



UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO

FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA AMBIENTAL

**Revisión Sistemática de Desglaciación, Extensión Superficial y
Formación de Lagos en la Cordillera de los Andes-Perú
Mediante Métodos de Teledetección, 2020**

TESIS PARA OBTENER EL TÍTULO PROFESIONAL DE:
INGENIERO AMBIENTAL

AUTORES:

Jiménez Tejeda, Larry Alexander (ORCID: 0000-0001-5498-025X)

Tecse López, Cesar Abelardo (ORCID: 0000-0001-9146-3032)

ASESORA:

Mg. Cabello Torres, Rita Jaqueline (ORCID: 0000-0002-9965-9678)

LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:

Calidad y Gestión de Recursos Naturales

LIMA – PERÚ

2021

DEDICATORIA

La presente tesis es el resultado del esfuerzo y la dedicación que hemos puesto de manifiesto durante estos meses; al cual, lo dedicamos a nuestras familias y a nosotros mismos. A nuestras familias por su apoyo incondicional que nos muestran cada día y durante todo este periodo de aprendizaje; y a nosotros mismos porque vencimos obstáculos, así como ser perseverantes en alcanzar nuestras metas, como es hoy culminar nuestra tesis.

AGRADECIMIENTO

Expresamos inmensamente nuestra gratitud a Dios, quien con su bendición llena siempre nuestras vidas de buena salud y nos protege del mal. Agradecer a nuestra familia por su apoyo constante demostrado durante nuestra etapa académica. También agradecer a la Mg. Cabello Torres Rita Jaqueline, quien nos ha guiado con su paciencia y su conocimiento durante el periodo de desarrollo de la tesis.

Índice de contenido

Caràtula.....	I
Dedicatoria	II
Agradecimiento	III
Índice de contenido	IV
Índice de tablas	V
Índice de graficos y figuras.....	VI
RESUMEN	VII
ABSTRACT	VIII
I. INTRODUCCIÓN.....	1
II. MARCO TEÓRICO.....	5
III. METODOLOGÍA.....	26
3.1 Tipo y diseño de investigación	26
3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística	26
3.3. Escenario de estudio.....	28
3.4. Participantes	28
3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos.....	28
3.6. Procedimientos	28
3.7. Rigor científico	29
3.8. Método de análisis de información.....	29
3.9. Aspectos éticos	29
IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	30
V. CONCLUSIONES.....	53
VI. RECOMENDACIONES	55
REFERENCIAS.....	56
ANEXO.....	69

Índice de tablas

Tabla 1	<i>Matriz de categorización apriorística</i>	27
Tabla 2	<i>Principales programas informáticos (software) para el inventario de glaciares.</i>	41
Tabla 3	<i>Características de resolución y bandas espectrales de las herramientas satelitales.</i>	42
Tabla 4	<i>Parámetros de adecuación y generación de información</i>	42
Tabla 5	<i>Estado de desglaciación según artículos de investigación revisados</i>	43
Tabla 6	<i>Número de glaciares y algunos glaciares cuantificadas por INAIGEM-ANA-MINAM (2018a)</i>	49
Tabla 7	<i>Perdida de áreas glaciares calculadas por entidades gubernamentales y reanalizadas con imágenes desde 1962 a 2016.</i>	50
Tabla 8	<i>Lagunas glaciares inventariadas por INAIGEM al 2018</i>	51

Índice de graficos y figuras

Figura 1	<i>Cuenca de las Cordilleras del Vilcanota-Urubamba-Vilcabamba (VUB). Investigación de DRENKHAN, et al (2018). Landsat 5 TM (1988, 1998, 2004 and 2010) y del Sentinel-2 MSI (2016) en la evaluación de glaciares y lagos del VUC</i>	6
Figura 2	<i>Elaboración propia</i>	7
Figura 3	<i>Elaboración propia</i>	8
Figura 4	<i>Elaboración propia</i>	9
Figura 5	<i>Mapa de Unidades de Cordilleras codificadas. Perú. Fuente: INAIGEM 2017.</i>	11
Figura 6	<i>Parámetros físico fundamentales de la Cordillera de los Andes. Fuente: Adaptado de INAIGEM (2017)</i>	12
Figura 7	<i>. Composición de sistemas aplicados en las investigaciones sobre el sistema glaciar de la Cordillera de los Andes en Perú de 2014-2020 en la investigación.</i>	30
Figura 8	<i>Distribución de investigaciones realizadas en la Cordillera Blanca usando el Satélite Landsat sobre Glaciares 2014-2020.</i>	31
Figura 9	<i>Estudios sobre glaciares en el Perú efectuado con el apoyo de distintos satélites 201-2017.</i>	32
Figura 10	<i>Ubicación del casquete glaciar de Quelccaya (a) Se representa la topografía de los Andes centrales en tono pardo y las ubicaciones de QIC (rojo), estación Ccatcca (azul). (b) Imagen LANDSAT 8 (bandas 4,3,2/RGB) de QIC (02/08/2017). Localización de AWS (rojo). Contornos verdes (5100 m), amarillo (5300 m) y rojo (5500 m) de elevación. Fuente: Estudio de Yarleque et al. (2018)</i>	47
Figura 11	<i>a). Capa de hielo perdida de Quelccaya derivada de una imagen Landsat TM de 1990 y una Imagen de 2009 TM. b) Imagen satelital de Quelccaya, c) Casquete glaciar del Nevado Coropuna entre 1955 (contorno negro) y 2003 (contorno amarillo; UTM zona 18 sur), d) Glaciar Japujapu y Glaciar Osjollo Anante (GJ-GOA) en 1985 (Amarillo), e) (GJ-GOA) en 1996 (violeta) y f) (GJ-GOA) en el 2006 (negro) (UTM, zona 18 sur) Landsat TM y ETM+ es imágenes multiespectrales ASTER. Fuente: Albert et al. (2014)</i>	48
Figura 12	<i>Reducción de superficie glaciar entre 1970 y 2007 en a) Nevado: Tales, Chuspi, Anchigrande, Huaytapallana y Cochas, b) Ticlla y Cullec, c) Vilcanota. Fuente: ANA, 2014.</i>	52

RESUMEN

Esta investigación ha tenido como objetivo determinar los Sistemas de Teledetección Espacial que se usa en la estimación de la desglaciación en la Cordillera de los Andes del Perú. La metodología comprendió una investigación de tipo cualitativa y de revisión bibliográfica de publicaciones científicas internacionales especializadas existentes en la base de datos Scopus, informes de entidades nacionales y visitas a las páginas web de agencias aeroespaciales como la NASA, ESA entre otros. Los resultados señalaron un notable uso de imágenes satelitales Landsat, Spot-ASTER-Sentinel. En el Perú la Autoridad Nacional del Agua (ANA) ha oficializado un protocolo para inventarios los glaciares y sus investigaciones relacionadas. En general investigaciones desde la década de los 60, de manera incipiente hasta la actualidad muestra importantes retrocesos, desde el 39% de pérdida de cobertura en la Cordillera Blanca que concentran la mayor superficie glaciar hasta un 99.4% de pérdidas en Chila y en consecuencia la formación de lagunas. Son los nevados con menor altitud los más afectados respecto a la elevación de su la línea de equilibrio ELA lo que indica una mayor fase de retroceso glaciar. Esta información provee futuras rutas de investigación con la intención de promover el desarrollo sostenible ante los efectos climáticos.

Palabras clave: sensores remotos, retroceso glaciar, Cordillera de los Andes, Landsat, Spot.

ABSTRACT

The objective of this research has been to determine the Space Remote Sensing Systems used in estimating deglaciation in the Andes mountain range of Peru. The methodology included in a qualitative research and bibliographic review of specialized international scientific publications existing in the Scopus database, reports from national entities and visits to the web pages of aerospace agencies such as NASA, ESA, among others. The results indicated a remarkable use of Landsat satellite imagery, Spot-ASTER-Sentinel. In Peru, the National Water Authority (ANA) has formalized a protocol for inventories of glaciers and their related investigations. In general, research from the 1960s, incipiently to the present, shows significant setbacks, from 39% loss of coverage in the Cordillera Blanca, which concentrates the largest glacial surface, to 99.4% losses in Chila and consequently formation of lagoons. The snow peaks with lower altitude are the most affected with respect to the elevation of the ELA balance line, which indicates a greater degree of glacial retreat. This information provides future research paths with the intention of promoting sustainable development in the face of climate effects.

Keywords: remote sensing, glacial retreat, Andes Mountains, Landsat, Spot.

I. INTRODUCCIÓN

La cordillera de los Andes representa el área glacial más importante de América del Sur ya que contiene fuentes de agua líquida para las comunidades más vulnerables y las ciudades. El cambio climático ha generado cambios en los sucesos estacionales con fuertes derretimientos, crecimiento en la extensión de cobertura sin hielo y formación de lagos, para ello se han aplicado modelamientos digitales o por teledetección, esta tecnología contempla el uso de imágenes satelitales de distintos satélites y software que permiten la discriminación y modelamiento de la pérdida de la cobertura glacial. Esta tecnología cambiada con método o herramientas satelitales y SIG permite evaluar las fluctuaciones de los glaciares en la Cordillera Blanca (Silverio y Jaquet, 2017), así como efectuar mapeos para demostrar distribuciones de cuerpos de agua y su relaciones con las poblaciones adyacentes en las zonas glaciares (Turpo, et al. 2019; Veettil, et al. 2016 a; Veettil, et al. 2018).

En el Perú se cuenta con la mayor extensión de nevados que cubre el 71% y cuenta con 18 cordilleras y con 3044 glaciares con una volumen estimado de cobertura glacial de $44338 \times 10^6 \text{ m}^3$ y una extensión de 1596 km^2 , la que destacan la cordillera Blanca, la de Vilcanota y la de Ampato los cuales cubren el 43%, 24% y 8% del total glacial existente a la fecha (MINAGRI, sf). Se han hecho algunos estudios, Albert et al. (2014) aplicaron la detección remota en datos de glaciares tropicales para evaluar la rápida disminución en el norte de los Andes, también Baraer, et al. 2014 estudiaron la contribución de aguas subterráneas hacia el fluido de las cuencas glaciares aun no calibradas de la Cordillera Blanca. Braun et al. (2019), evaluaron la elevación de los glaciares y sus cambios en los glaciares de Sudamérica. Drenkhan et al (2018). Evaluación actual y futura de glaciares y lagos en la cuenca desglaciante de Vilcanota-Urubamba, Andes peruanos. Durán-Alarcón, et al. (2015), analizaron las tendencias recientes del retroceso glacial en glaciares de Caullaraju-Pastoruri empleando imágenes Landsat. Hanshaw y Bookhagen, (2014), estudiaron áreas glaciares, de lagos y líneas de nieve (1975-2012) en la Cordillera Vilcanota, y el glaciar Quelccaya, mientras que López-Moreno, et al. (2017), evaluaron los procesos hidrológicos y sedimentación asociados a la recesión de glaciares de la cuenca de Yanamarey en la Cordillera Blanca.

Schauwecker, et al. (2014) analizaron las tendencias climáticas asociadas al retroceso en glaciares de la Cordillera Blanca.

En el Perú se han aplicado distintos modelos para la predicción de los impactos y algunas instituciones de investigación como universidades destacando el uso del Landsat, el SAT entre otros, lo más importante es que las investigaciones locales e internacionales puedan ser comparativos o estandarizados, sin embargo a pesar de que se cuenta recientemente con un manual para estudios de glaciares (INAIGEM, 2017) pueden ofrecer nuevas combinaciones de herramientas satelitales o metodología que permita optimizar tiempo de procesamiento y costos de la investigación, ya que en la actualidad la información de los últimos 10 años es muy dispersa pese a que se cuentan con algunas revisiones sistemáticas desactualizadas, existiendo la necesidad de actualizar para promover futuros modelos de predicción a largo plazo y mediano plazo.

En este contexto, se ha efectuado una revisión sistemática de toda la información científica relacionada con modelamientos de predicción de la pérdida de la cobertura glacial, y la formación de lagos desde el 2010 con especial énfasis desde el 2014 al 2020 para analizar la composición metodológica de los estudios y ofrecer las nuevas tendencias en las aplicaciones del Landsat y otras combinaciones posibles que permiten acortar el periodo de procesamiento de la información y los costos de la investigación, para conocer el estado de los glaciares y de la formación de nuevos cursos de agua.

La falta de información actualizada representa una limitación a las nuevas oportunidades de investigación sobre las relaciones meteorológicas con la desglaciación, de la evolución del retroceso glaciar en sí y sobre todo que provea elementos validados para que los actores que toman decisiones en la gestión de los recursos hídricos de gestión el desarrollo de la biodiversidad propia de las cordilleras de andes y el recurso hídrico que sustenta a las poblaciones adyacentes a esta región.

Esta investigación se justifica socialmente porque el conocimiento del estado de desglaciación y la presencia de cuerpos de agua significa una oportunidad socio-económica, los rápidos cambios en este entorno de alta montaña podrían generar nuevas rutas turísticas. De otro lado se justifica teóricamente debido a que se genera un nuevo conocimiento en el manejo de tecnologías de teledetección y de otras tecnologías de transformación ambiental y de nuevos servicios eco-sistémicos, la formación de nuevos lagos marca la necesidad de establecer planteamientos tecnológicos para su aprovechamiento y adaptación a la alta montaña en zonas recientemente desglaciadas (Vuille et al., 2017). La justificación metodológica radica en el procedimiento aplicado en la investigación, ya que se ha hecho un filtro de la información relacionada con la aplicación de imágenes Landsat y su combinación con otras herramientas para resolver problemas de incertidumbre ante imágenes no claras.

Los datos sobre la contracción actual de los glaciares y los procesos relacionados y los riesgos son escasos en la región. Solo unos pocos estudios han cuantificado Contracción de glaciares multitemporales para (partes) de la Cordillera Vilcanota (Hanshaw y Bookhagen, 2014; Salzmann et al., 2013; Veettil et al., 2017; Veettil y de Souza, 2017) y Vilcabamba (Guardamino y Drenkhan, 2016), algunos de ellos incluyen evaluaciones de lagos. La Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH) de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) en Perú ha compilado inventarios integrales de extensiones de glaciares y lagos para las Cordilleras Vilcanota, Urubamba y Vilcabamba hasta 2009 (ANA, 2014b; 2014a) que se encuentran actualizadas. El inventario reciente de lagos futuros bajo el escenario de desaparición de los glaciares peruanos por Colonia et al. (2017) es particularmente importante para las evaluaciones futuras de gestión de riesgos y del agua.

A partir del contexto se planteó el siguiente problema general: ¿Qué Sistemas De Teledetección Espacial se usan para estimar la desglaciación en la cordillera de los andes?

Y como problemas específicos los siguientes: PE1: ¿Que métodos de procesamiento de imágenes satelitales se han usado para estudiar la desglaciación en la Cordillera de los Andes de Perú? PE2: ¿Cuál es el estado

de desglaciación de los andes peruanos? PE3: ¿Qué inventarios nacionales de glaciares y lagos formados en los andes del Perú?

Como objetivo general: Determinar los Sistemas De Teledetección Espacial usados para estimar la desglaciación en la cordillera de los Andes del Perú,

Como objetivos específicos los siguientes: OE1: Analizar que métodos de procesamiento de imágenes satelitales usado para la desglaciación en la Cordillera de los Andes de Perú. OE2: Analizar el estado de desglaciación de los andes peruanos. OE3: Identificar inventarios nacionales de glaciares y lagos formados en los andes del Perú.

II. MARCO TEÓRICO

El cambio climático viene afectando los glaciares de la Cordillera Blanca en el Perú, se han realizado investigaciones sobre el deshielo de estos glaciares. Aguilar-Lome et al 2019, informaron sus resultados de modelación de una serie de tiempo LST (2000-2017) en los andes comprendido en la sierra centro y sur de Perú basado en la temperatura de la superficie terrestre (LST) bajo diferentes coberturas, esta investigación demostró una gradiente diurna en invierno de calentamiento de $1.0^{\circ}\text{C/década}$ cuya gradiente aumenta a alcanza valores máximos de $1,7^{\circ}\text{C/década}$ por encima de 5000 msnm. La dependencia de las tendencias de aumento de la temperatura de la elevación podría tener graves implicaciones para los recursos hídricos y los ecosistemas altoandinos. Sin embargo, Drenkhan et al. (2018) no solo evaluaron la tasa de pérdida de cobertura glacial, además evaluaron la extensión futura y la formación de lagos o lagunas en la cuenca del Vilcanota-Urubamba, entre 1988 y 2016 y la predicción para 2050 a 2100. Con este fin usaron datos de Landsat 5 TM (1988, 1998, 2004 y 2010) y Sentinel-2 MSI (2016) y 2016 descargaron USGS Earth Explorer y ESA Copernicus Open Access Hub, para el procesamiento correspondiente que generaron productos L1T y L1C corregidos por radiometría y geometría para estaciones de invierno austral, perdiéndose desde 1988 al 2016 un 37.3% de área glacial y con un incremento de las áreas de lagos del 15% (544 lagos) su producción señala una pérdida máxima del 44.9% al 2060 y un mínimo del 41.4% en este siglo. De esta manera se tendrían áreas sin cubierta solo extendida por encima de los 6000 msnm con un incremento de lagos de hasta 5.9%, lo cual debe ser considerado en los planes de gestión de recurso hídrico y de riesgos ante los cambios climáticos y los socio-ambientales.

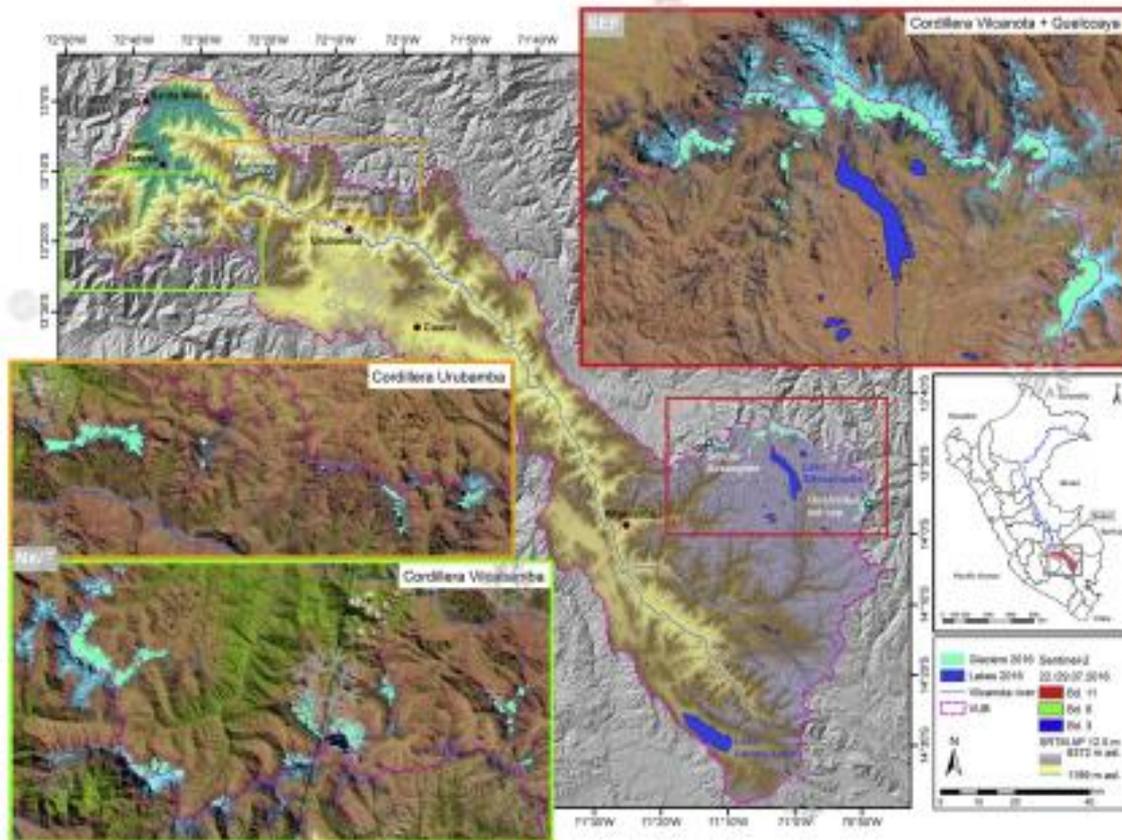


Figura 1. Cuenca de las Cordilleras del Vilcanota-Urubamba-Vilcabamba (VUB). Investigación de DRENKHAN, et al (2018). Landsat 5 TM (1988, 1998, 2004 and 2010) y del Sentinel-2 MSI (2016) en la evaluación de glaciares y lagos del VUC.

Como se sabe hay escasos estudios relacionados con la cordillera de los andes tropicales y de manera muy particular usando el enfoque de la teledetección, gran parte de los estudios en los que se ha usado la teledetección óptica ha sido para la imágenes Landsat y Radiómetro de reflexión y emisión térmica espacial avanzado (ASTER), pero las sombras que se producen en terrenos escarpados y la presencia de nubosidad muy densas en una Zona de Convergencia Intertropical (ITCZ) de los trópicos interiores, representa un gran desafío para seleccionar la metodología y realizar el análisis de datos. Existe información sobre el monitoreo de glaciares tropicales desde los años 50, pero en la actualidad este enfoque se desarrolla y se publica de manera muy dispersa y no siempre se encuentra al acceso del público, es importante conocer las nuevas tendencias, nuevas tecnologías ya

que son prometedoras y conducen a abrir nuevos enfoques para aplicar la teledetección en estudios sobre la evolución de los glaciares que sustentan la vida de montaña tropical en América del Sur.

