

EVOLUCIÓN RECIENTE DE LOS GLACIARES DE LA VERTIENTE SUR DEL NEVADO SALCANTAY (PERÚ)



ALBERTO MARTÍN DE LA CALLE

MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA

Directores de proyecto: David Palacios Estremera, José Úbeda Palenque

Departamento de Análisis Geográfico Regional de Geografía Física

ONG Guías de Espeleología y Montaña



ÍNDICE

	<u>Página</u>
1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO	3
1.1. Introducción.	3
1.2. Objetivos del estudio.	3
1.3. Localización y características geográficas.	4
1.4. Características geológicas y litológicas.	6
1.5. Características climáticas.	10
1.6. Evolución y características glaciares.	12
1.7. Riesgos asociados a los glaciares.	14
 2. METODOLOGÍA.	 16
2.1. Materiales.	16
2.2. Identificación y digitalización de morrenas.	17
2.3. Identificación y digitalización de glaciares.	18
2.3.1. Glaciares actuales, año 2009.	19
2.3.2. Paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.	21
2.4. Cálculo de ELAs.	22
2.4.1. Generación de intervalos altitudinales y altitudes medias.	23
2.4.2. Cálculo de ELAs para los glaciares actuales, año 2009.	26
2.4.3. Cálculo de ELAs para los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.	28
2.5. ELAs y zonas de acumulación y ablación.	28
2.5.1. Sistema de modelización de la ELA.	29
2.5.2. Zonas de acumulación y ablación y cálculo superficial.	29
 3. RESULTADOS.	 31
3.1. Mapa de morrenas.	31
3.2. Delimitación de los glaciares y cálculo de su superficie.	34
3.3. ELAs según el método AABR.	37
3.4. Modelo espacial de las ELAs y áreas de acumulación y ablación.	42

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y FUTUROS TRABAJOS	45
4.1. Cartografía de morrenas.	45
4.2. Delimitación de los glaciares y cálculo de superficies.	46
4.3. ELAs AABR.	48
4.4. Conclusiones.	49
 5. BIBLIOGRAFÍA	 51
 6. ANEXO	 56

1. PRESENTACIÓN DEL TRABAJO.

1.1. Introducción.

Los glaciares son sistemas que pueden ser considerados como indicadores clave para la interpretación del cambio climático, ya que el estudio de las masas de hielo que los conforman es muy valioso si se integra dentro de este tipo de estudios.

Además hay que tener en cuenta que los glaciares actúan como depósitos de agua dulce muy importantes para el ecosistema en el que están ubicados, así como abastecimiento de la población de los alrededores. La recesión glaciaria significa un cambio a gran escala que conlleva profundas consecuencias locales en lo que se refiere a los recursos hídricos y a las poblaciones que depende de ellos para su sustento (Mark, 2008).

El propósito de este trabajo es reconstruir las anteriores fases glaciares de la vertiente Sur del Nevado Salcantay para obtener información sobre los cambios que han sucedido, la evolución glaciaria y sus relaciones con el clima, y los riesgos vinculados con esta evolución. La determinación de la magnitud y de la naturaleza de las variaciones de masa de los glaciares tropicales en el tiempo, contiene indicios para comprender la dinámica del clima a nivel mundial (Kull y Grosjean, 1998). La comprensión de eventos pasados de los glaciares andinos es imprescindible para predecir respuestas al futuro cambio climático y sus consecuencias para los recursos (Licciardi et al., 2011).

Todo este proceso se logrará con ayuda de herramientas utilizadas en el máster de Tecnologías de la Información Geográfica, principalmente el programa ArcGIS de la compañía ESRI, y otros tales como Google Earth y Global Mapper.

1.2. Objetivos del estudio.

El principal objetivo a resolver es el de analizar los glaciares actuales de la vertiente Sur del Nevado Salcantay, y sus paleoglaciares a través de su reconstrucción, consiguiendo obtener datos e información sobre el cambio climático y el retroceso de los glaciares.

La reconstrucción de los paleoglaciares pretende mostrar el estado en el que se encontraban en la LIA (Little Ice Age) o PEH (Pequeña Edad del Hielo) . Dicha etapa tuvo lugar entre los siglos XIV y XVIII durante los cuales se produjo un periodo de enfriamiento global. Por su parte los glaciares actuales datan de fechas del 30 de junio de 2009.

Se pretende conseguir la información necesaria y adecuada sobre los glaciares de la zona de estudio, así como su realidad ambiental, sus dinámicas y sus características, para poder entender el comportamiento de los mismos. Con ese conocimiento se podrán minimizar los riesgos naturales que se asocian a los glaciares, conocer mejor la capacidad hídrica que albergan para poder utilizar de una forma más sostenible y eficiente este recurso, y observar e interpretar la velocidad del retroceso glaciario.

Además del principal objetivo, desarrollado anteriormente, existen otros más específicos que permiten alcanzarlo:

- Delimitación de los glaciares de la vertiente Sur del Nevado Salcantay en dos fases diferentes: LIA y 2009.
- Cálculo de las superficies glaciares para las dos fechas, y reconstrucción de la paleotopografía para LIA.
- Obtención de las ELAs (Equilibrium Line Altitude) o Línea de Equilibrio Altitudinal, definida como una isolínea que marca la frontera entre el área de acumulación de un glaciar (donde existe un balance positivo de masa gracias a procesos como la innivación, precipitación, y avalanchas) y el área de ablación (aquella que se caracteriza por una pérdida de masa debido a la fusión y sublimación).

El resultado final tiene el propósito de aumentar el conocimiento sobre estos glaciares.

1.3. Localización y características geográficas.

La Cordillera de los Andes recorre América del Sur con una dirección Norte-Sur, desde la depresión de Barquisimeto en Venezuela hasta la Isla de los Estados en Argentina, con una longitud superior a los 7.500 km, y una anchura media de 300 km con tramos de entre 200 a 750 km. Es una gran cadena montañosa extendida a lo largo del extremo occidental de la placa de América del Sur.

Esta cordillera se divide en tres grandes estructuras: los Andes Septentrionales, los Andes Meridionales, y los Andes Centrales, esta última es sobre la que se localiza la zona de estudio.

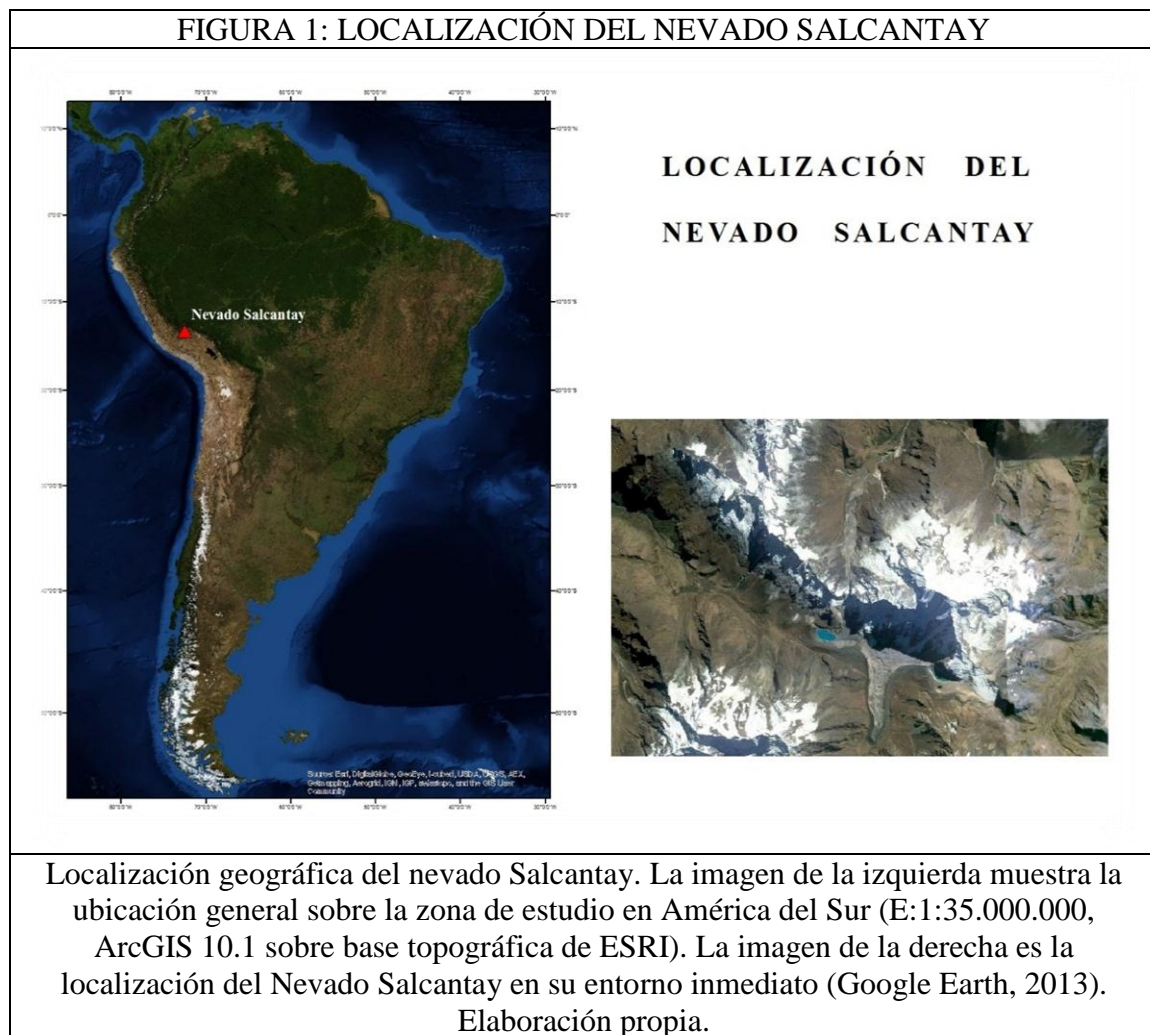
Los Andes Centrales se extienden desde la ciudad de Pasco (10° S) hasta el Macizo de las Tres Cruces (27° S) en Chile, próximo a la frontera con Argentina. Su rasgo más característico es la aparición de la meseta del altiplano situada entre las dos estribaciones montañosas que conforman la cordillera oriental y la occidental. Al norte de estos elementos geográficos se situaría la Sierra de Vilcabamba y el Nevado Salcantay.

La disposición de la cadena montañosa andina condiciona el clima de la zona, introduciendo un factor de aridez muy importante. Se produce un efecto barrera que provoca un impedimento de la circulación de masas de aire húmedo procedentes del océano Atlántico. Las precipitaciones en la vertiente occidental también son muy escasas, con valores que difícilmente superan los 100 mm anuales.

El espacio geográfico que ha sido seleccionado como área territorial de estudio es la vertiente meridional del Nevado Salcantay. Este nevado se localiza en los Andes Centrales, y más concretamente en la Cordillera de Vilcabamba, al Norte de las cordilleras occidental y oriental andinas. Ubicado en Perú, en la región de Cusco, a unos 65 km al Oeste de la ciudad homónima, tan solo a 19 km al Sur de la ciudadela de

Machu Picchu, y separado hacia el Este de la costa pacífica en 340 km aproximadamente.

El Nevado Salcantay se eleva hasta los 6.271 metros sobre el nivel del mar, y presenta las siguientes coordenadas: geográficas 13° 20' 6'' S y 72° 32' 31''W, UTM 766271E y 8524496S.



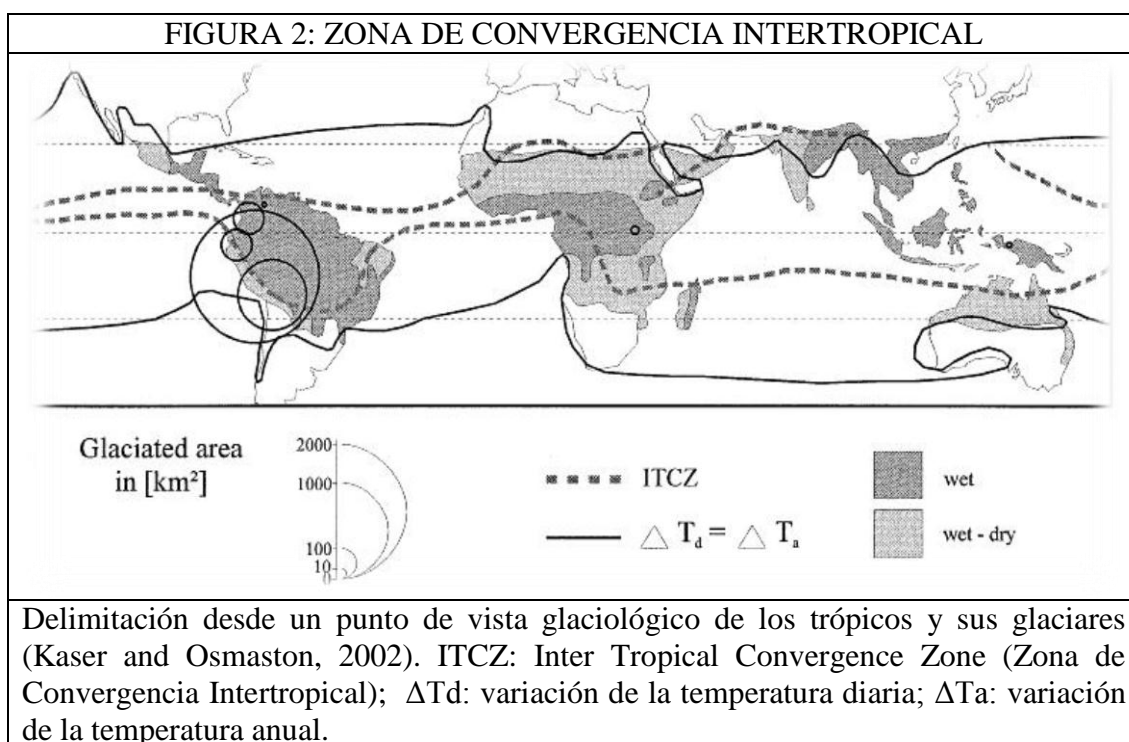
La cordillera de Vilcabamba, donde se encuentra el nevado Salcantay, limita por el SO con el río Apurímac lo que provoca que esa vertiente sea abrupta, sin embargo en el extremo Norte la vertiente es más suave y gradual hacia la vertiente Norte de la Cordillera Oriental. Presenta una dirección E-O y está conformada principalmente por rocas metamórficas del Paleozoico inferior así como intrusivos permo-triásicos. Esta alineación montañosa se caracteriza por sus terrenos elevados y accidentados, conformando áreas culminantes en forma de nevados, como el Salcantay.

En esta cordillera las formas que más se visualizan son, por una parte, aquellas relacionadas con el glaciario, como es el caso de los circos, morrenas, y valles glaciares en forma de U que además reciben constantemente aguas procedentes del

deshielo y también sirven como cabecera de los valles del Aobamba, Sacsara y Santa Teresa.

Según Kaser y Osmaston (2002), una forma simplificada de definir los glaciares tropicales es siguiendo las premisas que se expone a continuación:

- Deben de estar dentro de los trópicos.
- La variación de la temperatura diaria debe ser superior a la anual.
- La ubicación del glaciar debe estar en el interior del área de oscilación de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT).



1.4. Características geológicas y litológicas.

El orogeno que causó la formación y modificación andina, presenta una serie de características geológicas y litológicas que se expondrán a continuación.

Las placas tectónicas que definen la orogénesis de la cordillera son la placa de subducción de Nazca y el conjunto volcánico en forma de arco, que actualmente continua estando activo. El territorio andino, y más concretamente peruano, constituye un escenario tectónico en el que la deformación que se produce en la superficie está estrechamente relacionada con la subducción de la placa de Nazca por debajo de la placa sudamericana.

La placa de Nazca subduce con distintos ángulos de incidencia. En los sectores de la costa colombiana, ecuatoriana, y norte y central de Perú su ángulo de subducción es de entre 5 y 10°. Mientras nos desplazamos al Sur, en la zona Sur de la costa peruana y zona Norte de la costa chilena el ángulo de subducción es mucho mayor, aproximadamente de 30°, por lo que presenta una actividad volcánica mucho más reciente, activa incluso en la actualidad (Úbeda, 2011).

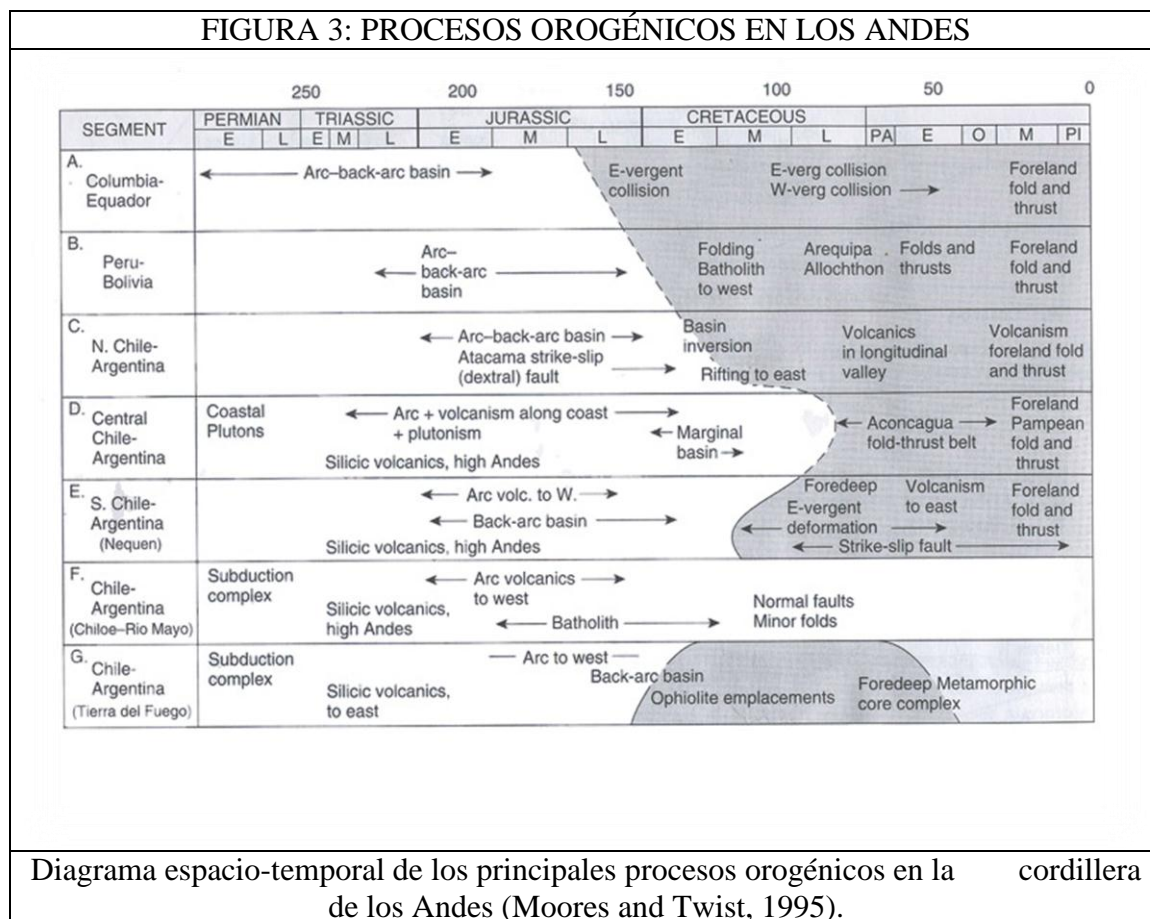
La evolución tectónica de los Andes se extiende desde el Paleozoico, donde la expansión y el crecimiento del terreno fue el proceso dominante, hasta el Mesozoico. A pesar de ello, existen otras teorías acerca de la formación y el desarrollo de la cadena montañosa, por lo que pudiera haberse formado prácticamente en su totalidad durante el periodo Mesozoico. Tras un largo intervalo de sedimentación marina y continental, se produjo un periodo caracterizado por el plutonismo, vulcanismo, y posterior sedimentación continental, todo ello con pausas temporales debido a las distintas fases tectónicas.

