura 21).

Tabla 16: Distancia de lagunas a centros poblados

Distancia a centro poblado (m)	Número de lagunas
< 1000	84
1000-2000	130
2000-5000	366
5000-10000	197
>10000	35
Total	812

Cabe resaltar que la distancia calculada con la herramienta *Near* es en línea horizontal, lo que significa que la cercanía de lagunas a algún centro poblado no implica necesariamente que sea una amenaza. Para ello, se revisaron todos los casos y se descartaron aquellos que no se encontraban en el canal de drenaje de la laguna o que se encontraban en zonas más elevadas, teniendo en cuenta que los fenómenos GLOF descargan aguas abajo. Con ello, se obtuvieron 53 casos de lagunas (Tabla 17). También se observó que seis de los centros poblados identificados albergan a más de 100 habitantes, lo que implica que el posible impacto de un GLOF sería mayor en esos casos.

Figura 21: Distancia de lagunas a centros poblados según porcentajes

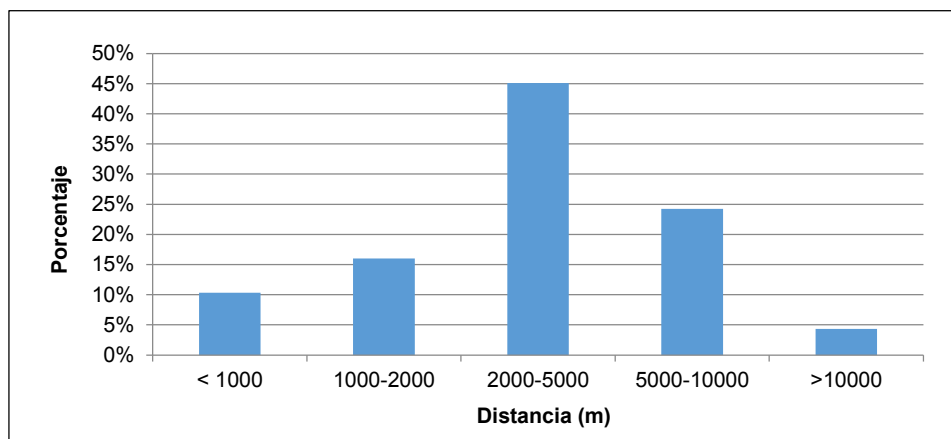
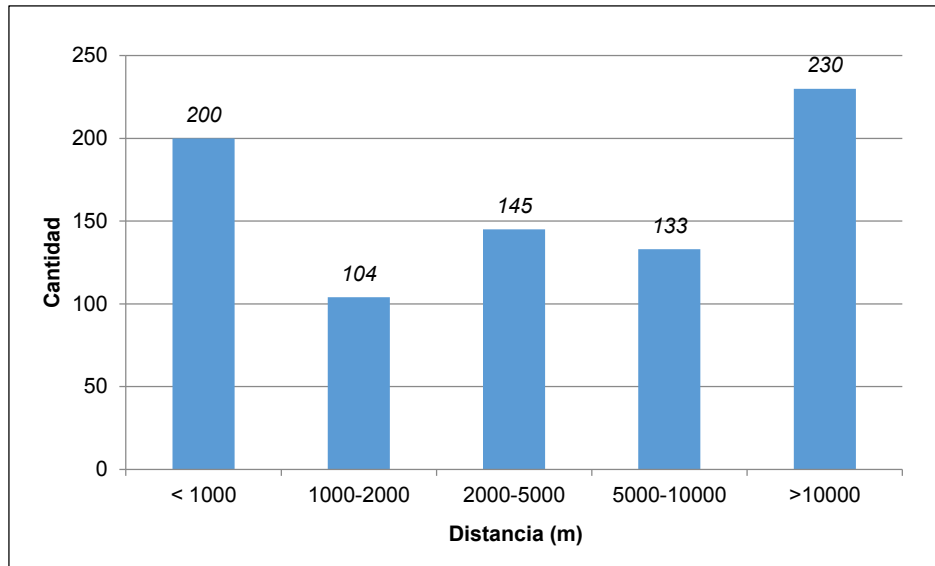


Tabla 17: Listado de lagunas a menos de 1km de distancia de algún centro poblado que se encuentran en el canal de drenaje del potencial GLOF

Departamento	Provincia	Distrito	Centro poblado	Habitantes	Distancia a laguna (m)	Código de laguna
Ancash	Bolognesi	Aquia	Aguascocha	4	780	13
	Huaylas	Caraz	Huachac	172	349	361
			Miramar	210	55	363
			Santa Cruz	Collicocha	1	511
		11			111	451
		11	11	452		
	Mariscal Luzuriaga	Lucma	Chaqui Quishuar	2	85	434
	Pallasca	Cabana	El Quinual	3	130	771
				7	912	588
		Conchucos	Labrascocha	7	408	559
				11	250	524
				4	547	736
			Pariacocha	4	324	737
				12	285	782
				12	413	783
				12	808	784
		Huandoval	Puracocha	2	104	614
				2	707	615
		Pampas	Chinchango	37	956	589
				2	900	598
				11	543	544
			Nauchavana	124	623	593
				124	363	594
				124	356	595
				61	368	535
			Pelagatos	59	325	539
				59	366	540
				23	500	533
		3		240	635	
		3		200	636	
	Quepina	10	394	531		
		10	394	531		
		10	394	531		
	Romero	10	394	531		
		10	394	531		
	Pomabamba	Pomabamba	Collota	15	274	436
			Huillcapampa	16	646	444
	Recuay	Catac	Aguascocha	4	811	12
			Ancus Cancha	4	555	91
			Gachicuta	4	0	22
Jatuncancho			4	309	41	
Romatambo			59	444	15	
Tapara			1	450	24	
1			257	25		
Yungay	Yungay	Keushu	4	193	380	
La Libertad	Sanchez Carrion	Huamachuco	Cushuro	209	987	674
			Sausacocha	183	22	677
			Tres Rios	374	168	695
		Sarin	Salitre	14	548	718
			Salitre	14	548	718
	Santiago De Chuco	Angasmarca	El Milagro	8	883	668
			Ucumal	23	588	664
		Cachicadan	Monteron	16	217	665
			Toma De Ichame	27	799	666
			764	661		
		Mollepata	Chinchangos	11	850	662
				11	227	678
		Quiruvilca	Laguna Del Toro	11	728	680
	11			728	680	

Respecto al parámetro de distancia a superficies glaciares, se lograron identificar 200 lagunas ubicadas a menos de 1 km distancia, que representa aproximadamente la cuarta parte de la cantidad de lagunas identificadas (Figura 22). De estas, 13 lagunas están a menos de 200 metros de alguna superficie glaciar (Tabla 18) y en cuatro casos están en contacto directo, como por ejemplo la laguna 365, ubicada en 203888 E y 9005265 N (Figura 22)

Figura 22: Distancia de lagunas por rangos a superficies glaciares



Del criterio de evolución de las lagunas en el tiempo, se detectaron 22 lagunas que por lo menos duplicaron su área, por ejemplo la laguna con código 346, ubicada en 211470 E y 9000786 N (Figura 24), de estas, seis (lagunas 27, 261, 345, 346, 456 y 713) triplicaron su área durante el periodo 2004-2014 (Tabla 19).