La teledetección representa una tecnología evolutiva basada en sensores remotos, esto implica generar imágenes de la superficie terrestre a distancia sin requerir un muestreo de campo in situ para levantar muestras y proceder al análisis de laboratorio, sin embargo, requiere de un procesamiento posterior y de su interpretación (Labrador et al. 2012).

Esta tecnología requiere de una fuente de energía que brinde energía (I) que atraviesa la atmósfera (II) e interacciona con la superficie terrestre que podría estar cubierta por un cultivo, foresta, agua, animales, etc.; sin embargo, la radiación es reflejada por los cuerpos sobre el suelo (III). De otro lado, un sensor insertado en un satélite que capta y graba la energía reflejada entre superficie terrestre y la atmósfera (IV). Esta energía se recibe en una estación que procesa cada dato en forma de imagen digital (V) interpretando de manera visual y digital la información (VI). Este proceso permite conocer la situación de la área terrestre o acuática estudiada en forma de imagen lo más precisa a la realidad para resolver alguna necesidad (VII). De esta forma sensores remotos detectan la energía que sale desde un cuerpo y almacenan datos, propiedades, intensidad, así como aspectos caracterizados de la señal en distintas bandas de espectros de energía. La evaluación de estas características radiométricas y del espectro, se logra identificar propiedades físico-químicas de un cuerpo (Mertikas et al., 2021).

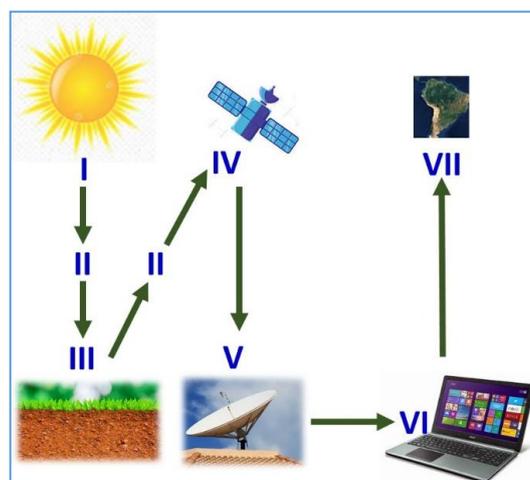


Figura 2. Elaboración propia.

El espectro electromagnético es un componente fundamental, en este sentido la luz visible, ondas de radio y calor, así como rayos ultravioletas, “X” corresponden a este amplio espectro, que son detectados y grabados por los sensores empotrados en los satélites orbitales como dispositivos de teledetección, entre la luz ultravioleta y las microondas (Labrador et al. 2012).

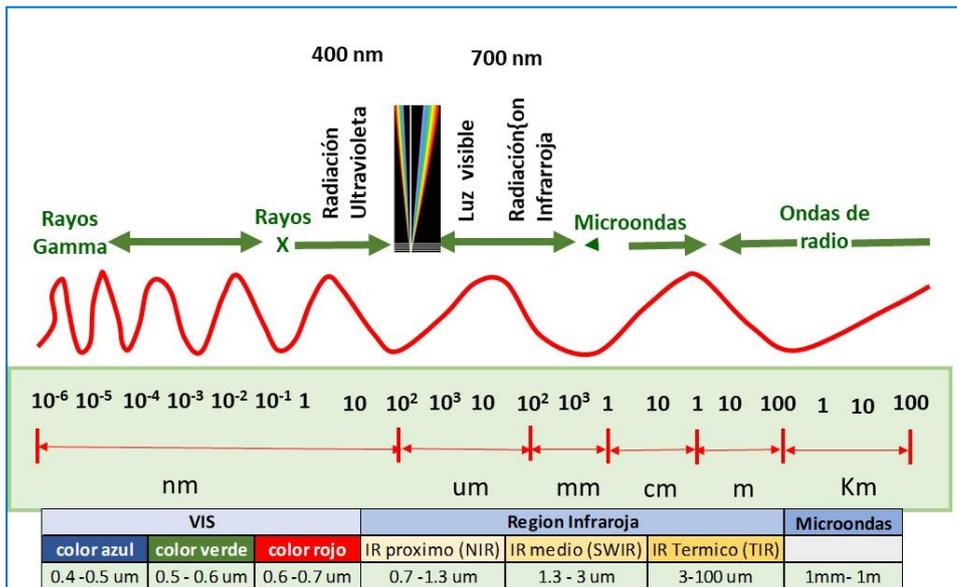


Figura 3 Elaboración propia

La reflectancia espectral de las superficies terrestre es una medida no dimensional ya que representa una proporción de haz que incide sobre la superficie y se expresa en términos de porcentaje, su grafico frente a la longitud de onda es considerado como la “firma espectral” (Évora Brondo y Arbelo Pérez 2012).

De otro lado, los satélites generan orbitas alrededor de la tierra, son geoestacionarias situados a elevadas altitudes y mantiene la misma proporción de la superficie de la tierra a 36.000 km manteniendo una posición permanente relativa sobre la superficie de la tierra. Cuando un satélite de teledetección orbita de norte a sur, la cual, se armoniza con el giro de la Tierra en sentido oeste hacia el este, de manera periódica de tal forma que este proceso le permite al sensor registrar datos un sector de la superficie terrestre mediante un ancho de barrido. En la actualidad esto ha sido superado por satélites que pueden girar en distintos sentidos (off-nadir) registrando franjas adjuntas en un solo giro. Además, existen satélites de órbita cuasi polar con mayor capacidad

de recojo de imágenes de altas latitudes a diferencia de las zonas ecuatoriales (Labrador et al. 2012).

Resolución Espacial, es aquella relacionada con las dimensiones del pixel cuya unidad mínima de una imagen denominada tessela donde se guarda los datos de tal forma que a mayor resolución menor tamaño de píxel de la imagen con lo que los cuerpos más pequeños serán más fácilmente identificados (Soria y Matar de Saquis, 2016).

Otros componente son la resolución espectral; basada en la espectroscopía para seleccionar el ancho y ubicación óptima de cada banda destinada a diferenciar y caracterizar la cubierta terrestre (Martínez-Barbáchano y Solís-Miranda, 2018).

Resolución radiométrica, es la mínima cantidad de energía que se necesita para elevar el valor de un píxel cierto nivel digital (ND) en un sensor, generalmente van de 0 a 2047 equivalente a 11 bits de resolución radiométrica, y en medio de una dispersión y absorción de la radiación en medio atmosférico y para longitudes cortas, se reduce el ND en las imágenes, (Labrador et al. 2012).

La Resolución Temporal, implica el ciclo de repetición de dos colectas de imágenes consecutivas de un mismo tamaño superficial dependiente del giro satelital, por eso se diferencia los satélites meteorológicos de frecuencia diaria (NOAA) frente a los satélites de recursos naturales LANDSAT de orbita entre 16 y 18 días, aunque hoy existen una variedad de satélites que redirigen su sensor, lo que genera la captura de más imágenes en un área superficial en distintos periodos del año (Soria y Matar de Saquis, 2016).

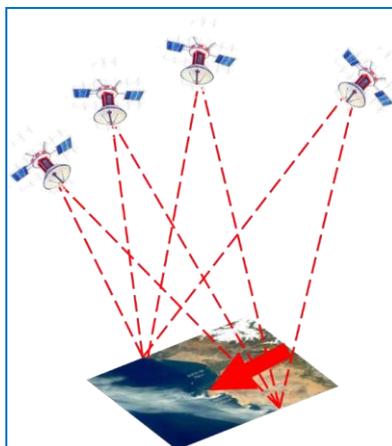


Figura 4 Elaboración propia.

En general los satélites de teledetección proveen una imagen digital tipo raster, conformado por Niveles Digitales de cada píxel que corresponden a la energía captada por una banda espectral, mientras que la imagen multispectral (MS) está asignada a distintos valores de cada píxel, en función de las bandas espectrales que el sensor puede captar. En cambio, una imagen pancromática (PAN) corresponde a una banda espectral del campo visible con principios del infrarrojo, generando imágenes en escala gris (blanco y negro) Imagen fusionada de pan-sharpened (PS) asigna valores algorítmicos que combinan la imagen pancromática con la multispectral aunque podría modificar los valores originales (Pedro Muñoz Aguayo. 2013)

Existen una variedad de satélites de detección tales como DMC, Earth Observing-1 (Eo-1), Eros-A/Eros-B, Formosat-2, Geosy-1, Ikonos, Kompsat-2, Landsat-7, Quickbird, Rapideye, Resourcesat-2, Spot-5, Terra (Eos-Am 1), Theos, Worldview-2. Entre estos destacan LANDSAT-7, el cual orbita a 705000 m de altitud y su órbita demora 16 días en escanear la cobertura superficial de la tierra haciendo un total de 232 órbitas alrededor del planeta, sus imágenes permiten un primer nivel de imagen original LOR, que permite hacer correcciones de geometría y radiométrica, seguido de otros niveles, su comercialización es gratuita mediante enlaces <http://glovis.usgs.gov>, <http://earthexplorer.usgs.gov>, con previo registro de usuario del USGS (Labrador et al 2012)

Esta herramienta es ampliamente usada en el modelamiento de la cobertura de la superficie terrestres y del agua para identificar las características de las áreas y unido a los algoritmos es capaz de predecir situaciones naturales que pueden tener impactos ambientales, económicos para un país. Una de las rutas aplicadas ha sido la identificación y medición de áreas glaciares.

Cordillera de los andes peruanos. Los Andes peruanos cuentan con dieciocho cordilleras con cobertura glaciaria; distribuidas en el Perú de norte cubriendo una amplia franja a lo largo del territorio, una forma de saber cómo se desarrolla su evolución espacial y temporal es estudiando su estructura geológica y como se modifica en el tiempo, además de comprender la dinámica de los procesos que la gobiernan y los factores internos y externos involucrados, su relación con el ciclo hidrológico y sus cambios impulsados por

el clima sobre sus superficies glaciares, resulta crucial para comprender su evolución futura como sistemas glaciares que determinan los servicios ambientales aprovechados por el país que los alberga.

Las cordilleras glaciares del Perú (Mapa N° 1), se ubican en los Andes Tropicales, entre los paralelos 7°32'1"-16°48'52" latitud Sur y 68°56'54"-80°27'25" longitud Oeste. Las cordilleras se dividen en los Andes del Norte, Centro y Sur, que se ubican en 12 departamentos del país; hidrológicamente localizados en las vertientes del Pacífico, Atlántico y Titicaca.

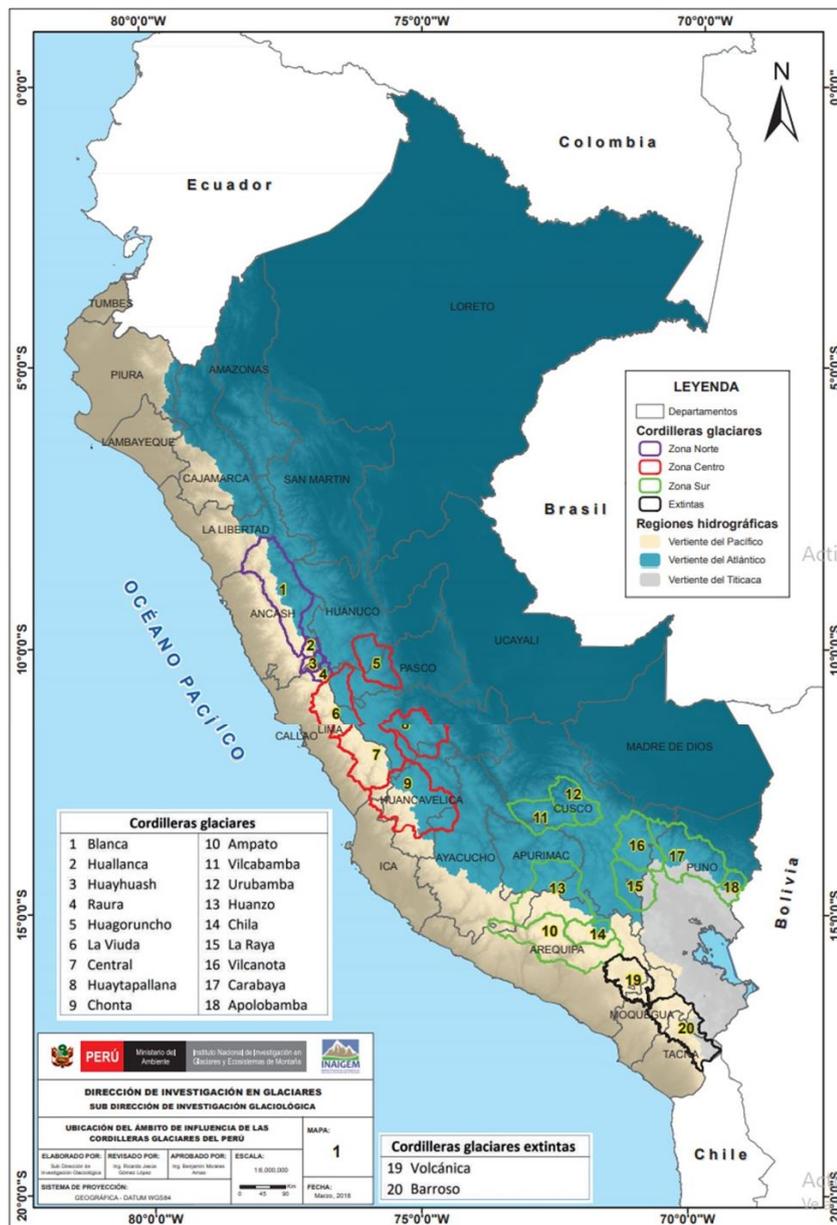


Figura 5 Mapa de Unidades de Cordilleras codificadas. Perú. Fuente: INAIGEM 2017.

Partes de un glaciar. Zona de acumulación: Es una zona que comprende todo el hielo, así como la nieve que se acumuló en el lapso de 01 año hidrológico, el mecanismo comprende todas aquellas precipitaciones solidas que caen sobre la superficie del glaciar en dicho periodo de tiempo y se mide en términos de cantidades (INAIGEM, 2017). **Zona de ablación:** Esta es una zona de hielo donde se desarrollan procesos de fusión es decir se produce un derretimiento del hielo que cambia al estado líquido, también se producen otros estados debido al ciclo del agua, vaporización, la sublimación, así como separaciones de masas de hielo. **Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA):** es la línea teórica que separa la zona de acumulación y la zona de ablación. En la primera zona predominan los procesos de ganancia, que propician la conservación de la nieve y su transformación en hielo; en la segunda zona, prevalecen la fusión y la sublimación que favorecen la pérdida de masa glaciar (INAIGEM, 2017)

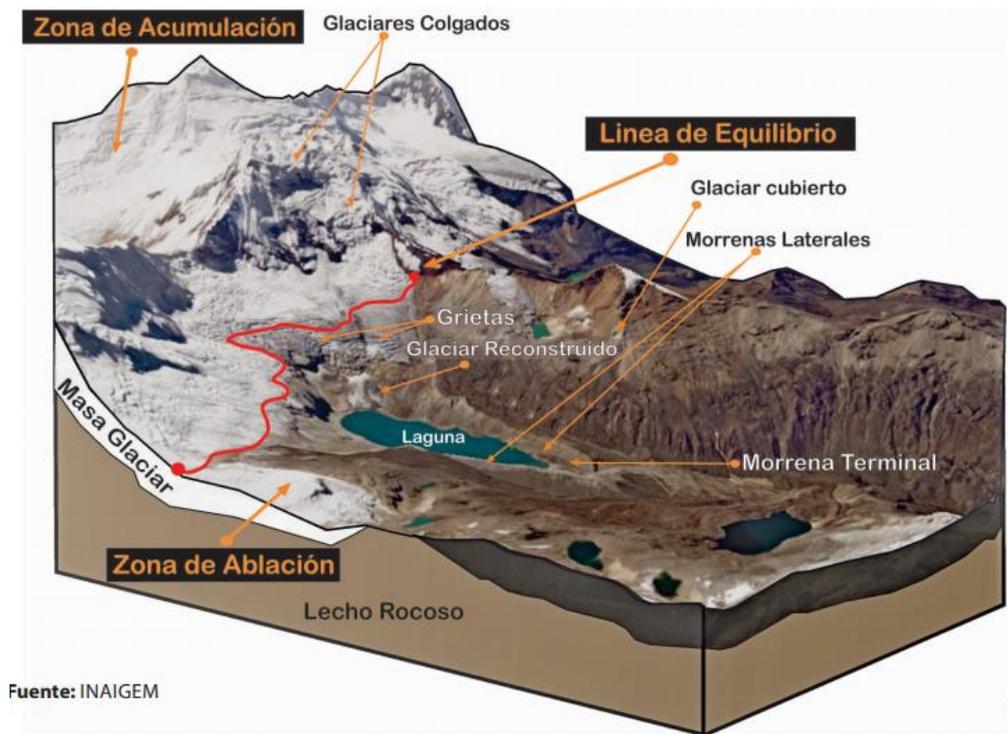


Figura 6. Parámetros físico fundamentales de la Cordillera de los Andes.

Fuente: Adaptado de INAIGEM (2017)

Sistemas De Teledetección Espacial-Sensores. Sistema De Satélites

Landsat. De acuerdo a la información difundida por la NASA (sf), El primer proyecto de envergadura dirigido al análisis de los recursos terrestres se denominó ERTS (Earth Resources Technology Satellite) que colocó en órbita el primer satélite ERTS 1 el 23 de julio de 1972. La decisión de poner en órbita este satélite dirigido al estudio de los recursos fueron las fotografías tomadas por los astronautas que anteriormente habían orbitado la Tierra en los proyectos Géminis y Apolo. Luego se buscó un sistema que permitiera la recolección de datos y su transmisión sin que la plataforma tuviera que volver al planeta. En 1976 se lanza el segundo satélite denominado LANDSAT, y a partir de allí a este proyecto se lo comenzó a llamar con este nombre con el que continúa hasta hoy en día. Los satélites 1, 2 y 3 conforman la primera generación Landsat, y el 4 y el 5, la segunda. Los tres primeros contaban con los siguientes sensores:

MSS (Multispectral Scanner= Barredor Multiespectral)

RBV (Return Beam Vidicom= Sistema Vidicon) poseen morfologías de mariposa debido al acomodamiento de los paneles solares con tamaños de hasta 3 metros de altitud, 1.5 metros de diámetro que se extendían hasta 4 metros una vez armados los paneles. Estos materiales se encontraban a 917 km de altitud y rodeaban el planeta tierra en un lapso de 103 min realizando en totalidad 14 órbitas por día cada vez que llegaba al mismo punto de partida de la superficie de la tierra a los 18 días. Los de la segunda generación tenían como sensores:

MSS (Multispectral Scanner)

TM (Thematic Mapper= Mapeador Temático) que reemplazó el RBV.

Por tanto cambia su morfología como sus características de órbita y la altitud de vuelo es reducido a unos 705 km mejora el ciclo de recubrimiento, realizándose cada 16 días al tardar 98 minutos cada órbita. Además, reciben el apoyo de una serie de satélites de comunicación denominado TDRSS (Trake and Data Relay Satellite System), que automáticamente envían información a la Tierra, con lo cual las imágenes llegan en tiempos reales. Esto es importante porque de esta manera no se colocan grabadoras de datos dentro de los satélites, aligerando su peso y prolongándose la vida de los mismos. Las resoluciones espaciales y de banda espectral de cada sensor como Thematic

Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper (ETM +) y Operational Land Imager (OLI) dentro el satélite Landsat 5, 7 y 8 son excelentes para monitorear variaciones originadas por factores naturales o tal vez causadas por el hombre sobre la superficie terrestre (Sivanpillai, 2017).

Tanto el MSS como el TM son barredores multiespectrales que están formados por un solo espejo movable, el cual fluctúa de manera perpendicular con dirección de la trayectoria, permitiéndoles buscar un espacio territorial en ambas zonas trazadas del satélite. La irradiación recibida por este instrumento óptico, se desplaza hacia una matriz de células fotosensibles, que la amplifica y convierte en señales eléctricas. Luego, ésta es transformada a un valor digital, que se puede almacenar en el satélite o ser transmitido a la red de antenas que lo reciben. Estos satélites se encuentran permanentemente tomando imágenes de la superficie terrestre. Nuestro país está cubierto por 12 órbitas, entre la 239 y 250 (NASA, sf).

MSS (Multispectral Scanner). Es un barredor multiespectral óptico electrónico que posee un ángulo de visión de 11° aproximadamente, el cual posibilita la exploración de un espacio de terrestre de 185 km, seccionados a ambos extremos de la perpendicular a la línea trazada. A medida que efectúa el barrido, simultáneamente toma imágenes en cuatro bandas del espectro. Los datos recolectados son grabados en cintas magnéticas y recibidas en las estaciones terrenas. Cuenta con una resolución de espacio igual a 79 metros y un espectro de 4 bandas (02 bandas en el espectro visible y dos franjas en el espectro del infrarrojo). Sin embargo, son las bandas N° 4 y N° 5 ambas visibles las mejores en la teledetección de formas antropogénicas, en este campo destacan zonas de urbe, rutas de comunicación, pero también se puede obtener datos de calidad acuática. En cambio, longitudes de onda infrarroja con valores de 6 a 7 generalmente se usan para obtener datos relacionados con valores de parámetros de la actividad vital de plantas, con una sensibilidad a la humedad.