La evolución de la tectónica de los Andes se caracterizó por eventos con un tiempo de duración relativamente corto que fueron desarrollándose desde finales del Mesozoico (85MA aprox). Las deformaciones andinas corresponden a una tectónica plástica (pliegues) y también a una tectónica de fracturamiento importante (fallas) (Marocco, 1978). Previo a la sucesión de episodios que conformaron la tectónica andina, ya existían unas direcciones bien marcadas en las fracturas, pero los movimientos producidos por las fallas durante y posteriormente a las actividades compresivas han conferido a esta cordillera un aspecto caótico y complejo.

Desde el extremo Norte de los Andes Septentrionales hasta el extremo Sur de los Andes Meridionales la cordillera conforma ramales y subcordilleras debido a la frecuente división que tiene lugar en el ramal central.

A continuación se muestra un diagrama espacio temporal (fig. 3) que resume los principales acontecimientos tectónicos que se relacionan con el desarrollo de la cordillera andina, siendo el sector al que pertenece el Nevado Salcantay el número 2, definido como “Perú-Bolivia”.

FIGURA 3: PROCESOS OROGÉNICOS EN LOS ANDES

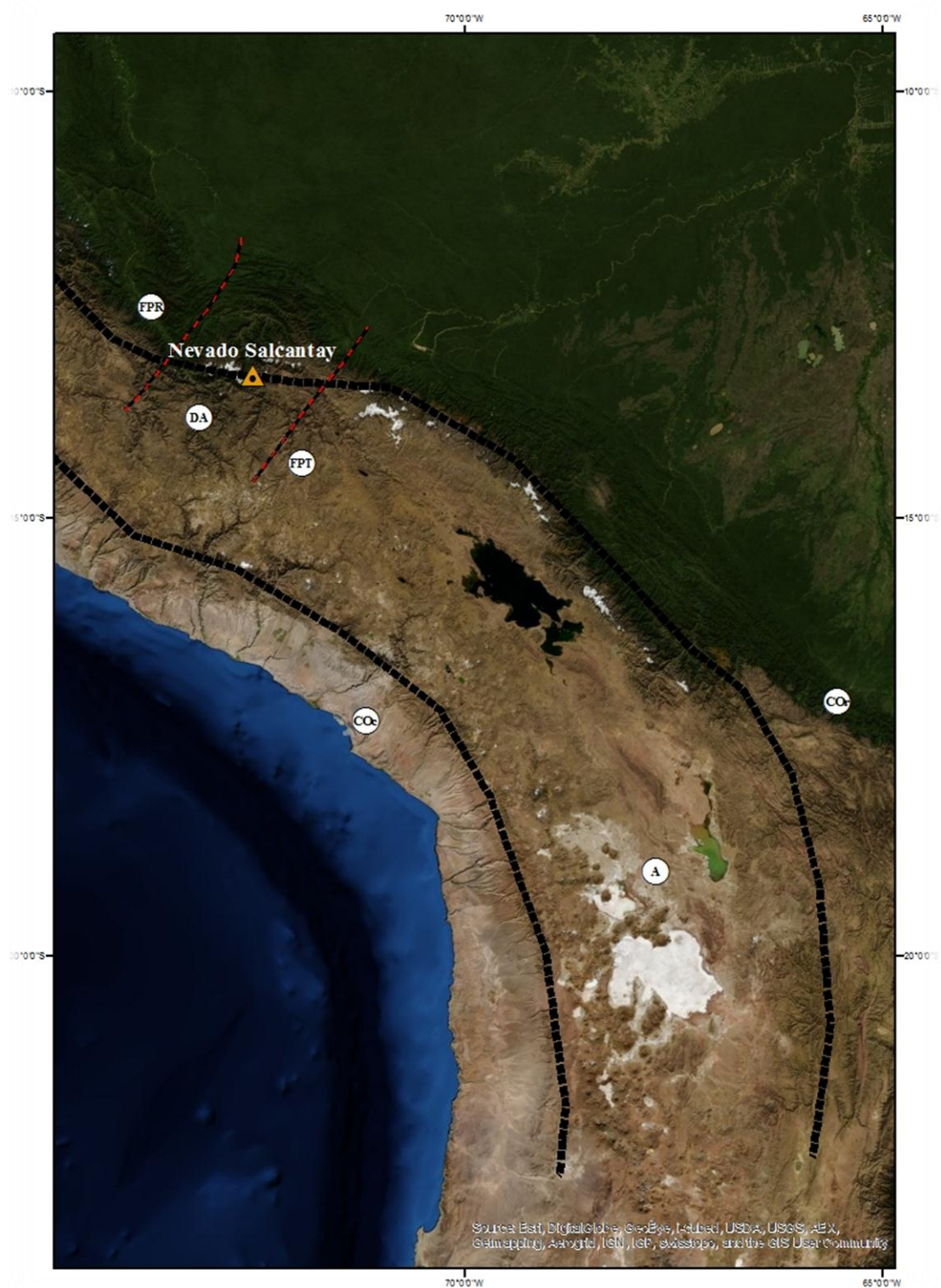


En los Andes Centrales, como ya se ha comentado anteriormente, se encuentra el altiplano de extensión aproximada de 300 x 500 km y con una altitud de entre 3.800 y 4.900 m, encajado entre las dos cordilleras occidental y oriental. Estos tres elementos conforman una unidad estructural denominada Oroclinal Boliviano, en donde en su zona Norte se encuentra la cordillera Vilcabamba y el Nevado Salcantay (Úbeda, 2011).

El Nevado Salcantay y la cordillera de Vilcabamba se integran dentro de la llamada deflexión de Abancay. Morfoestructuralmente en esta región se distingue la Cordillera Oriental y la Cordillera Occidental separadas por una zona de fallas Este-Oeste denominada Abancay-Andahuaylas-Chincheros. Este sistema limita en su parte oriental con el sistema de fallas Patacancha-Tamburco, que presenta una dirección NE-SO, y en su parte occidental con el complejo de fallas llamado Puyentimari-Rancahua, con una dirección similar al anterior (Carlotto, 1998; Carlotto et al., 2006; Cárdenas et al., 1997). Todos estos sistemas caracterizados por fallas provocan un desplazamiento en la cordillera Oriental lo que significa la definición del núcleo de la deflexión de Abancay, una zona levantada y emergida estructuralmente entre los periodos Triásico y Cretácico (225 MA-136 MA).

Actualmente la dirección de la deflexión de Abancay es E-O debido, además de a los sistemas de fallas locales que la limitan y rodean, a la formación del Oroclinal Boliviano.

FIGURA 4: CARACTERIZACIÓN GEOLÓGICA DEL NEVADO SALCANTAY



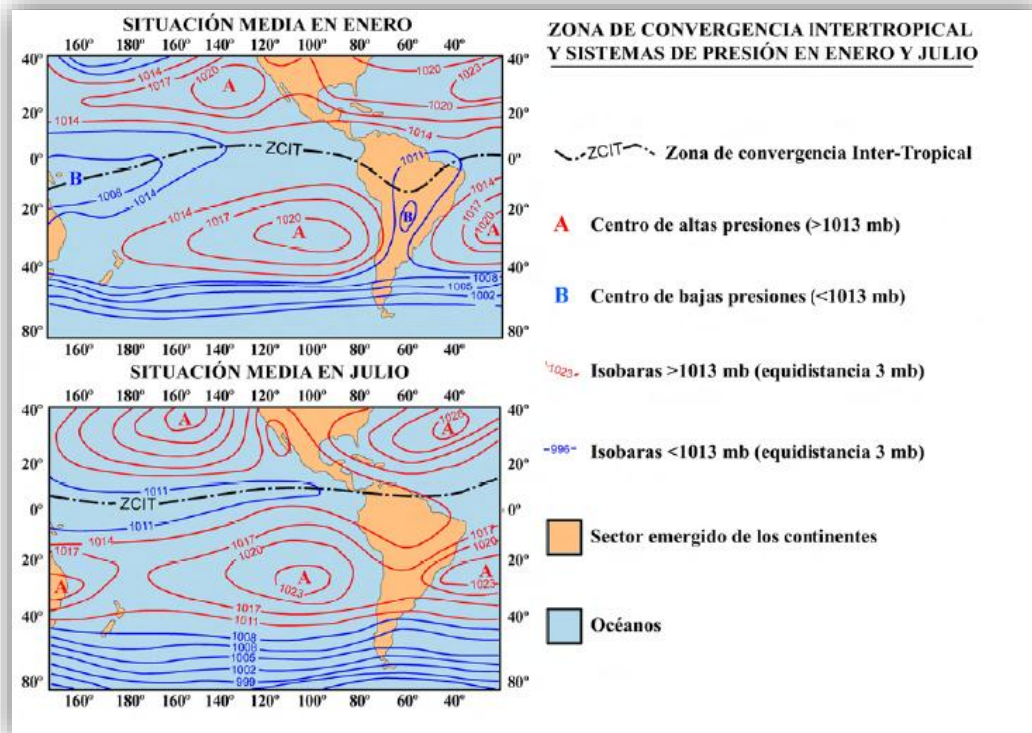
Caracterización geológica del Nevado Salcantay (E:1:6.000.000, ArcGIS 10.1 sobre base topográfica de ESRI). A: Altiplanicie, COc: Cordillera Occidental, COr: Cordillera Oriental, DA: Deflexión de Abancay, FPR: Fallas Puyentimari-Rancahua, FPT: Fallas Patacancha-Tamburco. Elaboración propia.

1.5. Características climáticas.

La existencia de una marcada disimetría térmica y pluviométrica entre las dos vertientes de los Andes Centrales provoca que la vertiente pacífica sea seca y templada, mientras que la atlántica se caracterice por ser cálida y mucho más húmeda. Las condiciones de humedad que se dan en las zonas tropicales se relacionan con la posición solar y el ecuador, influenciado a niveles térmicos y dinámicos por la circulación global. En la circulación tropical dominan procesos convectivos, tales como la variación diurna de la radiación solar, la humedad disponible y el relieve local (Kaser and Osmaston, 2002). En este marco la cordillera de Vilcabamba contribuye como impedimento a la circulación atmosférica del Este generando un obstáculo a las corrientes húmedas procedentes del Amazonas.

La existencia de la corriente marina fría de Humboldt hace que se produzca una disminución de la precipitación en la costa pacífica debido a que los centros de altas presiones bloquean las precipitaciones por lo que los Andes Centrales son privados de precipitaciones aumentando su aridez. Por lo tanto las únicas posibles precipitaciones que puede recibir los Andes Centrales son aquellas procedentes de la cuenca del Amazonas, cuyo régimen está influido por los ciclos anuales de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) (Úbeda, 2011), en el verano austral la ZCIT se desplaza meridionalmente por lo que es la época del año más húmeda y cuando se recibe una mayor cantidad de precipitaciones recibidas por las masas de aire tropical del Amazonas; en el invierno austral al volver a una posición más septentrional, la ZCIT provoca una época extremadamente seca aislando a los Andes Centrales de la cuenca amazónica (fig. 5).

FIGURA 5: ZONA DE CONVERGENCIA INTERTROPICAL Y SISTEMA DE PRESIONES



Esquema de los centros de altas y bajas presiones para los meses de enero y julio, junto con la situación de la Zona de Convergencia Intertropical, (Úbeda, 2014) a partir de (Strahler y Strahler, 1989).

Además, la aparición del fenómeno de El Niño-Oscilación Sur o ENSO provoca un aumento en la aridez que ya de por sí caracteriza a la región de los Andes Centrales. En estos periodos se produce una inversión de precipitaciones en Perú con un recorrido desde la costa pacífica hasta la cordillera andina, por lo que puede suceder que algunas estaciones meteorológicas costeras recojan mayor precipitación que otras estaciones andinas. Las temperaturas están sometidas a una variabilidad dependiente de los fenómenos ENSO que tienen como consecuencia una fuerte ablación en los glaciares.

La determinación de la variabilidad de la pérdida de volumen glaciar con respecto a la orientación del glaciar ofrece importantes conocimientos acerca del forzamiento climático y el impacto regional de la recesión glaciar, ya que las diferentes variables climáticas (radiación, precipitación, temperatura y humedad) tienen su impacto en los glaciares siguiendo patrones espaciales diferentes (Mark, 2008).

1.6. Evolución y características glaciares.

Más de un 99% de los glaciares tropicales se localizan en los Andes (Kaser,. 1999), por lo tanto en las regiones andinas de alta montaña, como es en este caso el área de estudio definida en el marco de la Cordillera Vilcabamba, se tiene una gran dependencia del suministro de agua dulce que proporcionan los glaciares. Los glaciares son una reserva fundamental para la población, ya que en la estación seca suministra agua para el desarrollo de las actividades económicas y personales de los habitantes del lugar. Así mismo los glaciares tropicales son considerados como los más sensibles frente a variaciones climáticas, sufriendo un retroceso más notable que tendría su incidencia en el suministro a la población y al entorno.

Existen numerosos estudios anteriores en los cuáles se ha puesto de manifiesto la intención de lograr realizar una reconstrucción de las condiciones paleoclimáticas a las que estaban sujetos los glaciares, así como la investigación de la extensión de los antiguos paleoglaciares. Alguno de los métodos que se han empleado son el análisis de los registros de los núcleos del hielo, y el análisis de los depósitos de morrenas generados durante los avances y retrocesos glaciales (Jomelli et al., 2009), estas morrenas habrían sido datadas por radiocarbono, por métodos liquenométricos, y por Berilio 10.

A continuación se citan varios de los estudios realizados con anterioridad que tratan de explicar la manera en que han evolucionado los glaciares en la zona central de los Andes, teniendo en cuenta cuatro periodos: el Último Máximo Glacial (LGM, Last Glacial Maximum), Younger Dryas (YD), la Pequeña Edad del Hielo (LIA, Little Ice Age), y las fluctuaciones modernas actuales. Se dará una mayor importancia a la Pequeña Edad del Hielo y a las fluctuaciones actuales, pues son las etapas temporales sobre las cuales se articula este trabajo.

- Último Máximo Glacial (LGM):

Para esta época existen diferentes estudios que comentan cuáles son las edades de las morrenas mediante su datación, obteniendo así las edades de mayor expansión glacial para determinadas áreas de los Andes Centrales y de los Andes Peruanos.

Uno de esos estudios relata cuál ha sido el método utilizado para datar morrenas de cuatro quebradas diferentes dentro de la Cordillera Blanca (Farber et al., 2005). Obteniendo como resultado el máximo avance glacial hace 29mil años, aguantando en ese emplazamiento hasta el comienzo de su regresión aproximadamente hace 20,5mil años.

Sobre la región de Junin también se realizaron análisis de morrenas, por parte de Smith et al. en 2005, que fueron datadas entre hace 34mil y 21mil años, siendo este periodo el de mayor avance que experimentaron los glaciares en ese territorio.

Ambos autores coinciden en que la datación de morrenas en estas regiones no es la más antigua, existiendo avances más antiguos.

- Younger Dryas (YD):

El Younger Dryas fue una etapa relativamente estable y frío que comenzó hace 13mil años aproximadamente y que se extendió hasta hace 11mil años, a finales del periodo Pleistoceno.

En los Andes Centrales actuó implicando un retroceso de los glaciares, junto con escasas pulsaciones y breves periodos de avance, lo que implica que los glaciares tropicales se retiraran. Los glaciares tropicales se retiraron, existen pocas evidencias de avance de glaciares en los Andes tropicales durante este periodo.

- Pequeña Edad del Hielo (PEH, LIA):

Se trata del periodo durante el que se había producido la progresión observada en los glaciares de las latitudes medias entre los siglos XVI y XVII (Matthes, 1939). Los avances de los glaciares durante esta época aún siguen estando insuficientemente indocumentados en la zona tropical.

Para constituir un marco de referencia que explique la naturaleza y el ritmo de la Pequeña Edad del Hielo en la región de los Andes Centrales es preciso establecer correlaciones entre la cronología de las fases de expansión glaciaria y el contexto paleoambiental en el que sucedieron (Úbeda, 2011).

Según diferentes estudios, si se comparan las cordilleras, se observa una coherencia bastante acertada, los glaciares en cada cordillera reaccionaron de manera similar en este periodo, sincronizados con los cambios climáticos ocurridos. En las décadas de 1730, 1760 y 1820 los glaciares avanzaron de forma sincrónica en Bolivia, Perú, Ecuador y Venezuela (Glasser et al., 2009).

Durante esta época de la Pequeña Edad del Hielo, los glaciares alcanzaron su mayor extensión en Perú entre 1630 y 1680 (Jomelli et al., 2009). En la mayoría de los glaciares peruanos se produjo esta circunstancia, superando la extensión que había tenido lugar en esta misma época aproximadamente en el año 1330.

La extracción de los testigos de hielo del glaciar Quelccaya (Perú, 5670 m) y la concentración de O^{18} reveló la diferenciación de dos etapas distintas que se introducen dentro de la Pequeña Edad del Hielo. La primera tuvo lugar entre 1500 y 1720, se caracterizó por una mayor acumulación y por condiciones más húmedas, y la segunda desde 1720 a 1880 caracterizada por un ambiente más árido (Thompson et al., 1984). El aumento de la aridez en esta última etapa puede tener la causa en un incremento de los eventos ENSO, al igual que el rápido retorno a la aridez sucedido entre 1890 y 1910, después de un breve paréntesis de dos décadas más húmedas, en los años 70 y 80 (Úbeda, 2011).

El comienzo de la regresión glaciaria a partir de la Pequeña Edad del Hielo es difícil de determinar (Kaser, 1999). Sí que es posible afirmar que entre finales del siglo XVII y el siglo XIX se desarrolló una tendencia al retroceso debido a la disminución de la precipitación, hecho justificado por la caída del isótopo O^{18} en las regiones polares durante este periodo (Jomelli et al., 2008).

En la cordillera de Vilcabamba las dataciones con más precisión para delimitar el máximo de la Pequeña Edad del Hielo se identifican con el año 1810, fecha posterior al máximo en otras zonas cercanas como la Cordillera Blanca y Bolivia. Puede deberse a la incertidumbre generada por los métodos de datación liquenométricos y de Berilio 10, pero indica probablemente diferencias reales en el momento de las culminaciones glaciares (Licciardi et al., 2009). El propio Licciardi et al., en 2009, publicó las dataciones de morrenas al Sur del Salcantay obteniendo como resultado una media de edad aproximada de 200 años de antigüedad, con un error estimado de 20 años.

Durante la Pequeña Edad del Hielo la Zona de Convergencia Inter-Tropical sufrió un desplazamiento hacia el Sur generando en los Andes centrales un incremento de las precipitaciones nivosas. Una vez la ZCIT migró de nuevo hacia el Norte se produjo la retirada de los glaciares, algo que coincide con el registro de hielo Quelccaya, lo que sugiere una reducción en la acumulación de nieve regional previa a la retirada de los glaciares de Vilcabamba hacia el final de la Pequeña Edad del Hielo (Licciardi et al., 2009).

- Fluctuaciones actuales:

El contexto actual muestra que los andes peruanos albergan la mayor cantidad de glaciares tropicales del mundo, aproximadamente el 70%.

Durante los últimos 15 años se observaron cambios con disminuciones similares en el balance de masas en glaciares de dimensiones equivalentes tanto en Bolivia como en Ecuador (Francou et al., 2007). Es uno de los ejemplos válidos por los que se puede afirmar que se está produciendo una tendencia basada en un retroceso continuado con el paso de los años. Los pequeños avances que se produjeron a principios del siglo XX han quedado en el olvido a fecha de hoy, pues se están generalizando los procesos de retroceso glacial.