Del último criterio, lagunas nuevas formadas durante el periodo 2004-2014, se lograron identificar 24 lagunas (Tabla 20), de las cuales, como ya se mencionó antes, siete están relacionadas a actividades antrópicas, como se mostraron en la Figura 19. Además, 11 de las lagunas nuevas de formación natural superan los 10 000 m² de área (letra color rojo en Tabla 20).

Tabla 18: Lagunas a menos de 200 m de distancia hacia algún glaciar

Código de laguna	Área (km)	Altitud (m)	Distancia al glaciar (m)	Sistema Glaciar
16	47700	5018	0	Caustraraju
95	22500	4771	0	Pongos
156	25200	4421	134	Chinchey
165	28800	4335	119	Chinchey
194	31500	5085	73	Chinchey
203	10800	5193	24	Chinchey
205	131400	4642	165	Chinchey
332	29700	4699	129	Huscarán
341	26100	4624	107	Contrahierbas
359	37800	4865	119	Huandoy
365	36900	4899	0	Huandoy
374	75600	4756	122	Huandoy
493	9900	4635	0	Champará

Tabla 19: Lagunas que al menos duplicaron su área durante los años 2004-2014

Código de laguna	Área 2004 (m ²)	Área 2014 (m ²)
21	5400	11700
26	7200	18900
27	365400	1608300
185	5400	11700
216	9000	19800
261	4500	20700
279	14094	39600
281	4500	12600
345	4500	20700
346	6300	24300
347	7200	15300
364	4500	9900
369	6300	12600
429	9000	18000
436	4500	9000
456	5400	17100
572	385200	865800
583	41400	93600
634	4534	11716
653	41739	84610
713	6305	79267
758	6300	12600

Figura 23: Laguna 365 en contacto directo con el glaciar (Imagen de Google Earth)



Figura 24: Laguna 346 en el año 2003 y 2013 (Imágenes de Google Earth)



Tabla 20: Lagunas nuevas formadas en el periodo 2004-2014 (Letra roja lagunas de áreas superiores a 10,000 m²).

Código de laguna	Área (m ²)	Tipo de formación
16	47700	Natural
95	22500	Natural
144	68400	Natural
167	4500	Natural
179	5400	Natural
194	31500	Natural
203	10800	Natural
217	108900	Antrópica
236	11700	Natural
285	16200	Natural
312	27900	Natural
331	11700	Natural
359	37800	Natural
373	4500	Natural
399	7200	Natural
654	6301	Antrópica
655	27902	Antrópica
658	11724	Natural
710	117100	Antrópica
712	13511	Antrópica
714	18015	Antrópica
715	8941	Natural
719	21870	Antrópica
744	5400	Natural

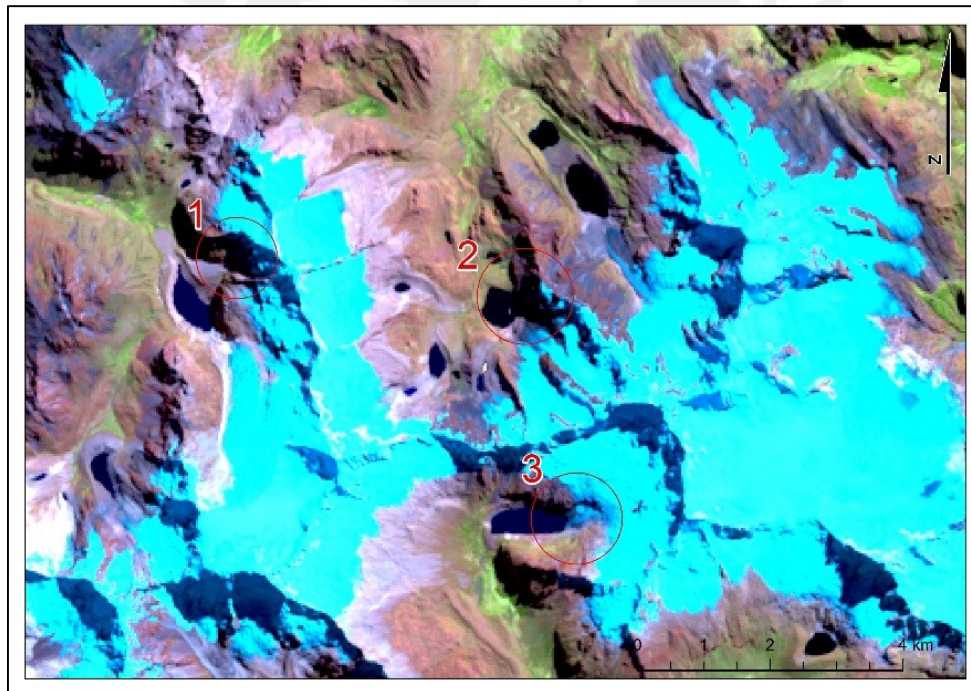
8 DISCUSIÓN Y RECOMENDACIONES

8.1 Discusión y recomendaciones en relación a los resultados de superficies glaciares y lagunares.

Los resultados del análisis de las superficies glaciares de esta investigación fueron bastante satisfactorios, ya que las áreas calculadas por el modelo para el año 2004 son bastante cercanos a los resultados del inventario de lagunas publicado por la UGRH con base en el año 2003; además, los resultados obtenidos para los años 2009 y 2014 aportan información adicional al registro de glaciares en la Cordillera Blanca.

El cálculo del NDSI pudo diferenciar bastante bien las superficies glaciares y los errores relacionados a sombras fueron superados con relativa facilidad, a excepción de las zonas en las que convergían lagunas, glaciares y sombras, donde el modelo erraba y era necesaria la edición manual (Figura 25).

Figura 25: Zonas de sombra de difícil detección. (1) Confusión hielo-sombra; (2) Confusión hielo-sombra-laguna; (3) Confusión laguna-hielo



La utilización de un filtro de altitud, depurando todo lo que está por debajo de 4000 msnm, permitió el ahorro de tiempo de edición de la capa de glaciares, concentrando esfuerzos en los errores de sombras y confusión con otras superficies. El tiempo invertido en la edición se empleó para la revisión de errores como en los de la Figura 25.

Del mismo modo, la generalización de los vacíos en el interior de los polígonos de superficies glaciares, que daban un aspecto de fragmentación en sitios en los que la superficie era continua, permitió concentrar esfuerzos en la edición manual de las superficies correspondientes a nunataks.

Pese a la anomalía de balance de masa positivo para el periodo 2004-2009, se reafirma la tendencia a la disminución de la superficie glaciaria a largo plazo en la Cordillera Blanca que muchos autores ya han descrito (Ames Marquez & Francou, 1995; Morales Arnao, 1998; Vuille, et al., 2008; Vuille, et al., 2008a; Frey, et al., 2010a; UGRH, 2014).