RBV (Return Beam Vidicom). Este sistema vidicón actuaba como un instrumento auxiliar del sensor MSS al mejorar la calidad visual de la imagen. Constaba de dos cámaras pancromáticas de alta resolución, ya que lo que se pretendía era mejorar la resolución espacial. Cubría la misma porción que el

MSS, aunque solo cubre una resolución de 40 m. a pesar de ello no se usó más en misiones orbitales de la 2da generación Landsat (NASA, sf).

(Thematic Mapper). Es un barredor multiespectral con mejores características que el MSS, que le permiten tener una resolución espacial de 30 m y una espectral de 7 bandas. Explora una franja del terreno de 185 km. La matriz de células fotosensibles es mayor que la del MSS, el ángulo de visión se reduce, todo esto hace que tenga una buena resolución espectral y espacial, acompañada de una resolución radiométrica importante. Esa resolución de 30 m hace que el sensor TM sea apto para elaborar cartografía temática, este diseño TM buscó resolver las limitaciones observadas en las imágenes MSS, este sensor permite detectar turbideces y contaminantes en el agua, contenidos de humedad en los vegetales y en el suelo, focos de calor y la exploración minera, sin embargo su costo económico algo elevado limita una mayor aplicación o aprovechamiento de la herramienta, así también el volumen de la información que genera con cierto grado de complejidad para su manejo es clave ante la escases de herramientas informáticas (NASA, sf).

Imágenes satelitales Landsat. Las imágenes se pueden adquirir en función de los paths y los rows. La órbita del satélite se denomina path, la cual no es paralela a los meridianos, sino que está levemente inclinada. Y los rows son líneas imaginarias con la misma disposición que los paralelos, que cortan a los paths. Estos elementos conforman un reticulado de 233 paths y 248 rows que cubren la totalidad de la Tierra. Hay que destacar que la intersección de un path con un row da como resultado el centro de una imagen satelital. Conociendo estos datos se puede adquirir la imagen de un lugar determinado. En principio a las imágenes provenientes de los satélites Landsat no se las puede analizar estereoscópicamente porque al tener imágenes de diferentes bandas correspondientes a una misma escena, se van a observar los mismos elementos y deformaciones. Se puede llegar a ver estereoscópicamente, utilizando imágenes de órbitas adyacentes. Estas tienen una separación máxima a la altura del ecuador, donde las imágenes tienen una superposición lateral mínima y en los polos las órbitas tienen una separación mínima, con lo que la superposición de imágenes es máxima. En la parte inferior de una imagen aparecen las letras T correspondiente a las TM, y la M perteneciente a

las MSS, el número de bandas y los colores que utilizan para formar el falso color compuesto.

Estas imágenes en falso color compuesto se obtienen mediante la composición de las bandas 4, 5 y 7, que por medio de filtros se les asignan colores: azul para la 4, verde para la 5 y rojo para la 7. De esta forma la vegetación sana aparece de color rojo, el agua clara de color verde-azulado, el agua con sedimentos, de color celeste, las áreas urbanas de color celeste-azulado y el suelo desnudo, azul, aunque a veces es complicado cuando hay interferencias en una zona producido por las nubes, hielo etc. (Sivanpillai, 2017).

Sistema De Satélites Spot. .El Spot (Systeme Probatoire d'Observation de la Terre= Sistema de Observación de la Tierra) (CNES. Sf.) orbita a 800 km de altura y en líneas generales se dice que es francés pero algunas partes fueron construidas por la Comunidad Económica Europea. La primera versión de satélite Spot fue lanzada en el año 1986 y el segundo estuvo dispuesto en órbita en los comienzos de la década de los 90. El sensor que lleva el satélite Spot se denomina HRV (Haute Resolution Visible= Alta Resolución Visible), que no es un barredor multiespectral sino un sensor por empuje. En este equipo se elimina el espejo oscilante y el panel de células fotosensibles es el que capta directamente la energía que proviene de la superficie terrestre. Al no tener un sistema barredor, le asegura una vida útil más larga y menor cantidad de errores al no sufrir desgastes las piezas que lo componen. Esta herramienta tecnológica logra aumentar la resolución del espacio relacionado a los barredores convencionales. La transmisión de datos es distinta a la de los Landsat ya que no está permanentemente tomando imágenes, sino que las capta por encargo.

HRV (Haute Resolution Visible). Este sensor puede captar imágenes en modo pancromático y multibanda (verde, rojo e infrarrojo cercano) con una resolución espacial de 10 y 20 m, respectivamente. Este no puede trabajar en más de tres bandas porque al tener 10 o 20 m de resolución recibe mucha información y a veces no la puede elaborar.

Imágenes satelitales Spot. Las imágenes son rectangulares con forma de paralelogramo debido al movimiento de la tierra. Si se llega a obtener una imagen Spot que no tenga esa forma, la misma corresponde a una ventana de la imagen original. El área que abarca una imagen Spot es de 60 x 60 km ya

sea en 10 o 20 m de resolución de espacio terrestre y debido a la resolución éstas son apropiadas para el análisis urbano. Los satélites Spot también tienen paths y rows pero varían con los de las Landsat. En éstas los paths se indican con la letra K y los rows con la J y el centro de la imagen no coincide con el cruce de estos elementos sino que está desplazado. La ventaja que tienen estas imágenes es que se las puede analizar estereoscópicamente de manera más eficaz que las Landsat, ya que se pueden obtener imágenes de una misma zona captadas desde dos puntos de vista distintos. Esto se debe a que el satélite cuenta con miras móviles que le permiten captar no sólo la escena que está exactamente debajo de él sino que puede obtener imágenes de sectores laterales a su órbita. Estas áreas se reducen en el ecuador porque las órbitas tienden a separarse, y aumentan hacia latitudes altas porque las órbitas tienden a juntarse. De esta manera, a la altura del ecuador el satélite puede registrar una misma escena desde ocho órbitas distintas mientras que hacia los polos, puede registrar una misma zona desde once órbitas diferentes (CNES. Sf.).

Sistema ERS (European Remote Sensing). Este proyecto desarrollado por la Agencia Espacial Europea (ESA) puso en órbita el satélite ERS-1 en 1991, con los siguientes sensores: 4 AMI (Instrumento Activo de Microondas): compuesto por el SAR (Radar de Apertura Sintética) y el WNS (Escaterómetro). Este último obtiene imágenes combinadas con el SAR de la velocidad del viento que recae en el suelo superficial, con una resolución espacial de 45 m. Operan en la banda C. (Escaterómetro que es un aparato que mide intensidades de viento) 4 RA (Radar Altimeter= Altimetro de Radar): detecta diferencias de altura y trabaja en el rango de la banda Ku. Bandas del radar La imagen que brinda el ERS-1 tiene un ancho de 100 km y está separada a 250 km de la órbita del satélite (path) y un largo de 200 a 300 km, distancia que puede ser seleccionada desde la Tierra. Este producto está dirigido a estudios oceanográficos (altura de oleaje, dirección y velocidad del viento, bancos de hielo, recursos pesqueros), aunque también puede ser de gran utilidad para el seguimiento de áreas continentales con frecuente cobertura nubosa. El satélite ERS-2 fue lanzado en abril de 1995 y cuenta con dos nuevos sensores: 4 ATSR (Along Track Scanning Radiometer= Radiómetro de Barrido en el sentido

de la Órbita): permite determinar temperaturas superficiales, sobre todo en el océano y es de gran utilidad para estudiar la vegetación. 4 GOME (Global Ozone Monitoring Experiment= Experimento de Vigilancia Global del Ozono): trabaja en las bandas ultravioleta, visible e infrarrojo, que incluyen las tres bandas normales de absorción del ozono (ESA, sf).

Estos dos satélites trabajan de manera conjunta, recorriendo la misma órbita, pero separados en el espacio, de tal manera, que pasarán sobre un mismo lugar con diferencia de un día. La operación conjunta de los ERS-1 y 2 permite realizar importantes aplicaciones en diversos temas, como: planificación de rutas de navegación, operaciones en ambientes poblados de hielos flotantes, inundaciones fluviales, erupciones volcánicas, derrames de petróleo en el mar.

Imágenes de radar. La imagen o radar grama posee los colores blanco y el negro o en su defecto un único color dispuesto en distintos tonos porque el radar opera sobre una sola banda del espectro. Pero hay que destacar que se han realizado varios ensayos con éxito para combinar una imagen radar con la MSS, por lo tanto se enriquece la información temática y la resolución espacial de la segunda. También es posible combinar imágenes de radar de un mismo sitio tomadas en diferente fecha, asignándole a cada imagen un color diferente, luego se las superponen y se obtiene una imagen coloreada de radar. Estas combinaciones son productos especiales y se realizan con un fin determinado. Otra característica de este tipo de imágenes es el spekle definido como el salpicado o punteado de colores grises, negros y blancos producidos por una interferencia en la recepción de datos por parte de la antena del radar. Si este efecto es muy acusado puede llegar a interferir seriamente en la interpretación de una imagen. Sin embargo, hay que considerar que esta interferencia puede ser eliminada a través de filtros digitales. Un hecho que afecta en mínimo grado al radar, son las condiciones climáticas porque en general, este sensor puede traspasar coberturas nubosas, dependiendo también de la longitud de onda que se utilice, ya que cuanto más larga sea ésta, mayor penetración tendrá, pudiéndose llegar a atravesar cobertura vegetal y algunos centímetros de la superficie del suelo. La elección de la longitud de onda para trabajar depende del estudio que se quiere realizar, por ejemplo, los geólogos por el suelo utilizan la banda L y los biólogos por el follaje, las bandas X y K. Otra particularidad de la imagen radar es el fenómeno denominado reflector de

esquina que se produce cuando la energía proveniente del sensor rebota en el suelo y en otra superficie perpendicular al anterior, lo que origina que el haz de energía vuelva a la antena del radar con más intensidad, dando tonos claros en la imagen. Es común observar que un cuerpo de agua aparezca de color negro con un borde blanco, producto de esta situación (ESA, sf).

La carta de imagen satelital. Es un documento cartográfico obtenido a partir de imágenes satelitales. Esta no reemplaza a la carta topográfica tradicional, sino que es un complemento de la misma. Para su obtención se realizan varios procesos, siendo importantes los de:

- Corrección radiométrica: permite resaltar los detalles mediante el empleo de filtros para su mejor visualización.
- Corrección geométrica: permite relacionar la imagen con el terreno, a través de un sistema de proyección. Se podría decir que se superponen la carta topográfica con la imagen. Por lo tanto, es posible medir distancias y calcular perímetros y/o superficies. Para su mejor interpretación, estas cartas poseen pequeños recuadros de áreas representativas, con su correspondiente descripción. También contiene una cuadrícula que materializa gráficamente el sistema de coordenadas, así como la toponimia e información marginal. Las imágenes de satélite y las mediciones de campo, como el radar de penetración terrestre (GPR), se utilizan comúnmente para estimar variables glaciológicas como el área y la longitud del glaciar, ELA, la línea de nieve y los gradientes del balance de masa (INAIGEM, 2017).

Teledetección óptica. Los satélites de a bordo de sensores remotos ópticos proporcionan la herramienta de monitoreo de glaciares multitemporal más utilizada. Las plataformas de resolución media, como la serie Landsat o ASTER (El Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica Avanzada del Espacio), pueden ser preferidas cuando se necesita un monitoreo continuo o cuando se produce una ablación durante todo el año, como en los trópicos interiores. Baraer, et al. (2014) en su estudio de contribución del agua subterránea al flujo de salida de cuencas glaciadas no calibradas de la Cordillera Blanca prefirió usar el ASTER para evaluar la geología de las zonas de las pampas. Para los glaciares con una temporada de ablación específica como los de los trópicos exteriores secos, las imágenes de alta resolución, por ejemplo, de Worldview-2 a una resolución espacial de 1.8 m, con un ancho de franja bajo pueden ser

una mejor opción, porque las imágenes adquiridas al final de la temporada de ablación son ideales para la estimación del balance de masa (Racoviteanu, Armstrong y Williams 2013).

Muy pocos estudios utilizaron imágenes satelitales de alta resolución para crear inventarios de glaciares en los Andes tropicales. Por ejemplo, Ramirez et al. (2012) informaron haber creado un inventario de glaciares de la Cordillera Real, Bolivia, utilizando una combinación de imágenes ALOS PRISM (2.5 m) y CBERS-2B que incluyeron 476 glaciares con un área total de 185.5 km² en 2010.

Para los Andes tropicales, algunas desventajas de la teledetección óptica incluyen sombras producidas por el terreno escarpado y, particularmente dentro de la ZCIT del interior trópico - una densa capa de nubes.

Metodologías aplicadas en la teledetección. Drenkham et al (2018) en su estudio sobre glaciares de Vilcanota (Urubamba) demostró la aplicación de distintos datos satelitales ópticos y multiespectrales de productos como L1T y L1C que corregido por radiometría y geométrica de Landsat 5 TM y Sentinel-2 MSI, descargando la data desde la plataforma USGS (Earth Explorer) y ESA (Copernicus Open Access Hub). En este tipo de modelación es necesario calcular la elevación de las montañas o de la nieve y se suele usar datos del Modelo de elevación digital (DEM) que derivan de la Misión topográfica de radar de lanzadera (SRTM) 1° facilitada por Alaska Satellite Facility (ASF) entre otros desarrollada para corregir imágenes ALOS PALSAR.

Detección remota por microondas. El hecho de que la teledetección por microondas sea aplicable en todas las condiciones climáticas es ventajoso, especialmente en los trópicos interiores. Sin embargo, aunque los sensores como el radar de apertura sintética (SAR) ofrecen una alta resolución espacial útil para estudios glaciológicos, las distorsiones moteadas, geométricas y radiométricas todavía representan desafíos en el procesamiento de datos. Algunas plataformas espaciales, como el satélite de observación terrestre avanzado (ALOS), llevan sensores ópticos y de microondas y se han utilizado en aplicaciones glaciológicas en los Andes tropicales (Ribeiro et al. 2013).

Si bien es difícil realizar estudios lidar aéreos y terrestres de la nieve y los glaciares en los Andes tropicales debido a la gran altitud y a las condiciones

climáticas severas que a menudo ocurren, se encuentran disponibles algunos estudios (Huh, Mark y Hopkinson 2012). El uso de sensores lidar en conexión con UAS puede ser útil para producir DEM de alta resolución en la investigación glaciológica (Bhardwaj et al. 2016b).

Mediciones de balance de masa. Altitudes de la línea de nieve y la línea de equilibrio. Un método común para estimar al menos el ELA de los glaciares en los Andes tropicales a partir de imágenes ópticas como ASTER o Landsat es calcular la altitud de la línea de nieve (SLA) al final de la temporada de ablación, es decir, el invierno austral. Al calcular el SLA en el glaciar Zongo en Bolivia y el glaciar Artesonraju en Perú, Rabatel et al. (2012) aplicaron un algoritmo que usaba una relación de banda TM4 / TM2 y luego validaron los resultados usando la verdad del campo; este método fue probado por Veettil et al. (2016d) sobre Nevado Tuco en la Cordillera Blanca. Si bien los estudios sobre glaciares en los trópicos exteriores siguieron con éxito este enfoque (por ejemplo, Veettil et al. 2014; Veettil et al. 2016a; Veettil et al. 2016b; Veettil et al. 2016c), está claro que los cálculos de SLA para un solo año pueden subestimar o sobreestimar el ELA, por ejemplo, en comparación con un invierno con nevadas excepcionales también en altitudes más bajas. En los trópicos interiores sin una temporada de ablación específica, el uso del SLA como una estimación del ELA conlleva aún más incertidumbre y, por lo tanto, no debe aplicarse.

Cambios en el área y el volumen del glaciar. Una de las variables de los glaciares que se puede calcular fácilmente mediante la teledetección es el área. En varios glaciares de los Andes tropicales, se ha documentado un cambio de área como señal de recesión glaciar en las últimas décadas (Rabatel et al. 2013). El cambio de área, particularmente en el extremo del glaciar, también se ha utilizado como una estimación del cambio del balance de masa (Veettil et al. 2016a). Los cambios de área en los glaciares de los Andes tropicales se han calculado utilizando imágenes óptimas de teledetección y delimitación manual. Diferentes combinaciones de bandas y relaciones de bandas aplicadas a una imagen Landsat-5 adquirida el 14 de agosto de 1991 para facilitar la identificación de la altitud de la línea de nieve (SLA) en Nevado Tuco en Perú, se usó una combinación de bandas 3–2–1; (b) relación 3/5; (c) relación 4/5; (d) índice de diferencia de nieve normalizado (NDSI) con umbral

en 0,6; (e) combinación de bandas 5–4-2; (f) igual que (g) con umbral de 120 y 135 para las bandas 4 y 2, respectivamente; (h) la flecha amarilla apunta a la posición de la línea de nieve. (De Veettil et al. 2016d), proporciones de bandas como visible / SWIR o NIR / SWIR (p. Ej., Poveda y Pineda 2009; Liu, Kinouchi y Ledezma 2013; Salzmann et al.2013; Hanshaw y Bookhagen 2014), análisis de componentes principales, clasificación supervisada (Collet 2010), e índices como el índice de diferencia de nieve normalizado (NDSI) (Zubieta y Lagos 2010, Morizawa et al.2013; Burns y Nolin 2014; Lopez-Moreno et al.2014; Alarcón et al.2015; Veettil et al.2016a). De estos, aunque puede ser muy preciso cuando lo realiza un experto, la delimitación manual de los límites de los glaciares requiere mucho tiempo y no es preferible cuando se incluye una gran muestra de glaciares. Por otro lado, la precisión de los resultados de la relación de bandas o índices normalizados depende en gran medida de la resolución espacial de las imágenes de satélite y del umbral que se aplica para clasificar las imágenes de relación / índice en "glaciares" y "no glaciares".

Aunque los métodos de procesamiento de imágenes satelitales se han usado para de teledetección que utilizan índices y relaciones de bandas son fáciles de utilizar para cambios en el volumen y el área de los glaciares, no están exentos de errores. La mayoría de estos errores son aplicables a los glaciares en entornos alpinos de forma universal. La precisión estimada del área del glaciar a partir de imágenes de satélite depende de la presencia de nieve estacional en el glaciar

Los trópicos interiores de los Andes no tienen una estación de precipitación específica y la probabilidad de sobreestimación del área glaciar es alta. La precisión tanto de las relaciones de banda como de los índices de nieve está sujeta al valor de umbral seleccionado y a la resolución espacial de la imagen de satélite. La elección de un umbral demasiado pequeño puede resultar en una sobreestimación del área del glaciar, mientras que un umbral demasiado alto puede resultar en un área del glaciar subestimada; en ambos casos se requiere la edición manual (Kamp y Pan 2015).

Los volúmenes de los glaciares en el Nevado Coropuna en Perú se han estimado combinando la información del área con los datos del espesor del hielo recuperados de las mediciones del radar de penetración terrestre (GPR) (Peduzzi, Herold y Silverio 2010). También se han realizado prospecciones de

GPR en otras cadenas montañosas de los Andes tropicales (Peduzzi, Herold y Silverio 2010; Salzmann et al. 2013; Chilsom et al. 2014; Torres et al.2014; Bastantes-Serrano et al.2016; Chadwell et al.2016). Incluso si dichos datos sobre el espesor del hielo no están disponibles, los cambios en el volumen de los glaciares durante un período de tiempo pueden estimarse aplicando el enfoque geodésico como lo han hecho Ribeiro et al. (2010) para la Cordillera Tres Cruces en Bolivia.

Sin embargo, el método geodésico requiere DEM de alta precisión, por ejemplo, de lidar aerotransportado (Huh, Mark y Hopkinson 2012), para calcular los cambios de elevación de la superficie del glaciar. Además, aunque los cambios en el volumen de los glaciares a menudo se consideran representativos de los cambios en el balance de masa, el establecimiento de un factor de conversión es problemático porque la densidad derivada del modelo geodésico es, en su mayoría, menor que la densidad del hielo (Huss 2013). La actividad tectónica está presente en todos los Andes tropicales, lo que debe tenerse en cuenta al utilizar DEM para estimar los cambios de volumen de los glaciares en la región, incluso si los datos son de alta resolución.

Características del albedo superficial. En los Andes tropicales, la reposición de la superficie del glaciar con nieve fresca ocurre durante el verano austral (noviembre-abril), lo que resulta en un albedo superficial alto. Para hacer esto, se montan al menos dos pares de piranómetros a una altura específica de la superficie del glaciar, y luego se comparan los datos recibidos para un período específico de interés (es posible que sea necesario omitir los días de nevadas para la intercomparación).Soria y Kazama (2011) utilizaron una combinación de datos de AWS y Landsat ETM + para las mediciones del balance energético superficial y la distribución espacial del balance energético del glaciar Zongo en Bolivia. En años más recientes, la influencia de la contaminación antropogénica, como las partículas oscuras en los glaciares de América del Sur, reduce cada vez más el albedo superficial (Molina et al. 2015).