En el caso particular del Nevado Salcantay, según la Autoridad Nacional del Agua de Perú, ha perdido en los últimos 40 años el 64% de su superficie glaciar, lo que supone cerca de 22 km².

Se puede establecer una relación directa entre el retroceso de los glaciares desde la Pequeña Edad del Hielo y la disminución de la precipitación, esto puede deducirse de los datos indirectos o proxy basado en los valores del isótopo O¹⁸ extraídos de los núcleos de hielo del Huascarán. Estos valores generan una discrepancia ya que algunos investigadores sostienen una relación con la temperatura y otros con la precipitación. Cualquiera que sea la interpretación se observa que los registros de las variaciones isotópicas y de las morrenas son monosíncronos (Jomelli et al., 2008).

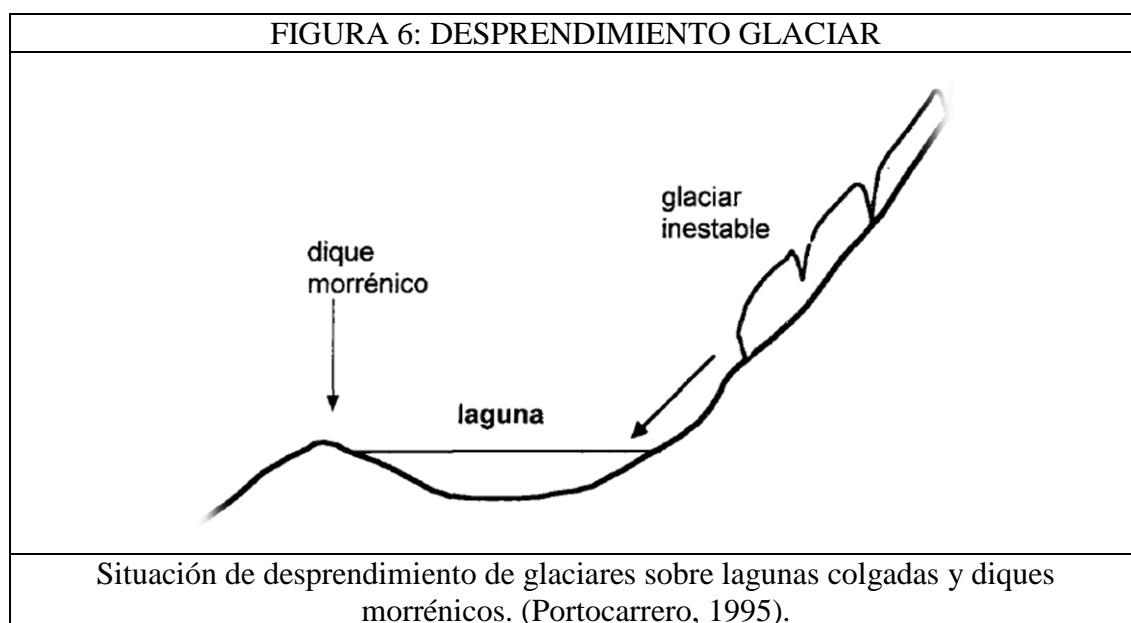
1.7. Riesgos asociados a los glaciares.

Las actuales características climáticas que afectan a los glaciares así como su emplazamiento sobre zonas tectónicas, topografías abruptas y materiales no consolidados suponen un riesgo natural. Las partes más altas de los nevados se

corresponden con elevaciones prominentes, estando expuestas a pendientes muy fuertes que son susceptibles de sufrir aludes y desprendimientos.

El retroceso y fusión de los glaciares implica una pérdida muy importante del volumen de agua, por lo que la disponibilidad de este bien necesario se reducirá considerablemente. Perú es un país que, bien por el abastecimiento a la población o por actividades económicas como la agricultura, depende en su gran mayoría de territorio de los regímenes y caudales de los ríos que tienen un origen glaciar. La deglaciación también está favorecida por la topografía ya que las crestas agudas y los flancos irregulares con fuertes pendientes contribuyen a ello.

En un primer momento la fusión de glaciares provocaría el aumento de los recursos hídricos a corto plazo, pero posteriormente se producirían sequías y estiajes. Además, se aumentaría el riesgo de desastres naturales al incrementarse las probabilidades de inundaciones y aluviones. Las lagunas que quedarían colgadas, actuarían como diques naturales, pudiendo suceder un desembalse violento de las mismas (fig. 6).



Algunas de las posibles causas que producirían la ruptura de los diques morrénicos y el desagüe violento de las lagunas serían: la caída de bloques de hielo, deslizamiento de taludes, y caída de masas de roca sobre la laguna. Estas causas están vinculadas a la alta sensibilidad de los glaciares tropicales y a su retroceso, pudiendo generar graves daños humanos, económicos y materiales a la población residente en las proximidades.

2. METODOLOGÍA.

Este capítulo sirve como guía de los diferentes procesos, métodos y técnicas que han sido consultadas y puestas en práctica para desarrollar este trabajo y lograr así los objetivos deseados previos a la realización del mismo.

Para ello primero se hará un repaso de cómo se han cartografiado las morrenas, los glaciares y los paleoglaciares. Posteriormente el método de cálculo de las ELAs, las Líneas de Equilibrio Altitudinal que han sido definidas en el anterior apartado como la isolínea que marca la frontera entre el área de acumulación y el área de ablación de un glaciar. Y finalmente de qué forma han quedado establecidas las zonas de acumulación y ablación una vez desarrollada esta metodología para las ELAs.

Además, se comentarán los materiales principales que han sido empleados para conseguir elaborar todo lo citado en las líneas superiores. El software empleado para el tratamiento de dichos materiales ha sido ArcGIS 10.1 de ESRI.

2.1. Materiales.

En la tabla que aparece a continuación (tabla 1) se exponen los materiales que han sido empleados para la elaboración de este trabajo, así como su fuente y su fecha.

TABLA 1: MATERIALES UTILIZADOS		
Materiales, datos	Fuente, institución	Fecha
Carta Geológica: Mapa Geológico del Cuadrángulo de Machupicchu Escala 1:100.000	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico de Perú (INGEMET)	Desconocida
Imágenes satélite	Google Earth	2009
Imágenes satélite	United States Geological Survey (USGS)	2013
Curvas de nivel	Guías de Espeleología y Montaña (G.E.M.)	1955
Fichero Excel programado para el cálculo de las ELAs para el método AABR (Osmaston, 2005)	Guías de Espeleología y Montaña (G.E.M.)	2005

La Carta Geológica obtenida en el INGEMET para el Cuadrángulo de Machupicchu, región donde se integra el Nevado Salkantay, sirvió para obtener información geológica, litológica y tectónica sobre el área de estudio y sus alrededores más inmediatos, ayudando a redactar la información expuesta en el capítulo 1 sobre la introducción y la caracterización.

Las imágenes satélite de Google Earth son la base principal del trabajo. Son un elemento imprescindible pues ha sido utilizado para la identificación de morrenas y glaciares, y la digitalización de las mismas.

Las imágenes satélite procedentes de la USGS han servido como complemento a las imágenes satélite de Google Earth. Este material se ha utilizado escasamente ya que el área de estudio no tenía una buena visibilidad debido a la alta y constante nubosidad de la zona, además la existencia de zonas de sombra dificultaban la identificación.

Las curvas de nivel facilitadas por el G.E.M. se han empleado para el cálculo de las ELAs ya que a través de ellas se conoce la altitud de los glaciares y paleoglaciares. También para el cálculo de la paleotopografía, mediante su modificación para representar el relieve de la Pequeña Edad del Hielo.

Y por último, el fichero Excel proporcionado por el G.E.M. ha sido fundamental para la obtención de resultados de las ELAs, ya que está programado para ello utilizando la técnica AABR (Osmaston, 2005).

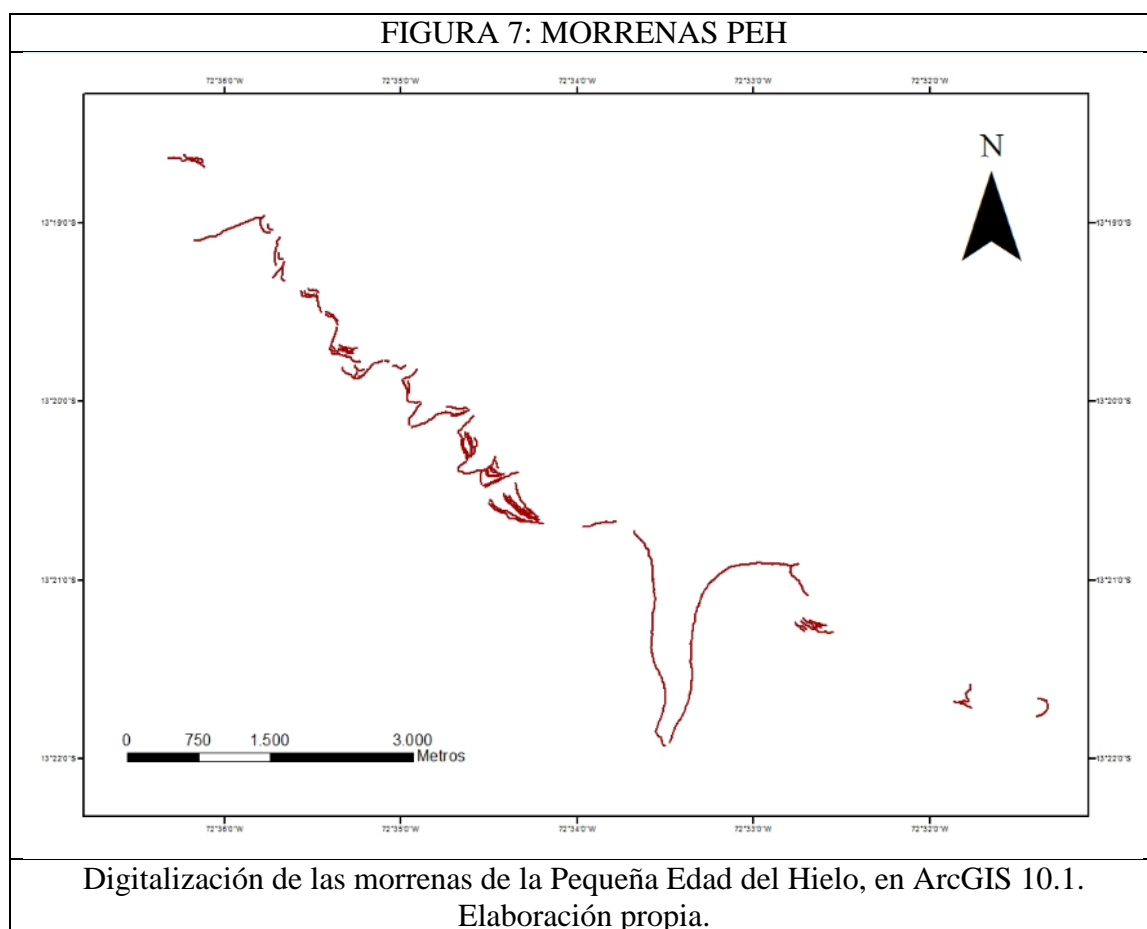
2.2. Identificación y digitalización de morrenas.

Las imágenes satélite sirven como referencia para realizar este proceso de identificación de morrenas. Este paso puede considerarse como intermedio, ya que el fin último de la identificación de las morrenas es la digitalización de los paleoglaciares. Las imágenes de alta precisión de Google Earth, su excelente resolución, y la comodidad de manejo del desplazamiento hacen de Google Earth una herramienta perfectamente útil y adecuada para esta tarea.

Las morrenas son el conjunto de material detrítico transportado y depositado por los glaciares (Muñoz, 1995). Por ello son especialmente útiles para determinar las extensiones de los glaciares antiguos o paleoglaciares ya que delimitan de alguna manera los periodos de mayor expansión y reflejan las pulsaciones que pudieron experimentar los glaciares.

Para este trabajo se han delimitado aquellas morrenas que marcan las extensiones de los paleoglaciares para la Pequeña Edad del Hielo, así como las pulsaciones sufridas por los paleoglaciares tanto en su periodo de avance como de retroceso. Únicamente se han identificado aquellas que se visualizaban con total certeza y precisión.

Para digitalizar las morrenas se ha empleado la herramienta “Rutas” dentro de Google Earth, que permite el trazado de líneas sobre la imagen satelital a pequeña escala y con una alta precisión. Esto nos genera unos archivos de morrenas con extensión “.kmz” o “.kml”.



El software ArcGIS 10.1 no permite la introducción de archivos con tal extensión, por lo que se ha necesitado un programa que efectúe las labores de cambio de formato. Ese programa es Global Mapper 10, que permite transformar los archivos “.kmz” a otro formato que sí reconozca ArcGIS, como es el caso de “.shp”.

Una vez realizada la transformación, se pueden introducir en ArcGIS la capa de morrenas, desde donde se podrá manipular y modificar. Esta capa será utilizada posteriormente para la reconstrucción de paleoglaciares, ya que el conjunto de morrenas más externas servirá como referencia para los límites inferiores de aquellos.

También se ha elaborado un mapa de puntos, que se ha podido integrar con las morrenas digitalizadas, elaborado a partir de las dataciones de Licciardi en 2009 de la morrena interior del valle del río Blanco, siendo la morrena más extensa y alargada situada justo al Sur del pico más elevado del nevado Salcantay. Estas dataciones sirven para argumentar tanto la introducción como la discusión.

2.3. Identificación y digitalización de glaciares.

La delimitación glaciar está basada en la interpretación de las fotografías de satélite de Google Earth, de esta manera se obtienen los límites y las superficies de los glaciares.

En el caso de los paleoglaciares correspondientes a la Pequeña Edad de Hielo también se usará la cartografía de morrenas elaborada en el anterior paso.

Se trata de uno de los puntos más importantes del trabajo, pues de la correcta delimitación de los glaciares depende el cálculo final de las ELAs y los resultados finales y conclusiones.

2.3.1. Glaciares actuales, año 2009.

La identificación de los glaciares actuales se ha realizado sobre las imágenes satélite de Google Earth de fecha de 30 de junio de 2009, que permiten el dibujo de áreas poligonales con la herramienta “Polígonos”.

La delimitación de los glaciares actuales llevó consigo varios problemas asociados a diversos elementos y fenómenos causados por los mismos.

En primer lugar el análisis visual general de los glaciares sirvió para identificar a grandes rasgos la extensión superficial y los límites de los glaciares actuales. Posteriormente un análisis visual más exhaustivo permitió percibir zonas conflictivas generadas por alguno de los elementos que a continuación se exponen:

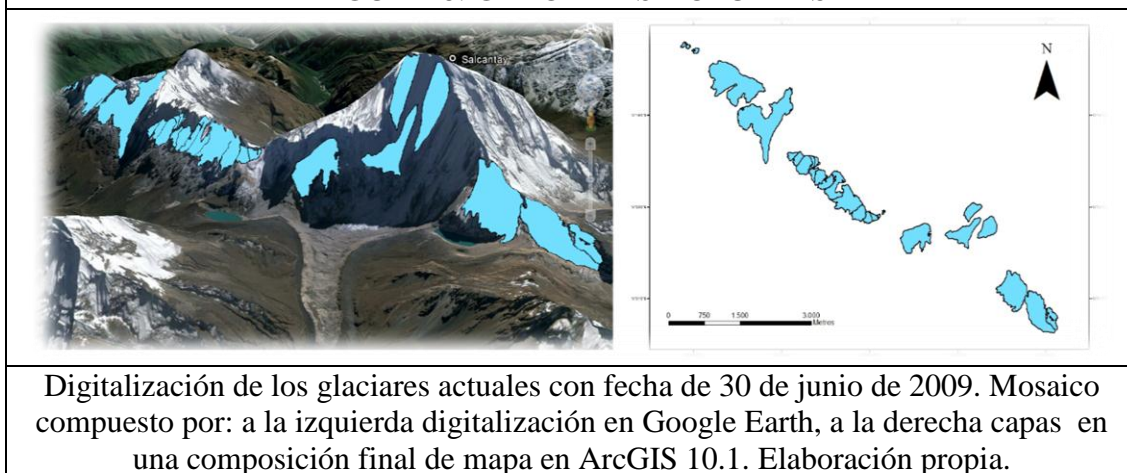
- Las rimayas son las grietas o hendiduras que se localizan en la parte superior de los glaciares, son las que delimitan el margen superior de estos. Son difíciles de delimitar ya que en varios glaciares esta línea no se diferencia bien y puede llegar a confundirse con la línea de cumbres, o con otras fracturas de hielo dentro del glaciar.
- Las zonas de sombra, sobre todo de la parte oriental de la vertiente Sur del Salcantay, han dificultado la delimitación de varios límites superiores e inferiores.
- Los aludes y su diferenciación conllevan otro problema, puesto que los límites inferiores de los glaciares en algunos casos presentaban movimientos de nieve y aludes en torno a ellos, por lo que el análisis visual debió ser muy estricto y riguroso para lograr definir bien qué elementos son aludes y así excluirlos de la digitalización.
- La delimitación de cada flujo y lengua de hielo. La individualización de los glaciares resulta complicada en determinadas áreas ya que la homogeneidad del hielo dificulta su separación.

Una vez delimitados todos los glaciares de forma correcta y definitiva sobre Google Earth se utiliza el programa Global Mapper 10 para transformar los archivos “.kmz” o “.kml” en “.shp”, de modo que así podrán manipularse en ArcGIS 10.1.

En ArcGIS 10.1 lo que fundamentalmente se va a realizar es un proceso de edición para que no existan errores de topología entre varios glaciares. Alguna de las herramientas que se han utilizado dentro del propio programa son:

- Para los límites de los glaciares se utilizará la herramienta “Erase” (Analysis Tools → Overlay → Erase) que permite eliminar las superposiciones de capa y definir correctamente los límites laterales de los glaciares. Esta herramienta también se ha empleado en el caso de que los glaciares presentaran zonas vacías dentro de ellos en los cuales se visualizara la roca, con el fin de eliminar esa superficie del glaciar y generar agujeros que reflejen la inexistencia de hielo en las zonas que así lo requieran.
- Herramientas de edición como “Split”, “Merge”, y “Union”, han sido empleadas sobre todo para las correcciones que se han ido realizando sobre las delimitaciones, ya que había que modificar la extensión, forma y límites del glaciar.
- A la hora de elaborar la individualización de los glaciares, también se ha usado la herramienta “Feature to Polygon” (Data Management Tools → Features → Feature to Polygon).
- Por último, para volver a transformar los archivos a formato “.kmz”/”.kml” se ha empleado la herramienta “Layer to KML” (Conversion Tools → To KML → Layer to KML).

FIGURA 8: GLACIARES ACTUALES



Después de una primera digitalización general, y seguidas de varias más específicas y en las que se ha empleado un mayor tiempo y un mayor nivel de detalle, se obtienen dos archivos en los que vienen representados los glaciares actuales, uno para Google Earth en formato “.kmz” y otro para ArcGIS en formato “.shp” que será utilizado para pasos siguientes.