Esta anomalía puede haber ocurrido como respuesta al impacto de un evento La Niña, en la que se registraron anomalías negativas en la SST durante los años 2007, 2008 y 2009 (Tabla 21). Si bien es cierto que aún es bastante limitado el conocimiento sobre el impacto del ENSO en la variabilidad climática interanual en la Cordillera Blanca, y los Andes Tropicales en general, existen varios estudios que lo han documentado para la temperatura superficial y precipitación de varias regiones en los Andes tropicales y subtropicales (Garreaud & Aceituno, 2000; Vuille, et al., 2008a).

Tabla 21: Anomalías en la temperatura superficial del mar (SST) en la región El Niño 3.4 (Índice Oceánico el Niño-ONI)

Año	DEF	EFM	FMA	MAM	AMJ	MJJ	JJA	JAS	ASO	SON	OND	NDE
1990	0.1	0.2	0.3	0.3	0.2	0.2	0.3	0.3	0.4	0.3	0.4	0.4
1991	0.3	0.2	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.8	1.2	1.4
1992	1.6	1.5	1.4	1.2	1	0.7	0.3	0	-0.2	-0.3	-0.2	0
1993	0.2	0.3	0.5	0.6	0.6	0.5	0.3	0.2	0.2	0.2	0.1	0.1
1994	0.1	0.1	0.2	0.3	0.4	0.4	0.4	0.4	0.5	0.7	1	1.2
1995	1	0.8	0.6	0.3	0.2	0	-0.2	-0.4	-0.7	-0.8	-0.9	-0.9
1996	-0.9	-0.8	-0.6	-0.4	-0.3	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.4	-0.5
1997	-0.5	-0.4	-0.1	0.2	0.7	1.2	1.5	1.8	2.1	2.3	2.4	2.3
1998	2.2	1.8	1.4	0.9	0.4	-0.2	-0.7	-1	-1.2	-1.3	-1.4	-1.5
1999	-1.5	-1.3	-1	-0.9	-0.9	-1	-1	-1.1	-1.1	-1.3	-1.5	-1.7
2000	-1.7	-1.5	-1.2	-0.9	-0.8	-0.7	-0.6	-0.5	-0.6	-0.6	-0.8	-0.8
2001	-0.7	-0.6	-0.5	-0.4	-0.2	-0.1	0	0	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3
2002	-0.2	0	0.1	0.3	0.5	0.7	0.8	0.8	0.9	1.2	1.3	1.3
2003	1.1	0.8	0.4	0	-0.2	-0.1	0.2	0.4	0.4	0.4	0.4	0.3
2004	0.3	0.2	0.1	0.1	0.2	0.3	0.5	0.7	0.8	0.7	0.7	0.7
2005	0.6	0.4	0.3	0.3	0.3	0.3	0.2	0.1	0	-0.2	-0.5	-0.8
2006	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	0	0.1	0.2	0.3	0.5	0.8	1	1
2007	0.7	0.3	-0.1	-0.2	-0.3	-0.3	-0.4	-0.6	-0.8	-1.1	-1.2	-1.4
2008	-1.5	-1.5	-1.2	-0.9	-0.7	-0.5	-0.3	-0.2	-0.1	-0.2	-0.5	-0.7
2009	-0.8	-0.7	-0.5	-0.2	0.2	0.4	0.5	0.6	0.8	1.1	1.4	1.6
2010	1.6	1.3	1	0.6	0.1	-0.4	-0.9	-1.2	-1.4	-1.5	-1.5	-1.5
2011	-1.4	-1.2	-0.9	-0.6	-0.3	-0.2	-0.2	-0.4	-0.6	-0.8	-1	-1
2012	-0.9	-0.6	-0.5	-0.3	-0.2	0	0.1	0.4	0.5	0.6	0.2	-0.3
2013	-0.6	-0.6	-0.4	-0.2	-0.2	-0.3	-0.3	-0.3	-0.3	-0.2	-0.3	-0.4
2014	-0.6	-0.6	-0.5	-0.1	0.1	0.1	0	0	0.2	0.5	0.7	0.7
2015	0.6	0.5	0.6	0.7	0.9	1.1	1.3	1.6	1.9	2.3		

Por otra parte, las anomalías positivas registradas en los últimos meses en la región El Niño 3.4 (Tabla 21), permiten suponer que el balance de masa para el año 2015 sufriría una pérdida muy importante; por ello, sería recomendable prestar atención a lo que pueda ocurrir en la Cordillera Blanca.

Durante el periodo 2004-2009, cuando se registró un aumento en las superficies glaciares, las superficies lagunares disminuyeron en 0.36 km². La anomalía de balance de masa positivo en el año 2009, ha hecho más evidente la relación entre evolución de superficies glaciares y lagunares. Realizando un ejercicio de correlación entre los años 2003, 2004, 2009 y 2014, este arrojó una

relación inversa de -0.75, si bien no es un resultado significativo por los pocos registros utilizados, ayuda a tener una idea de la relación entre glaciares y lagunas.

Por otro lado, respecto a los resultados de superficies lagunares, estas presentaron más complicaciones para ser detectadas. Pese a que el NDWI descrito por Huggel (2002) identifica muy bien los cuerpos de agua profundos y de gran tamaño, incluso en zonas con sombras, no sucedió lo mismo en cuerpos más pequeños y de poca profundidad. Este problema de omisión de lagunas se solucionaba ampliando los umbrales del modelo; sin embargo, esto implicaba incrementar el error de confusión con sombras. Por ello, al aplicar umbrales diferentes para superficies más pequeñas permitió, en cierta medida, disminuir el ruido en los resultados del modelo.

Pese a que existe un patrón de formación de nuevas lagunas a mayor elevación, no se pudo establecer un filtro altitudinal, debido a que ya existían lagunas en zonas más bajas, inclusive en el valle del Santa (laguna más baja fue registrada en 3019 msnm.). Por otra parte, la utilización de un filtro relacionado a la pendiente del terreno funcionó satisfactoriamente, ya que las áreas lagunares presentan la característica de tener baja pendiente, lo que facilita la acumulación de agua.

El filtro por pendientes permitió descartar buena parte del ruido de sombras que el modelo detectaba por error; sin embargo, también ocurría el problema de confusión con sombras cercanas al glaciar (Figura 25). Por ello, con el fin de superar esta complicación, se realizó un filtró con las superficies glaciares ya identificadas previamente, de manera que se descarten los errores de confusión de lagunas con superficies glaciares con sombras. Por último, los errores que no pudieron ser superados se tuvieron que editar de forma manual, con ayuda del test de sombras desarrollado en Frey, et al. (2010a).

Los resultados fueron satisfactorios, pero no posibles de ser comparados con los que se obtuvieron en el inventario de lagunas de la UGRH. Esto fue, principalmente, debido a la mayor resolución espacial de las imágenes satelitales empleadas (10-15 m), lo que les permitió identificar mejor las superficies más pequeñas. Además, las complicaciones en la detección de lagunas de menor tamaño y menor profundidad hacen aún más difícil el compararlo con otras investigaciones.

Por otro lado, no afrontaron errores de confusión con sombras debido a que fue elaborado mediante digitalización manual, proceso mucho más largo pero que puede llegar a ser más exacto; aunque, la digitalización manual también tiene problemas relacionados a la experiencia del operador y errores propiamente de la imagen.