Seguimiento de los cambios de los glaciares

Mernild y col. (2015) estimaron la pérdida de masa y el desequilibrio a lo largo de la totalidad de los Andes entre 1993 y 2012 y observaron que el balance de masa anual medio había cambiado de $620 \pm 390 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ durante

1993–2002 a $740 \pm 240 \text{ kg m}^{-2} \text{ año}^{-1}$ durante 2003-2012. El mismo estudio situó los desequilibrios en el área y el volumen promedio en 23% y 27%, respectivamente, y la razón del área de acumulación promedio (AAR) en 0.42, que está por debajo del valor normal para los glaciares en equilibrio. Con base en datos de teledetección, Veettil (2017) observó tres tipos de gradientes en el retroceso de los glaciares en los Andes tropicales: geográficos, altitudinales y direccionales. La influencia de las variaciones de la temperatura de la superficie del mar (SST), como ENSO y PDO, en el retroceso de los glaciares depende de la distancia geográfica desde la costa del Pacífico y también de la distancia desde la ZCIT de enero. Los glaciares ubicados en elevaciones más bajas, particularmente los más pequeños, se estaban retirando más rápido que los de las más altas. Además, el glaciar retrocedió más rápido en el noreste y más lento en los aspectos suroeste. Albert y col. (2014) presentaron una síntesis regional integral sobre el retroceso de los glaciares a lo largo de los Andes tropicales que cubren los trópicos interiores (Venezuela y Colombia), los trópicos exteriores húmedos del norte (Cordillera Blanca), los trópicos exteriores húmedos del sur (Cordillera Vilcanota, Perú y la Cordillera Tres Cruces, Bolivia) y los trópicos exteriores secos (Nevado Coropuna, Cordillera Ampato) como parte de la iniciativa GLIMS.

Inventario nacional. Respecto a los glaciares el ANA viene efectuando recientemente una actualización del inventario de glaciares a través de codificaciones según el método Pfafstette, las clasifica y codifica de acuerdo al estándar internacional GLIMS. Usa tecnología geoespacial con técnicas de teledetección y salidas de campo, integra los datos obtenidos mediante cartografía al Sistema de Información Geográfica. Generalmente usa imágenes satelitales Spot 5, Aster, Liss III y Landsat, de media resolución, generalmente aplica los modelos de elevación digital, también utiliza el algoritmo Normalized Difference Snow Index (NDSI) en el procesamiento cartográfico de las imágenes satelitales complementando su investigación con análisis multi-temporales que permiten evaluar la persistencia de los glaciares y descartar interferencias con la nieve temporal. El ANA ha presentado contiene cuantificados glaciares de 19 cordilleras nevadas del Perú, con un total de 2679 glaciares (1298.59 km²) siendo la Cordillera Blanca (755 glaciares de 527.62 km²) localizada en los Andes del Norte, Cordillera de Vilcanota (374 glaciares y

279.4 km²) y Vilcabamba (355 glaciares de 129.15 km²) ubicada en los andes centrales las de mayor extensión glaciaria, hasta ahora la altitud mínima de un glaciar debidamente inventariado promedia los 4000 msnm. Estos glaciares han reducido su geometría con una pérdida superficial total en las 18 cordilleras del 42.64% en comparación con información colectada de 1970, se ha determinado que los glaciares más pequeños son los más propensos a producir fuertes cambios en su superficie glaciaria lo que hace un grupo de 2341 glaciares (87.38%) con superficie inferior a un km² y 338 glaciares (12.62%) con superficie mayor a un km².

Respecto a la formación de lagunas, el Proyecto Glaciares+ (PG+) mantuvo una colaboración importante con el Área de Evaluación de Glaciares y Lagunas de la Autoridad Nacional del Agua (ANA) del Perú, como parte de una cooperación Suiza – Perú dentro del Programa Global de Cambio Climático y Medio Ambiente de Suiza. De esta forma el ANA en conjunto con los Gobiernos Regionales de Ancash, Cusco y Lima y con el apoyo de las universidades locales ha tenido la iniciativa de ejecutar estas investigaciones para tratar de recoger, informar y promover el uso productivo del agua que proviene de los glaciares, también el de fortalecer las capacidades para reducir los riesgos de eventos inesperados y de desastres ante el retroceso glaciario en el país. Se pretende producir información geoespacial que pueda cubrir el nacimiento de lagunas, con estimación de áreas, de volumen de los nuevos cuerpos de agua como proyectar la probabilidad de su formación considerando los hechos cambiantes y evolutivos del retroceso de glaciares del Perú. Se pretende contribuir al conocimiento de lagunas y ecosistemas futuros como parte de la integración de los recursos hídricos, riesgo de desastres y del ordenamiento territorial a largo, corto, mediano y plazo.

III. METODOLOGÍA

3.1 Tipo y diseño de investigación

Esta investigación es de tipo cualitativo es comparativo porque identificará las distintas satélites y programas de modelamiento aplicado en cada estudio para el cálculo de pérdidas de cobertura glacial y de predicción de retroceso glacial en los andes de Perú. Explica además e fenómeno causado por el cambio climático (Fernández, Hernández y Baptista. 2014, p. 470).

3.2. Categorías, Subcategorías y matriz de categorización apriorística

En la tabla 3 se detalla la matriz de categorización apriorística donde señala los objetivos específicos, problemas específicos, las categorías y sub categorías.

Tabla 1. Matriz de categorización apriorística

Revisión sistemática de desglaciación y formación de lagos en la cordillera de los Andes-Perú mediante Teledetección, 2020.

Objetivos específicos	Problemas específicos	Categorías	Sub categorías	Unidad de análisis
Determinar los Sistemas De Teledetección Espacial usados para estimar la desglaciación en la cordillera de los andes del Perú	¿Qué Sistemas De Teledetección Espacial se usan para estima la desglaciación en la cordillera de los andes? Más usados al 2020	Sistema De Teledetección	Sentinel-2, Spot, Áster, Landsat, Resourcesat, Rapideye, CBERS	Veettil, BK y Kamp, U. (2017).
Analizar que métodos de procesamiento de imágenes satelitales se han usado para estudiar la desglaciación en la Cordillera de los Andes de Perú.	¿Qué métodos de procesamiento de imágenes satelitales se han usado para estudiar la desglaciación en la Cordillera de los Andes de Perú?	Métodos de procesamiento de imágenes satelitales	1. Diferenciación entre nieve y hielo en las imágenes remotas 2. NDSI 3. Determinación de la superficie y volumen glaciar	Gilberto Medina ¹ ; Abel Mejía (2014)
Analizar el estado de desglaciación de los andes peruanos	¿Cuál es el estado de desglaciación de los andes peruanos?	desglaciación	Estado de desglaciación/investigación	Tordocillo, 2019
Identificar inventarios nacionales de glaciares y lagos formados en los andes del Perú	¿Qué inventarios nacionales de glaciares y lagos formados en los andes del Perú?	inventarios nacionales	Glaciares lagos	Alton C. Byers (2017)

3.3. Escenario de estudio

No se presenta un escenario definido, debido a que este estudio es totalmente una revisión bibliográfica sobre la teledetección de los glaciares en los Andes del Perú considerado como Andes tropicales. Se ha buscado información básica sobre los principios de la teledetección y de los instrumentos actuales que permiten estimar la desglaciación y la formación de lagunas glaciales.

3.4. Participantes

Se han seleccionado artículos provenientes de Scopus y páginas de entidades nacionales como: El Ministerio del Ambiente, Instituto geofísico entre otros, considerando su relevancia para el tema.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Se ha desarrollado una búsqueda y colecta de la información aplicando el análisis documental, que servirá como base para la investigación (Domínguez, 2016, p. 15). El inicio de la búsqueda bibliográfica, ha dependido del tema central con palabras clave relacionadas con la teledetección, desglaciación, cordillera de los andes, Perú entre otros aspectos de esta investigación. El aprovechamiento de la información colectada se ha relacionada con el análisis de cada artículo, lo cual ha permitido organizar apropiadamente de manera sistemática los distintos contenidos permitiendo una planificación adecuada de la estructura del informe y de la ruta final aplicada en el trabajo analítico posterior cumplido posteriormente y presentado en este documento final (Cegarra, 2011, p. 102). De acuerdo con la investigación, se definirán las técnicas de recolección de datos: que pueden ser documentales y observación (Domínguez, 2016, p. 55).

Según lo mencionado anteriormente en esta investigación se hizo uso una base de datos en Excel, la cual incluye información de: título, autor (es), tipo de documento, indexación, objetivo, método, resultado y conclusiones.

3.6. Procedimientos

Documentar y evaluar la situación actual y el nivel de investigación alcanzado en la presente década frente a las bases preliminares del siglo pasado respecto a la variación de la cobertura glacial de los Andes en el Perú desde un nivel a pequeña escala considerando el estado a nivel regional de la cordillera. Se ha

tenido en cuenta 03 aspectos u objetivos a cubrir: i. El área de cobertura glacial y su retroceso ii. La extensión de suelo desglaciado y iii la formación de lagos en función de las metodologías aplicadas para su modelamiento basadas en las tecnología de teledetección.

3.7. Rigor científico

Para esta investigación se desarrollaron los siguientes criterios descritos por Varela y Vives (2016, p.194), quienes explican aspectos relevantes sobre el criterio de dependencia de la consistencia de la información, mediante los artículos científicos extraídos de bases de datos científicos. También se destaca la credibilidad debido las fuentes confiables, extraídas desde las fuentes científicas acreditadas. La confirmabilidad, se demuestra en los artículos seleccionados para esta investigación escogidos por sus descripciones teóricas.

3.8. Método de análisis de información

La información se agrupó de acuerdo a las categorías y sub categorías, El método comprende la revisión sistematizada de todos documentos que aparecen en la base de datos de la base Scopus que mantiene la Universidad Csear Vallejos. Se seleccionaron con las clave remote sensing, glaciers, Andes mountain range, Peru 2010 al 2020 y teledeteccion, glaciares, cordillera de los andes, Perú.

Se revisó toda la información siguiendo el método de revisión de Fernandez y. Mark (2016).

3.9. Aspectos éticos

Esta investigación presenta el aporte de artículos de investigación que aparecen en las bases de datos de revistas indexadas, se usa también las referencias bibliográficas siguiendo el manual ISO 690 de la Universidad César Vallejo, el análisis de resultados será respaldados por los criterios de rigor científico establecidos, así mismo, esta investigación podrá ser utilizada por cualquier persona que requiera información con respecto al tema de estudio.

IV. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

OE1 Sistema de teledetección a nivel internacional

La revisión bibliográfica dio como resultado, que el 50% de las investigaciones respecto a la extensión del glaciar de la cordillera de los Andes comprendieron la aplicación de datos del Satélite Landsat, mientras que un porcentaje menor aplico el Satellite ASTER y aplicaciones de una combinación de sistemas tales como ASTER/Landsat, Aster/Sentinel entre otros. La mayoría de los sistemas corresponde a satélites de la NOAA y cooperaciones internacionales con la Unión Europea, Japón y Francia entre otros.

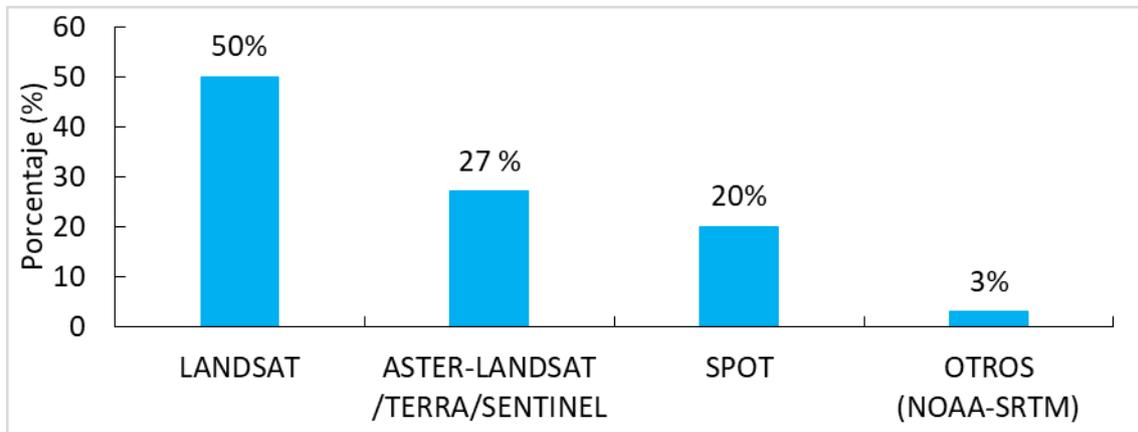


Figura 7. Composición de sistemas aplicados en las investigaciones sobre el sistema glaciar de la Cordillera de los Andes en Perú de 2014-2020 en la investigación.

De acuerdo a la bibliografía realizada, se han recolectado información desde el año 2014 al 2020. Los resultados mostraron una variedad de años como base, de acuerdo a la data disponible en el Landsat, así se han efectuado modelamientos desde el año 1963 hasta el 2018. Han destacado cuantificaciones de glaciares del Vilcanota (/Albert et al. 2014), Quecaya-Vilcanota (Hansshow et al 2014), Drenkhan et al 2016), así como nevados Quyericocha (Lopez-Moreno et al 2017), Artesonjo (Concha et al. 2017), Shallap (Maussion et al. 2015), Pastoruri (Veetti et al. 2016) y otros nevados de la Cordillera Blanca (Burns y Nolin 2014, Duran-Aklarcon et al, 215, Silverio y Jaquet, 2017, Turbo et al. 2020) entre otros (ver figura).

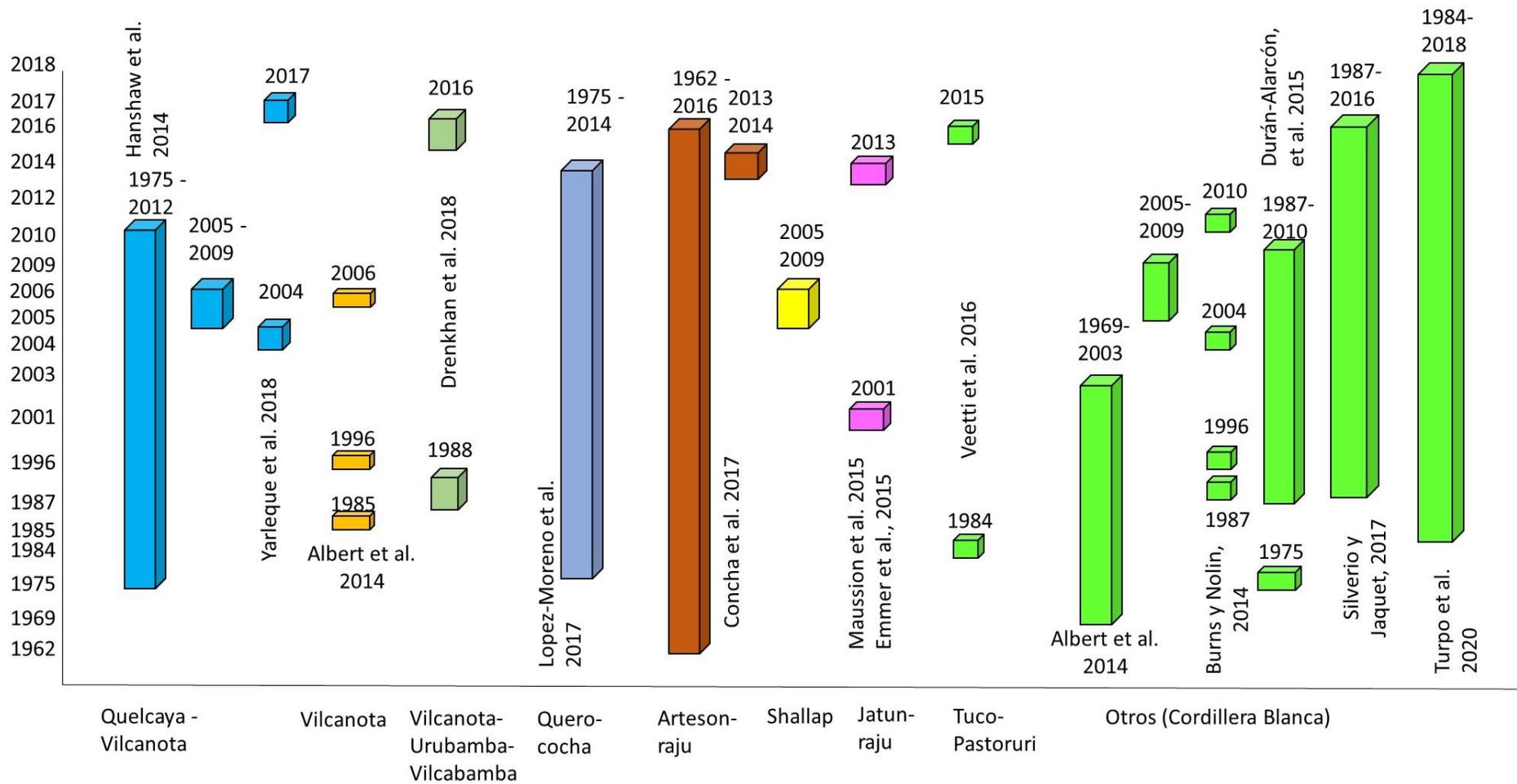


Figura 8. Distribución de investigaciones realizadas en la Cordillera Blanca usando el Satélite Landsat sobre Glaciares 2014-2020.

La figura muestra las investigaciones reportadas de la Cordillera Blanca y Vilcanota realizadas usando distintos Satelites cuyas imágenes y datos se usan como apoyo mutuo y resolver mejor cada área de interés. De acuerdo a ello, se han aplicado imágenes de Aster del Satelite Terra para las áreas glaciares de Yanganuco, Quilcayhuanca, Yanamarey, Pumapampa (Baraer et al, 2014), Lansat-Aster para evaluar glaciares de Tuco y Coropuna (Veettil et al 2016^a) y otros, Spot para estudiar los glaciares de cordillera Blanca y Vilcanota (Albert et al 2014) (ver figura).

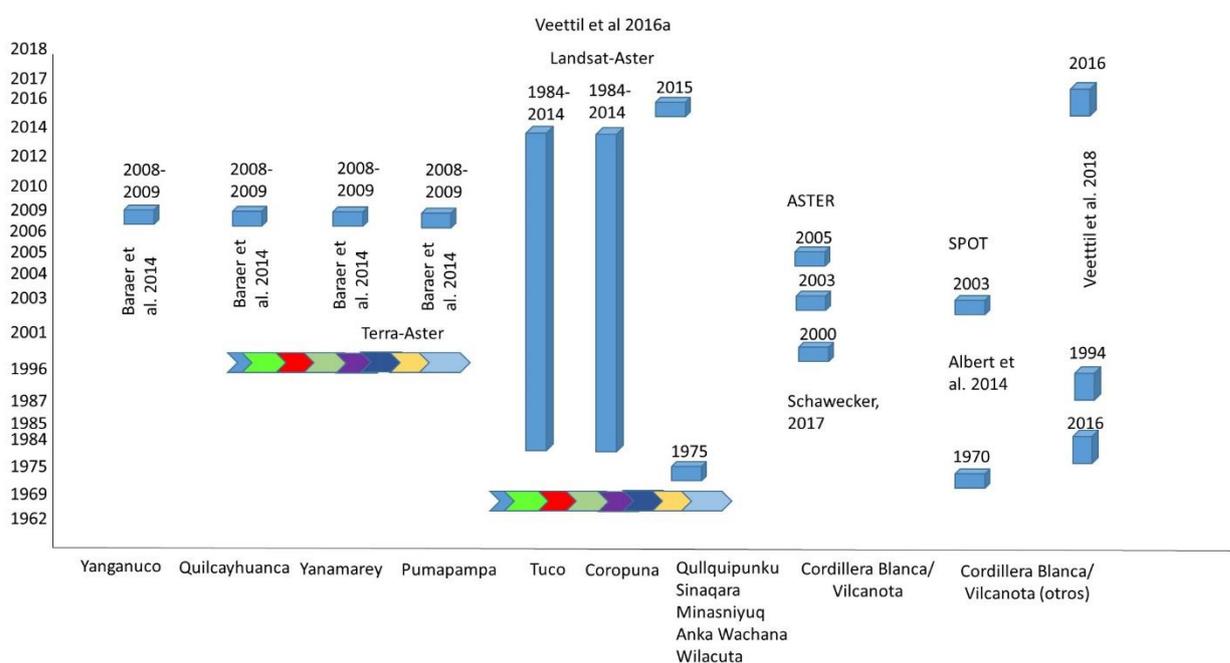


Figura 9. Estudios sobre glaciares en el Perú efectuado con el apoyo de distintos satélites 2001-2017.

Sin embargo se han efectuado estudios que han involucrado factores específicos como la caída del hielo en lagos que usan modelo hidrográficos asociados a data obtenida desde misiones topográficas de la NASA, SRTM: Misión Topográfica con un sensor remoto activo (Shuttle Radar).

Servicios satelitales usados en el Perú. En el Perú las entidades gubernamentales, vienen usando las imágenes captadas por satélites como Sentinel-2, Spot, Áster, Landsat, Resourcesat, Rapideye, CBERS con

resoluciones especiales de 10 a 20 m para el Sentinel e ≥ 30 m para las demás, también es importante que se cuente con múltiples bandas espectrales que no superen 10% de nubosidad sin presencia de nieve (casi nula). Actualmente se ha incorporado el satélite peruano PeruSat1. Se presentan algunas características de los mismos:

De acuerdo a INAIGEN (2017), los glaciares que conforman la cordillera de los Andes mantiene 03 zonas muy importantes, i. la Zona de acumulación que contiene una cantidad acumulada de nieve y hielo durante un año hidrológico, ii. La altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) que es una línea ideal que separa la Zona de acumulación y iii. La zona de ablación esta última es donde se deposita el material en proceso de fusión y ganancia de energía.