2.3.2. Paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.

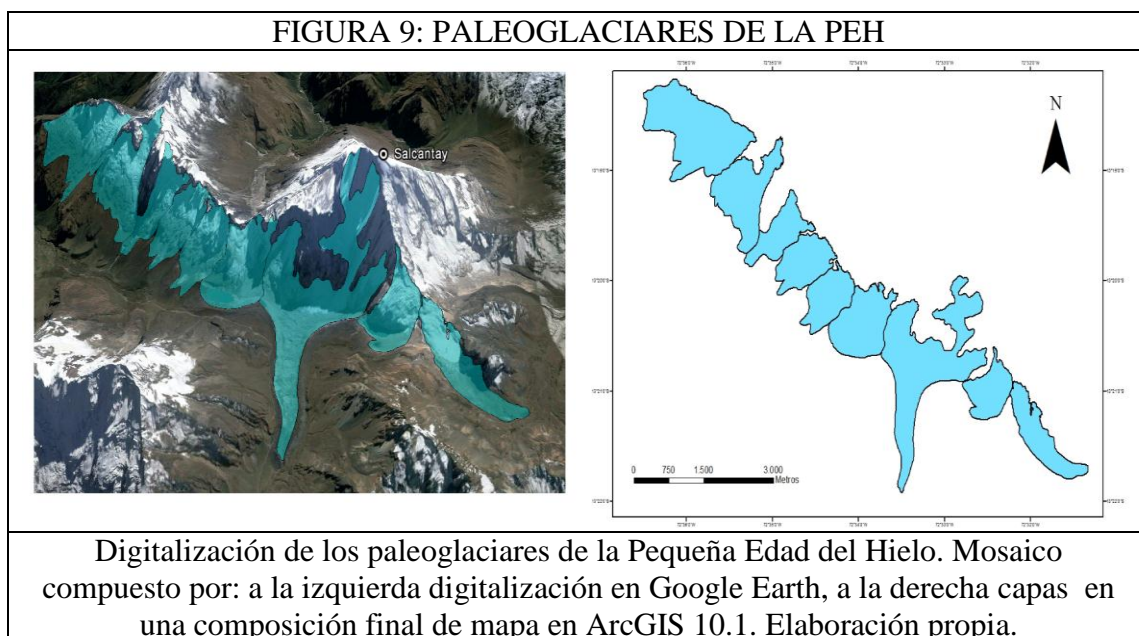
Para el caso de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo se realizó un proceso similar al anteriormente citado para los glaciares actuales. La identificación y digitalización en Google Earth con la herramienta “Polígono”, la conversión de los archivos mediante el programa Global Mapper 10 para hacerlos compatibles con ArcGIS 10.1, y el tratamiento sobre este último programa de la información para modificarla y someterla a análisis en la medida que fuera necesario.

Los paleoglaciares son masas de hielo extintas que pueden ser deducidas por sus huellas geomorfológicas habiendo confluído hacia una misma vertiente (Quirós, 2013). Tanto su análisis visual como el procedimiento de identificación van a tener otros factores de influencia, que se resumen a continuación:

- Para el caso de los márgenes superiores del paleoglaciar se tendrá en cuenta los márgenes superiores de los glaciares actuales, obtenidos en el proceso anterior, ya que en la mayoría de los casos serán similares y se tomarán como referencia.
- En el caso de los márgenes inferiores de los paleoglaciares, se tendrán en cuenta las morrenas identificadas previamente, ya que marcan los movimientos de expansión y contracción de la masa de hielo en la Pequeña Edad del Hielo. En determinadas áreas de la zona de estudio se han diferenciado varios conjuntos de morrenas, aquellas que se encuentran más externas y alejadas de la cabecera y que por lo tanto son las que definen el mayor avance del glaciar para esta época son las que han sido seleccionadas como referencia para el límite inferior del paleoglaciar.
- Los límites laterales han sido identificados por varios factores: si se hace un análisis visual detallado y con detenimiento de la topografía actual de la vertiente Sur del Salkantay se puede intuir el terreno que pertenece a cada paleoglaciar, por dónde se desplazó la lengua de hielo, cuál fue su caída natural, y así conseguir definir sus márgenes laterales.
- Rocas aborregadas. Como consecuencia de la abrasión glaciar y efecto de pulimento que produce el glaciar sobre el lecho rocoso se genera una tipología de rocas conocida como rocas aborregadas que se caracterizan por poseer una superficie lisa debido al desgaste y unos perfiles superficiales que han sido modelados hasta tener forma ligeramente convexa. Esta tipología es un claro indicador de la existencia de un antiguo glaciar, por lo tanto también sirven como guía para el conocimiento de la superficie y las zonas en las que se halló ubicado el antiguo paleoglaciar.

Una vez se han tenido en cuenta estas características se procede a efectuar la digitalización de los paleoglaciares. Se empleará un sistema similar a los glaciares, es decir, digitalizando con Google Earth, convirtiendo los datos de fichero “.kmz” a “.shp” con Global Mapper 10, y realizando acciones de modificación, análisis, y edición con ArcGIS 10.1. Respecto a este último paso las herramientas que se han utilizado son

exactamente las mismas con excepción de que también se ha utilizado la acción “Dissolve” (Data Management Tools → Generalization → Dissolve) para la agrupación de los glaciares actuales en su correspondiente paleoglaciario.



El resultado final es la obtención de dos archivos de paleoglaciares de la Pequeña Edad de Hielo, uno en formato “.kmz” para Google Earth, y otro, básico para los siguientes puntos que se describirán, compatible con ArcGIS con extensión “.shp”.

2.4. Cálculo de ELAs.

La ELA o Equilibrium Line Altitude es un término que hace referencia a la Línea de Equilibrio Altitudinal. Se trata de una línea teórica que no es visible y que separa las zonas de acumulación de las zonas de ablación del glaciar, es el límite entre las áreas donde el glaciar sufre ganancias de hielo y aquellas áreas en las que experimenta pérdidas y fusión de la masa helada. Tradicionalmente la ELA se ha definido como la altitud donde el saldo neto de masa al final de la temporada de ablación (normalmente verano) es cero, pero esta definición no es del todo correcta para los glaciares tropicales, donde existe ablación durante todo el año (Benn et al., 2005).

Se trata de uno de los parámetros y de las características de los glaciares que son consecuencia directa del clima y sus variaciones. Por lo tanto la ELA es una de las características más importantes a la hora de medir un glaciar moderno, o de reconstruir un paleoglaciario, cuando la meta es el entendimiento del clima actual o pasado (Ramage et al., 2005).

Existen diferentes métodos para el cálculo de la ELA, los más utilizados son los siguientes:

- Método THAR (Terminus Headwall Altitude Ratio). Basado en la idea de que la ELA se encuentra en un término medio entre las altitudes superiores de los glaciares y la altitud de los límites inferiores de los mismos. Algunos estudios establecieron que para paleoglaciares de los Andes Tropicales un THAR de valor 0,45 es apropiado (Klein et al., 1999).
- Método MELM (Maximum Elevation of Lateral Moraines). La premisa es que las morrenas laterales únicamente aparecen a altitudes inferiores a la ELA. El principal fallo de este método es que depende por completo del estado de conservación de las morrenas laterales, por lo que en caso de que se encuentren en mal estado o incompletas es inválido.
- Método AA (Area x Altitude). Se asume que en los glaciares que se se van a analizar el Balance Ratio es igual a 1, es decir que el cociente entre los gradientes de ablación y acumulación es igual a 1 (Úbeda, 2011). Implica el conocimiento de la topografía del glaciar estudiado, para así obtener las bandas altitudinales.
- Método AABR (Area x Altitude Balance Ratio). Se basa en ponderar el balance de masa en las áreas ubicadas más próximas a los límites tanto superior como inferior del glaciar en una mayor medida que aquellas áreas que se sitúan cercanas a la propia ELA. El resultado se redefine mediante el establecimiento de diferentes pendientes lineales del perfil del balance de masa por encima y por debajo de la ELA (Úbeda, 2011).

En el presente trabajo el método que se va a aplicar, para la obtención tanto de la ELA de los glaciares actuales como de la paleoELA de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo de la vertiente Sur del Nevado Salkantay, es el AABR. Método utilizado anteriormente por Úbeda en 2011, y en trabajos similares por Giráldez en 2011, Campos en 2012, y García en 2013.

Este método, si se poseen los datos acerca del balance de masa y una correcta altimetría, es considerado como el más riguroso (Benn et al., 2005), para gran cantidad de los glaciares actuales obtienen buenos resultados ya que su ajuste es adecuado. Este método es aplicable tanto para glaciares actuales como para paleoglaciares (Benn et al., 2005; Osmaston., 2005; Úbeda, 2011).

2.4.1. Generación de intervalos altitudinales y altitudes medias.

El cálculo de la ELA por el método AABR requiere dos condiciones fundamentales, la primera de ellas es la delimitación glaciar, ya elaborada anteriormente. La segunda es el conocimiento de la altimetría del área de estudio, que se va a desarrollar en este apartado.

En primer lugar se deben obtener las curvas de nivel de las zonas donde están ubicados los glaciares. Esta información ha sido facilitada por la ONG G.E.M., presentando unos intervalos hipsométricos de 50 metros, adecuados para introducir posteriormente los datos en la hoja de Excel preparada para el cálculo de las ELAs.

Para la generación de los intervalos altitudinales se requieren dos capas de información: las curvas de nivel, y los glaciares delimitados y digitalizados.

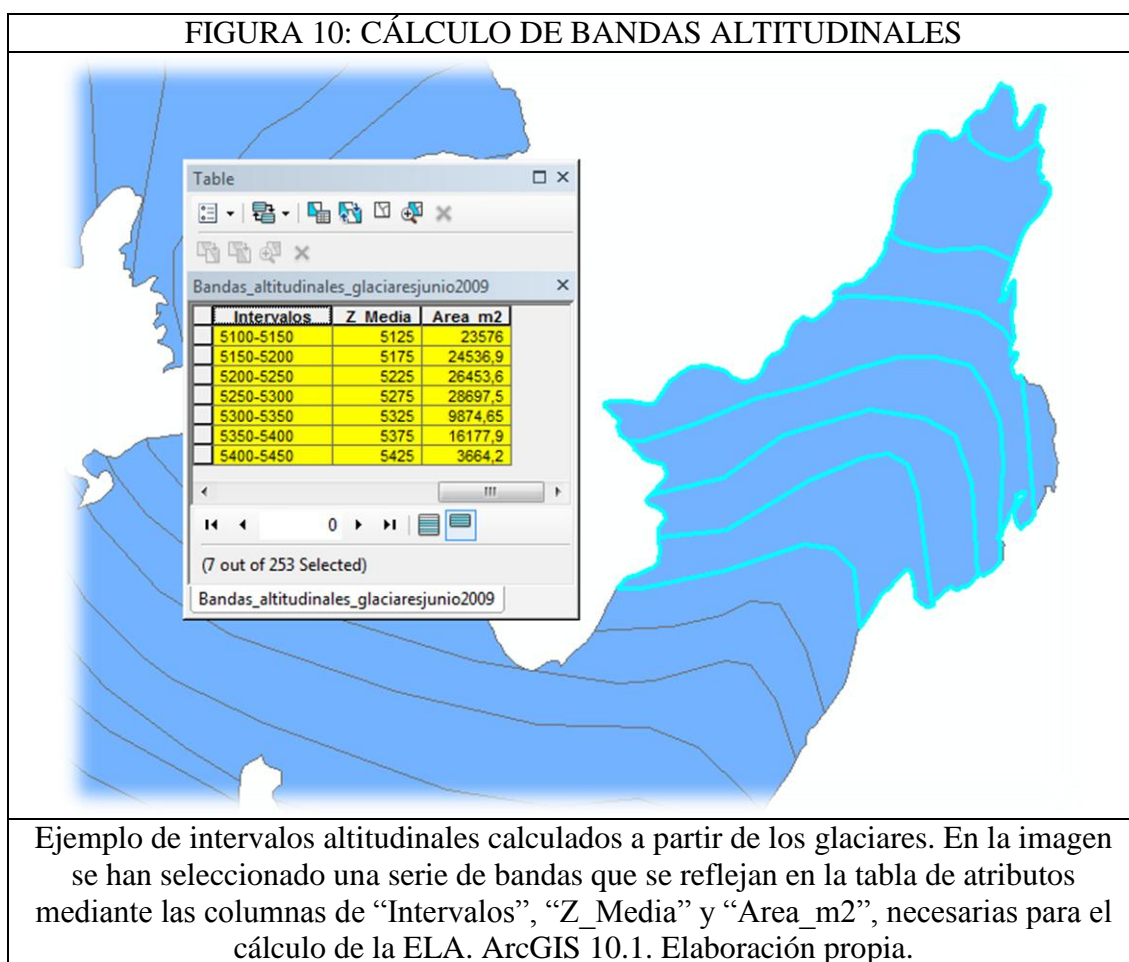
A continuación se presenta un resumen indicando las operaciones que se han desarrollado en ArcGIS para conseguir los intervalos altitudinales y las altitudes medias de los glaciares:

- Las curvas de nivel facilitadas para la zona de estudio se disponían en dos capas diferentes de información, una correspondiente a las curvas de nivel, y otra a los nevados. Para conseguir una capa que aunase las dos anteriores respetando la información y su disposición en la tabla de atributos se ha empleado la herramienta “Append” (Data Management Tools → General → Append).
- Para facilitar el tratamiento de las capas y evitar operar con grandes cantidades de información innecesaria se pasa a reducir el área de la nueva capa de curvas de nivel obtenida en el anterior paso. Para ello se crea una nueva capa poligonal que hace las labores de marco y con la herramienta “Intersect” (Analysis Tools → Overlay → Intersect) se consigue reducir la extensión de la capa de curvas de nivel.
- Únicamente para los paleoglaciares es necesario desarrollar un paso adicional. Los glaciares poseen una acción erosiva lenta pero constante y poderosa, por lo que es necesario tener en cuenta la abrasión y sobreexcavación glacial sobre el lecho rocoso, es decir, la incidencia que ha generado el glaciar en el relieve. Por lo tanto la topografía existente en la Pequeña Edad del Hielo no es la misma en la actualidad en aquellas zonas donde existió el paleoglaciar. Este paso trata de reconstruir la paleotopografía mediante la modificación de las curvas de nivel. Para conseguir este paso habrá que usar la herramienta “Clip” (Analysis Tools → Extract → Clip) sobre las curvas de nivel generadas anteriormente y la extensión de los paleoglaciares, adquiriendo las curvas de nivel que tienen que modificarse para la reconstrucción de la paleotopografía. Con las herramientas de edición se pasa a suavizar las curvas de nivel, simulando un relleno del material pulido y sobreexcavado por el paleoglaciar, esto puede revisarse generando un modelo digital del terreno para comprobar que la paleotopografía tiene sentido (3D Analyst Tools → Data Management → TIN → Create TIN). Para reintroducir las curvas de nivel modificadas al resto del conjunto se utiliza la herramienta “Erase” (Analysis Tools → Overlay → Erase) que se aplica sobre la topografía actual para poder unir posteriormente las dos capas (el Clip de la paleotopografía con el resto de la topografía actual). A continuación se unen las capas (Data Management Tools → General → Append) de la nueva paleotopografía generada para la zona donde se localizan los paleoglaciares con el resto de topografía existente y que no ha sido modificada. De esta forma se ha generado para la zona de estudio una capa que contiene las isohipsas que representan la paleotopografía para la Pequeña Edad de Hielo, que será utilizada para el cálculo de las bandas altitudinales de los paleoglaciares.

- En el siguiente paso entra en escena la capa de glaciares, con ella y con la de curvas de nivel conseguida en el paso previo se realiza un cruce con la herramienta “Feature to Polygon” (Data Management Tools → Features → Feature To Polygon), se crean polígonos glaciares delimitados altitudinalmente.
- Dado que se han generado multitud de polígonos que no aportan ninguna información y contaminan el resultado, se realiza un “Clip” (Analysis Tools → Extract → Clip) estableciendo como marco el propio glaciar para tener únicamente los intervalos altitudinales correspondientes a la superficie glaciar.
- Una vez conseguidos los intervalos altitudinales se añadirán los campos que son imprescindibles para el cálculo de la ELA: el intervalo altitudinal, y la Z o altitud media ((intervalo mayor + intervalor menor)/ 2).

Todo este proceso habrá que repetirse para cada glaciar individualmente para obtener todos los intervalos altitudinales. De igual modo para los paleoglaciares.

Así mismo, para cada intervalo deberá calcularse el área, automáticamente con el programa ArcGIS.



2.4.2. Cálculo de ELAs para los glaciares actuales, año 2009.

Con la hoja de cálculo Excel facilitada se procede a conseguir la ELA. La hoja ha sido programada por Osmaston (2005) que además añade unas especificaciones de uso. Seguidamente se explicará qué pasos hay que seguir para lograr el resultado y en qué consisten.

Antes de insertar datos en la hoja Excel es necesario pasar la tabla de atributos de los glaciares en ArcGIS al formato “.dbf” para que pueda introducirse la información en Excel.

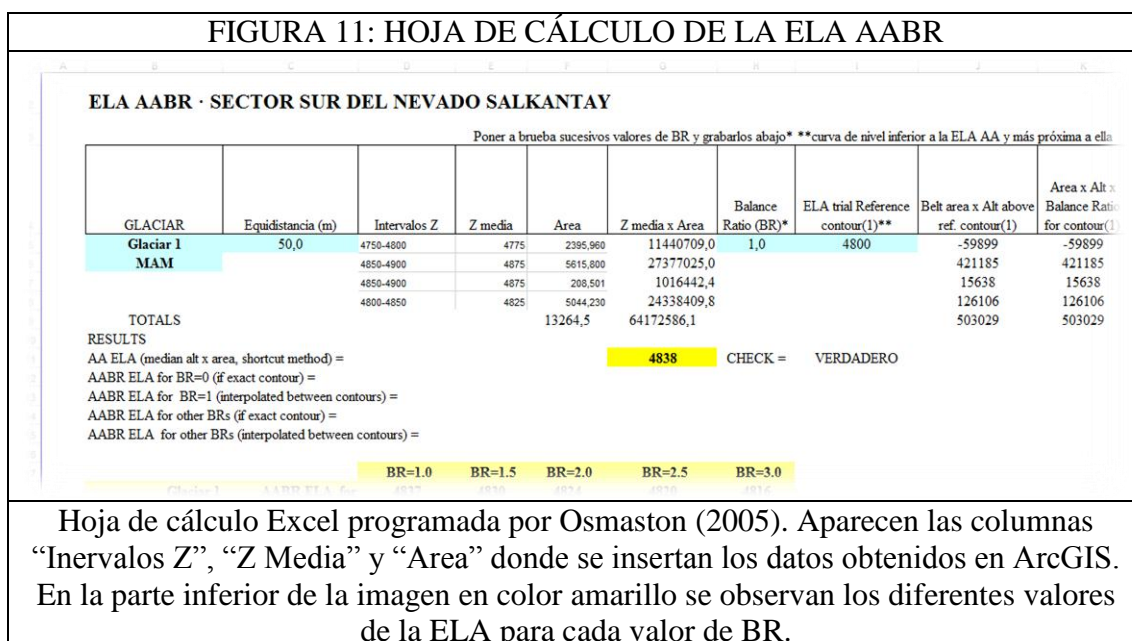
Una vez ya en la hoja de cálculo de Osmaston las columnas que habrá que rellenar con la información obtenida en ArcGIS serán las de “Intervalos Z”, “Z Media” y “Area”. En un primer paso las ELAs son calculadas utilizando el método AA (Area x Altitude) mediante la siguiente ecuación:

$$ELA = \frac{\sum Z * A}{\sum A}$$

$\sum Z * A \rightarrow$ Sumatorio del producto de la altitud media de cada intervalo altitudinal por su área.

$\sum A \rightarrow$ Sumatorio de las áreas de las bandas altitudinales.

Posteriormente se introducen los diferentes valores de BR (Balance Ratio) deseados. El BR es el gradiente de equilibrio en la zona de ablación dividido por el gradiente de equilibrio en la zona de acumulación (Ramage, 2005). Osmaston (2005) utilizó los valores 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0. Para cada BR se obtiene un valor de la ELA, seleccionando aquel ligado a la menor desviación típica, al considerar que es el más probable.



Todo este procedimiento habrá de hacerse para cada uno de los glaciares, siendo el valor promedio de la ELA que menor desviación típica obtenga aquel con el que se trabajará.