El inventario de la UGRH, en base a imágenes satelitales del año 2003, registró 830 lagunas con áreas de 5000 m² a más, mientras esta investigación, en base a imágenes Landsat del año 2004, se lograron registrar 795 lagunas con áreas superiores a los 4500 m². Son 35 lagunas identificadas por la UGRH que no fueron incluidas en esta por no cumplir con el área mínima cartografiable o simplemente por no haber sido identificadas por el modelo.

Sin embargo, pese a la desventaja relacionada a la resolución espacial de las imágenes, esta investigación tiene la ventaja de poseer un registro actualizado de las superficies glaciares y lagunares hasta el año 2014, en comparación al inventario nacional que está hecho en base a imágenes del 2003. Además, esta investigación aporta con un modelo automatizado para detectar lagunas y glaciares; y, establece parámetros para identificar lagunas que representan una potencial amenaza de ocurrencia de GLOF.

Esta investigación también puede servir como fuente para contrastar resultados con las actualizaciones de los inventarios de lagunas y glaciares que viene elaborando la UGRH (por publicar en los próximos meses la actualización con año base al 2012).

En relación a los resultados del análisis, de las dos lagunas que desaparecieron en el periodo 2009-2014, no se lograron encontrar registro de imágenes en *Google Earth* que permitieran identificar si la desaparición de ambas lagunas se deba algún desembalse. Sin embargo, por la falta de huellas de GLOFs y por la cercanía a una zona de actividad minera, es muy probable que el agua de las lagunas haya sido usada para actividades relacionadas a la mina (Figura 26).

Figura 26: Lagunas secas entre los años 2009-2014



8.2 Discusión y recomendaciones en relación a los parámetros para identificar lagunas de potencial amenaza.

Por otro lado, los parámetros aquí propuestos otorgan una primera aproximación a la situación actual de la evolución de las lagunas y cómo esos cambios convierten a una laguna en una amenaza potencial. Como se mencionó anteriormente, se aplicó la primera fase de la Gestión de una Amenaza Glaciar desarrollada en Richardson & Reynolds (2000), la identificación de las potenciales amenazas.

Acerca del primer parámetro, se pudo encontrar en *Google Earth* algunas imágenes que ejemplifican bien lo que se quiere demostrar. En la Figura 27 se observan dos lagunas en la parte alta, mientras que en la zona de valle se aprecian grandes áreas agrícolas que podrían ser afectados en caso de ocurrencia de un GLOF.

Esta información es un insumo importante para estudios complementarios en los que se modela el cauce del aluvión, de esta manera se estima las zonas de mayor vulnerabilidad y las labores de prevención se enfocan en los puntos más críticos.

Con relación al parámetro de distancias de lagunas al glaciar, es un buen indicador que permite enfocar aquellas lagunas en las que, en caso de que el glaciar desprenda un bloque de hielo, sea más probable que desencadene un GLOF; sin embargo, para complementar los datos de distancia sería recomendable conocer algunas características generales de estabilidad del glaciar, como por ejemplo la pendiente predominante, el balance de masa, la presencia de grietas en el interior, entre otras. Además, también es importante conocer la estabilidad de las vertientes de montañas adyacentes a las lagunas, ya que las caídas de rocas también son una de las principales causas de GLOFs.

Figura 27: Dos lagunas ubicadas aguas arriba de campos agrícolas



Por otra parte, los parámetros relacionados a la evolución de las lagunas, entre ellos el aumento significativo del área del espejo de agua y la formación de nuevas lagunas, también son buenos indicadores para discriminar la potencial amenaza. Adicionalmente, esta información podría ir acompañada de otras características de la laguna, como por ejemplo volumen y tipo de dique que soporta la laguna.

De tal modo, en esta investigación se pudieron identificar 99 lagunas que cumplen con al menos uno de los parámetros definidos (Anexo 2), estos se muestran en una tabla con el código correlativo y sus respectivas coordenadas (WGS 1984-UTM zona 18 Sur).

Los parámetros utilizados para la identificación de la potencial amenaza de las lagunas brindan una aproximación sobre aquellas que representan una potencial amenaza y sobre los centros poblados expuestos. La metodología ofrece posibilidades de identificar cuáles son las lagunas de interés que necesitan de estudios complementarios para poder medir el grado de amenaza.

Este es un primer paso para la gestión de amenazas de origen glaciar y GRD, estudios posteriores que cuenten con mejores insumos, como imágenes satelitales y modelos de elevación de mayor resolución espacial, e incluso con la posibilidad de realizar medición *in situ*, pueden complementar esta investigación adicionando más parámetros como los recomendados anteriormente.

Por otro lado, también es importante el acercamiento a las realidades socioeconómicas y político-institucionales para la determinación de las vulnerabilidades. La complejidad entre la relación de los sistemas socioeconómicos y las consecuencias del cambio climático amerita toda una investigación adicional al respecto.

Finalmente, se acepta la hipótesis propuesta al inicio de la investigación, existe una tendencia creciente al aumento de las superficies y número de lagunas en la Cordillera Blanca durante los años 2004-2014. A su vez, la evolución de las lagunas y la dinámica glaciar han hecho que algunas lagunas presenten características que las podrían volver una potencial amenaza de GLOF, las 99 lagunas identificadas en el presente trabajo son prueba de ello.

9 CONCLUSIONES

Existe una tendencia creciente en el aumento de las superficies y número de lagunas en la Cordillera Blanca por el derretimiento acelerado de los glaciares, causado en gran medida por el cambio climático.

En los 10 años de análisis (2004-2014), la superficie glaciar se redujo de 515.4 km² a 484.4 km², una pérdida del 6%, lo que corrobora la tendencia general de reducción de los glaciares a nivel global. Además, teniendo en cuenta el área estimada por Georges (2004) de 850-900 km² para la LIA (año 1850), la reducción de la superficie desde la LIA hasta el año 2014 sería de 38%.

Si bien durante el periodo 2004-2009, la superficie glaciar aumentó 82 km², lo que puede estar relacionado probablemente al evento La Niña ocurrido durante los años 2007 al 2009, durante el periodo 2009-2014, el porcentaje de pérdida de superficie glaciar fue de 18.9%; volviendo a la tendencia general de retroceso glaciar.

La superficie lagunar en la Cordillera Blanca se ha incrementado en 10%, pasando de 52.57 km² a 57.93 km² durante el periodo 2004-2014. Además, para el año 2014 se han identificado 24 lagunas nuevas en comparación a las identificadas en el año 2004.

De las lagunas identificadas como nuevas, 17 son de origen natural, mientras las otras siete tienen origen antrópico, reservorios/pozas para actividad minera. Además, se detectó la desaparición de dos lagunas en el periodo 2009-2014, posiblemente asociado a consumo/uso para actividad minera, debido a la presencia en las cercanías de ambas lagunas.

No fue posible establecer una correlación entre superficies lagunares y glaciares, ya que no se contaba con los datos suficientes para que el resultado sea representativo, por ello, es necesaria la elaboración de inventarios de la evolución de los glaciares y lagunas en periodos de tiempo más cortos.

Los parámetros utilizados brindan una aproximación sobre aquellas lagunas que representan una potencial amenaza y sobre los centros poblados expuestos. La metodología ofrece posibilidades de identificar cuáles son las lagunas de interés que necesitan de estudios complementarios para poder medir el grado de amenaza.