En el Perú oficialmente a través del MINAN (2017) se cuenta con un manual para la aplicación de software elaborado por INAIGEN en el que describe los software usados por la institución y que debe ser usado para inventarios de glaciares en el país. Se describe el uso del software Arcgis 10.4, imágenes satelitales Sentinel – 2 y el Modelo Digital de Elevación (MDE) ALOS PALSAR (Advance Land Observation Satellite) de resolución 12.5 m.

OE2 MÉTODOS DE PROCESAMIENTO DE IMÁGENES SATELITALES

Métodos usados en investigaciones internacionales. Cuando Albert et al (2014) estudia la desglaciación emplea la detección remota de glaciares tropicales para confirmar una rápida disminución en el norte de los Andes peruanos, evaluó glaciares de Quelccaya que es el casquete glaciar más grande de los trópicos con una altitud de 5670 m emplea Landsat TM y ETM imágenes multiespectrales ASTER. Sensores satelitales, incluido MSS, que tienen diferentes resoluciones espaciales y espectrales. Visible al infrarrojo cercano (VNIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), como TM4 / TM5 y para evaluar el Vilcanota, con 6425 m solo usa imágenes Landsat 5 TMde 1985, 1996 y 2006, mientras la Cordillera Blanca emplea una combinación de Landsat y SPOT-5 para imágenes del 2003 y fotografías aéreas de 1970.

De otro lado, Hanshaw y Bookhagen (2014) evaluaron las áreas glaciares, lacustres y las líneas de nieve en la Cordillera de Vilcanota y del nevado de Quelccaya entre los años 1975 y 2012 ubicados en los andes centrales norte de Perú. En este caso modelaron para altitudes promedios de

4700–5000 m. Usaron las imágenes de satélite ópticas y multiespectrales, Landsat Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +), Advanced Spaceborne Thermal Emission, Radiómetro de Reflexión (ASTER), e imágenes de Corona KH-9 desclasificadas. Aplicaron un Modelo de elevación digital (DEM) del radar de lanzadera (SRTM) 2000 y el de ASTER (GDEM V1 y V2).

También Burns y Nolin, (2014). uso imágenes Landsat corregidas atmosféricamente con la finalidad de medir los cambios de área de los nevados de la Cordillera Blanca entre los años 1987 a 2010 con altitudes promedio de 4237 m-4920 m., fue necesario u que usara 05 sensores satelitales: Landsat 2 Multispectral Scanner (MSS), Landsat 5 TM, Landsat 7 Enhanced Thematic Mapper (ETM +), ASTER e IKONOS-2. También uso imágenes de alta resolución de Google Earth (satélite QuickBird) como referencia adicional. Con esta combinación calculo los cambios recientes de 1987, 1996, 2004 y 2010 respecto a los reservorios de agua provenientes de glaciares de la Cordillera Blanca y de las sub-cuencas del Río Santa. La aplicación de imágenes de satélite de alta resolución le sirvió para calibrar el Índice de diferencia de nieve normalizado (NDSI) y luego derivaron 04 escenarios con el Landsat Thematic Mapper (TM).

DURÁN-ALARCÓN et al. (2015) investigaron las tendencias del retroceso glaciar sobre los nevados Caullaraju-Pastoruri de la Cordillera Blanca tales como Caullaraju, Jenhuaracra, Condorjitanca, Huiscu, Tuco, Pastoruri, Santon y Rajutuna con altitudes promedio entre 5000 -5682 m para los años 1975, 1987-2010. Para esta finalidad usaron imágenes Landsat - Nivel 1T para corregir el terreno y topografía con el Modelo Digital de Elevación (DEM) basado en el Global Land Survey 2000 (GLS2000), aplicaron también una conversión de conteos digitales a radiancia en el sensor (TOA, bandas VNIR/SWIR) y temperatura de brillo (sensor- bandas TIR). La emisividad de la superficie se basó en datos de la biblioteca espectral ASTER, mientras que la delimitación glaciar de hielo limpio se basó en el alto albedo de nieve/hielo (VNIR) y el albedo medio a bajo SWIR y NDSI (bandas 2 y 5 de L5/TM).

Veettil, et al (2016) estudio las variaciones anuales de la línea de nieve de los nevados del sur de la Cordillera Blanca, tales como el Nevado Tuco, glaciar Pastoruri entre los años 1984 y 2015, para ello usaron modelos digitales de elevación, con datos meteorológicos e índices de ENSO y PDO y datos de la NOAA, la Agencia Meteorológica de Japón, imágenes Landsat Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper + (ETM +) (USGS) y Operational Land Imager (OLI) (1984–2015), imágenes lineales Resourcesat-1 (LISS-III) (2012) (con resolución espacial de 23.5 m). El uso de datos de ASTER sirvió para calcular el Modelo de elevación digital global (GDEM) V2 (resolución espacial de 30 m) y para calcular las altitudes de la línea de nieve (ERDAS IMAGINE 2013 y ArcMap 10). Para calcular la humedad relativa, utilizaron datos de Reanálisis 1 de los Centros Nacionales de Predicción Ambiental (NCEP)/Centros Nacionales de Investigación Atmosférica (NCAR), que mantienen una resolución de latitud-longitud de $2.5^{\circ} \times 2.5^{\circ}$, y datos ERA-Interim.

De otro lado Silverio y Jaquet, (2017) han usado imágenes de Landsat para evaluar las variaciones de los glaciares de la Cordillera Blanca entre 1987 y 2016 en el marco del ENSO, para altitudes de 4500-5000 y de 5000-5500, emplearon la relación de bandas (TM4/TM5) del Landsat 5 TM, ETM + 4 /ETM + 5 de Landsat 7 ETM + y OLI5/OLI 61 del Landsat 8

Concha, et al 2017 calcularon la evolución glaciar al final del periodo del Holoceno en la cuenca Parón-Ancash en el nevado Artesonraju perteneciente a la Cordillera Blanca para altitudes entre 5049 y 5164 m y pico máximo de 6025 m, para los años 2013, 2014, y de 1962 a 2016, en este caso demostraron los resultados del cálculo de Altitudes de la línea de equilibrio (ELA) en los glaciares de la cuenca del Parón, en la Cordillera Blanca, el mapeo de glaciares se realizó usando imágenes satelitales de 1962, 2016(LLA), para ello aplicaron el método de relación equilibrio superficial por la altura (AABR) y usaron el ArcGIS para mapear sus hallazgos. Calculo de ELA y paleo-ELA a 5 164 m, 5 114 m y 5058 m.

López-Moreno et al. (2017), estudiaron los procesos hidrológicos y de depósito relacionados al retroceso glaciar en la cuenca de Yanamarey-Querococha en la Cordillera Blanca desde 1975 a 2014 para un altitud media de 4600. Con este objetivo trabajaron 19 Imágenes Landsat TM y Landsat ETM+ de USGS. Aplicaron un modelo de elevación digital (DEM, celda de 30 m) con discriminación de superficies cubiertas de nieve y hielo usando $NDSI = (TM2 - TM5) / (TM2 + TM5)$ valido para 0.4 y para cuerpos de agua (expansión de lagos): $NDWI = (TM4 - TM5) / (TM4 + TM5)$, valido (+). Aplicaron imágenes de teledetección con resolución submétrica desde 1948 a 2014 con fotografías de 1948, 1962 y 1970 (ANA) capturadas en imágenes satelitales de alta resolución disponibles en Google Earth Digital Globe 2014 (US Geological Survey 2003 e imágenes CNES / Astrium 2014) para establecer la geomorfología del nevado. Usaron imágenes de LANDSAT 7 ETM+ y LANDSAT 8 OLI (2001, 2013) para procesar la velocidad superficial de cubrimiento de escombros, bandas pancromáticas (LANDSAT 8-OLI) y rectificadas con el LANDSAT 7 ETM+ y calcularon valores de desplazamiento y vectores de velocidad.

Asimismo Yarleque et al. (2018) continuó haciendo proyecciones sobre la desaparición del nevado de Quelccaya que está ubicado en los andes centrales de Perú con imágenes LANDSAT de los años de 2004 a 2017 con altitudes que promediaron 5680 m. En este proyecto se proveyeron imágenes con altitud anual más elevada que la línea de nieve (SLA) del modelo CMIP5 con temperatura del aire (T_a).

Drenkhan et al. (2018) evaluaron en el 2016 los glaciares y lagos en la cuenca del Vilcanota y Urubamba y proyectaron su desglaciación futura una altitud media de 4917 m con imágenes multispectrales de 1988 a 2016 con intervalos de 6 años para altitudes mayores a 4000 m excepto para los años de 1988 a 1998, para ello hicieron una corrección de L1T y L1C por radiometría y geométrica de Landsat 5 TM (1988, 1998, 2004 y 2010), también usaron herramientas del Sentinel-2 MSI (2016):USGS y ESA. Aplicaron los datos de Modelo de elevación digital (DEM) usando SRTM-ASF y ALOS PALSAR. SRTM con una resolución de 30 m.

En cambio Turpo et al. (2020) hicieron un mapeo multitemporal de cuerpos de agua y áreas urbanas en los andes del Perú usando imágenes Landsat en la plataforma Google Earth Engine entre los años 1984-2018. Para ello, aplico mosaicos de imágenes anuales entre 1984- 2017 mediante imágenes de satélite: Landsat 5 TM (LANDSAT/LT05/C01/T1_SR), Landsat 7 ETM+ (LANDSAT/LE07/C01/T1_SR), Landsat 8 OLI (LANDSAT/LC08/C01/T1_SR). Calculó las fracciones de mistura espectral (ME), basada en la vegetación verde-GV no fotosintética-NPV, la del suelo, nieve y sombra. Entonces calculó la detección multi-temporal de las áreas urbanas (NUACI) cuya valoración dependía de los índices (NDWI-agua), (NDVI-vegetación), (NDBI-edificada).

Aplicaciones de otras fuentes: Albert (2014) Detección remota de glaciares tropicales en rápida disminución en el norte de los Andes, entonces analizaron imágenes de la capa glaciaria de Quelccaya respecto a 04 décadas y así determinaron la extensión superficial del hielo para ello Se recopilaban un total de 44 imágenes sin nubes entre 1975 y 2009, los datos incluyeron Landsat TM y ETM+ es imágenes multiespectrales ASTER. Una de las cuestiones más relevantes en estas pruebas resulta el tiempo de procesamiento y la presión de la proyección, entonces usaron el rango visible al infrarrojo cercano (VNIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), como TM4/TM5 logrando errores muy pequeños en la estimación. Luego efectuó los cálculos para la montaña más alta que es el Nevado Ausangate (6384 m) de la Cordillera Vilcanota utilizando imágenes Landsat 5 TM (1985, 1996 y 2006). En cambio para calcular la disminución del Nevado Coropuna (Cordillera Ampato) cuyo pico más alto alcanza los 6.425 m emplearon una imagen Landsat 2 MSS de 1975, imágenes Landsat 5 MSS, imágenes Landsat 5 TM de 1996 y 2003.

Calcular esta función para la Cordillera Blanca (3500 a 6800 m), significó medir variaciones en los glaciares desde 1970 a 2003, entonces estimaron valores a partir de la información provista por el satélite SPOT-5 (2003) y de fotografías aéreas (1970). Tuvieron que construir nuevos contornos de glaciares para el año 2003 basadas 02 imágenes clasificadas (SPOT-5) (GLIMS-NSIDC) del glaciar. Entonces combinaron los datos de SPOT y las fotografías aéreas muy

antiguas e incorporarlas a un análisis GIS usando los siguientes elementos: 02 mapas con niveles topográficos de 1:100000 (1962/1970), 01 modelo de elevación digital (DEM) (30 m), 02 escenas SPOT-5 (2003) (VNIR: 10 m resolución), un DEM derivado del SRTM (2000) y 54 GCP adquiridos con un GPS diferencial en terreno no glaciado. A pesar de ello 04 grupos de montañas (Pongos, Caulliraju, Roscos, Pelegatos) se ubicaron fuera de la detección del SPOT, entonces usaron el índice de nieve de diferencia normalizada (NDSI) con los canales SPOT 1 (visible) y 4 (infrarrojo medio) y el umbral de segmentación (0.5) para extraer el área cubierta de hielo y los glaciares cubiertos de escombros se digitalizaron manualmente, se mapearon y ubicaron mediante análisis de regresión y SIG.

Baraer et al. (2014) estudiaron la contribución del agua subterránea al flujo de salida de los nevados de Llanganuco (5231 m), Quilcayhuanca (5139 m), Yanamarey (4946 m) y Pumapampa (5128 m) no calibradas de la Cordillera Blanca. Para ello se usó la base de datos del año 2005 de Global Land Ice Measurements from Space (Racoviteanu, 2005), las áreas de los nevados se estimaron utilizando un modelo de elevación digital derivado de imágenes de satélite del ASTER con una resolución de 30 m (celda), que permitió mapear los cambios de cada glaciar, y medir su cobertura geológica superficial, la cual contribuye al Río Santa. También se usaron pendientes promedio de 10° con elevación mínima superior a 3500 m, y luego usaron trazadores hidroquímicos para diferenciar las distintas fuentes de agua en el sistema.

Schauwecker et al. (2014) estudiaron las tendencias de clima y el retroceso glaciar en la Cordillera Blanca (4900 m) y la de Vilcanota (5010 m) desde 1930. Para ello, compilaron mediciones de balance de materia existentes, luego se calcularon las ELAs en los dos sistemas glaciares y se compararon con la hipsografía de cada glaciar, para discutir el desequilibrio del glaciar. Se desarrolló para el primer enfoque una prueba numérica simple al glaciar Shallap balanceando la cantidad de precipitación requerida para alcanzar el equilibrio cuando se produce un aumento en la línea de nieve en eventos de precipitación. Luego, se calculó los contornos de los límites de cada

glaciar combinado con un Mapa de Elevación Digital Global (GDEM) de Radiómetro de Reflexión y Emisión Térmica Avanzada del Espacio (ASTER) (30 m). Asimismo se usaron imágenes de 2003 del Satélite SPOT- disponibles en GLIMS, así se proyectaron las posiciones contemporáneas usando tales imágenes SPOT de elevada resolución entre el 2011 y el 2012 (Google Earth). El índice de área de acumulación del área total glaciar es AAR, se asumen valores en estado estacionario en un rango entre 0.75 y 0.82 y con esto hallar el ELA medio de cada glaciar estacionario que sería comparado con el real. Se pudo determinar mediante la aplicación de un AAR a la curva hipsográfica (Kerschner, 1990). Este ELA hipotético de estado estacionario corresponde a la conservación de la masa glaciar calculado a partir del balance de materia.

Veettil y de Souza, (2016) estudiaron el retroceso de glaciares en 40 años de la Cordillera Vilcanota tales como Qullqipunku (5522 m), Sinaqarea (5471 m), Minasniyuq (5248 m), Anka (5100 m) y Wilaquta (5100 m) desde 1975 a 2015. Usaron Imágenes Landsat (Multispectral Scanner (MSS): (01 imagen 1975); Thematic Mapper (TM): 03 imágenes: 1985–2005 y Operational Land Imager. (OLI): 01 imagen (2015). Para el invierno austral aplicaron el modelo de elevación digital (DEM) del Radiómetro de Emisión y Reflexión Térmica Avanzada del Espacio (ASTER). Global DEM (GDEM V2) para estimar la posición final, la pendiente y el aspecto del área. Área glaciar se calculó por el índice de nieve de diferencia normalizado ($NDSI = [(Reflectancia\ verde - Reflectancia\ infrarroja\ cercana)/(Reflectancia\ verde + Reflectancia\ infrarroja\ cercana)]$), con valor umbral entre 0,5 y 0,6, se generó 03 tres rangos de elevación (< 5000, entre 5000 – 5300 y > 5300 msnm) usando DEM (ASTER). Resoluciones espaciales: MSS- 60 m; TM y OLI: 30 m).

Veettil et al (2016 a) efectuaron una comparación del retroceso entre los glaciares de los Andes Tropicales de zonas climáticas diferentes que incluyó los nevados de Tuco y Coropuna de la cordillera de los andes peruana. Se usaron imágenes multiespectrales de distintos sensores entre 1984 y 2014, también se aplicaron modelos digitales de elevación (MDE). Los investigadores usaron datos meteorológicos como los Índices del ENOS y ODP para relacionarlos con el retroceso glaciar. Las imágenes de Landsat ya estaban

ortorrectificadas en GeoTIFF (USGS). Las imágenes de EO—1 ALI correspondieron a IRS LISS III (año 2012) obtenidos del INPE y las imágenes ASTER (Reverb- NASA). Se generaron modelos digitales de elevación (MDE). Se usaron datos de ASTER GDEM para calcular la ALN (30 m) y MDE y se calibró por radiometría. Se usó Erdas Imagine y ESRI ArcGIS 10.1 para procesar las imágenes. Se calculó la altitud límite de las nieves (ALN) en estación seca. Landsat y SPOT, presentaron limitaciones de resolución espacial y espectral, respectivamente. Se usaron entonces índices de nieve por diferencia normalizada (NDSI) calculados desde las bandas del verde (TM2, 0,52 - 0,60 μm) y del infrarrojo medio (TM5, 1,55 - 1,75 μm) de Landsat, usando las ecuaciones $\text{NDSI} = [(\text{TM2}-\text{TM5}) / (\text{TM2} + \text{TM5})]$ para calcular la ALN con las imágenes Landsat.

En el 2018 Veettil et al (2018) realizó un mapeo de nevados de la cordillera blanca para 1975, 1994 y 2016. Se compararon los resultados de calcular la superficie glaciaria de los nevados de la cordillera blanca al aplicar imágenes Sentinel-2 MSI y Landsat OLI para estimar la superficie del glaciar en 2016. Para estimar área superficial glaciaria entre 1975 y 1994 se emplearon imágenes Landsat MSS (1975), TM (1994), otros datos fueron obtenidos para el 2016 (OLI y MSI) con resoluciones espaciales específicas MSS (60 m), TM, ETM+, OLI (30 m), MSI (10 m y 20 m). Se empleó un modelo de elevación digital ASTER (ASTER GDEM-v2) (30 m). Datos de GLIMS se aplicaron para calcular límites de cada glaciar bajo sombra proyectada. Los extremos de cada glaciar se calcularon mediante algoritmos automáticos, se evaluaron mediante imágenes disponibles de Google-Earth y para identificar la existencia de lagos y arroyos de glaciar. Se usaron el índice de nieve de diferencia normalizada ($\text{NDSI} = [\text{verde} - \text{SWIR}] / [\text{verde} + \text{SWIR}]$) y la imagen de relación de bandas (NIR/SWIR) eficientes para mapear cada glaciar libre de escombros y se usaron imágenes OLI y MSI. También imágenes de Sentinel-2 presentaron longitudes de onda válidas para calcular el NDSI. Se usó el valor de 0.2 como umbral de la NDSI derivada de MSI, para delimitar cada glaciar. Así se calculó la distribución de cada superficie glaciaria en función de sus rangos de elevación, su orientación y topografía aplicando ASTER GDEM.

Investigaciones efectuadas por entidades estatales. A continuación, se presenta una relación de programas informáticos más empleados por entidades como ANA, Instituto Nacional de Investigación de Glaciares y Ecosistema de Montaña (INAIGEM) entre otros, los que aparece en el Manual metodológico de inventario nacional de glaciares (INAIGEM, 2017).

Tabla. 2 Principales programas informáticos (software) para el inventario de glaciares

Línea	Procesos	Programas
Sistema de Información Geográfica	Sistematización de carta geográficas	ARCGIS, QGIS, GvSIG, SAGAGIS, ORFEO, SNAP
Sistema de Información Geográfica	Delimitación del ámbito de estudio	
Sistema de Información Geográfica	Obtención de cobertura glaciar -Normalized Difference Snow Index (NDSI)	
Sistema de Información Geográfica	Determinación de parámetros y caracterización de glaciares	
Sistema de Información Geográfica	Base de datos del inventario de glaciares	
Sistema de Información Geográfica	Elaboración de mapas temáticos	
Teledetección	Procesamiento de imágenes de satélite	ENVI ERDAS IMAGINE
Teledetección	Adecuación y generación de modelos digital de Elevación (MDE) y derivados	
Teledetección	Análisis multitemporal	

Asimismo, establece las condiciones de procesamiento con las imágenes satelitales, tales como resolución espacial, bandas espectrales con fines del inventario y de su evaluación temporal.

Tabla 3 Características de resolución y bandas espectrales de las herramientas satelitales

IMAGEN SATELITAL	Resolución Espacial (m)	Bandas espectrales	Objetivo
Sentinel-2	10 y 20 m Spot, Áster y/o equivalentes, con múltiples bandas espectrales para desarrollar el inventario; las cuales deben cumplir con los siguientes criterios: Descarga Gratuita.	Múltiples fecha de toma (entre los meses de mayo y setiembre), % de nubosidad (menor a 10%) y nieve temporal (escasa o nula).	Desarrollar el inventario
Aster, Landsat, Resourcesat, Rapideye y otros para la evaluación y análisis multitemporal,	≥ 30 m de acuerdo con el requerimiento del inventario.		Evaluación y análisis multitemporal

Este manual describe el uso de los software, así como los requerimientos del sistema de referencia geodésica, recopilación, adecuación y producción de dato geo referenciado mediante el procesamiento de imágenes satelitales para luego efectuar el mapeo de los glaciares de la cordillera del Perú.