FIGURA 12: RESUMEN DE LA ELA AABR

ELA AABR SALCANTAY SUR						
GLACIARES ACTUALES SUR	BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3	
Glaciar 1	4837	4830	4824	4820	4816	
Glaciar 2	4940	4934	4929	4926	4923	
Glaciar 3	4985	4956	4963	4978	4989	
Glaciar 4	4958	4975	4998	5014	5025	
Glaciar 5	4692	4683	4676	4671	4667	
Glaciar 6	4702	4708	4714	4719	4723	
Glaciar 7	4677	4662	4653	4653	4658	
Glaciar 8	4837	4825	4817	4811	4807	
Glaciar 9	4901	4913	4923	4930	4935	
Glaciar 10	4913	4903	4903	4908	4912	
Glaciar 11	4683	4673	4667	4662	4659	
Glaciar 12	4772	4757	4751	4758	4763	
Glaciar 13	4880	4858	4856	4867	4875	
Glaciar 14	5050	5082	5103	5117	5128	
Glaciar 15	5045	5018	5000	5011	5021	
Glaciar 16	4979	4959	4953	4962	4968	
Glaciar 17	5029	5015	5006	5000	5004	
Glaciar 18	5063	5050	5059	5066	5070	
Glaciar 19	5216	5207	5202	5201	5203	
Glaciar 20	4709	4708	4719	4727	4732	
Glaciar 21	5853	5887	5914	5933	5948	
Glaciar 22	5853	5887	5914	5933	5948	
Glaciar 23	5853	5887	5914	5933	5948	
Glaciar 24	5063	5057	5071	5080	5087	
Glaciar 25	4923	4908	4901	4907	4912	
Glaciar 26	4890	4884	4879	4875	4872	
promedio	5012	5009	5012	5018	5023	
desviación típica	339	352	361	366	371	

Hoja de cálculo Excel programada por Osmaston (2005). Se visualiza todos los resultados de las ELAs para cada glaciar y dependiendo del BR. En la parte inferior se ve el promedio y la desviación típica para cada BR. Los valores en cursiva se explicarán en el apartado de resultados.

En este caso (fig. 12) el valor que tiene la menor desviación típica es el primero, correspondiente con el BR = 1,0, arrojando un resultado de 5012 metros para la ELA de los glaciares actuales.

2.4.3. Cálculo de ELAs para los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.

El mismo procedimiento descrito en el apartado anterior es el que se empleó para calcular las paleoELAs de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo. En primer lugar se crearon los intervalos altitudinales y posteriormente se calculó su superficie, para en un siguiente paso hallar las paleoELAs con los datos de altitud (intervalos y altitud media de cada intervalo) y área de cada intervalo.

La única diferencia, en cuanto a metodología se refiere, con respecto a los glaciares actuales, es que se trabajará con la paleotopografía, cuya obtención ya se explicó en apartados anteriores.

FIGURA 13: RESUMEN DE LA PALEOELA AABR

paleoELA AABR SALKANTAY SUR					
<u>PALEOGLACIARES SUR</u>	BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
✓ Paleoglaciador 1	4681	4664	4694	4715	4731
✓ Paleoglaciador 2	4690	4660	4693	4716	4733
✓ Paleoglaciador 3	4602	4640	4667	4685	4698
✓ Paleoglaciador 4	4660	4678	4703	4720	4731
✓ Paleoglaciador 5	4670	4665	4689	4705	4716
✓ Paleoglaciador 6	4653	4674	4690	4700	4707
✓ Paleoglaciador 7	4702	4737	4760	4775	4786
✓ Paleoglaciador 8	4932	4904	4913	4925	4934
✓ Paleoglaciador 9	4788	4761	4756	4770	4780
promedio	4709	4709	4729	4746	4757
desviación típica	97	83	76	74	73

Hoja de cálculo Excel programada por Osmaston (2005). Se visualiza todos los resultados de la paleoELA para cada glaciar y dependiendo del BR. En la parte inferior se ve el promedio y la desviación típica para cada BR.

El valor obtenido (fig. 13) con una menor desviación típica es el que se corresponde con el BR = 3,0. El resultado de la paleoELA para los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo es de 4757 metros.

2.5. ELAs y zonas de acumulación y ablación.

Como se ha comentado anteriormente, el cálculo de los valores de las ELAs en la hoja Excel genera varios registros, cada uno de ellos asociados a un Balance Ratio diferente (fig. 12 y 13). El valor de la ELA con menor desviación típica es el que ha sido seleccionado, indicando que es aquel el que tiene una probabilidad estadística más elevada de ser el adecuado.

Las ELAs de los glaciares de la zona de estudio se aproximan mucho entre sí, debido a que sólo factores locales e individuales como la pendiente o la orientación influyen para generar esas pequeñas variaciones en los resultados. Un grupo homogéneo de glaciares, en un área restringida con un medio ambiente homogéneo, debe reaccionar al clima que experimentan de manera similar (Osmaston, 2005).

2.5.1. Sistema de modelización de la ELA.

ArcGIS 10.1 posibilita la generación de una capa que contenga la isohipsa que marque el valor de la ELA obtenido anteriormente en la hoja de cálculo Excel programada por Osmaston (2005). Esto se ha realizado para la ELA de los glaciares actuales con fecha de 2009 y para la paleoELA de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.

Para conseguir esto habrá que proceder con los siguientes pasos:

- En primer lugar hay que crear un TIN (Triangular Irregular Networks) basado en la capa de curvas de nivel (en la paleotopografía para el caso de la paleoELA). Para eso se emplea la herramienta “Create TIN” (3D Analyst Tools → Data Management → TIN → Create TIN). Un TIN es una estructura de datos de tipo vectorial que se utiliza para representar la distribución de cualquier variable continua.
- En segundo lugar el TIN generado ha de convertirse a un MDT con la herramienta “TIN to Raster” (3D Analyst Tools → Conversion → From TIN → TIN to Raster). Es fundamental que el “Cellsize” sea 1 a la hora de realizar la operación de transformación para que así el MDT generado tenga cotas de 1 m de diferencia.
- Para individualizar el valor de la ELA necesitamos la herramienta “Contour List” (Spatial Analyst Tools → Surface → Contour List). Se obtiene una nueva capa de líneas con el valor de la ELA de manera independiente, es una línea que recorre el valor hipsométrico de la ELA.
- Por último con la herramienta “Clip” (Analysis Tools → Extract → Clip) se consigue ajustar la capa de la ELA a la zona donde se encuentran los glaciares.

2.5.2. Zonas de acumulación y ablación y cálculo superficial.

La ELA es la línea de equilibrio altitudinal que diferencia, dentro de un glaciar, las zonas de acumulación y ablación. Aquella línea imaginaria en la que la cantidad de masa adquirida y perdida es la misma, es nula.

Para conseguir diferenciar las zonas de acumulación y ablación de los glaciares simplemente se realizará una división de la superficie del glaciar tomando como referencia la ELA.

Esto se ha realizado para los glaciares actuales fechados en 2009 y para los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.

Los pasos que se han seguido son:

- Se duplican las capas de glaciares desde ArcCatalog.
- A continuación y seleccionando la línea de la ELA se ejecuta “Split Polygons”, de la barra de herramientas “Advanced Editing”.

Una vez obtenidas la superficie de acumulación y la superficie de ablación se genera un nuevo campo y en él se calcula la superficie con la herramienta “Calculate Geometry”.

3. RESULTADOS.

Los glaciares son buenos indicadores para la observación del cambio climático, por ello, el conocer sus tendencias resulta de importancia para establecer y estudiar hipótesis que marquen el estado de las masas de hielo y sus dinámicas.

El objetivo de este proyecto fue la delimitación de los glaciares actuales de la vertiente Sur del Nevado Salcantay y la reconstrucción de sus paleoglaciares durante la Pequeña Edad del Hielo. Para lograr esto, a continuación se exponen los resultados obtenidos mediante el mapeo de las morrenas, la delimitación de los diferentes glaciares y sus superficies, el cálculo de ELAs basado en el modelo AABR, y por último la modelización de las zonas de acumulación y ablación.

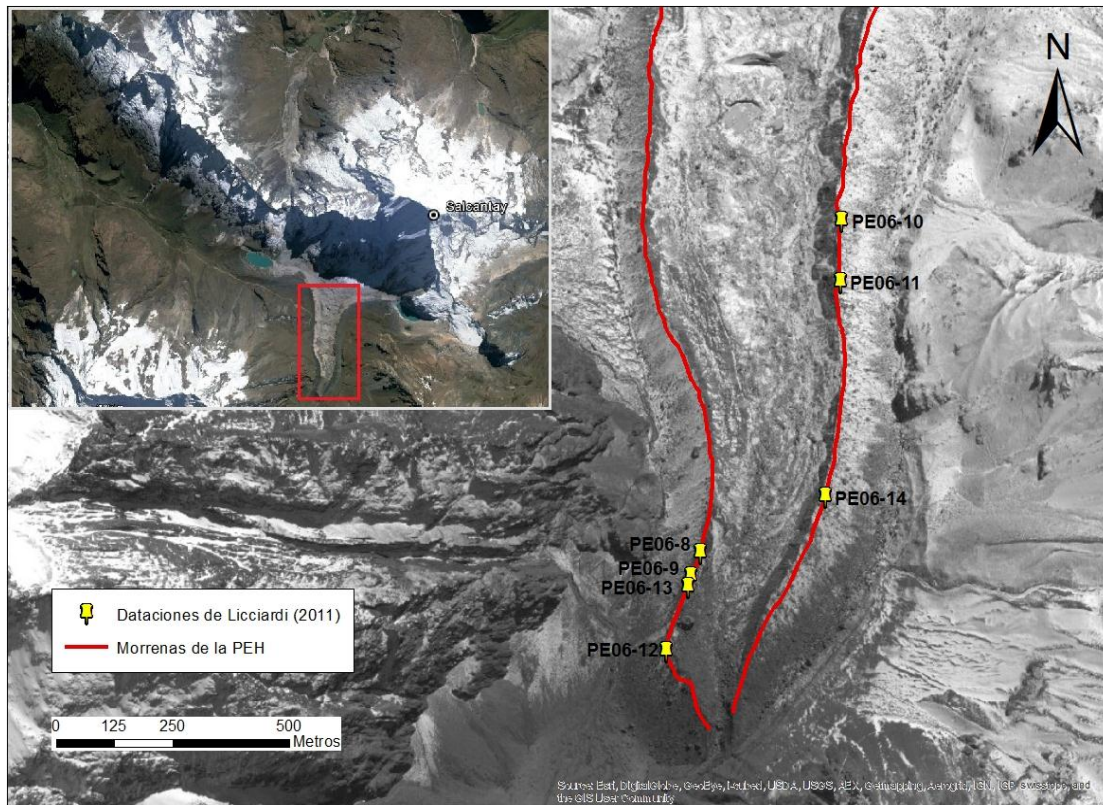
3.1. Mapa de morrenas.

Se define como morrena al conjunto de material detrítico que se transporta y deposita por el movimiento de los glaciares. Es un elemento geomorfológico que se utilizan para designar los límites de extensión de un glaciar en cada uno de los periodos, de este modo han sido clave para definir la superficie y permitir la reconstrucción de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.

Para la vertiente meridional del Nevado Salcantay se han podido definir morrenas de la Pequeña Edad del Hielo, así como en ocasiones pequeñas marcas morrénicas o pulsaciones que se asocian a otras más marcadas. Estas pulsaciones son originadas por los pequeños avances y retrocesos del glaciar durante esta época.

Licciardi et al., en 2011 realizó una publicación sobre dataciones de una de las morrenas más vistosas del área de estudio, la correspondiente al valle alto del Río Blanco, cuyo comienzo se localiza justo al Sur del Salcantay (fig. 14).

FIGURA 14: DATACIONES DE LICCIARDI ET AL. (2011)



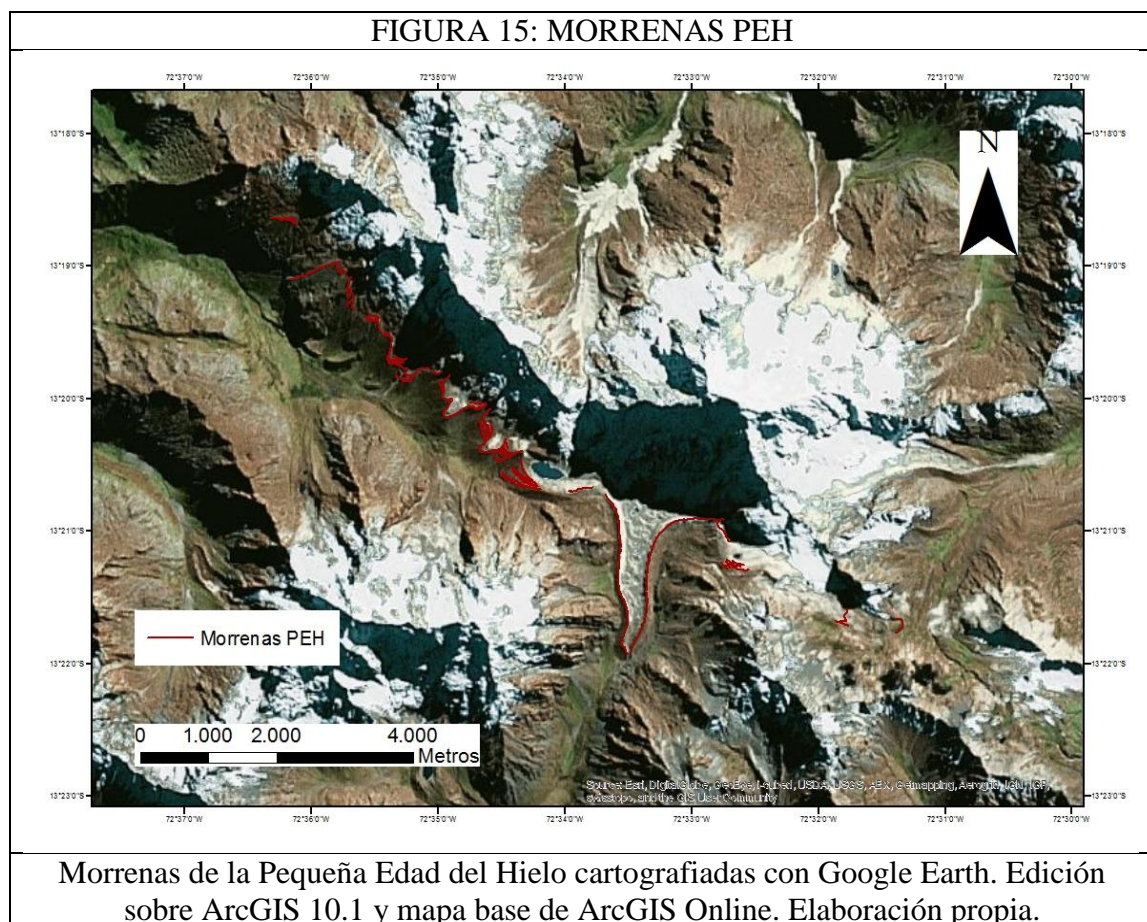
Ubicación de las dataciones de Licciardi (2011) sobre base cartográfica de ArcGIS Online en ArcGIS 10.1. Localización del nevado Salcantay sobre Google Earth. Elaboración propia.

En la siguiente tabla (tabla 2) se exponen las muestras tomadas por Licciardi et al., (2011) y sus dataciones, realizadas con berilio 10 (Be^{10}). Pueden localizarse en el mapa superior (fig. 14).

TABLA 2: DATACIONES DE LICCIARDI ET AL. (2011)		
Muestra	Antigüedad (años)	Error estimado (años)
<i>PE06-8</i>	493	21
PE06-9	229	23
PE06-10	192	12
PE06-11	219	16
<i>PE06-12</i>	1013	28
PE06-13	179	14
PE06-14	175	13
Media	199	25
Muestras y dataciones tomadas por Licciardi et al.(2011) para la morrena del valle del Río Blanco, al Sur del Salcantay. Las muestras en cursiva no se han tomado en cuenta para la media debido a su diferencia de valores con respecto al resto.		

La morrena datada por Licciardi et al. (2011), aquella más fácil de ver, se localiza entre unas altitudes de entre 4200 y 4800 m en su lado más oriental, e indica una antigüedad de 199 ± 25 años.

En la siguiente imagen (fig.15) aparecen las morrenas de la Pequeña Edad del Hielo cartografiadas, así como varias pulsaciones que se han identificado. Estas morrenas han sido digitalizadas en unas cotas altimétricas de entre los 4100 y los 4800 m.



El grupo de morrenas que se ha identificado correspondiente a la PEH presenta una serie de características morfológicas típicas de morrenas que a continuación se exponen. La principal es la conservación en el tiempo, dado que son morrenas muy recientes su buena observación e identificación favorecen la cartografía.

Las morrenas son elementos geomorfológicos que se caracterizan por acumulaciones de material, como ya se definió anteriormente, por lo tanto lo primero que ha de observarse son dichas acumulaciones, junto con otras evidencias como las rocas aborregadas o la sobreexcavación glaciaria que tras la retirada de los hielos puede generar lagunas, como es el caso de las lagunas del Sur del Salcantay cerradas por resaltes rocosos. Las morrenas por lo general presentan una continuidad en el espacio y en la altimetría, exceptuando la gran morrena datada por Licciardi et al. (2011), por lo que son fácilmente identificables si se mantiene un recorrido por valores altitudinales similares.

La mayoría de ellas se corresponden con morrenas de fondo, aunque también se han visualizado morrenas laterales, que sirven para identificar cuál fue la máxima expansión del hielo de los glaciares para esta fase. Son elementos geomorfológicos tan indicativos que son clave para el conocimiento de las fases antiguas del glaciar.

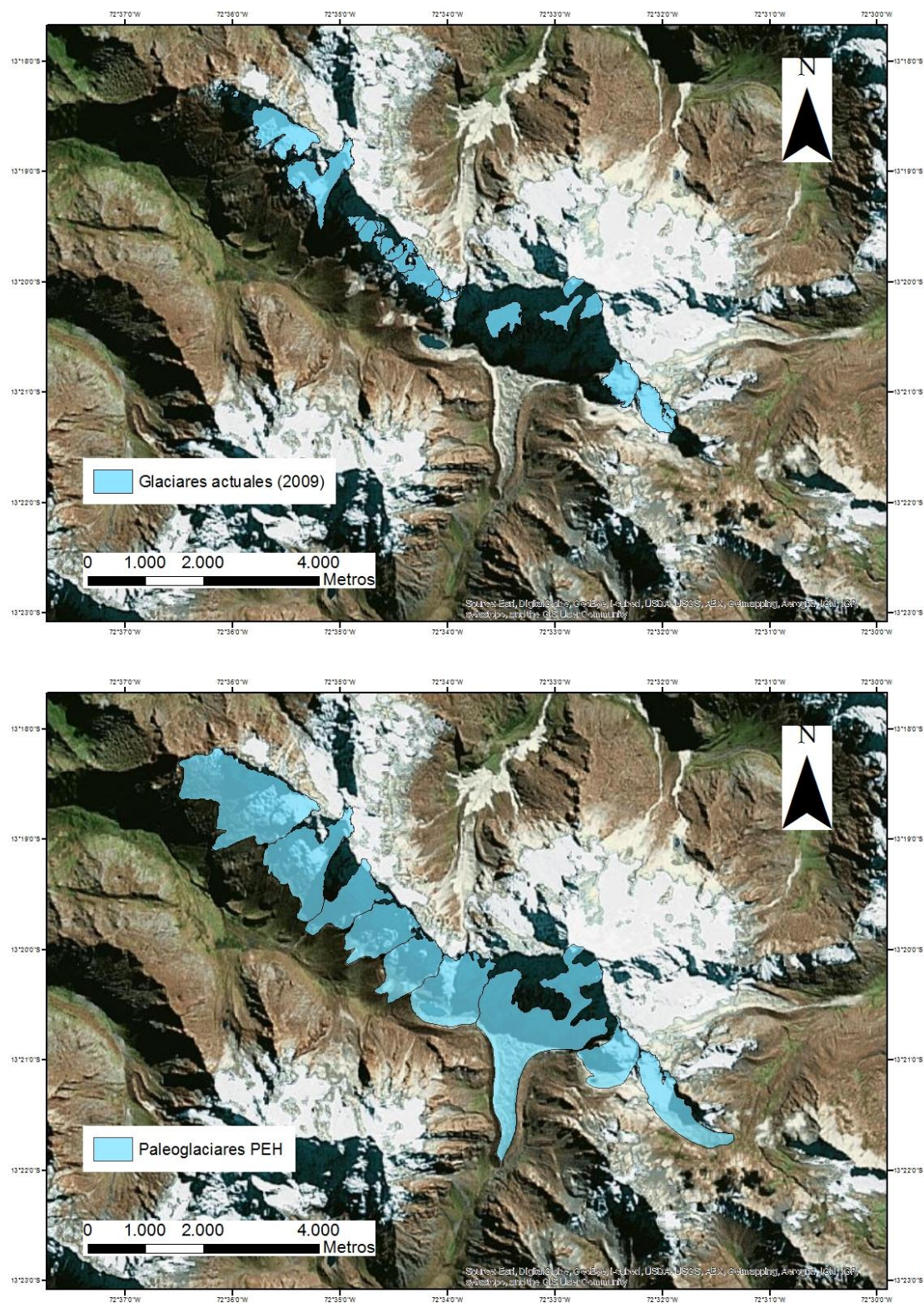
3.2. Delimitación de los glaciares y cálculo de su superficie.