En base a ello, se han logrado identificar un total de 99 lagunas que cumplen con al menos una de las características para ser considerada como una potencial amenaza, esto es un poco más del 12% de las lagunas identificadas; además, seis de ellas cumplen dos parámetros a la vez.

Se identificaron 40 centros poblados que se encuentran a menos de 1km de distancia de una laguna, de estos, sería recomendable en futuras investigaciones más a detalle y con información in situ para identificar la real magnitud de la amenaza.

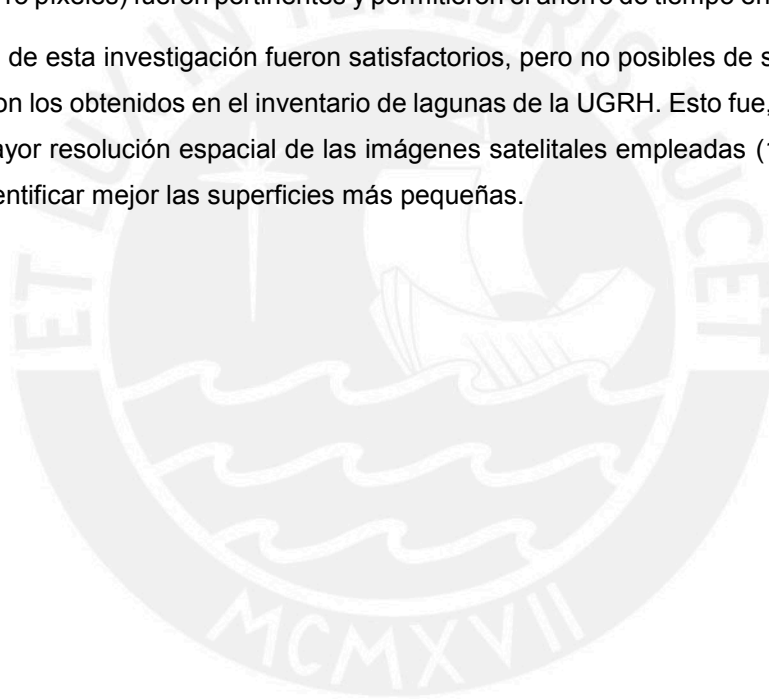
También se registraron 13 lagunas que se encontraban a menos de 200 metros de una superficie glaciar, cuatro de estas están en contacto directo con el glaciar y su vez son lagunas de formación reciente.

Con relación a las técnicas empleadas en esta investigación, el modelo de detección automática de glaciares ha demostrado ser un método rápido, robusto y bastante preciso, con mucha coherencia en los resultados comparados con otros estudios, por ejemplo, el Inventario Nacional (UGRH, 2014).

Por otro lado, el modelo de detección semiautomática de lagunas es un método rápido, pero aún no logra ser muy preciso, las características espectrales de los cuerpos de agua varían mucho siendo reflectores especulares e incluir todo lo que podría ser una laguna implicaría ampliar los umbrales; sin embargo, ampliar los umbrales significa aumentar el error de confusión por otros elementos, como por ejemplo, las sombras.

La aplicación del test de sombras empleado por Frey et al. (2010a) fue de gran ayuda para anticipar los posibles sitios donde el modelo semi-automatizado posiblemente erraría. Además, el filtro de selección por baja pendiente y la aplicación de un umbral diferente para lagunas pequeñas (5 a 15 píxeles) fueron pertinentes y permitieron el ahorro de tiempo en edición manual.

Los resultados de esta investigación fueron satisfactorios, pero no posibles de ser directamente comparados con los obtenidos en el inventario de lagunas de la UGRH. Esto fue, principalmente, debido a la mayor resolución espacial de las imágenes satelitales empleadas (10-15 m), lo que les permitió identificar mejor las superficies más pequeñas.



Bibliografía

- Adam, E., Vít, V., Klimeš, J. & Cochachin, A., 2014. Glacier Retreat, Lakes Development and Associated Natural Hazards in Cordillera Blanca, Peru. *Springer International Publishing Switzerland 2014*, pp. 231-252.
- Alianza Clima y Desarrollo, 2012. *La Gestión de Riesgos de Eventos Extremos y Desastres en los Recursos Hídricos: Aprendizajes del Informe SREX del IPCC*, Lima: INDECI.
- Ames Marquez, A. & Francou, B., 1995. Cordillera Blanca Glaciares en la Historia. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 24(1), pp. 37-64.
- Ames, A., 1989. *Inventario de Glaciares del Perú. 1ra Parte*, Huaraz: s.n.
- Bajracharya, S. R. & Mool, P., 2009. Glaciers, glacial lakes and glacial lake outburst floods in the Mount Everest region, Nepal. *Annals of Glaciology*, 50(53), pp. 81-86.
- Burns, P. & Nolin, A., 2014. Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Perú from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, Volumen 140, pp. 165-178.
- Carenas, M., Giner, J., González, J. & Pozo, M., 2014. *Geología*. Madrid-España: Parainfo.
- Carey, M., 2010. *In the Shadow of Melting Glaciers*. New York: Oxford University Press.
- Carey, M. y otros, 2012. An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru. *Climate Change*, Issue 112, pp. 733-767.
- Casassa, G. y otros, 2007. Current status of Andean glaciers. *Global and Planetary Change*, Volumen 59, pp. 1-9.
- Cobbing, E., 1996. *Geología de los cuadrángulos de Huaraz, Recuay, La Unión, Chiquián y Yanahuanca*. Lima: INGEMMET.
- Concha, J., 1957. El Problema de las Lagunas de la Cordillera Blanca. *Boletín de la Sociedad Geológica del Perú*, Volumen 32, pp. 87-95.
- Coudrain, A., Francou, B. & Kundzewicz, Z. W., 2005. Glacier shrinkage in the Andes and consequences for water resources. *Hydrological Sciences—Journal—des Sciences Hydrologiques*, 50(6), pp. 925-932.
- Cuffey, K. M. & Paterson, W. S. B., 2010. *The Physics of Glaciers*. 4 ed. USA: Elsevier.
- Drenkhan, F. y otros, 2015. The Changing Water Cycle: Climatic and Socioeconomic Drivers of Water-related Changes in the Andes of Peru. *WIREs Water*, 2(6), pp. 715-733.
- EIRD, 2008. *La gestión de riesgo de desastres hoy: Contextos globales, herramientas locales*. San José: s.n.
- Emmer, A., Vilímek, V., Klimeš, J. & Cochachin, A., 2014. Glacier Retreat, Lakes Development and Associated Natural Hazards in Cordillera Blanca, Peru. En: W. S. e. al., ed. *Landslides in Cold Regions in the Context of Climate Change. Environmental Science and Engineering*. Suiza: Springer International Publishing, pp. 231-252.
- Frey, H. y otros, 2010. A multi-level strategy for anticipating future glacier lake formation and associated hazard potentials. *Natural Hazards and Earth Syttem Sciences*, Volumen 10, p. 339–352.
- Frey, H., Huggel, C., Paul, F. & Haerberli, W., 2010a. Automated detection of glacier lakes based on remote sensing in view of assessing associated hazard potentials. *Grazer Schriften der Geographie und Raumforschung*, Volumen 40, pp. 261 - 272.