En la tabla se muestra un caso de adecuación y generación de información a partir de modelo digitales o algoritmos disponibles a nivel mundial.

Tabla 4 Parámetros de adecuación y generación de información.

ADECUACIÓN Y GENERACIÓN DE INFORMACIÓN				
Modelos digitales de elevación	Modelos digitales de elevación del sensor ALOS-PALSAR de resolución espacial de 12.5 m o equivalente para realizar el inventario	Adquisición de MDE de 30 m, en caso lo amerite,	Para adecuar y mejorar los errores o completar la falta de datos del MDEALOS-PALSAR.	Modelo digital de elevación Modelo digital de sombras Modelo digital de pendiente Modelo digital de orientación

OE3: Estado de desglaciación

Continuación se presenta los resultados obtenidos como consecuencia de las revisiones bibliográficas efectuadas. La tabla 1 se muestra los hallazgos encontrados en las investigaciones internacionales. Como es de esperanzarse

todas confluyen en un retroceso glacial medido bajo los distintos métodos y herramientas satelitales (Tabla 5).

Tabla 5. Estado de desglaciación según artículos de investigación revisados

Cordillera/glacial		Descripción	Unidad de Investigación
1.	Quelccaya (CV)	Quelccaya (1975)= 58.9 km ² a (2010) 40.8 km ² , pérdida de 31%. A este ritmo, la capa de hielo desaparecería en aproximadamente 80 años o para 2090	Albert (2014)
2.	Quelccaya (CV)	Análisis del estado futuro de la capa de hielo de Quelccaya (QIC): Calentamiento aproximado 2.4 ° C y 5.4 °. A mediados del 2050 la ELA (línea de equilibrio de hielo) se elevara y todas las montañas similares a ella también lo harán.	Yarleque et al. (2018)
3	Quelccaya (CV)	Desde 1988 la superficies áreas glaciares CV (361 km ²) disminuyeron a una tasa de 3.99 ± 1.15 km ² año ⁻¹ . Desde 1980, el casquete glacial de Quelccaya (63.1 km ²) disminuyó a una tasa de 0.57 ± 0,10 km ² año ⁻¹ . Las tasas de disminución para cada región de glaciares se aceleraron entre 2000-2010. Glaciares elevadas (5200 m) se están retirando a mayores alturas (tasa: ~ 1 m año ⁻¹) más rápido que otros elevados a 5400 m.	Hanshaw et al (2014)
4	CV	Cordillera Vilcanota (CV): en 1970, tenía una superficie glacial de 418 km ² y Coropuna (82.7 km ²). Cobertura de la Cordillera Vilcanota: 1985 (443.6 km ²), 1996 (343.7 km ²) y 2006 (296,6 km ²), Perdida (1985-1996) = 99.9 km ² (tasa= 9 km ² año ⁻¹ y pérdida (1996-2006)= 47.1 km ² (4.7 km ² año ⁻¹)	Albert (2014)
5	CB	Cordillera Blanca, se estimó un área glacial inicial de 723,37 km ² (1962/1970) con una pérdida de área glacial de 22.4% entre 1970 a 2003 (568 km ²).	Albert (2014)
6	CB	Cordillera Blanca en 2010 (área total glacial= 482 km ²) con pérdida de 25% desde 1987. Los glaciares con menores elevaciones medias perdieron mayor porcentaje de área entre 1987-2010. Tasa de perdida glacial (2004-2010) > 3.5 tasa (1970-2003).	Burns y Nolin (2014).
7	CB	Cambios en el área glacial (1975-2016). Los glaciares disminuyeron 33,5% en la Cordillera Blanca (1975-2016) de 726 ±20.3 km ² a 482.8±7.4 km ² .	Veettil et al. (2018)
8	CB	Desde 1930 cuando los glaciares cubrieron 830 km ² , la Cordillera Blanca ha perdido el 46% de su cobertura en 86 años.	Silverio Y Jaquet (2017)
9	CB-CV	El modelo CMIP5 reveló un fuerte aumento de la altura del nivel de congelación FLH hasta fines de este siglo de 230 m ± 190 m a 875 m ± 390. Por debajo de FLH las lluvias relacionadas con la ablación anual de la superficie de los glaciares suele ser muy alta controlando en el extremo del glacial, entonces los glaciares pequeños y medianos serán más impactada, ya que al menos la mitad de la superficie actual de glaciares desaparecerá a finales de este siglo.	Schauwecker, (2017)

10	Glaciar Shallap (CB)	Evaluaron una serie de tiempo (1980-2013) de datos atmosféricos (huella ENSO) relacionados al glaciar Shallap para identificar el mecanismo que influye sobre su estabilidad latitudinal y altitudinal, ya que los eventos de Niño/Niña implican un aumento/disminución de la temperatura del aire que conduce a una mayor/menor altitud de nevada y, por lo tanto, a un aumento/disminución del suministro neto de radiación de onda corta. Entonces, se espera una influencia de ENOS más fuerte para menores altitudes, pero aún se detecta altitudes más altas a través de cambios en la precipitación total. Se encontró una pequeña influencia de ENOS en el flujo de calor sensible, pero ninguna influencia significativa en la radiación neta de onda larga o en la sublimación.	Maussion et al. (2015)
11.	Glaciar de Llanganuco (CB)	En los valles proglaciales de la Cordillera Blanca, depósitos de astrágalo son un componente clave del sistema hidrológico. En la Cordillera Blanca los depósitos de astrágalo recolectan agua que fluye de las elevaciones más altas a lo largo de las paredes laterales de los valles y la liberan en elevaciones más bajas con un desfase de tiempo que es lo suficientemente largo para sostener el flujo de agua subterránea durante la estación seca, que se libera en manantiales ubicados en el fondo de los depósitos y en acuíferos no consolidados dentro del fondo del valle. Muchos manantiales se recargan con las precipitaciones, pero algunos también se alimentan con agua de deshielo	Baraer et al. (2014)
12	Glaciar de Quilcayhuanc a (CB)		Baraer et al. (2014)
13.	Glaciar de Yanamarey (CB)		Baraer et al. (2014)
14	Glaciar de Pumapampa (CB)		Baraer et al. (2014)
15	Nevados Caullaraju, Jenhuaracra, Condorjitanca, Huisco, Tuco y Pastoruri, Santon y Rajutuna (CB)	El rápido retroceso de los glaciares de la Cordillera Blanca está teniendo un impacto notable en la hidrología corriente, la evolución temporal del hielo limpio y el área total de glaciares entre 1975-2010 y 1957-2010 Se revelo una tendencia decreciente de 4.5 km ² /década, con una disminución total de 15.9 km ² de hielo limpio (55%) y 22.5 km ² del área total de glaciares (58%), en las últimas cuatro décadas.	Durán-Alarcón, et al. (2020)
16	Glaciar Jatunraju (CB)	Los núcleos de hielo glaciar de roca y la lengua glaciar cubierta de escombros se están derritiendo y degradando conforme aumenta el ELA. El ciclo de formación y extinción de lagos supraglaciales contribuye al derretimiento del hielo. Las velocidades superficiales de escombros disminuyeron de 4.82 m/año (1967-1968), 5.30 m/año (1977-1984), 1.0 m/año (2001-2013).	Emmer et al (2015)
17	nevado Tuco, (CB)	Cordillera Blanca: está retrocediendo a un ritmo alarmante desde finales de 1970. Mayor tasa de retiro en trópicos exteriores húmedos del sur y los trópicos interiores. Diferentes tasas de subida/caída de la línea de nieve se produce durante El Niño y La Niña. Se evidencio el porcentaje de pérdida de superficie de los glaciares entre 1975-2015: nevado Tuco (48.96%), y Nevado Coropuna (34.78%) con > tasa de retroceso glaciar (1975 – 1998: 20.43% y 34.18%)	Veettil et al. (2016 ^a)
18	Nevado Coropuna (CB)		
19	Nevado Tuco, glaciar Pastoruri (CB)	Las nevadas máximas anuales (SLAMax) de glaciares de la Cordillera Blanca (1984 y 2015), experimenta un rápido retroceso coincidente con eventos El Niño cuando son muy fuertes (ONI> 1,5), favorecido por la configuración climática regional, actividades volcánicas e irradiancia solar o cobertura de nubes. Glaciares con menor elevación fluctuaron más frente a los de mayor altitud. El aumento de la línea de nieve podría deberse en parte al calentamiento por lluvias en lugar de nevadas, aumento de la humedad que mejora el derretimiento en lugar de la sublimación durante el invierno austral	Veettil et al. (2016)

20	Qullqipunku (CV)	Reducción: aproximada 48% del área glaciar en la región norte de la Cordillera Vilcanota (1975-2015). Gradiente altitudinal en el retroceso glaciar: disminución significativa cerca del 81% del área glaciar inicial < 5000 msnm, la LE aumento. Alturas > a 5300 m s.n.m. son algo estables. Hay > tasas de retroceso en glaciares de las vertientes norte, noreste y este.	Veettil, Souza (2016).
21	Sinaqara (CV)		
22	Minasniyuq (CV)		
23	Anka Wachana (CV)		
24	Wilaquta (CV)		
25	Artesonraju (CB)	Altitudes de la línea de equilibrio (ELA) instrumental obtenido del glaciar Artesonraju en el período 2013-2014 (Autoridad Nacional del Agua, 2014) fue 5049 m, 115 m por debajo del ELA obtenido de este trabajo.	Concha et al. (2017)
26	Región andina de Per163	Se cuantificó extensiones de área de glaciares, cuerpos de agua y áreas urbanas en la cordillera andina (Perú). Plataforma GEE (1984 a 2018). Leve tendencia negativa global en los glaciares, con alta relación con los cuerpos de agua. Existen retrocesos diferentes entre glaciares, e incremento de zonas urbanas dependen dientes de glaciares para su abastecimiento	Turpo et al. (2020)
27	Cuenca Vilcanota-Urubamba-Vilcabamba	Base: 1988-2016. Proyección: 2050/2100 de glaciares/lagos (Cuenca Vilcanota-Urubamba). Volumen de glaciar disminuye 37.3 % (20,5%), de 226.1 km ² a 141.7 km ² (de 8,122 km ³ a 6457 km ³) entre 1988 y 2016. En 1988 se contaron 460 lagos de entorno (23.3 mk ²) a 544 lagos (26.9 km ²) en 2016. Con un aumento en volumen de 0.637 km ³ a 0.699 km ³ (9.7% incremento)	Drenkhan et al. (2018)
28	Conopuma (CV)	1962: Coropuna área glaciar=82.6 km ² , (2000=60.8 km ²), (1955)=122.7 km ²). Entre 1996 (63.5 km ²)-2003 (56.4 km ²), 1955-2003 perdido 66.3 km ² (54% perdido en 48 años)	Albert (2014)
29	Cuenca Querococha (CB)	En este estudio, investigamos los cambios en la superficie glaciar y la formación de lagos. Se usaron 24 imágenes Landsat de 1975 a 2014 y registro hidrológico relativamente corto (2002-2014), se detectó calentamiento de 0,21 ° C/década provocó: reducción glaciar de 3.5 a 1.4 km ² . Formación de nuevos lagos desglaciadas de 1.8 ha (1976) a 2.8 ha (2014). Correlación positiva: Tasas anuales de recesión entre glaciares-escorrentía.	López-Moreno et al. (2017).

Como se observa de acuerdo al cuadro uno de las unidades de mayor interés es el Casquete del Quelccaya, Yarleque et al 2018, analizó el estado futuro de la capa de hielo de Quelccaya (QIC), la más grande del mundo con una elevación de 5680 msnm, en esta oportunidad uso el modelo CMIP5 para temperatura del aire (Ta) y reporto un calentamiento entre 2,4°C y 5,4°C para dos tipos de escenarios a fines del siglo XXI. Esto quiere decir que la congelación se lograra para niveles de altura más elevadas a las normales (altura de nivel FLH). Las proyecciones fueron calculadas usando proyecciones de altitud de línea de equilibrio (ELA) cuantificadas por la relación empírica ELA-FLH y calibradas con la altitud anual más alta de la línea de nieve (SLA) obtenida de los datos LANDSAT. Entonces desde mediados de la década de

2050 en adelante, el ELA se ubicará por encima de la cumbre QIC en uno de los escenarios.

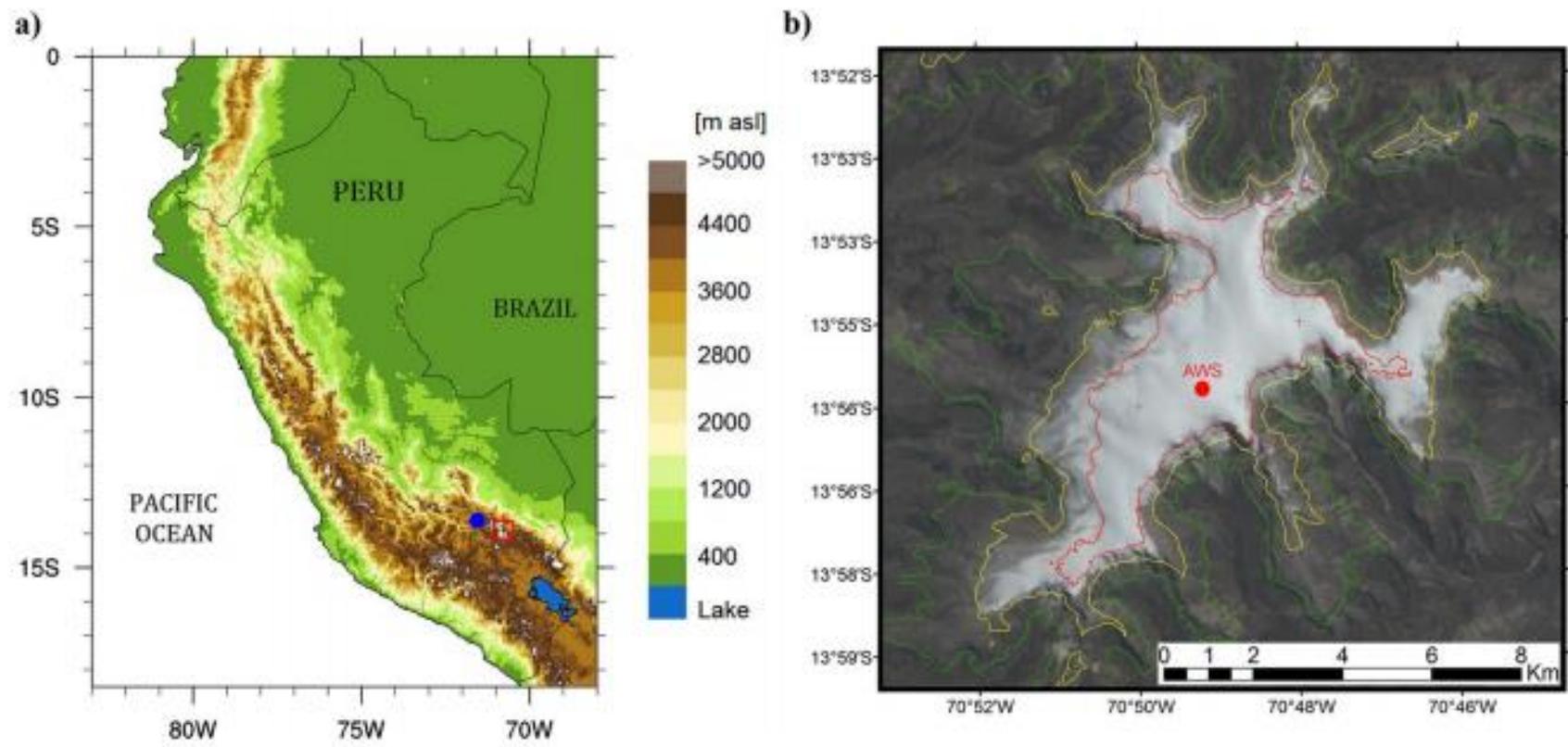


Figura 10. Ubicación del casquete glaciar de Quelccaya (a) Se representa la topografía de los Andes centrales en tono pardo y las ubicaciones de QIC (rojo), estación Ccatcca (azul). (b) Imagen LANDSAT 8 (bandas 4,3,2/RGB) de QIC (02/08/2017). Localización de AWS (rojo). Contornos verde (5100 m), amarillo (5300 m) y rojo (5500 m) de elevación. Fuente: Estudio de Yarleque et al. (2018)

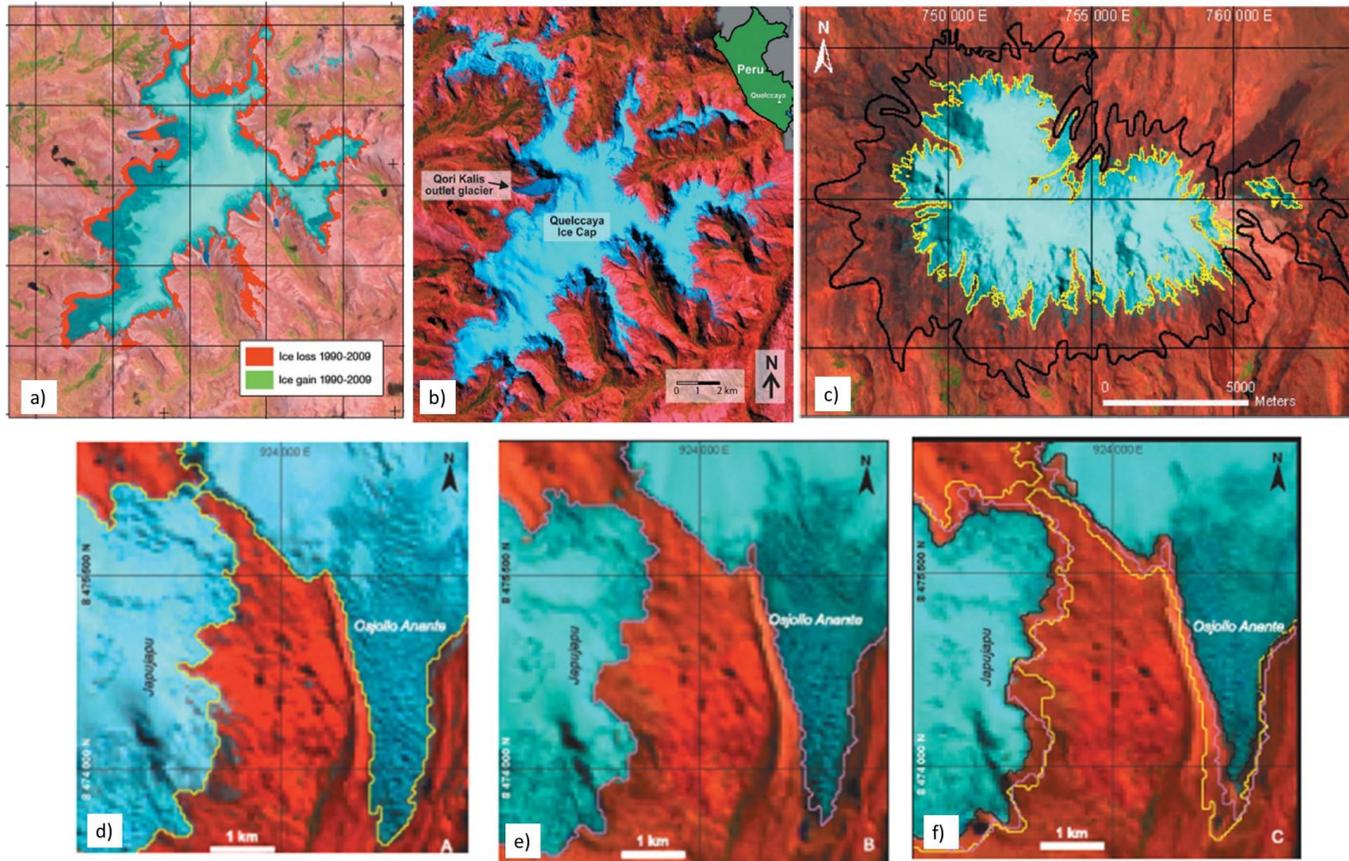


Figura 11. a). Capa de hielo perdida de Quelccaya derivada de una imagen Landsat TM de 1990 y una Imagen de 2009 TM. b) Imagen satelital de Quelccaya, c) Casquete glaciar del Nevado Coropuna entre 1955 (contorno negro) y 2003 (contorno amarillo; UTM zona 18 sur), d) Glaciar Japujapu y Glaciar Osjollo Anante (GJ-GOA) en 1985 (Amarillo), e) (GJ-GOA) en 1996 (violeta) y f) (GJ-GOA) en el 2006 (negro) (UTM, zona 18 sur) Landsat TM y ETM+ es imágenes multiespectrales ASTER. Fuente: Albert et al. (2014),.