La delimitación de los glaciares de la vertiente Sur del Nevado Salcantay se realizó para dos fases glaciares, el año 2009 y para la Pequeña Edad del Hielo. La diferencia de superficies entre las dos épocas del glaciar sirve para introducir una primera visión de cómo se ha experimentado un evidente retroceso de los glaciares.

Para realizar lo descrito en el párrafo anterior se utilizó fundamentalmente Google Earth. Los glaciares actuales fueron digitalizados directamente sobre este programa con la ayuda complementaria de fotografías de campo. Mientras que para la Pequeña Edad del Hielo esta delimitación se basó en la cartografía de morrenas, desarrollada en el punto anterior.

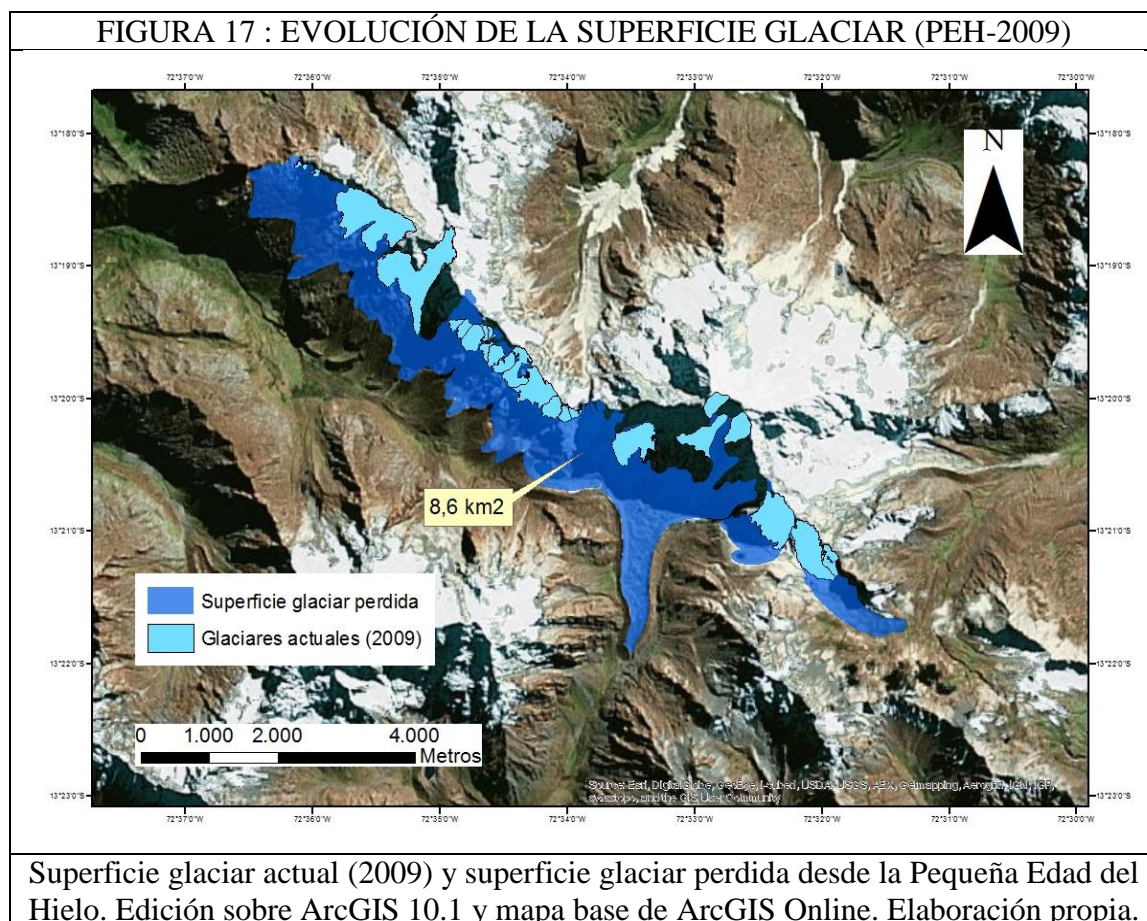
Dicha cartografía para los dos periodos se observa en los mapas que se muestran a continuación (fig. 16). Resulta muy visible la diferencia de tamaño y cómo han ido retrocediendo las masas glaciares.

FIGURA 16: COMPARACIÓN DE LOS GLACIARES ACTUALES (2009) CON LOS DE LA PEH



Digitalización de los glaciares actuales (2009) y de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo. Edición sobre ArcGIS 10.1 y mapa base de ArcGIS Online.
Elaboración propia.

Esa diferencia de superficies (fig. 17) se visualiza de mejor manera en el mapa siguiente, se ha coloreado de un azul más oscuro el total de superficie glaciar que se ha perdido en la vertiente Sur del Salcantay desde la Pequeña Edad del Hielo, un total de 8,6 km².



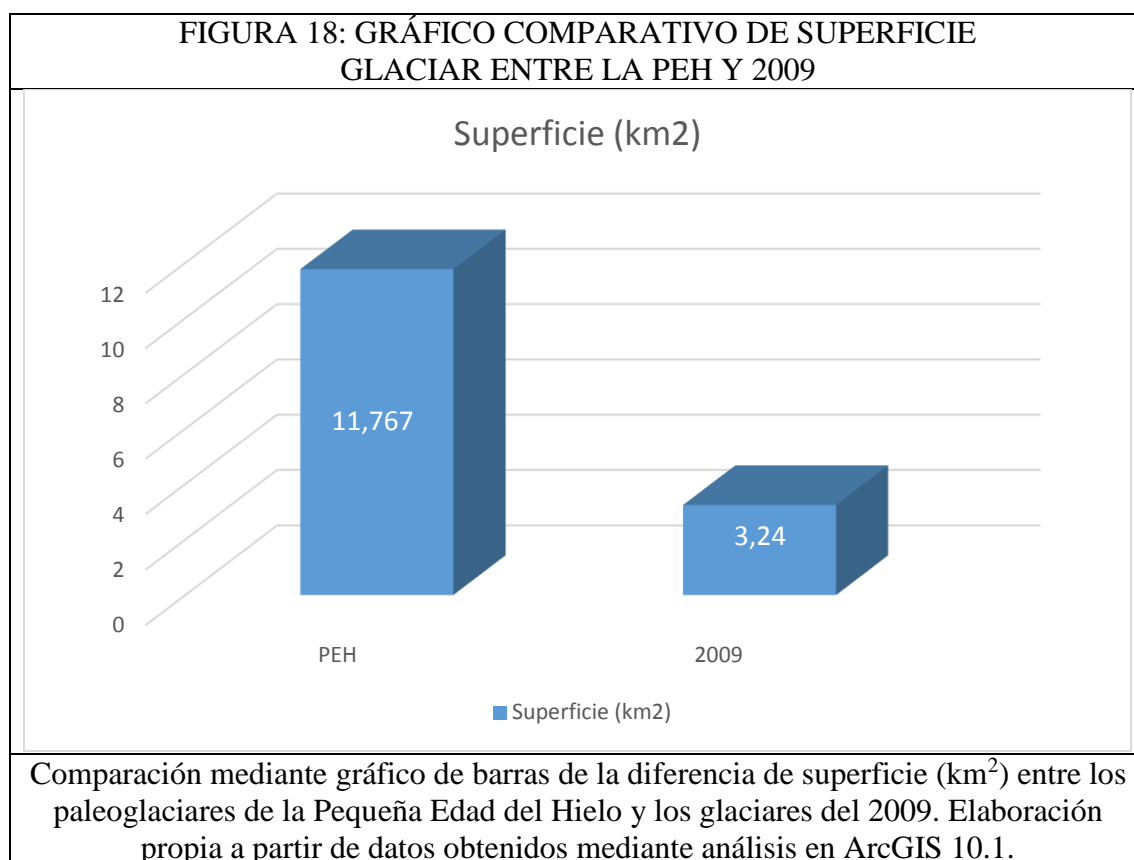
En el año 2009, fecha que se ha tomado de referencia para cartografiar con los glaciares actuales, los glaciares se extendían desde cotas cercanas a los 6240 m (el caso del glaciar con mayor altitud justo al Sur del Salcantay) o 5400 en otros ejemplos en sus límites superiores, hasta altitudes cercanas a los 4400 en la mayoría de los casos, siendo los que se ubican justo en la pared Sur del Salcantay los que mayor cota inferior obtienen superando incluso los 5000 m. La superficie total glaciar para el año 2009 alcanzaba la cifra de 3,24 km².

Sin embargo para la PEH, etapa glaciar que se desarrolló entre los siglos XIV y XVIII, la extensión de los paleoglaciares que se localizaban en la vertiente Sur del Nevado Salcantay era de un total de 11,77 km², un valor que se queda cerca de cuadruplicar la superficie actual. Los paleoglaciares se extendían desde cotas similares a los actuales en sus límites superiores, sin embargo es en los límites inferiores donde se observa una

diferencia contundente, la mayoría de ellos llegaban a alcanzar valores altitudinales de poco más de 4000m, los más orientales se quedaban en torno a los 4400 m.

Estos dos hechos, el valor de las superficies para estos dos periodos, muestran dos situaciones muy bien diferenciadas que reflejan el retroceso que están experimentando los glaciares.

Si consideramos las dataciones de Licciardi et al. (2011) podemos establecer una tasa de retroceso anual entre la PEH y 2009, siendo la fecha de la PEH el año 1812 (restamos la antigüedad media de las muestras al año de la publicación de Licciardi). El resultado sería una tasa de deglaciación anual de unos 43284 m²/año. Si bien es cierto que esa tasa no es representativa, ya que la deglaciación no ha sido lineal, si no que se ha ido incrementando con la llegada del siglo XX y siglo XXI.



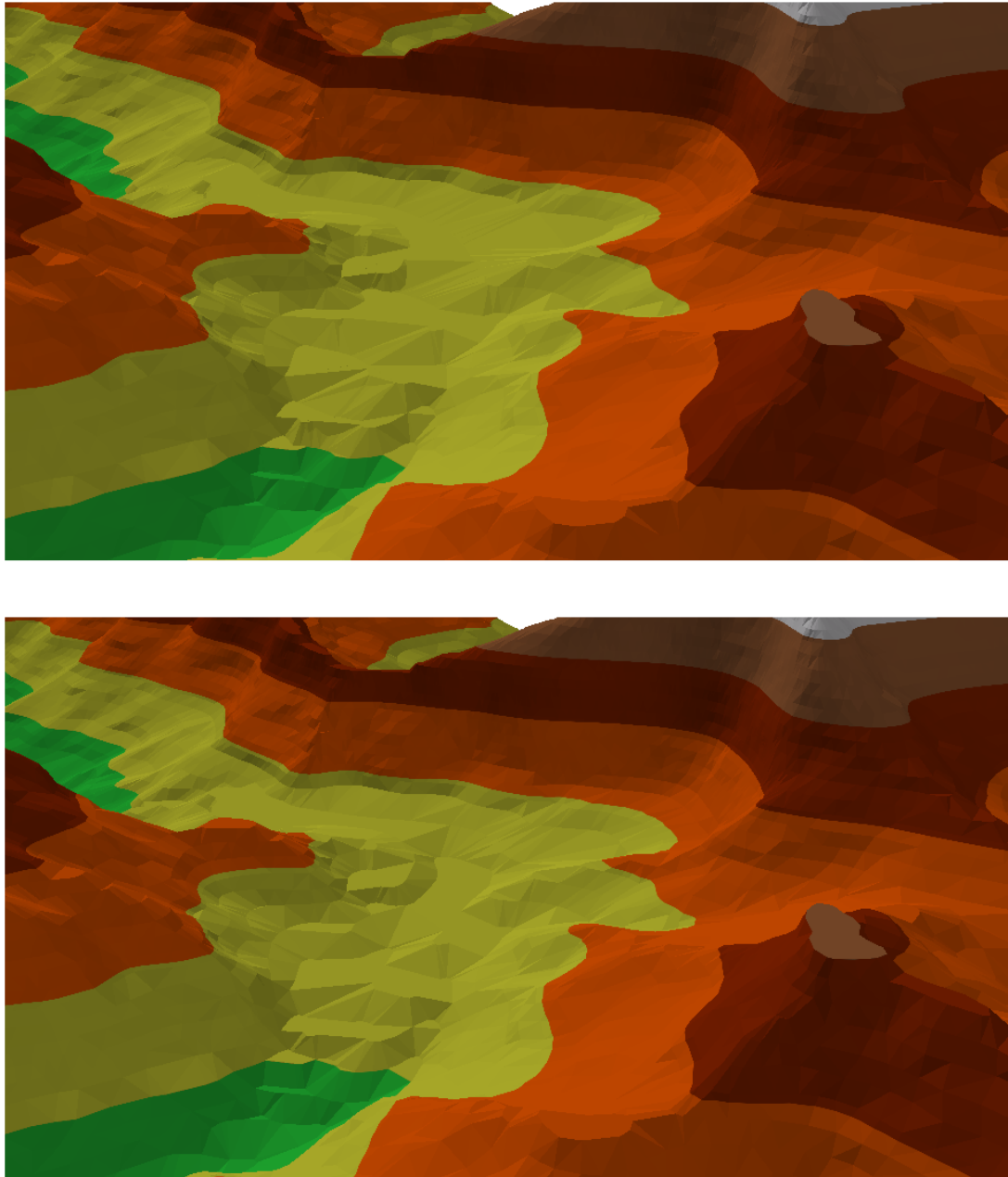
3.3. ELAs según el método AABR.

La ELA de los glaciares, así como la diferencia entre la actual y la paleoELA, es un indicador indirecto o proxy para interpretar y estimar el cambio climático (Benn et al. 2005; Ramage et al. 2005). La característica de los glaciares que refleja directamente el clima es la ELA, tiene una importancia climática definida (Osmaston, 2005).

Para calcular las ELAs se requiere información sobre los límites de los glaciares, su superficie, y la topografía de la zona donde se ubican los glaciares. Toda esta información se ha introducido en la hoja de cálculo de Osmaston (2005) para obtener los

valores de la ELA. Para el caso de los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo hubo que reconstruir la pelotopografía, en la imagen que se expone a continuación (fig. 19) se observa la modificación de las curvas de nivel para cada uno de los periodos de estudio.

FIGURA 19: COMPARACIÓN DE TOPOGRAFÍA



Comparación de la paleotopografía de la PEH (imagen superior) con la topografía actual (imagen inferior). Se observan pequeñas modificaciones en el valle. Elaboración propia del modelo tridimensional en ArcScene.

La recreación tridimensional está centrada en la parte superior del valle alto del río Blanco, justo al Sur del Nevado Salcantay. Se observan pequeñas variaciones topográficas que indican una sobreexcavación y desgaste del terreno provocado por la acción erosiva del antiguo paleoglaciar.

La hoja Excel de Osmaston calcula cada valor de la ELA en función de una serie de BR diferentes, siendo el valor óptimo el que menor desviación tiene, explicado en el apartado metodológico. A continuación (fig. 20) se observan todos los valores de la ELA para cada BR de los glaciares actuales, y de igual modo los valores de la paleoELA para los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo.

FIGURA 20: RESULTADOS ELA AABR

ELA AABR SALCANTAY SUR					
GLACIARES ACTUALES	BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
Glaciar 1	4837	4830	4824	4820	4816
Glaciar 2	4940	4934	4929	4926	4923
Glaciar 3	4985	4956	4963	4978	4989
Glaciar 4	4958	4975	4998	5014	5025
Glaciar 5	4692	4683	4676	4671	4667
Glaciar 6	4702	4708	4714	4719	4723
Glaciar 7	4677	4662	4653	4653	4658
Glaciar 8	4837	4825	4817	4811	4807
Glaciar 9	4901	4913	4923	4930	4935
Glaciar 10	4913	4903	4903	4908	4912
Glaciar 11	4683	4673	4667	4662	4659
Glaciar 12	4772	4757	4751	4758	4763
Glaciar 13	4880	4858	4856	4867	4875
Glaciar 14	5050	5082	5103	5117	5128
Glaciar 15	5045	5018	5000	5011	5021
Glaciar 16	4979	4959	4953	4962	4968
Glaciar 17	5029	5015	5006	5000	5004
Glaciar 18	5063	5050	5059	5066	5070
Glaciar 19	5216	5207	5202	5201	5203
Glaciar 20	4709	4708	4719	4727	4732
<i>Glaciar 21</i>	<i>5853</i>	<i>5887</i>	<i>5914</i>	<i>5933</i>	<i>5948</i>
<i>Glaciar 22</i>	<i>5853</i>	<i>5887</i>	<i>5914</i>	<i>5933</i>	<i>5948</i>
<i>Glaciar 23</i>	<i>5853</i>	<i>5887</i>	<i>5914</i>	<i>5933</i>	<i>5948</i>
Glaciar 24	5063	5057	5071	5080	5087
Glaciar 25	4923	4908	4901	4907	4912
Glaciar 26	4890	4884	4879	4875	4872
Media	5012	5009	5012	5018	5023
Desviación Típica	339	352	361	366	371

Tabla de la ELA según el método AABR para los glaciares de 2009. En azul la menor desviación típica, en amarillo la media seleccionada como ELA. Los valores en cursiva se explicarán en el apartado de resultados. Datos obtenidos a partir de la hoja de Osmaston (2005).