- Garreaud, R. & Aceituno, P., 2000. Interannual Rainfall Variability over the South American Altiplano. *J. Climate*, Volumen 14, p. 2779–2789.
- Garreaud, R. D., 2009. The Andes climate and weather. *Advances in Geosciences*, Volumen 22, pp. 3-11.
- Georges, C., 2004. 20th-Century Glacier Fluctuations in the Tropical Cordillera Blanca, Perú. *Arctic Antarctic and Alpine Research*, 36(1), pp. 100-107.
- Guardamino, L., 2014. *Análisis de la Evolución de las Lagunas de Alta Montaña en la Cordillera del Vilcabamba (Cusco y Apurímac) entre los Años 1991-2014*. Lima: PUCP.
- Haeberli, W., Huggel, C., Paul, F. & Zemp, M., 2013. Glacial Responses to Climate Change. En: *Teatrise on Geomorphology*. San Diego: Academic Press, pp. 152-175.
- Hanshaw, M. N. & Bookhagen, B., 2014. Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru. *The Cryosphere*, Volumen 8, p. 359–376.
- Huddart, D. & Stott, T., 2010. *Earth Environment. Present, past and future*. s.l.:Wiley & Sons.
- Huggel, C. y otros, 2004. An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Can. Geotech. J.*, Volumen 41, pp. 1068-1093.
- Huggel, C. y otros, 2002a. Assesmente of glacier hazards and glacier runoff for different climate escenarios based on remote sensing data: A case of study for a hydropower plant in the peruvian Andes. *Proceedings of EARSeL*, Volumen 2, pp. 22-33.
- Huggel, C. y otros, 2002. Remote sensing based assessment of hazards from glacier lake outbursts: a case study in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, Volumen 39, pp. 316-330.
- INDECI, 2010. *Atlas de Peligros del Perú 2010*. 2 ed. Lima: s.n.
- INEI, 2007. *Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*. Perú: s.n.
- IPCC, 2013. *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambirdge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press.
- IPCC, 2013. Observations: Cryosphere. En: *Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental*. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, p. 1535.
- IPCC, 2013. *Summary for Policymakers. In: Climate Change 2013: The Physical Science Basis. Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment*. United Kingdom y Nueva York: Cambridge University Press.
- IPCC, 2014a. Annex II: Glossary. En: J. Agard & E. L. F. Schip, edits. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part B: Regional Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. Cambridge, United Kingdom and New York: Cambridge University Press, pp. 1757-1776.
- IPCC, 2014. *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York: University Cambridge Press.
- IPE, 2015a. <http://www.ipe.org.pe/>. [En línea]
Available at: http://www.ipe.org.pe/sites/default/files/u3/ficha_2015_-_la_libertad.pdf
[Último acceso: 7 Septiembre 2015].

- IPE, 2015. <http://www.ipe.org.pe/>. [En línea]
Available at: [http://www.ipe.org.pe/sites/default/files/u3/ficha_2015 - ancash.pdf](http://www.ipe.org.pe/sites/default/files/u3/ficha_2015_-_ancash.pdf)
[Último acceso: 7 Septiembre 2015].
- Kaser, G., 1995. Some notes of behaviour of tropical glaciers. *Boletín del Instituto Francés de Estudios Andinos*, 24(3), pp. 671-681.
- Kaser, G., 1999. A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, pp. 93-103.
- Kaser, G., Fountain, A. & Jansson, P., 2003. *A manual for monitoring the mass balance of mountain glaciers. with particular attention to low latitude characteristics*. Paris: INTERNATIONAL HYDROLOGICAL PROGRAMME - UNESCO.
- Kaser, G. & Osmaston, H., 2002. *Tropical Glaciers*. Cambridge: s.n.
- Kinzi, H., 1969. La glaciación actual y pleistocénica en los Andes Centrales. *Boletín de la Sociedad Geográfica de Lima*, Volumen 89, pp. 89-100.
- Lliboutry, L., Morales Arnao, B., Pautre, A. & Schneider, B., 1977. Glaciological Problems set by the Control of Dangerous Lake in the Cordillera Blanca, Perú. Historical Failures of Morainic Dams, their Causes and Prevention. *Journal of Glaciology*, 18(79), pp. 239-254.
- McKillop, R. J. & Clague, J. J., 2007. Statistical, remote sensing-based approach for estimating the probability of catastrophic drainage from moraine-dammed lakes in southwestern British Columbia. *Global and Planetary Change*, Volumen 56, p. 153–171.
- Morales Arnao, B., 1998. Glaciers of South America - Glaciers of Perú. En: R. Williams & J. Ferrigno, eds. *U.S. Geological Survey Professional Paper 1386, Satellite Image Atlas of Glaciers of the World*. San Diego: s.n., pp. 151-179.
- Mostacero León, J., 1996. *Fitogeografía del norte del Perú*. Lima: CONCYTEC.
- Oppenheimer, M. y otros, 2014. Emergent risks and key vulnerabilities. En: *Climate Change 2014: Impacts, Adaptation, and Vulnerability. Part A: Global and Sectoral Aspects. Contribution of Working Group II to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change*. United Kingdom and New York: Cambridge University Press, pp. 1039-1099.
- PNUD, 2013. *Informe sobre Desarrollo Humano Perú 2013. Cambio climático y territorio: Desafíos y respuestas para un futuro sostenible*, Lima. Perú: s.n.
- PNUD, 2014. *Cambio Climático y Territorio*, Magdalena del Mar, Lima 17, Perú: s.n.
- Proyecto Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático, 2009. *Evaluación Local Integrada y Estrategia de Adaptación al Cambio Climático en el Río Santa*, San Isidro, Lima: s.n.
- Rabatel, A. y otros, 2013. Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change. *The Cryosphere*, Volumen 7, pp. 81-102.
- Richardson, S., 2010. Remote sensing approaches for early warning of GLOF hazard in the Hindu Kush—Himalayan region.. *United Nations International Strategy for Disaster*, p. 35.
- Richardson, S. & Reynolds, J., 2000. An overview of glacial hazard of the Himalayas. *Quaternary International*, Volumen 65/66, pp. 31-47.
- Schauwecker, S. y otros, 2014. Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Perú, revisited. *Global and Planetary Change*, Volumen 119, pp. 85-97.
- SERNANP, 2011. *Parque Nacional Huascarán. Plan Maestro 2010-2015*. SERNAMP ed. Lima: s.n.
- Smith, D. N., 1988. *Flora and Vegetation of the Huascarán National Park, Ancash, Perú with preliminary taxonomic studies for a manual of the flora*. Ames, Iowa: Iowa State University.