Respecto a las investigaciones gubernamentales, el ANA, el INAIGEM, mantienen un programa permanente de medición de glaciares y estudios relacionados con la hidrodinámica de la cordillera, cuyos resultados se presenta a continuación:

Tabla 6. Número de glaciares y algunos glaciares cuantificadas por INAIGEM-ANA-MINAM (2018a)

Cordilleras	Departamentos	Glaciares	Lagunas
Blanca	Ancash	556	836
Huallanca	Áncash	57	71
Huayhuash	Áncash, Huánuco y Lima	96	101
Raura	Huánuco, Lima y Pasco	83	176
Huagoruncho	Huánuco y Pasco	40	621
La Viuda	Junín, Lima y Pasco	50	773
Central	Junín y Lima	137	818
Huaytapallana	Junín y Lima	94	948
Chonta	Huabcavelica y Junín	6	708
Ampato	Arequipa	60	101
Vilcabamba	Cusco	340	165
Urubamba	Cusco y Apurímac	111	303
Huanzo	Arequipa, Apurímac y Cusco	20	501
Chila	Arequipa	6	65
La Raya	Cusco y Puno	24	203
Vilcanota	Cusco y Puno	394	561
Carabaya	Cusco y Puno	153	1337
Apolobamba	Puno	77	212
Voñc{anica	Arequipa y Moquegua	0	15
Barroso	Moquegua, Puno y Tacna	0	53
Total		2274	8568

Desde el 2016 INAIGEM ha desarrollado la metodología del procesamiento del mapeo mediante herramientas satelitales y geoespaciales a partir de los datos colectados por distintas entidades gubernamentales aplicados a Modelos Digitales de Elevación (MDE) con resolución espacial de 12.5 conseguidos por el uso de imágenes ALOS-PALSAR. De acuerdo a las tablas preliminares mostradas, es importante tener en cuenta que las correcciones geométricas y la reflectancia al tope de la atmósfera (TOA), se ha logrado considerando: la mínima o nula presencia de nubes, usando la base el año 2016; imágenes

satelitales de alta resolución Google Earth para hielos cubiertos por detritos o escombros. La metodología describe la aplicación de imágenes satelitales Sentinel 2, para lo cual se optimizan valores de reflectancia debajo de la atmósfera (BOA), entre niveles 1C o 2A (L2A). En el 2018 el INAIGEM presenta un inventario actualizado de glaciares usando imágenes satelitales Landsat 2 MSS del año 1975, con superficies no coberturadas en el primer inventario. Uso además uso por convenio con el ANA, desde 2003 (publicada en el 2014) para la Cordillera Volcánica imágenes Aster del 2009 en su totalidad, y en las demás cordilleras uso imágenes Spot, Aster, Landsat y LISS III. Luego se ha trabajado con imágenes Sentinel -2 (2016) para, las Cordilleras Volcánica y Barroso, consideradas extintas en el análisis multiespectral.

De acuerdo a IMAIGEM (2018a), la evolución de las cordilleras, se muestra en la siguiente tabla:

Tabla 7. Pérdida de áreas glaciares calculadas por entidades gubernamentales y reanalizadas con imágenes desde 1962 a 2016.

		INAIGEM (REANALIZADO EN EL 2016, 1962)	MINAGRI- ANA (2003, 2007, 2009, 2010)	INAIGEM 2018 (2016)	INAIGEM (RE-ANALIZADO)
Nº	Cordillera	1962-1975	2014	2016	Pérdida glaciar (%)
1	Blanca	726.26	527.62	448.81	38.2
2	Huallanca	21.05	7.01	5.24	75.11
3	Huayhuash	86.89	55.27	53.06	39.93
4	Raura	55.31	28.34	25.63	53.68
5	Huagorucho	23.7	9.71	7.58	68.02
6	La Viuda	28.6	6.03	3.84	86.57
7	Central	117.2	51.91	42.44	63.79
8	Huaytapallana	68.05	26.4	21.42	68.52
9	Chonta	17.85	1.4	0.39	97.82
10	Ampato	146.73	60.96	50.05	65.89
11	Vilcabamba	261.45	129.15	101	61.37
12	Urubamba	76.16	26.39	23.54	69.09
13	Huanzo	39.31	4.51	2.91	92.6

14	Chila	33.89	0.93	0.19	99.44
15	LaRaya	11.27	3.06	1.9	83.14
16	Vilcanota	495.05	279.4	255.44	48.4
17	Carabaya	107.17	34.53	31.05	71.03
18	Apolobamba	83.12	45.25	39.63	52.32
19	Volcanica		0.72		
20	Barroso				

Fuente: INAIGEM 2018a

Del mismo modo se presentan los resultados del monitoreo de las lagunas cuantificadas o codificadas oficialmente

Tabla 8. Lagunas glaciares inventariadas por INAIGEM al 2018

Departamento	Lagunas	Superficie (Km ²)	Volumen estimado (Mm ³)	Altitud media (m.s.n.m.)
Ancash	924	60.31	1307.23	3670
Ancash/Huanuco	1	0.12	2.85	4465
Apurimac	199	8.64	166.52	4250
Arequipa	365	58.63	1468.18	3721
Ayacucho	132	59.51	1577.48	4125
Cusco	1294	164.65	4046.09	4372
Cusco/Puno	1	0.01	0.04	4810
Huancavelica	621	93.66	2331.37	4238
Huancavelica/Junin	2	0.15	3.33	4651
Huanuco	444	41.77	961.84	4156
Ica	1	0.04	0.71	4485
Junin	1442	133.87	3101.21	4035
Lima	971	81.4	1876.94	3032
Lima/Huancavelica	1	0.01	0.02	4740
Lima/Junin	4	0.05	0.19	4775
Moquegua	25	27.28	735.02	4725
Pasco	574	98.08	2448.5	4128
Puno	1543	164.12	3915.93	4154
Tacna	24	20.18	540.57	4133
Totales	8568	1013.36	24487.02	

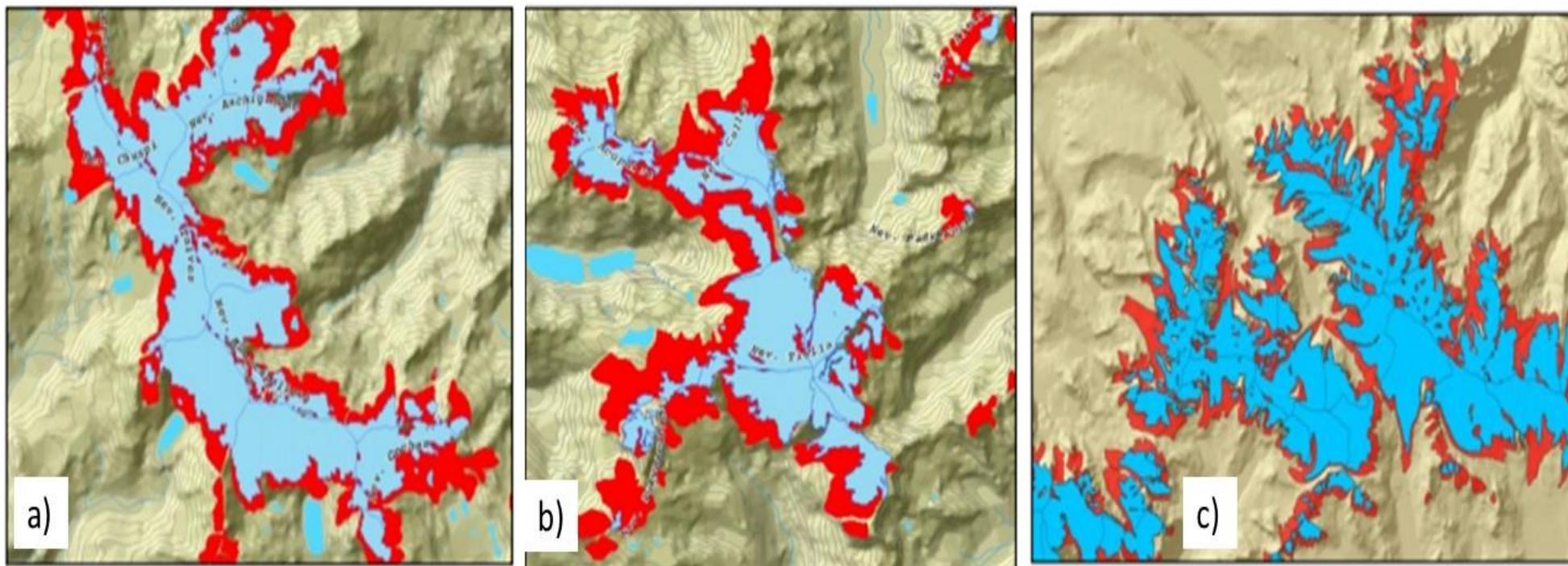


Figura 12. Reducción de superficie glaciar entre 1970 y 2007 en a) Nevado: Tales, Chuspi, Anchigrande, Huaytapallana y Cochas, b) Ticlla y Cullec, c) Vilcanota. Fuente: ANA, 2014

V. CONCLUSIONES

OG: Se han revisado los distintos estudios realizados en los últimos años por diversos investigadores internacionales, se identificaron el uso principalmente de satélites de la NOAA Landsat, otros SPOT, etc, radares para cuantificar la desglaciación y formación de lagos, los métodos han sido similares a nivel nacional, de tal forma que se han encontrado resultados similares a los aplicados mediante metodología nacional, en este caso existe una guía nacional siendo el ente rector de estos estudios la ANA. Los hallazgos han indicado que en este siglo es posible la desaparición de gran parte de los glaciares del Perú. Sin embargo surgen nuevas oportunidades por la generación de lagunas. Dentro de la gestión de los recursos hídricos debe considerarse programas prioritarios para disminuir los riesgos de desastres ante este cambio climático. También se han visualizado nuevas oportunidades de desarrollo socio-económico como nuevas rutas de montaña turística se pueden desarrollar.

OE1: Se ha determinado los Sistemas De Teledetección Espacial usados para estimar la desglaciación en la cordillera de los andes del Perú, de acuerdo a la revisión el 50% de las investigaciones respecto a la extensión del glaciar de la cordillera de los Andes comprendieron la aplicación de datos del Satélite Landsat, mientras que un porcentaje menor aplico el Satellite ASTER y aplicaciones de una combinación de sistemas tales como ASTER/Landsat, Aster/Sentinel entre otros. La mayoría de los sistemas corresponde a satélites de la NOAA y cooperaciones internacionales con la Unión Europea, Japón y Francia entre otros.

OE2. Se ha analizado métodos de procesamiento de imágenes satelitales usado para estudiar la desglaciación en la Cordillera de los Andes de Perú. Se usa el espectro visible al infrarrojo cercano (VNIR) y el infrarrojo de onda corta (SWIR), como TM4 / TM5. Hay que destacar a las imágenes multiespectrales, Landsat Multispectral Scanner (MSS), Thematic Mapper (TM), Enhanced Thematic Mapper Plus (ETM +), Advanced Spaceborne Thermal Emission, Radiómetro de Reflexión (ASTER), e imágenes de Corona KH-9 desclasificadas. Aplicaron un Modelo de elevación digital (DEM) del radar de

lanzadera (SRTM) 2000 y el de ASTER (GDEM V1 y V2). LANDSAT 7 ETM + y LANDSAT 8 OLI (2001, 2013) para procesar la velocidad superficial de cubrimiento de escombros, bandas pancromáticas (LANDSAT 8-OLI) y rectificadas con el LANDSAT 7 ETM + y calcularon valores de desplazamiento y vectores de velocidad. Los métodos incluyen la obtención de cobertura glaciaria

-Normalized Difference Snow Index (NDSI). Adecuación y generación de modelos digital de Elevación (MDE) y derivados. Programas de ARCGIS, QGIS, GvSIG, SAGAGIS, ORFEO, SNAP. ENVI ERDAS IMAGINE

OE3 Se ha analizado el estado de desglaciación de los andes peruanos hallando 2274 áreas glaciares existentes destacando que la cordillera Blanca ha experimentado la pérdida del 38.2% pero a nivel nacional se ha producido una desglaciación promedio austera del 68% que podría ser mayor.

OE4 Se ha identificado los inventarios nacionales de glaciares y lagos formados en los andes del Perú de lo cual destaca el incremento de las lagunas glaciares por causa de la desglaciación de los nevados, en la actualidad se cuenta con 8568 lagunas de una extensión total de 1013.36 Km² y un volumen de 24487 Mm³.

VI. RECOMENDACIONES

Los estudios señalan la desaparición de la mayor parte de los glaciares y de la formación de lagunas o el incremento de nivel de las ya existentes, esto significa el surgimiento de desastres debido a inundaciones de los sitios poblados adyacentes, resulta imperativo optimizar las iniciativas gubernamentales en alianza con los entes académicos y de la población a sistematizar también las áreas de mayor riesgo para establecer programas que involucren acciones para no dejar en el desamparo por la escases de agua que también ocurrirá y no solo a los pobladores aledaños, sino también con las poblaciones que viven en áreas lejanas pero que reciben el agua gracias a los programas de captación y distribución.

REFERENCIAS

- Albert, T., Klein, A., Kincaid, J. L., Huggel, C., Racoviteanu, A. E., Arnaud, Y., Silverio, W. y Ceballos, J. L. (2014). Remote sensing of rapidly diminishing tropical glaciers in the northern Andes. En Kargel, J. S., Leonard, G. J., Bishop, M. P., Kääb, A., Raup, B. H. (Eds). Global land ice measurements from space, 609-638. Berlín y Heidelberg, SpringerVerlag [en línea].2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-540-79818-7_26
- AGUILAR-LOME, J., ESPINOZA-VILLAR, R., ESPINOZA, J.-C., ROJAS-ACUÑA, J., WILLEMS, B y LEYVA-MOLINA, W.-M. Calentamiento de las temperaturas de la superficie terrestre en los Andes, dependiente de la elevación, evaluado utilizando la serie de tiempo MODIS LST (2000-2017). Revista Internacional de Geoinformación y Observación Aplicada de la Tierra, n.º77, pp. 119–128. [en línea].2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi: 10.1016 / j.jag.2018.12.013](https://doi.org/10.1016/j.jag.2018.12.013)
- ANA. Sf. Inventario Nacional de Glaciares. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://www.ana.gob.pe/portal/gestion-del-conocimiento-girh/inventario-nacional-de-glaciares>
- ASOKAN Anju, J. Anitha, Monica Ciobanu, Andrei Gabor, Antoanela Naaji and D. Jude Hemanth . Image Processing Techniques for Analysis of Satellite Images for Historical Maps Classification—An Overview. Appl. Sci. 2020, 10(12), 4207; <https://doi.org/10.3390/app10124207>
- BARAER, M., MCKENZIE, J., MARK, B. G., GORDON, R., BURY, J., CONDOM, T., ... FORTNER, S. K. Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: a multi-site study in the tropical Cordillera Blanca, Peru. Hydrological Processes, n.º29, pp. 2561–2581. [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi:10.1002/hyp.10386](https://doi.org/10.1002/hyp.10386)
- BRAUN, M. H., MALZ, P. H., SOMMER, C. H., FARÍAS-BARAHONA, D., SAUTER, T., CASASSA, G., et al. Constraining glacier elevation and mass changes in South America. Nat. Clim. Change, n.º9, pp. 130–136. [en

línea]. 2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi: 10.1038/s41558-018- 0375-7>

BURGER, F., AYALA, A., FARIAS, D., MACDONELL, S., SHAW, T., BROCK, B., et al. Interannual variability in glacier contribution to runoff from high-elevation Andean catchments: understanding the role of debris cover in glacier hydrology. *Hydrol. Process*, n.º 33, pp. 214–229. [en línea].2019 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi: 10.1002/hyp.13354>

BURNS, P., & NOLIN, A. Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010. *Remote Sensing of Environment*, n.º140, pp.165–178. [en línea]. (2014). [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en

CARRIVICK, J. L., DAVIES, B. J., JAMES, W. H. L., QUINCEY, D. J., and GLASSER, N. F. Distributed ice thickness and glacier volume in southern South America. *Glob. Planet. Change*, n.º 146, pp. 122–132. [en línea].2016. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi: 10.1016/j.gloplacha.2016.09. 010>

CNES. Sf. <https://cnes.fr/fr/>

Concha, R., Palomino, A., Astete, I., Iparraguirre, J., Úbeda, J., Vásquez, E. Evolución glaciaria a finales del Holoceno en glaciares de la cuenca Parón (Cordillera Blanca – Ancash). *International Congress on Climate Change and its Impacts*, 1, Huaraz-Ancash, PE, Abstracts Volume. [en línea]. Nov. 2017. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://hdl.handle.net/20.500.12544/1064>

CORDERO, R. R., ASECIO, V., FERON, S., et al. (2019). Dry-season snow cover losses in the andes (18°–40° S) driven by changes in large-scale climate modes, n.º 9. [en línea].2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi: 10.1038/s41598-019-53486-7>

CORTÉS, G., and MARGULIS, S. Impacts of El Niño and La Niña on interannual snow accumulation in the Andes: Results from a high-resolution 31 year reanalysis. *Geophys. Res.*, n.º44, pp. 6859–6867. [en línea].2017. [

Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi: 10.1002/2017gl073826](https://doi.org/10.1002/2017gl073826)

CORTÉS, G., GIROTTO, M., and MARGULIS, S. (2016). Snow process estimation over the extratropical Andes using a data assimilation framework integrating MERRA data and Landsat imagery. *Water Resour. Res.*, n.º 52, pp. 2582–2600. [en línea].2016. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi: 10.1038/s41598-019-53486-7](https://doi.org/10.1038/s41598-019-53486-7)

DRENKHAN, F., GUARDAMINO, L., HUGGEL, C., & FREY, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Global and Planetary Change*, n.º169, pp. 105–118. [en línea].2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: [https// doi:10.1016/j.gloplacha.2018.07.005](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005)

DRENKHAN, F., GUARDAMINO, L., HUGGEL, C., and FREY, H. (2018). Current and future glacier and lake assessment in the deglaciating Vilcanota-Urubamba basin, Peruvian Andes. *Glob. Planet.* n.º 169, pp. 105–118. [en línea].2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi: 10.1016/j.gloplacha. 2018.07.005](https://doi.org/10.1016/j.gloplacha.2018.07.005)

DURÁN-ALARCÓN, Claudio, GEYAERT, Carolina, MATTAR, Cristian, JIMENEZ, Juan, PASAPERA-GONZALES, José, SOBRINO, José, SILVA-VIDAL, Yamina, FASHE-RAYMUNDO, Octavio, CHAVEZ-ESPÍRITU, Tulio, SANTILLA-PORTILLA, Nelson. Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery n.º59 pp. 19-26[en línea].April, 2015 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.jsames.2015.01.006>

DUSSAILLANT, I., BERTHIER, E., BRUN, F., MASIOKAS, M., HUGONNET, R., and FAVIER, V. Two decades of glacier mass loss along the Andes. *Nat.* n.º 12, pp. 802–808. [en línea].2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https// doi: 10.1038/s41561-019-0432-5](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0432-5)

EMMER, A., VILÍMEK, V., KLIMES, J., COCHACHIN, A., (2014) Glacier retreat, lakes development and associated natural hazards in Cordillera Blanca,

Peru. In: Shan W et al (eds) Landslides in cold regions in the context of climate change, environmental science and engineering. Springer, New York, pp 231–252. [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en

EMMER, Adam, LOARTE, Edwin, KLIMES, Jam., VILÍMEK, Vít. Recent evolution and degradation of the bent Jatunraju glacier (Cordillera Blanca, Perú) n.º 228, pp. 345-355 [en línea] January 2015, [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2014.09.018>

ESPINOZA, J. C., GARREAUD, R., POVEDA, G., ARIAS, P. A., MOLINACARPIO, J., MASIOKAS, M., et al. Hydroclimate of the andes part I: main climatic features. *Front. Earth Sci.* n.º 8, p. 64. [en línea].2020. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi: 10.3389/feart.2020.00064](https://doi.org/10.3389/feart.2020.00064)

EUILLADES, L., EUILLADES, P., RIVEROS, N., MASIOKAS, M., RUIZ, L., PITTE, P., et al. Detection of glaciers displacement time-series using SAR. *Remote Sens.* n.º 184, pp. 188–198. [en línea].2016. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi: 10.1016/j.rse.2016.07.003](https://doi.org/10.1016/j.rse.2016.07.003)

FARINOTTI, D., HUSS, M., FÜRST, J. J., LANDMANN, J., MACHGUTH, H., MAUSSION, F., et al. A consensus estimate for the ice thickness distribution of all glaciers on Earth. *Nat.* n.º 12, p.168. [en línea].2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https:// doi: 10.1038/s41561-019-0300-3](https://doi.org/10.1038/s41561-019-0300-3)

GIRALDEZ, C., PALACIOS D., HAEBERLI, W., UBEDA, J., SCHAUWECKER, S, TORRES. J. Glacier changes since Local Last Glacial Environ *Earth Sci* 123 Maximum in the South-West slope of Nevado Hualcaín, Cordillera Blanca, Peru, deduced from moraine mapping and GISbased analysis. *Geophysical Research Abstract*, EGU2014- 7350,n.º 16, [en línea]. 2014

[Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://meetingorganizer.copernicus.org/EGU2014/EGU2014-7340.pdf>

HAMMOND, J. C., SAAVEDRA, F. A., and KAMPF, S. K. Global snow zone maps and trends in snow persistence 2001–2016. *Int. J. Climatol.* n.º38, pp. 4369–4383. . [en línea].2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https// doi: 10.1002/joc.5674](https://doi:10.1002/joc.5674)

HANSHAW, M. N., & BOOKHAGEN, B. 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*, n.º 8, pp. 359–376. [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi:10.5194/tc-8-359-2014](https://doi:10.5194/tc-8-359-2014)