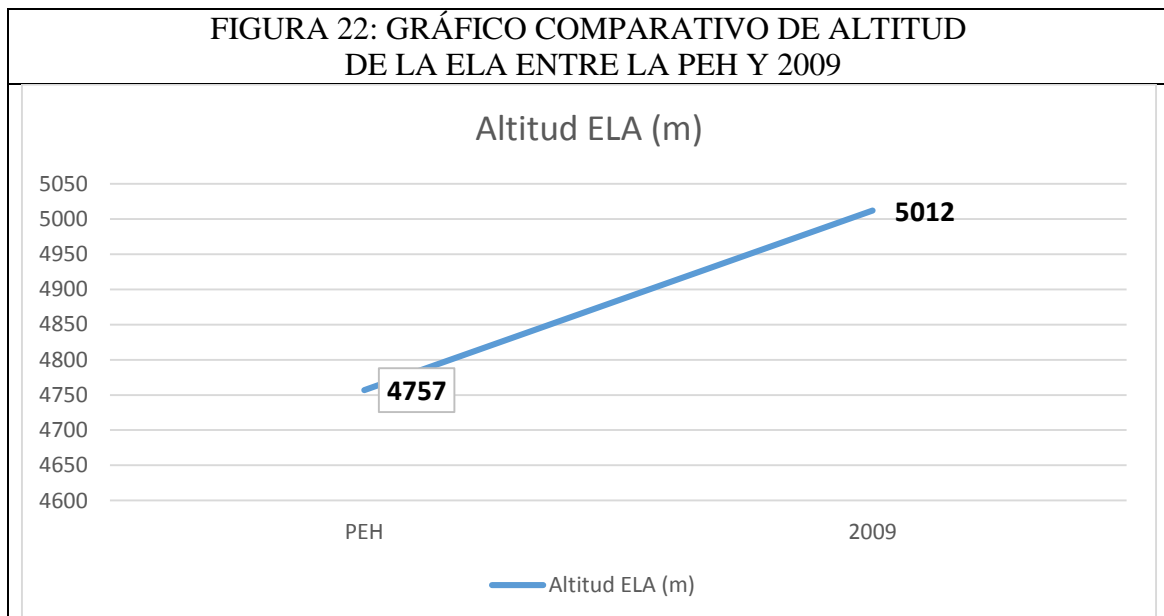
FIGURA 21: RESULTADOS paleoELA AABR

paleoELA AABR SALKANTAY SUR					
GLACIARES SUR	BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
Paleoglaciario 1	4681	4664	4694	4715	4731
Paleoglaciario 2	4690	4660	4693	4716	4733
Paleoglaciario 3	4602	4640	4667	4685	4698
Paleoglaciario 4	4660	4678	4703	4720	4731
Paleoglaciario 5	4670	4665	4689	4705	4716
Paleoglaciario 6	4653	4674	4690	4700	4707
Paleoglaciario 7	4702	4737	4760	4775	4786
Paleoglaciario 8	4932	4904	4913	4925	4934
Paleoglaciario 9	4788	4761	4756	4770	4780
promedio	4709	4709	4729	4746	4757
desviación típica	97	83	76	74	73

Tabla de la paleoELA según el método AABR para los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo. En azul la menor desviación típica, en amarillo la media seleccionada como ELA. Datos obtenidos a partir de la hoja de Osmaston (2005)

La ELA ha variado notablemente, siendo de 4757 m en la PEH (fig.21) y de 5012 m en 2009 (fig. 20), con un incremento de 255 m, reflejado en el gráfico que se muestra seguidamente (fig. 22).

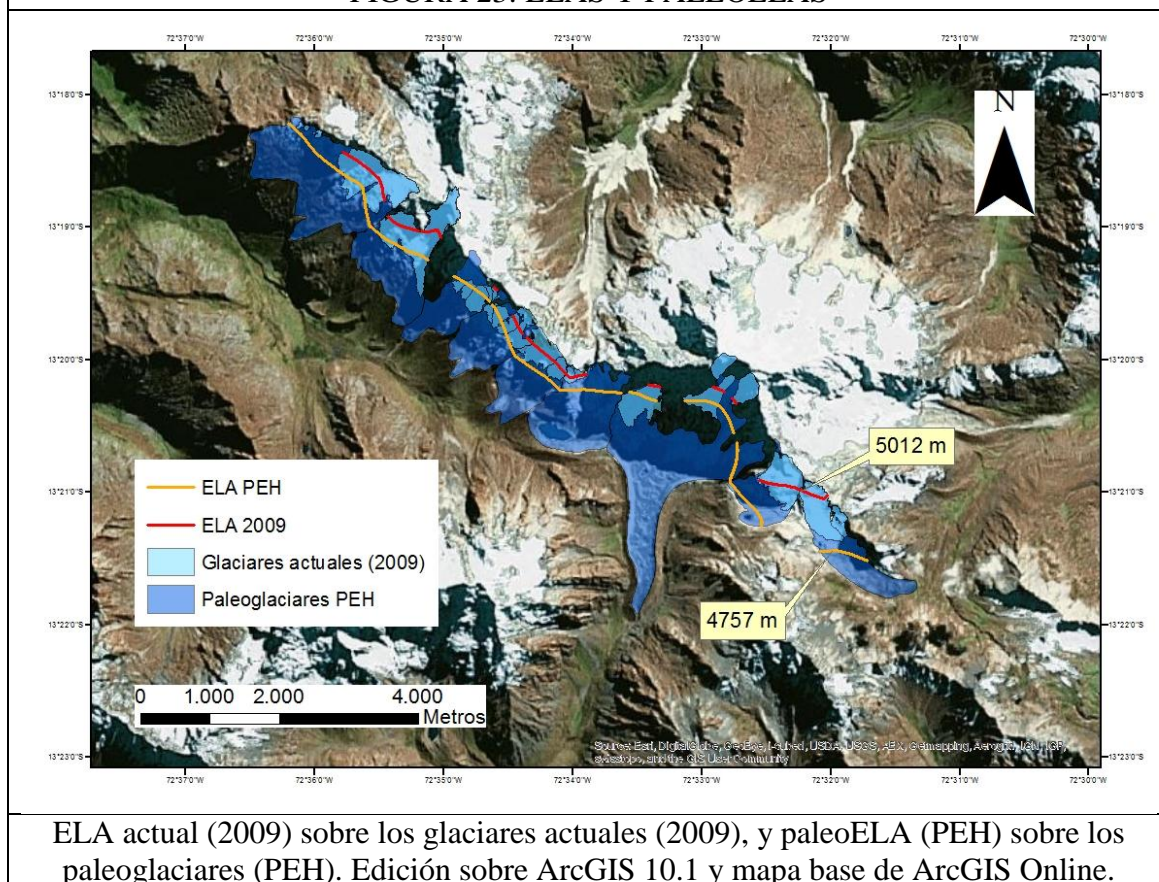
FIGURA 22: GRÁFICO COMPARATIVO DE ALTITUD DE LA ELA ENTRE LA PEH Y 2009



Comparación mediante gráfico de líneas de la diferencia de altitud (m) de la ELA entre los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo y los glaciares del 2009. Elaboración a partir de datos obtenidos mediante análisis en ArcGIS 10.1.

La ELA está vinculada con las condiciones climáticas y de temperatura del periodo al que pertenecen. El que los valores que se han calculado de la ELA sean diferentes, siendo mayor el actual y menor la paleoELA de la PEH, implica que ha habido una modificación de las condiciones climáticas y de temperatura. Por lo tanto la ELA y las variaciones que esta sufre suministran una información fundamental para el estudio del cambio climático, relacionándola directamente con la extensión y superficie de los glaciares para cada periodo.

FIGURA 23: ELAS Y PALEOELAS



3.4. Modelo espacial de las ELAs y áreas de acumulación y ablación.

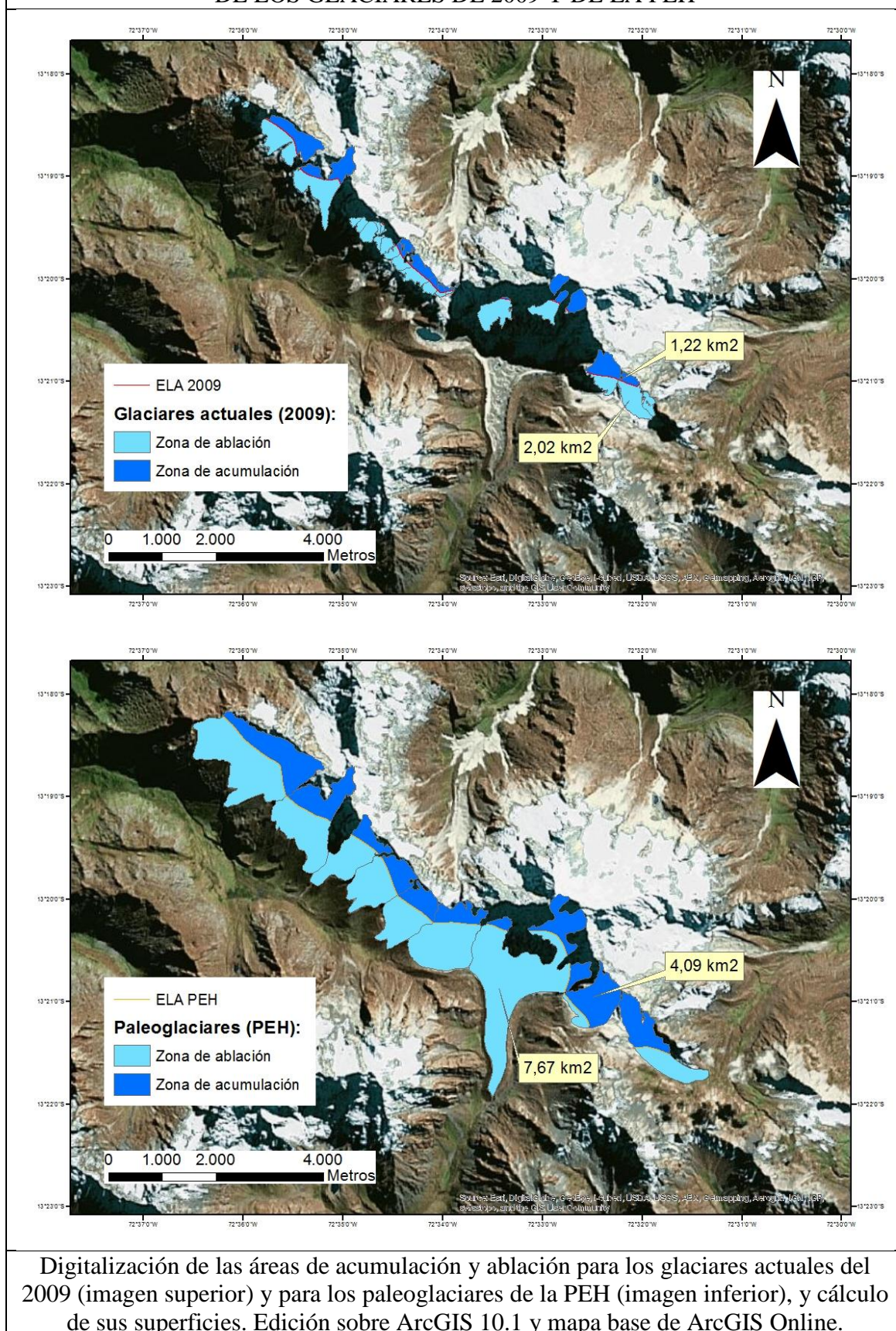
Como ya se ha explicado en capítulos anteriores la ELA (Equilibrium Line Altitude) o Línea de Equilibrio Altitudinal es una línea imaginaria donde las pérdidas y ganancias de masa son nulas. Sirve de frontera entre la zona de acumulación y la zona de ablación, y sobre ello se basa el contenido de este apartado.

La ELA es el límite imaginario de los dos grandes elementos del contenido de masa de los glaciares. En la zona superior del glaciar se halla el área de acumulación donde se obtienen ganancia de masa a través de procesos como la compactación de la nieve, neviza y el hielo; mientras que en la zona inferior se localiza el área de ablación donde se producen procesos de pérdida de masa glaciar como la fusión y sublimación.

Todo ello hace que la ELA sea un indicador valiosísimo en la predicción de la evolución del glaciar, sirve para interpretar de qué manera va a desarrollarse el glaciar en los próximos años, si experimentará un aumento o una pérdida de masa, e incluso si el glaciar está en un proceso terminal y terminará extinguiéndose con el paso del tiempo (esta última situación se produce cuando la ELA es más elevada que el límite superior del glaciar eliminándose la zona de acumulación por completo).

La ELA está íntimamente relacionada con las condiciones climáticas del lugar, de modo que el clima afectará al glaciar y esto vendrá reflejado en la ELA, por lo que también puede experimentar cambios tanto hacia mayores altitudes como a menores.

FIGURA 24: ÁREAS DE ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN DE LOS GLACIARES DE 2009 Y DE LA PEH



En las imágenes anteriores (fig. 24) se comparaba la situación de la ELA y la variación de la misma, obteniéndose un incremento en altitud desde la PEH hasta el año 2009 de 255 m.

La posible circunstancia que se mencionaba anteriormente de que algunos glaciares puedan interpretarse como terminales sucede en varios de los glaciares del año 2009 al verse superados altitudinalmente por la ELA, es el caso de varios de los glaciares que se localizan en la parte central-occidental del área de estudio. Al haber perdido toda su zona de acumulación es cuestión de tiempo, siempre que no se modifiquen drásticamente las condiciones climáticas, que esos glaciares desaparezcan.

Si se tomara como referencia los datos de la tasa de deglaciación estimación calculada en apartados anteriores, muchos de los glaciares actuales desaparecerían próximamente. Del mismo modo que se calculó para las superficies también se puede realizar una aproximación del aumento de la ELA por año. Tomando los mismos criterios el resultado es de un ascenso vertical de 1,29 m/año.

Para conseguir información adicional que pueda ser de utilidad para el conocimiento del clima y su evolución así como las repercusiones que genera, se puede utilizar una ecuación que relacione los desplazamientos verticales de los valores de las ELAs con las variaciones en la temperatura. Para ello Úbeda (2010) propone la siguiente ecuación:

$$\Delta T = GTV * \Delta ELA$$

Donde:

ΔT : se refiere a la variación de la temperatura

GTV : se refiere al gradiente térmico vertical

ΔELA : se refiere a la variación de la ELA

El GTV que se utiliza será el GTV global, es decir 6°C por km (0,006°C/m), de este modo el resultado que muestra la variación de temperatura entre la PEH y 2009 es 1,53°C. Para conseguir un cálculo más exacto se debería obtener un GTV local personalizado para la vertiente Sur del Nevado Salcantay mediante características de la zona como humedad, precipitación, temperatura, u orientación entre otros.

Como conclusión hay que subrayar el valor de la ELA para generar predicciones de tendencias climáticas, así como para observar y analizar de qué manera se ha comportado el clima en el pasado y cómo ha evolucionado hasta el presente.

4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS Y FUTUROS TRABAJOS.

Los glaciares tropicales que se localizan en la cordillera de los Andes son unos indicadores óptimos a la hora de analizar el clima tropical y las variaciones ambientales del entorno. La alta sensibilidad de los glaciares tropicales de montaña a los cambios climáticos con una amplitud relativamente pequeña los hace muy útiles como indicadores de las fluctuaciones climáticas (Licciardi et al., 2009).

El objetivo de este trabajo era la reconstrucción de fases glaciares para la vertiente Sur del Nevado Salcantay de manera que se pudiera conseguir evaluar información de los cambios ocurridos en la zona y así poder analizar la evolución que han experimentado los glaciares y la relación que tiene con el clima.

Los resultados que se han obtenido reflejan una pérdida de superficie glaciar desde la PEH hasta 2009 de 8,6 km², lo que supone una pérdida del 73 %. Con respecto a la ELA AABR en la PEH alcanzaba un valor de 4757 m, mientras que en 2009 5012 m, un incremento en altitud de 255 m, unos resultados muy significativos que si se interpretan como constantes suponen un aumento de la ELA de 1,29 m por año. Si los resultados de las fluctuaciones altitudinales de las ELAs se asocian únicamente a la temperatura se obtiene una diferencia de temperatura entre la PEH y el año 2009 de 1,53 °C.

4.1. Cartografía de morrenas.

La cartografía de morrenas es un importante paso en el proceso que conlleva la reconstrucción de los paleoglaciares. Esta cartografía se ha elaborado a partir de imágenes proporcionadas por Google Earth fechadas en 2009, lo que ha permitido identificar las morrenas de la vertiente Sur del Nevado Salcantay correspondientes al periodo de la Pequeña Edad del Hielo.

Las morrenas de la PEH para la vertiente Sur del Nevado Salcantay se disponen sobre altitudes mínimas de 4100 m para la mayor parte de las morrenas cartografiadas. Es cierto que en el paleoglaciar que se localiza justo al Sur del Salcantay y se dispone longitudinalmente en la cabecera del valle alto del río Blanco esas morrenas tienen unas cotas mínimas similares al resto, a pesar de que la lengua del paleoglaciar es mucho más extensa favorecida por una topografía más suave y no tan abrupta como en el resto del área de estudio. Se sugiere que para este periodo incluso a nivel local existan pequeñas fluctuaciones, como es el caso de la longitud de estas morrenas, producido en este caso por la pendiente ya que al ser menos escarpada es más complicado que se generen pérdidas a raíz de las fracturas del hielo y los aludes.

Las morrenas de la cordillera Vilcabamba también han sido objeto de estudios para otros autores, es el caso de Licciardi et al.(2009) que debido a las dataciones morrénicas no excluye la existencia de varios periodos de reavance de los glaciares durante el Holoceno, llegando a la conclusión de que la Pequeña Edad del Hielo es el segundo episodio del Holoceno (el primero se corresponde con un intervalo glacial Holoceno temprano) que más destaca por evidencias geomorfológicas en la cordillera de Vilcabamba. Esto no se cumple a lo largo de los Andes, Rodbell et al., (2009) llega a la

conclusión de que la PEH en determinadas zonas supone los máximos avances del Holoceno.

Si los resultados de las morrenas de la PEH de la vertiente Sur del nevado Salcantay se comparan con otras cordilleras de los Andes Centrales se aprecian pequeñas diferencias. Jose Úbeda (2011) para el Nevado Coropuna identificó las morrenas de la PEH en intervalos altitudinales de entre 4735 m en el sector Suroeste, y 6300 m en la vertiente Sureste. Sin embargo en otros sectores del mismo Nevado Coropuna los resultados presentan pequeñas variaciones, en el cuadrante Noroeste, García Gutiérrez (2013) observó las morrenas de este periodo en intervalos situados entre los 5400 y los 5800 m, y en el Suroeste Campos (2012) agrupó las morrenas entre los 5200 y 6100 m. En otras cordilleras como es el caso de la cordillera Blanca en el sector Suroeste del Nevado Hualcán, Giráldez (2011) estableció las morrenas entre 3460 y 4070 m.

La diferencia de resultados demuestra que el periodo de la Pequeña Edad del Hielo no tuvo las mismas consecuencias, repercusiones y grados de intensidad en los Andes Centrales. Tampoco fue un periodo que tuviera una influencia similar a lo largo de la cordillera andina, adquiriendo en unas zonas una mayor importancia a nivel de extensión glaciaria que en otras. Si nos ceñimos al por qué de estas variaciones altitudinales en los Andes Centrales se debe a las diferencias locales que presenta cada cordillera y más concretamente cada aparato glaciario, como ya se ha mencionado a lo largo de este trabajo las condiciones de cada glaciar son únicas y vienen influidas por la topografía, orientación, y condiciones locales climáticas de temperatura y precipitación.

Estas variaciones podrían ajustarse si se emplearan métodos de datación absoluta para el área de estudio, teniendo en cuenta las metodologías previas empleadas por otros autores para su correcta comparación y discusión.

4.2. Delimitación de los glaciares y cálculo de superficies.

La delimitación de los glaciares se ha conseguido mediante imágenes de Google Earth, mientras que para reconstruir los paleoglaciares el elemento principal empleado ha sido la cartografía de morrenas. La digitalización de los glaciares y la reconstrucción de los paleoglaciares son especialmente útiles para el cálculo de superficies y de las ELAs, mediante los cuales se pueden realizar análisis comparativos que confieren una información muy valiosa para evaluar el clima y su evolución.

Los resultados que se han obtenido reflejan que los glaciares actuales para el año 2009 comprendían unas cotas mínimas de 4400 m y unas cotas superiores de 6400 m que se visualizan en los glaciares de la pared Sur del Salcantay, llegando casi a conectar con la cima del Nevado Salcantay. La superficie total acumulada de estos glaciares es de 3,24 km².