- Stoffel, M. & Huggel, C., 2012. Effects of climate change on mass movements in mountain environments. *Progress in Physical Geography*, Volumen 37, pp. 248-258.
- Tarback & Lutgens, 2005. *Ciencias de la Tierra. Una Introducción a la Geología Física*. 8 ed. Madrid: Pearson.
- Terrier, S. y otros, 2011. Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps. *Proc. of International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges*, pp. 497-508.
- Terrier, S. y otros, 2011. Optimized and adapted hydropower management considering glacier shrinkage scenarios in the Swiss Alps. *Proc. of International Symposium on Dams and Reservoirs under Changing Challenges*, pp. 497-508.
- Turner II, B. L. y otros, 2003. A framework for vulnerability analysis in sustainability science. *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America*, 100(14), p. 8074–8079.
- Úbeda, J. & Palacios, D., 2008. El clima de la vertiente del Pacífico de los Andes Centrales y sus implicaciones geomorfológicas. *Espacio y Desarrollo*, Issue 20, pp. 31-56.
- UGRH, 2014. *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Huaraz: Depósito Legal en la Biblioteca Nacional del Perú.
- Ulloa, F., 2011. *Manual de Gestión de Riesgo de Desastre para Comunicadores Sociales*. Lima: UNESCO.
- UNEP, 2007. *Global Outlook for Ice & Snow*. Birkeland: s.n.
- UNFCCC, 1992. *Convención Marco de las Naciones Unidas sobre el Cambio Climático*. Nueva York, s.n.
- USGS, 2014a. <http://landsat.usgs.gov/>. [En línea]
Available at: http://landsat.usgs.gov/about_landsat5.php
[Último acceso: 12 Septiembre 2014].
- USGS, 2014. http://landsat.usgs.gov. [En línea]
Available at: http://landsat.usgs.gov/about_ldcm.php
[Último acceso: 12 Septiembre 2015].
- Vergara, W. y otros, 2007. Economic Impacts of Rapid Glacier Retreat in the Andes. *EOS, TRANSACTIONS, AMERICAN GEOPHYSICAL UNION*, 88(25), pp. 261-268.
- Villanueva Ramírez, R., 2011. *Características de la Cuenca del Río Santa*. 1 ed. Huaraz: Biblioteca Nacional del Perú.
- Vuille, M., 2013. *El cambio Climático y los Recursos Hídricos en los Andes Tropicales*. s.l.:Banco Interamericano de Desarrollo.
- Vuille, M. y otros, 2008. Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, p. 79–96.
- Vuille, M., Kaser, G. & Juen, I., 2008a. Glacier mass balance variability in the Cordillera Blanca, Peru and its relationship with climate and the large-scale circulation. *Global and Planetary Change*, Issue 62, pp. 14-28.
- WGMS/UNEP, 2008. *Global Glacier Changes: Facts and figures*. s.l.:s.n.
- Wilson, J., Reyes, L. & Garay, J., 1967. *Geología de los Cuadrángulos de Mollebamba, Tayabamba, Huaylas, Pomabamba, Carhuaz y Huari*. Lima: INGEMMET.
- Worni, R. y otros, 2014. Coupling glacial lake impact, dam breach, and flood processes: A modeling perspective. *Geomorphology*, Volumen 224, p. 161–176.

ANEXOS

Anexo 1: Índice de Desarrollo Humano en los distritos dentro del área de estudio.

Región Ancash		
Huaraz	0.4816	40
Huaraz	0.5342	162
Independencia	0.4994	268
Jangas	0.3398	765
Olleros	0.2775	1126
Tarica	0.3745	607
Antonio Raymondi	0.2264	182
Llamellin	0.2865	1074
Aczo	0.2516	1305
Chaccho	0.2378	1399
Chingas	0.2683	1176
Mirgas	0.1513	1796
San Juan De Rontoy	0.1719	1731
Asunción	0.2739	153
Chacas	0.3138	892
Acochaca	0.2074	1591
Bolognesi	0.3680	84
Chiquian	0.4267	441
Aquia	0.3527	710
Ticillos	0.3015	975
Carhuaz	0.3134	123
Carhuaz	0.3428	754
Acopampa	0.3546	700
Amashca	0.2548	1278
Anta	0.2761	1129
Marcara	0.2779	1122
Pariahuanca	0.3405	763
San Miguel De Aco	0.2204	1521
Shilla	0.2235	1498
Tinco	0.3679	632
Yungar	0.3284	807
Carlos Fermín Fitzcarrald	0.2278	181
San Luis	0.2378	1400
San Nicolas	0.2442	1352
Yauya	0.1890	1671
Corongo	0.3142	122
Corongo	0.3035	964
Aco	0.2513	1309
Bambas	0.2111	1572
Cusca	0.2634	1212
La Pampa	0.3463	738

Yanac	0.3241	829
Yupan	0.4579	362
Huari	0.3154	121
Huari	0.4059	501
Cajay	0.2560	1265
Chavin De Huantar	0.2244	1493
Huantar	0.3000	985
Masin	0.3324	793
Rahuapampa	0.4230	452
Huaylas	0.3187	118
Caraz	0.4036	505
Huallanca	0.4171	473
Santa Cruz	0.1939	1653
Yuracmarca	0.2189	1531
Mariscal Luzuriaga	0.2446	171
Piscobamba	0.3560	691
Casca	0.2337	1440
Eleazar Guzman Barron	0.1680	1750
Fidel Olivas Escudero	0.1937	1655
Llama	0.3364	776
Llumpa	0.1598	1779
Lucma	0.1912	1664
Musga	0.3371	774
Pallasca	0.2781	150
Cabana	0.3244	827
Bolognesi	0.3319	798
Conchucos	0.2259	1485
Huacachuque	0.2685	1174
Huandoval	0.3150	884
Lacabamba	0.3122	905
Llapo	0.3019	973
Pallasca	0.2716	1153
Pampas	0.2703	1164
Santa Rosa	0.3562	688
Tauca	0.2862	1077
Pomabamba	0.2760	151
Pomabamba	0.3352	781
Huayllan	0.2729	1141
Parobamba	0.1491	1803
Quinuabamba	0.1554	1786
Recuay	0.3463	97
Recuay	0.3667	640
Catac	0.3762	603
Ticapampa	0.3442	744
Sihuas	0.2719	156

Sihuas	0.4570	366
Acobamba	0.2276	1479
Alfonso Ugarte	0.2559	1267
Cashapampa	0.1807	1703
Chingalpo	0.3002	983
Huayllabamba	0.2156	1547
Quiches	0.1981	1633
Ragash	0.1835	1694
San Juan	0.1913	1662
Sicsibamba	0.2289	1468
Yungay	0.2797	147
Yungay	0.3462	739
Mancos	0.3586	677
Ranrahirca	0.3557	692
Yanama	0.2281	1474
Región La Libertad		
Sánchez Carrión	0.1857	193
Huamachuco	0.2489	1323
Chugay	0.0932	1834
Curgos	0.1392	1814
Marcabal	0.1296	1824
Sanagoran	0.0936	1833
Sarin	0.1468	1808
Santiago de Chuco	0.2866	137
Angasmarca	0.3078	933
Cachicadan	0.3015	976
Mollebamba	0.2900	1048
Mollepata	0.2286	1471
Quiruvilca	0.3349	782
Santa Cruz De Chuca	0.2021	1621
Sitabamba	0.1641	1763