HAUWECKER, S., ROHRER, M., HUGGEL, C., ENDRIES, J., MONTOYA, N., NEUKOM, R., ... SUAREZ, W. The freezing level in the tropical Andes, Peru: An indicator for present and future glacier extents. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, n.º 10, pp. 5172–5189. [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: [https//doi:10.1002/2016jd025943](https://doi:10.1002/2016jd025943)

INAIGEM. Informe de la Situación de los glaciares y Ecosistemas de Montaña. [en línea]. 2018b [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://www.inaigem.gob.pe/wp-content/uploads/2019/04/Informe-2018-v33-formato-digital.pdf>

INAIGEM. Inventario Nacional de glaciares. Las Cordilleras Glaciares del Perú. Huaraz. [en línea]. 2018a [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en http://sigrid.cenepred.gob.pe/sigridv3/storage/biblioteca//5176_inventario-nacional-de-glaciares-las-cordilleras-glaciares-del-peru.pdf

INAIGEM. Manual metodológico de inventario nacional de glaciares. [en línea]. 2017 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en https://cdn.www.gob.pe/uploads/document/file/913161/Manual_Metodologico_o_de_Inventario_Nacional_de_Glaciares.pdf

- IPCC, 2013: Glosario [Planton, S. (ed.)]. En: Cambio Climático 2013. Bases físicas. Contribución del Grupo de trabajo I al Quinto Informe de Evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático [Stocker, T.F., D. Qin, G.-K. Plattner, M. Tignor, S.K. Allen, J. Boschung, A. Nauels, Y. Xia, V. Bex y P.M. Midgley (eds.)]. Cambridge University Press, Cambridge, Reino Unido y Nueva York, NY, Estados Unidos de América. [en línea].2001. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en https://www.ipcc.ch/site/assets/uploads/2018/08/WGI_AR5_glossary_ES.pdf
- KADMON, R. (2001). Detección remota y procesamiento de imágenes. Enciclopedia de la Biodiversidad, pp. 121-143. [en línea].2001. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https://doi:10.1016/b0-12-226865-2/00232-7](https://doi.org/10.1016/b0-12-226865-2/00232-7)
- KLIMES, J., BENESOVA, M., VILÍMEK, V, BOUSKA, P., COCHACHIN, A. The reconstruction of a glacial lake outburst flood using HECRAS and its significance for future hazard assessments: an example from Lake 513 in the Cordillera Blanca, Peru. *Natural Hazards* 71(3):1617–1638. [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://link.springer.com/article/10.1007%2Fs11069-013-0968-4>
- LABRADOR, M., ÉVORA, J., ARBELO, M. 2012. Satélites de detección para la gestión del territorio. SATELMAC, Programa de Cooperación Transnacional Madeira - Azores- Canarias -2007-2013 (PCT-MAC). ISBN: 13:978-84-695-3276-8 [en línea].2012. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <http://www.comunidadism.es/herramientas/satelites-de-teledeteccion-para-la-gestion-del-territorio>
- LOGROÑO, S., LÓPEZ, C., MOYANO, M Y OYAGUE, E. El alcance de la teledetección satelital utilizando modelos estadísticos y físicos y sus beneficios en áreas contables. *Dom. CienVol.* N.º 2, pp. 25-40 abril-junio 2020, ISSN: 2477-8818 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <http://dx.doi.org/10.23857/dc.v6i2.1142>

- LÓPEZ-MORENO, J., VALERO-GARCÉS, B., MARK, B., CONDOM, T., REVUELTO, J., AZORÍN-MOLINA, C.,... ALEJO-COCHACHIN, J. (2017). Hydrological and depositional processes associated with recent glacier recession in Yanamarey catchment, Cordillera Blanca (Peru). *Science of The Total Environment*, n.º 579, pp. 272–282. [en línea].2017. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: [https://doi: 10.1016/j.scitotenv.2016.11.107](https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.11.107)
- MAUSSION, F., W. GURGISER, M. GROßHAUSER, G. KASER & B. MARZEION. ENSO influence on surface energy and mass balance at Shallap Glacier, Cordillera Blanca, Peru. *The Cryosphere*, 9: 1663-1683. [en línea]. Abril-Agosto, 2015. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.5194/tc-9-1663-2015>
- MERTIKAS, S. P., PARTSINEVELO, P., MAVROCORDATOS, C., & MAXIMENKO, N. A. (2021). Environmental applications of remote sensing. *Pollution Assessment for Sustainable Practices in Applied Sciences and Engineering*, 107–163. [en línea]. Abril-Agosto, 2015. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-809582-9.00003-7>
- MUÑOZ, P. Apuntes de Teledetección: Fusión de Imágenes. Centro de información de recursos naturales. Ministerio de Agricultura Gobierno de Chile. [en línea]. 2013. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://www.minagri.gob.pe/portal/objetivos/42-sector-agrario/recurso-agua/328-glaciares>
- NASA. Sf. <https://landsat.gsfc.nasa.gov/landsat-9/oli-2-design>
- SIVANPILLAI Ramesh. 2017. No-cost landsat data redefines student research projects in applied remote sensing classes at uw. *Conference Papers & Proceedings. The International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences*, Volume XLII-3/W11, 2020 PECORA 21/ISRSE 38 Joint Meeting, 6–11 October 2019, Baltimore, Maryland, USA. <https://search.proquest.com/openview/648e24d8b01b12c74d13c766b92cb515/1?pq-origsite=gscholar&cbl=2037674>

- REINTHALER, J., Paul, F., GRANADOS, H., RIVERA, A., and HUGGEL, C. Area changes of glaciers on active volcanoes in Latin America between 1986 and 2015 observed from multi-temporal satellite imagery. *J. Glaciol*, n.º65, pp. 542–556. [en línea]. 2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi:10.1017/jog.2019.30>
- RUIZ, L., BERTHIER, E., MASIOKAS, M., PITTE, P., and VILLALBA, R. First surface velocity maps for glaciers of Monte Tronador, North Patagonian Andes, derived from sequential Pléiades satellite images. *J. Glaciol*, n.º 61, pp. 908–922. [en línea]. 2015. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi:10.3189/2015JoG14J134>
- SAAVEDRA, F. A., KAMPF, S. K., FASSNACHT, S. R., and SIBOLD, J. S. Changes in Andes snow cover from MODIS data, 2000–2016. *Cryosphere*, n.º 12, pp.1027–1046. . [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi:10.5194/tc-12-1027-2018>
- SAAVEDRA, F. A., KAMPF, S. K., FASSNACHT, S. R., and SIBOLD, J. S. (2017). A snow climatology of the Andes Mountains from MODIS snow cover data. *Int. J. Climatol*, n.º37, pp. 1526–1539. [en línea]. 2015. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi:10.1002/joc.4795>
- SAGREDO, E., RUPPER, S., LOWELL, T. Sensitivities of the equilibrium line altitude to temperature and precipitation changes along the Andes. *Quat Res*, n.º 81, pp. 355–366. [en línea]. 2014. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi:10.1016/j.yqres.2014.01.008>
- SCHAUWECKER, S., ROHRER, M., ACUNA, D., COCHACHIN, A., DAVILA, L., FREY, H., GIRALDEZ C, GOMEZ, J., HUGGEL, C., COPER, M., LOARTE, E., SALZMANN, N., VUILLE, M. Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited. *Glob Planet Chang*, n.º 119, pp. 85–97. [en línea]. 2014. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi:10.1016/j.gloplacha.2014.05.005>
- SCHNEIDER, D., HUGGEL, Ch., COCHACHIN, A., GUILLE´N, S., GARCÍA, J. Mapping hazards from glacier lake outburst floods based on modelling of

process cascades at Lake 513, Carhuaz, Peru. *Adv Geosci* , n.º 35 pp.145–155. [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://www.gaphaz.org/files/publications/schneider_etal_laguna513_adgeo14.pdf

SCHOOLMEESTER, T., JOHANSEN, K. S., ALFTHAN, B., BAKER, E., HESPING, M., and VERBIST, K. *The Andean Glacier and Water Atlas – The Impact of Glacier Retreat on Water Resources*. Arendal: UNESCO and GRID-Arendal. [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://unesdoc.unesco.org/ark:/48223/pf0000265810>

SILVERIO, W., JAQUET, J. Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 and 2016 in the context of ENSO, n.º 69, p. 145-162 [en línea]. 2017 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://archive-ouverte.unige.ch/unige:98197>

SILVERIO, Walter, JAQUET, Jean-Michel. Evaluating glacier fluctuations in Cordillera Blanca (Peru) by remote sensing between 1987 and 2016 in the context of ENSO. *Archives des Sciences*, n.º69, pp. 145-162. [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: https://www.unige.ch/sphn/Publications/ArchivesSciences/AdS%202017/PDF%20MRes%2069-2/145-162_Silverio_69-2.pdf

SORIA, M., y MATAR, M. 2016. *Nociones Sobre Teledetección*. Laboratorio de Procesamiento de Imágenes y SIG Instituto de Investigaciones Mineras Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional de San Juan. <http://www.unsj.edu.ar/unsjVirtual/cartografiaaplicadaminas/wp-content/uploads/2016/10/Apuntes-de-c%C3%A1tedra-para-Cartograf%C3%ADa-Aplicada.pdf>

TROMBOTTO, L. (2014). Environmental Status of the Cryogenic Permafrost Conditions in the Last Decade in the Central Andes, one Example. Mendoza: IANIGLA – CCT CONICET, 27–29. [en línea]. 2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://globalcryospherewatch.org/meetings/sacryonet2014/presentations/CryoNet%20South%20America%20DTL.pdf>

- TURPO, E., ESPINOZA, Raúl., RÍOS, S., MORENO C. Mapeo Multitemporal De Cuerpos De Agua Y Área Urbanas En Los Andes Del Perú Usando Imágenes Landsat En La Plataforma Google Earth Engine, Periodo 1984-2018. Anais do XIC Simpósio Brasileiro de Sensoriamento Remoto. ISBN: 978-17-00097-3[en línea].2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://proceedings.science/sbsr-2019/papers/mapeo-multitemporal-de-cuerpos-de-agua-y-areas-urbanas-en-los-andes-del-peru-usando-imagenes-landsat-en-la-plataforma-go?lang=en>
- VEETTIL, B., BREMER, U., SOUZA, S., MAIER, E., SIMOES, J., (2015b) Variations in annual snowline and area of an ice-covered stratovolcano in the Cordillera Ampato, Peru, using remote sensing data (1986-2014). Geocarto Int. [en línea]. 2015b [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1080/10106049.2015.1059902>
- VEETTIL, B., BREMER, U., SOUZA, S., MAIER, E., SIMOES, J. Influence of ENSO and PDO on mountain glaciers in the outer tropics: case studies in Bolivia. Theoretical and Applied Climatology. [en línea]. 2015a [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00704-015-1545-4>
- VEETTIL, B., MAIER, E., BREMER, U., SOUZA, S. Combined influence of PDO and ENSO in northern Andean glacier: a case study on the Cotopaxi ice-covered volcano, Ecuador. Clim Dyn, n.º43, pp. 3439– 3448. [en línea]. 2014. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1007/s00382-014-2114-8>
- VEETTIL, B. K. (2018). Glacier mapping in the Cordillera Blanca, Peru, tropical Andes, using Sentinel-2 and Landsat data. Singapore Journal of Tropical Geography. [en línea].2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: <https://doi.org/10.1111/sjtg.12247>
- VEETTIL, B. K., & KAMP, U. Remote sensing of glaciers in the tropical Andes: a review. International Journal of Remote Sensing, n.º 23, pp. 7101–7137 [en línea]. 2017 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://doi.org/10.1080/01431161.2017.1371868>

- VEETTIL, B. K., and KAMP, U. Remote sensing of glaciers in the tropical Andes: a review. *Int. J. Remote Sens*, n.º 38, pp. 7101–7137. [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi: 10.1080/01431161. 2017.1371868](https://doi: 10.1080/01431161. 2017.1371868)
- VEETTIL, B. K., WANG, S., BREMER, U. F., DE SOUZA, S. F., & SIMÕES, J. C. (2016). Recent trends in annual snowline variations in the northern wet outer tropics: case studies from southern Cordillera Blanca, Peru. *Theoretical and Applied Climatology*, n.º 129, pp. 213–227. [en línea]. 2016 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi:10.1007/s00704-016-1775-0](https://doi:10.1007/s00704-016-1775-0)
- VEETTIL, B., & DE SOUZA, S. F. Study of 40-year glacier retreat in the northern region of the Cordillera Vilcanota, Peru, using satellite images: preliminary results. *Remote Sensing Letters*, n.º 8, pp. 78–85. [en línea]. 2016 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi:10.1080/2150704x.2016.1235811](https://doi:10.1080/2150704x.2016.1235811)
- VEETTIL, B., RUIZ, S., WANG, S., VALENTE, P., BICA, A., BECERRA, Adriana., REKOWSKY, I., FLORENCIO, S., BIANCHINI, N., BREMER, U., CARDIA, J. Un análisis comparativo del retroceso glaciar en los Andes Tropicales usando Teledetección. *Investig. Geogr*, n.º51 pp. 3-16 [en línea]. Mayo-junio. 2016a [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=6867242>
- VILÍMEK, V., KLIMEŠ, J., EMMER, A., & BENEŠOVÁ, M. (2014). Geomorphologic impacts of the glacial lake outburst flood from Lake No. 513 (Peru). *Environmental Earth Sciences*, n.º9, pp. 5233–5244. [en línea]. 2014 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi:10.1007/s12665-014-3768-6](https://doi:10.1007/s12665-014-3768-6)
- VUILLE M, FRANQUIST E, GARREAUD R, CASIMIRO WSL, CÁCERES B. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *J Geophys Res*, n.º12, pp. 3745–3757. [en línea]. 2015 [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: [https//doi:10.1002/2015JD023126](https://doi:10.1002/2015JD023126)

- VUILLE, M., FRANQUIST, E., GARREAUD, R., Cáceres, B. Impact of the global warming hiatus on Andean temperature. *J Geophys Res*, n.º 120, pp. 3745–3757. . [en línea]. 2015. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: [https// doi:10.1002/2015JD023126](https://doi:10.1002/2015JD023126)
- VUILLE, M., CAREY, M., HUGGEL, C., BUYTAERT, W., RABATEL, A., JACOBSEN, D., et al. (2018). Rapid decline of snow and ice in the tropical Andes–Impacts, uncertainties and challenges ahead. *Earth Sci. Rev.*, n.º 176, pp. 195–213. [en línea]. 2017. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi: 10.1016/ j.earscirev.2017.09.019](https://doi: 10.1016/ j.earscirev.2017.09.019)
- WANG, S., HUANG, J., HE, Y., GUAN, Y. (2014) Combined effects of the Pacific Decadal Oscillation and El Niño-Southern Oscillation on global land dry-wet changes. *Nature Scientific Reports*, n.º 4, pp. 1–8. [en línea]. 2014. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en: [https//doi:10.1038/srep06651](https://doi:10.1038/srep06651)
- WEIDEMANN, S. S., SAUTER, T., MALZ, P., JAÑA, R., ARIGONY-NETO, J., CASASSA, G., et al. Glacier mass changes of lake-terminating grey and tyndall glaciers at the southern patagonia icefield derived from geodetic observations and energy and mass balance modeling. *Front. Earth Sci.*, n.º 6, p. 81. [en línea]. 2018a. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi: 10.3389/feart.2018.00081](https://doi: 10.3389/feart.2018.00081)
- WELTY, E., ZEMP, M., NAVARRO, F., HUSS, M., FÜRST, J. J., GÄRTNER-ROER, I., et al. Worldwide version-controlled database of glacier thickness observations. *Earth Syst. Sci. Data Discuss.* (in press). [en línea]. 2020. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi: 10.5194/essd-2020-87](https://doi: 10.5194/essd-2020-87)
- WOUTERS, B., GARDNER, A. S., and MOHOLDT, G. Global Glacier Mass Loss During the GRACE Satellite Mission (2002-2016). *Front. Earth Sci.*, N.º 7, p.96. [en línea]. 2019. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en [https//doi: 10.3389/feart.2019.00096](https://doi: 10.3389/feart.2019.00096)

YARLEQUE, C., VUILLE, M., HARDY, Douglas., ELISON, Oliver., DE LA CRUZ, Jorge, RAMOS, Hugo & RABATEL, A. Projections of the future disappearance of the Quelccaya Ice Cap in the Central Andes. Scientific REPOrTS N° 8 [en línea]. Mayo-octubre, 2018. [Fecha de consulta: 30 de diciembre de 2020]. Disponible en <https://DOI:10.1038/s41598-018-33698-z>

MATRIZ DE OPERACIONALIZACIÓN DE VARIABLES

ANEXO 3 Revisión sistemática de desglaciación y formación de lagos en la cordillera de los Andes-Perú mediante Teledetección, 2020.

CATEGORÍA DE ESTUDIO	DEFINICIÓN CONCEPTUAL	DEFINICIÓN OPERACIONAL	SUBCATEGORÍAS	INDICADORES	ESCALA DE MEDICIÓN
Sistema de Teledetección	La teledetección y sus sensores, hace referencia a todos los instrumentos aéreos y vía satélite diseñados para la observación de la Tierra, lo que abarca desde la fotografía aérea analógica hasta los instrumentos digitales por satélite, así como los radares de apertura sintética (SAR) y los sistemas optoelectrónicos. (Logroño, et al, 2020)	La teledetección ofrece imágenes satelitales que requieren ser procesadas, para lo cual se usan portales internacionales que almacenan información complementaria necesaria para el mapeo de la realidad glaciaria que se quiere demostrar..	Sentinel-2, Spot, Áster, Landsat, Resourcesat, Rapideye, CBERS	Imágenes satelitales Resolución espacial Tamaño de imagen Resolución espectral Resolución radiométrica Resolución temporal	Veettil, BK y Kamp, U. (2017).
métodos de procesamiento de imágenes satelitales	El método de procesamiento de imágenes satelitales son mejoras, extracción de características, segmentación, fusión, detección de cambios, compresión, clasificación y detección de características (ASOKAN et al, 2020))	Los métodos de procesamiento de datos se usan en función de la complejidad que demuestran las imágenes obtenidas de los satélites y para calcular valores de manera automática o	1. Diferenciación entre nieve y hielo en las imágenes remotas 2. NDSI 3. Determinación de la superficie y volumen glaciario	Algoritmos automáticos Algoritmos personalizados	Gilberto Medina1; Abel Mejía

		bajo la resolución de algoritmos para lograr una imagen lo más cercana a la realidad glacial.			
Desglaciación	Transiciones desde condiciones completamente glaciales (edad de hielo) a condiciones interglaciales cálidas caracterizadas por el calentamiento global y la elevación en el nivel del mar debidos a la modificación del volumen de hielo continental (IPCC, 2013)	En el Perú ocurre una rápida desglaciación como respuesta al acontecimiento más grande nuestros tiempos el cambio climático; lo cual ha causado el deshielo y la formación de cuerpos de aguas, estas se represan como depósitos glaciáricos muy inestables.	Estado de desglaciación/investigación	Tasa de perdida glacial Porcentaje de reducción ELA Extensión glaciár	Tordocillo, 2019
Estado de formación de lago	La ANA define al Inventario de los Glaciares y lagunas, como el resumen de los resultados obtenidos, de los inventarios de glaciares y lagunas glaciares para 19 cordilleras, información que se pone a disposición de la comunidad nacional e internacional (ANA sf).	Los inventarios nacionales de glaciares representa una contribución al conocimiento de este recurso que deben formar parte de las estrategias dirigidas a lograr una gestión integrada de los recursos hídricos en el país	Glaciares, lagos	Numero de glaciares desaparecidos Número de lagos formados Cobertura glaciár	Alton C. Byers



Declaratoria de Originalidad del Autor / Autores

Yo (Nosotros), TECSE LOPEZ CESAR ABELARDO, JIMENEZ TEJEDA LARRY ALEXANDER estudiante(s) de la FACULTAD DE INGENIERÍA Y ARQUITECTURA y Escuela Profesional de INGENIERÍA AMBIENTAL de la UNIVERSIDAD CÉSAR VALLEJO, declaro (declaramos) bajo juramento que todos los datos e información que acompañan al Trabajo de Investigación / Tesis titulado: " REVISIÓN SISTEMÁTICA DE DESGLACIACIÓN, EXTENSIÓN SUPERFICIAL Y FORMACIÓN DE LAGOS EN LA CORDILLERA DE LOS ANDES - PERÚ MEDIANTE MÉTODOS DE TELEDETECCIÓN, 2020", es de mi (nuestra) autoría, por lo tanto, declaro (declaramos) que el Tesis:

1. No ha sido plagiado ni total, ni parcialmente.
2. He (Hemos) mencionado todas las fuentes empleadas, identificando correctamente toda cita textual o de paráfrasis proveniente de otras fuentes.
3. No ha sido publicado ni presentado anteriormente para la obtención de otro grado académico o título profesional.
4. Los datos presentados en los resultados no han sido falseados, ni duplicados, ni copiados.

En tal sentido asumo (asumimos) la responsabilidad que corresponda ante cualquier falsedad, ocultamiento u omisión tanto de los documentos como de información aportada, por lo cual me someto a lo dispuesto en las normas académicas vigentes de la Universidad César Vallejo.

Apellidos y Nombres del Autor	Firma
CESAR ABELARDO TECSE LOPEZ DNI 40001237 ORCID: 0000-0001-9146-3032	
JIMENEZ TEJEDA LARRY ALEXANDER DNI: 41233190 ORCID: 0000-0001-5498-025X	