Sin embargo para los glaciares actuales, y concretamente tres de ellos que se localizan en la pared Sur del Nevado Salcantay y que se han citado con anterioridad, han existido ciertas complicaciones a la hora de llevar a cabo su identificación y cartografía. Estos glaciares (fig. 25) generan cierta controversia sobre si realmente son o no son glaciares,

ya que la topografía sobre la que se asientan presenta una pendiente demasiado pronunciada como para favorecer la acumulación y conservación de masas de hielo.

FIGURA 25: LOCALIZACIÓN DE GLACIARES PROBLEMÁTICOS



En la imagen de la izquierda plano general de la pared Sur del Nevado Salcantay. En la imagen de la derecha ampliación de uno de los glaciares problema. Fotografías de campo de Agosto de 2014 proporcionadas por Jose Úbeda.

Esta característica suscita la posibilidad de que lo que conformen dichos glaciares sean en realidad cúmulos de nieve creados a partir de la precipitación y los movimientos en masa y aludes, lo que no permitiría definir a estas estructuras como glaciares, siendo descartados de este estudio. En el supuesto caso de que no se incluyeran en el estudio los glaciares problema, el área que ocupan los glaciares actuales se reduciría a 2,77 km².

No obstante estos glaciares han sido incluidos en el estudio y se dan por válidos, pudiendo en futuros trabajos determinar con una precisión mayor su naturaleza.

Esta superficie era mucho mayor en los paleoglaciares de la Pequeña Edad del Hielo, concretamente aglutinaban un total de 11,77 km², y se extendían hasta cotas cercanas a los 4000 m. Esta disminución de la superficie refleja datos alarmantes, ya que entre estos dos periodos se ha perdido un 73% de área glacial, lo que demuestra un proceso de deshielo continuo que si lo relacionamos con la tasa de deglaciación es de 43284m²/año.

Al relacionar estos datos con otros trabajos de los Andes Centrales que hayan trabajado para los periodos de la Pequeña Edad del Hielo y el periodo actual, se observan los siguientes resultados. Giráldez (2011) en la cordillera Blanca calculó un área para los glaciares de la PEH de 29,73 km² y para el 2003 un total de 18,55 km², un 38% menos de superficie glacial. Quirós (2013) para las montañas Chollquepucro y Pariaqaqa identificó una superficie glacial para la PEH de 21,27 km² mientras que en el 2010 únicamente 3,13 km², lo que supone un 85% de superficie glacial perdida. En el caso del Nevado Coropuna Úbeda (2011) para el sector Noreste fijó en 3,32 km² la superficie de los paleoglaciares de la PEH y en 2,27 km² los del año 2007, un 32% menos de superficie; y para el sector Noroeste García Gutiérrez (2013) estableció 3,54 km² para los glaciares de la PEH y 1,87 km² para los del 2010, un 48% menos.

La delimitación de los glaciares proporciona información cuantitativa muy útil para el estudio de la evolución de los mismos, como es el caso de la superficie. Procesos

pendientes como realizar estudios sobre los volúmenes de hielo pueden resultar de gran interés para conseguir información que pueda unirse a la de este trabajo, ya que puede ser útil para calcular la disponibilidad del recurso hídrico que proporcionan los glaciares, así como para controlar de un modo más fiable los riesgos que se les asocian.

4.3. ELAs AABR.

Las modificaciones que se producen en las ELAs proporcionan una información muy valiosa sobre las condiciones paleoclimáticas y cómo han evolucionado hasta el presente. La ELA está estrechamente ligada con la masa de los glaciares y las superficies de ablación y acumulación, pudiendo emplearse esta información para generar parámetros y relacionar datos sobre las variaciones climáticas de temperatura, precipitación, o radiación solar que han ido actuando sobre el área de estudio.

En este trabajo se han elaborado las ELAs de la vertiente Sur del Salcantay basándose en el método AABR (Area x Altitude Balance Ratio) tanto para la ELA actual del 2009 como para la paleoELA de la PEH. Este método, el cual se ha explicado previamente, arroja unos resultados de 5012 m para la ELA de los glaciares de 2009 y de 4757 m para los paleoglaciares de la PEH, un ascenso vertical de la ELA de 255 m, que supone una media de 1,29 m de ascenso por año. Se trata de un argumento más para evidenciar la disminución de la masa glaciar y la retirada de los mismos hacia altitudes más elevadas.

De la misma manera que para la superficie glaciar, para las ELAs actuales también se ha de tener en cuenta los glaciares problemáticos identificados. Los resultados de las ELAs pueden ser discutidos y comparados tomando en cuenta o no esos tres glaciares problemas. De este modo, si se llegaran a excluir, repercutiría en la ELA de tal modo que los valores de la misma para el 2009 serían de 4911 m. Así los cambios en la ELA actual serían de 101 metros menor en la vertical, lo que significaría un ascenso en altura con respecto a la paleoELA de la PEH de 154 m.

En este trabajo los glaciares problema se han considerado como glaciares, por lo que la ELA final para el 2009 es de 5012 m. Sin embargo, ya que existe un amplio margen de error si se toman o no esos glaciares como válidos, es necesario continuar el estudio para resolver esto y centrar la máxima atención a la evolución de los mismos, puesto que dependiendo de su estructura y naturaleza los resultados son bastante variables.

De nuevo se van a comparar los valores de las ELAs con los de cordilleras de los Andes Centrales. En el Nevado Coropuna existen varios estudios de cálculo de la ELA, alguno de ellos ya vienen siendo citados en este trabajo, en el sector Noreste Úbeda (2011) estableció una paleoELA para la PEH de 5886 m y para el año 2007 de 5968 m, y en el sector Sureste para la PEH 5776 m y para 2007 5844 m; Bromley et al. (2011) calculó las ELAs actuales para la vertiente Oeste (5850 ± 54 m) y Sur (5580 ± 54 m); Campos (2012) estableció la ELA actual en 5854 m para la vertiente Suroeste en el año 2007; y por último García Gutiérrez (2013) para la vertiente Noroeste estableció una paleoELA para la PEH de 5961 m y para el año 2010 de 6041 m. Giráldez (2011) para la vertiente Suroeste del Nevado Hualcán fijó la paleoELA de la PEH en 4994 m y la ELA actual de

2003 en 5124. Quirós (2013) en las montañas de Chollquepucro y Pariaqaqa obtuvo una paleoELA de la PEH de 4998 m y la del año 2010 de 5138 m.

Los valores del Salcantay difieren del resto de cordilleras estudiadas, de tal modo que la diferencia de las ELAs es mayor en el primer caso que en el resto. Esto no hace sino aumentar la probabilidad de realizar un estudio futuro para resolver los problemas que han surgido y así disipar dudas, y ver la posibilidad de asemejar los resultados de manera que se homogeneicen.

Los valores de ELA y sus variaciones en el tiempo proporcionan información muy útil para la estimación y el estudio del cambio climático. Si se analiza el desplazamiento vertical que sufre la ELA entre dos o más periodos de tiempo, es posible estudiar las modificaciones climáticas que han sucedido.

4.4. Conclusiones.

Los glaciares, además de constituir una fuente de información vital para el análisis del clima su evolución, suponen un importante recurso hídrico para las poblaciones andinas del entorno del Salcantay y también un foco de riesgos y desastres naturales.

El objetivo de este proyecto era reconstruir las fases de la vertiente Sur del Nevado Salcantay para la obtención de información cuantitativa de cálculo de superficies y ELAs que han permitido el posterior análisis glaciar y climático y su evolución.

Las conclusiones a las que se ha llegado son las siguientes:

- Las morrenas de la vertiente Sur del Salcantay y su identificación y cartografía han servido como referencia para la reconstrucción de anteriores fases glaciares como es el caso de la Pequeña Edad del Hielo, de donde se obtuvo la paleotopografía y los paleoglaciares. Google Earth fue una ayuda fundamental para digitalizar los glaciares modernos del año 2009.
 - Partiendo de la digitalización de los glaciares se calculó las áreas de cada uno de ellos. La superficie glaciar en la PEH era de 11,77 km² y ha experimentado un retroceso de alrededor del 73%. La identificación y digitalización exacta de los glaciares supone un esfuerzo muy grande para que los resultados sean fiables, no obstante sería necesario un estudio futuro para afianzar estos resultados.
- Los datos que se han conseguido se asemejan en parte de los estudios con los que se ha comparado, habiendo diferencias con respecto a otras cordilleras de los Andes Centrales debido a condiciones particulares y locales del área de estudio.
- El cálculo de las ELAs por el método AABR, que se ha considerado el más óptimo, ha dejado como resultado un valor de 4757 m para la PEH y 5012 para el año 2009. Supone una diferencia de 255 m, mayor que en otros puntos de los Andes Centrales. Lo que sugiere que, de igual modo que en el apartado anterior, un nuevo trabajo futuro con datos e imágenes más actuales supondría un reforzamiento de este trabajo.

El cálculo de ELAs ha propiciado que se hallen las superficies de ablación y acumulación de los glaciares, lo que implica el conocimiento del estado de los mismos y si alguno de ellos, como se ha dado el caso, está en riesgo de desaparición.

- Por último, las ELAs han ayudado a calcular las temperaturas de las diferentes fases glaciares estudiadas, permitiendo el análisis de las diferencias climáticas. Se ha producido un aumento de la temperatura en la vertiente Sur del Nevado Salcantay, desde la PEH hasta el 2009, de 1,53 °C.

5. BIBLIOGRAFÍA.

Benn, D.I., Gemmell, A.M.D. (1997). Calculating equilibrium-line altitudes of former glaciers by the balance ratio method: a new computer spreadsheet *Glacial Geology and Geomorphology*.

Benn, D. I., Owen, L. A., Osmaston, H. A., Seltzer, G. O., Porter, S. C. and Mark, B. (2005). Reconstruction of equilibrium-line altitudes for tropical and sub-tropical glaciers. *Quaternary International*, 138–139, 8–21.

Bromley, G. R. M., Hall, B.L., Schaefer, J.M., Winckler, G., Todd, C.E., and Rademaker, K.M. (2011). Glacier fluctuations in the southern Peruvian Andes during the late-glacial period, constrained with cosmogenic ³He. *Journal of Quaternary Science*, 26(1), 37-43.

Campos, N. (2012). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Perú). Master Thesis. Universidad Complutense de Madrid.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Romero, D., Valdivia, W., and Tintaya, D. (1999). Geología de los cuadrángulos de Quillabamba y Machupicchu. Hojas 26-q y 27-q, INGEMMET, Bol. 127, Serie A, Lima-Perú, 317 p.

Carlotto, V., Cárdenas, J., Tintaya, D., Rodríguez, R., and Valdivia, W., (2006). Altos estructurales en el control de la evolución andina: la deflexión de Abancay y el arco de Manu. XIII Congreso Peruano de Geología. Resúmenes Extendidos Sociedad Geológica del Perú.

Farber, D. L., Hancock, G. S., Finkel, R. C. and Rodbell, D. T. (2005). The age and extent of tropical alpine glaciation in the Cordillera Blanca, Peru. *Journal of Quaternary Sciences*, 20, 759–776.

Fernández, A. (2014). Evolución glaciaria en los Andes Centrales. Tesis de Universidad. Universidad Complutense de Madrid.

Francou, B., and Pizarro, L., (1985). El Niño y la sequía en los altos Andes Centrales: (Perú y Bolivia). *Bull. Inst. Fr. Et. And* XIV(1-2), 1-18.

Francou, B., Ribstein, P., Sémiond, H., Portocarrero, C., and Rodríguez, A. (1995). Balances de glaciares y clima en Bolivia y Perú: impacto de los eventos ENSO. *Bull. Inst. Fr. Et. And* 24(3), 661-670.

Francou, B., Vuille, M., Wagnon, P., Juen, I., Kaser, G., Mark, B.G., and Bradley, R.S. (2008). Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future. *Earth-Science Reviews*, 89(3-4), 79-96.

García, E. (2013). Evolución Glaciar del cuadrante noroeste del Nevado Coropuna. Tesis Máster. Universidad Complutense de Madrid.

Giráldez, C. (2011). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Perú). Master Thesis. Universidad Complutense de Madrid.

Isacks BL. (1988). Uplift of the central Andean plateau and bending of the Bolivian Orocline. *Journal of Geophysical Research*, 93, 3211– 3231.

Jomelli, V., Favier, V., Rabatel, A., Brunstein, D., Hoffman, G., and Francou, B. (2009). Fluctuations of glaciers in the tropical Andes over the last millennium and palaeoclimatic implications: A review. *Palaeogeography, Palaeoclimatology, Palaeoecology*, 1-14.

Jomelli, V., Grancher, D., Brunstein, D., and Solomina, O. (2008). Recalibration of the yellow *Rhizocarpon* growth curve in the Cordillera Blanca (Peru) and implications for LIA chronology. *Geomorphology*, 93, 201-212.

Kaser, G., (1995). Some notes on the behaviour of tropical glaciers. *Bull. Inst. Fr. Etudes Andines*, 24 (3), 671–681.

Kaser, G. (1999): A review of the modern fluctuations of tropical glaciers. *Global and Planetary Change*, 22, 93–103.

Kaser, G., and Osmaston, H. (2002): *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press: Cambridge, UK.

Klein, A.G., Seltzer, G.O. and Isacks, B.L. (1999). Modern and last local glacial maximum snowlines in the Central Andes of Peru, Bolivia, and Northern Chile. *Quaternary Science Reviews*, 18, 63-84.

Kousky, V. E., Kagano, M. T., and Cavalcanti, I. F. A. (1984). A review of the Southern Oscillation: oceanic-atmospheric circulation changes and related rainfall anomalies. *Tellus*, 36A, 490-504.

Kull, C., and Grosjean M. (1998). Albedo changes, Milankovitch forcing, and late Quaternary climate changes in the central Andes. *Climate Dynamics*, 14(12), 871-881.

Licciardi, J.M., Schaefer, J.M., Taggart, J.R., and Lund, D.C. (2009): Holocene Glacier Fluctuations in the Peruvian Andes Indicate Northern Climate Linkages. *Science*, 325, 1677.

Mark, B.G., (2008). Tracing tropical Andean glaciers over space and time: Some lessons and transdisciplinary implications. *Global and Planetary Change*, 60 (2008), 101–114.

Marocco, R. (1978). Estudio geológico de la cordillera de Vilcabamba. Instituto de Geología y Minería Lima-Perú 4.

Marocco, R., and García-Zabaleta, F. (1974). Estudio geológico de la región entre Cuzco y Machu Picchu. *Bull. Inst. Fr. Et. And*, 3(2), 1-27.

Moore, E., and Twiss, R. J. (1995). *Tectonics*. W. H. Freeman and Co.

Mora, J.-E. G. (2012). Retroceso glaciar y cambio climático en los Andes Peruanos: principales impactos. Cusco.

Muñoz, J. (1995). *Geomorfología General*. Madrid, Editorial Síntesis.

Osmaston, H.A. (2005). Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area-Altitude, the Area-Altitude Balance Ratio and the Area-Altitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International*, 138–139, 22–31.

Portocarrero, C. (1995). Retroceso de glaciares en el Perú: consecuencias sobre los recursos hídricos y los riesgos geodinámicos. *Bull. Inst. Fr. Et. And*, 24(3), 697-706.

Puebla, J. G., and Gould, M. (2000). *SIG: Sistemas de Información Geográfica*. Madrid.

Quirós, T. (2013). Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Paraqaqa (Perú). Tesis de Universidad. Universidad Complutense de Madrid.

Ramage, J. M., Smith, J.A., Rodbell, D. T., and Seltzer, G. O. (2005). Comparing reconstructed Pleistocene equilibrium-line altitudes in the tropical Andes of Central Peru. *Journal of Quaternary Science*, 20(7-8), 777-788.

Rodbell, D.T., Smith, J. A. and Mark, B.G. (2009). Glaciation in the Andes during the Lateglacial and Holocene. *Quaternary Science Reviews*. *Quaternary Science Reviews*, 28 (2009), 2165–2212.

Seltzer, G. O. (1990). Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes. *Quaternary Sciences Reviews*, 9, 137-152.

Seltzer GO, Rodbell DT, Baker PA, Fritz SC, Tapia PM, Rowe HD, Dunbar RB. (2002). Early warming of tropical South America at the last glacial–interglacial transition. *Science*, 296, 1685–1686.

SENAMHI (2011). Componente hidrológica. Determinación de la disponibilidad hídrica presente y futura: subcuenca del río de Santa Teresa. P. Ministerio del Ambiente.

Smith, J. A., Finkel, R. C., Farber, D. L., Rodbell, D. T. and Seltzer, G. O. (2005). Moraine preservation and boulder erosion in the tropical Andes: interpreting old surface exposure ages in glaciated valleys. *Journal of Quaternary Science*, 20(7-8), 735–758.

Thompson, L. G., Mosley-Thompson, E., Dansgaard, W., and Grootes, P. M. (1986). The Little Ice Age as Recorded in the Stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, 234(47774), 361-364.

Úbeda, J. (2011). El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (Cordillera Occidental de los Andes Centrales). Tesis. Universidad Complutense de Madrid.

Úbeda, J., Campos, N., Giráldez, G., García, E., Quirós, T., and Palacios, D. (2014). Evaluación del enfriamiento del clima durante la Peugña Edad del Hielo en los Andes Centrales deducido de la Altitud de la Línea de Equilibrio de glaciares actuales y pasados. Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico-INGEMET (Perú), Autoridad Nacional del Agua-ANA (Perú), Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña-GFAM, Universidad Complutense de Madrid (España), Department of Geography, University of Zurich (Suiza), Guías de Espeleología y Montaña-GEM (España).

Vuille, M., Bradley, R. S., Werner, M., and Keimig, F. (2003). 20th century climate change in the tropical Andes: observations and model results. *Climate Change*, 59, 75-99.

Zapata, R. (2013). Salkantay: la lenta agonía de un nevado salvaje. *El Comercio*. Lima.

6. ANEXO.

FIGURA 1: Localización del Nevado Salcantay.....	5
FIGURA 2: Zona de Convergencia Intertropical	6
FIGURA 3: Procesos Orogénicos en los Andes	8
FIGURA 4: Caracterización geológica del Nevado Salcantay.....	9
FIGURA 5: Zona de Convergencia Intertropical y Sistema de Presiones	11
FIGURA 6: Desprendimiento glaciar.....	15
FIGURA 7: Morrenas PEH	18
FIGURA 8: Glaciares actuales	20
FIGURA 9: Paleoglaciares de la PEH.....	22
FIGURA 10: Cálculo de bandas altitudinales	25
FIGURA 11: Hoja de cálculo de la ELA AABR.	26
FIGURA 12: Resumen de la ELA AABR.....	27
FIGURA 13: Resumen de la paleoELA AABR	28
FIGURA 14: Dataciones de Licciardi et al.(2011).....	32
FIGURA 15: Morrenas PEH	33
FIGURA 16: Comparación de los glaciares actuales (2009) con los de la PEH.....	35
FIGURA 17: Evolución de la superficie glaciar (PEH-2009).....	36
FIGURA 18: Gráfico comparativo de superficie glaciar entre la PEH y 2009	37
FIGURA 19: Comparación de topografía	38
FIGURA 20: Resultados ELA AABR.....	39
FIGURA 21: Resultados paleoELA AABR	40
FIGURA 22: Gráfico comparativo de altitud de la ELA entre la PEH y 2009	40
FIGURA 23: ELAs y paleoELAs.....	41
FIGURA 24: Áreas de acumulación y ablación de los glaciares de 2009 y de la PEH.....	43
FIGURA 25: Localización de glaciares problemáticos.....	47
 TABLA 1: Materiales utilizados.	 16
TABLA 2: Dataciones de Licciardi et al.(2011)	32