Anexo 2: Lagunas identificadas como potencial amenaza

Código	Este (m)	Norte (m)	Altitud (m)	Área 2014 (m ²)	Distancia a Centro Poblado (m)	Distancia al Glaciar (m)	Periodo de aparición	Número de Parámetros
12	256020	8888965	4279	7200	811	6007	Antes 2003	1
13	257984	8889070	4362	219600	780	4382	Antes 2003	1
15	246225	8888644	4006	9000	444	9410	Antes 2003	1
16	260344	8903250	5018	47700	3471	0	Antes 2003	2
21	262115	8904176	4833	11700	2864	1055	Antes 2003	1
22	256318	8889960	4260	1614600	0	5259	Antes 2003	1
24	241043	8903570	4039	62100	450	10595	Antes 2003	1
25	240768	8903955	4032	27900	257	11008	Antes 2003	1
26	246993	8905834	4162	18900	857	7449	Antes 2003	1
27	250365	8879530	4020	1608300	2572	16564	Antes 2003	1
41	246670	8912971	4248	259200	309	4344	Antes 2003	1
91	247510	8913681	4263	94500	555	3245	Antes 2003	1
95	253114	8916622	4771	22500	5501	0	Después 2003	2
144	246628	8950558	4801	68400	7722	591	Después 2003	1
156	245940	8964796	4421	25200	13258	134	Antes 2003	1
165	247841	8961839	4335	28800	11750	119	Antes 2003	1
167	231186	8960458	4817	4500	7475	710	Después 2003	1
179	237055	8968085	4587	5400	10404	639	Después 2003	1
185	234367	8956533	4948	11700	7938	355	Antes 2003	1
194	232352	8960034	5085	31500	8407	73	Antes 2003	2
203	236248	8961665	5193	10800	12029	24	Después 2003	2
205	236130	8963335	4642	131400	11213	165	Antes 2003	1
216	271928	8984290	4287	19800	3250	26217	Antes 2003	1
236	247036	8971817	4747	11700	9223	278	Después 2003	1
261	247538	8983255	4344	20700	3114	9065	Antes 2003	1
279	245525	8985550	4014	39600	2809	11176	Antes 2003	1
281	239316	8972956	4791	12600	5754	554	Antes 2003	1
285	241640	8974720	4213	16200	5488	995	Después 2003	1
312	231451	8975973	4842	27900	6467	270	Después 2003	1
331	216835	8991176	4859	11700	8979	940	Después 2003	1
332	217530	8992360	4699	29700	10338	129	Antes 2003	1
341	224001	8992069	4624	26100	9202	107	Antes 2003	1
345	224794	9000191	4032	20700	2043	4253	Antes 2003	1
346	211470	9000787	4617	24300	9801	1218	Antes 2003	1
347	215384	9002886	4719	15300	5397	464	Antes 2003	1
359	214208	9011153	4865	37800	8767	119	Después 2003	2
361	194157	9004741	3311	106200	349	6928	Antes 2003	1
363	193291	9002231	3179	21600	55	8049	Antes 2003	1
364	205265	9002244	4739	9900	7046	413	Antes 2003	1
365	203888	9005265	4899	36900	5242	0	Antes 2003	1
369	205164	9006162	4952	12600	4454	312	Antes 2003	1
373	205794	9009244	4810	4500	1849	581	Después 2003	1
374	212273	9010542	4756	75600	7656	122	Antes 2003	1
380	203492	8994334	3473	117000	193	4021	Antes 2003	1
399	210435	9018820	4761	7200	6958	432	Después 2003	1
429	200400	9013578	4839	18000	4928	398	Antes 2003	1
434	223046	9012310	3951	168300	85	2756	Antes 2003	1
436	215907	9028492	4221	9000	274	5827	Antes 2003	2

444	215982	9027214	4156	51300	646	4665	Antes 2003	1
450	195917	9018918	4351	23400	511	2325	Antes 2003	1
451	197585	9018967	4620	897282	111	988	Antes 2003	1
452	196496	9019240	4632	36000	11	1666	Antes 2003	1
456	198450	9024550	4513	17100	2129	399	Antes 2003	1
493	192742	9037532	4635	9900	6072	0	Antes 2003	1
524	196923	9087475	3992	431100	250	20417	Antes 2003	1
531	199714	9096464	4132	45000	394	29472	Antes 2003	1
533	191956	9094817	3977	1712242	500	24832	Antes 2003	1
535	198365	9098282	4030	43200	368	30430	Antes 2003	1
539	189320	9095545	3943	6851	325	24921	Antes 2003	1
540	190140	9095628	3960	29802	366	25163	Antes 2003	1
544	193425	9098140	4202	57600	543	28440	Antes 2003	1
559	196170	9088930	3869	378900	408	21194	Antes 2003	1
572	179565	9066595	4315	865800	3484	6323	Antes 2003	1
583	174104	9062298	4337	93600	5947	13269	Antes 2003	1
588	189214	9086302	3493	29413	912	15888	Antes 2003	1
589	198908	9105493	4124	10800	956	37228	Antes 2003	1
593	194655	9104635	4010	9000	623	35011	Antes 2003	1
594	195890	9104572	4003	234900	363	35319	Antes 2003	1
595	194954	9104742	4022	45000	356	35199	Antes 2003	1
598	187430	9097279	4301	18933	900	26374	Antes 2003	1
614	179010	9074170	4106	110700	104	6330	Antes 2003	1
615	179887	9074363	4126	271800	707	5726	Antes 2003	1
634	184497	9103168	4194	11716	2896	32134	Antes 2003	1
635	194210	9093789	4080	86400	240	24617	Antes 2003	1
636	193559	9094199	4035	115200	200	24759	Antes 2003	1
653	165827	9102320	3373	84610	1186	36544	Antes 2003	1
658	186136	9111248	4055	11724	3040	40234	Después 2003	1
661	176177	9104310	4158	18028	764	34363	Antes 2003	1
662	176139	9104522	4171	4557	850	34577	Antes 2003	1
664	172521	9107355	4415	13649	588	38325	Antes 2003	1
665	171683	9108597	3973	73675	217	39771	Antes 2003	1
666	172902	9109360	4283	62429	799	40116	Antes 2003	1
668	171033	9107667	4175	16744	883	39114	Antes 2003	1
674	162190	9128085	4015	7143	987	61345	Antes 2003	1
677	170211	9137109	3160	1306752	22	67656	Antes 2003	1
678	141866	9115732	4019	50445	227	61850	Antes 2003	1
680	142408	9116270	4066	258527	728	61874	Antes 2003	1
695	162814	9122466	3838	1419597	168	55908	Antes 2003	1
713	143270	9119707	3982	79267	2420	63884	Antes 2003	1
715	188991	9118624	4056	8941	1164	47772	Después 2003	1
718	187803	9117115	4124	7678	548	46177	Antes 2003	1
736	186930	9071365	4249	154800	547	1941	Antes 2003	1
737	187372	9072109	4234	122400	324	2774	Antes 2003	1
744	180025	9065325	4534	5400	5233	6908	Después 2003	1
758	183309	9068798	4399	12600	2051	2169	Antes 2003	1
771	181573	9070114	4308	143100	130	2860	Antes 2003	1
782	182333	9079032	4246	15300	285	8356	Antes 2003	1
783	182815	9079120	4215	5400	413	8314	Antes 2003	1
784	183350	9079281	4191	21600	808	8365	Antes 2003	1