

ANÁLISIS DEL REGISTRO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN EL ÚLTIMO AVANCE DE LOS GLACIARES EN LA VERTIENTE NORTE DE LA CORDILLERA PARIAQAQÁ (ANDES CENTRALES OCCIDENTALES DE PERÚ)



DANIEL PÉREZ GONZÁLEZ
MÁSTER EN TECNOLOGÍAS DE LA INFORMACIÓN GEOGRÁFICA
UNIVERSIDAD COMPLUTENSE DE MADRID

Directores de proyecto: Luis Miguel Tanarro García y José Úbeda Palenque

Departamento de Análisis Geográfico Regional de Geografía Física

ONG Guías de Espeleología y Montaña



Tesis de Fin de Máster realizada en el marco del proyecto CRYOPERU (www.cryoperu.pe)

ÍNDICE.

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.....	4
1.1. Objetivos del trabajo.....	5
1.2. Encuadre geográfico.....	6
1.3. Caracterización geológica y geomorfológica.....	8
1.4. Caracterización climática.....	9
1.5. Evolución glaciar.....	11
1.6. Recursos hídricos y riesgos asociados a los glaciares.....	14
2. METODOLOGÍA.....	15
2.1. Materiales	15
2.2. Desarrollo metodológico.....	16
2.2.1. <i>Obtención del mapa topográfico del área de estudio</i>	16
2.2.2. <i>Identificación y digitalización de glaciares actuales (2010)</i>	16
2.2.3. <i>Digitalización de morrenas</i>	19
2.2.4. <i>Reconstrucción de paleoglaciares</i>	20
2.2.5. Cálculo de la Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA).....	21
2.2.5.1. <i>Generación de intervalos o bandas altitudinales</i>	23
2.2.5.2. <i>Cálculo de ELAs y paleoELAs</i>	25
2.2.6. <i>Zonas de acumulación y ablación</i>	26
3. RESULTADOS.....	27
3.1. La cartografía de las morrenas de la PEH.....	27
3.2. La cartografía de la extensión de los glaciares actuales y cálculo de sus áreas.....	29
3.3. La Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA)	31

3.4. Modelo espacial de las ELAs y zonas de acumulación y ablación.....	35
3.5. Cálculo de la variación de la temperatura entre la PEH y la actualidad.....	37
3.6. La tasa de deglaciación y posibles escenarios de futuro.....	38
4. DISCUSIÓN DE RESULTADOS.....	41
4.1. La evaluación de las TIG en la investigación.....	41
4.2. la extensión de los glaciares en la PEH y en la actualidad.....	42
4.3. La variación de las ELAs y zonas de acumulación y ablación en la PEH y actualidad.....	45
5. CONCLUSIONES.....	47
6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO.....	48
7. BIBLIOGRAFÍA.....	49

1. PRESENTACIÓN DEL PROYECTO.

Los glaciares tropicales son extremadamente sensibles a las variaciones climáticas, por lo que constituyen un indicador excelente a la hora de medir y evaluar el alcance de los efectos del cambio climático. Esto se debe a que cualquier variación de las condiciones climáticas se manifiesta rápidamente en la masa de hielo del glaciar, es decir en su balance de masa o relación entre su área de acumulación o alimentación y de ablación o pérdida. Ambas áreas están separadas por una línea teórica que indicaría el estado de equilibrio de un glaciar en relación con las condiciones climáticas imperantes. La altura de esta línea teórica (o la Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar -*Equilibrium Line Altitude*, ELA, en inglés- es uno de los parámetros más utilizados para estimar el efecto de los cambios climáticos en los glaciares (Zemp *et al.*, 2007, Kaser. y Osmaston, 2002).

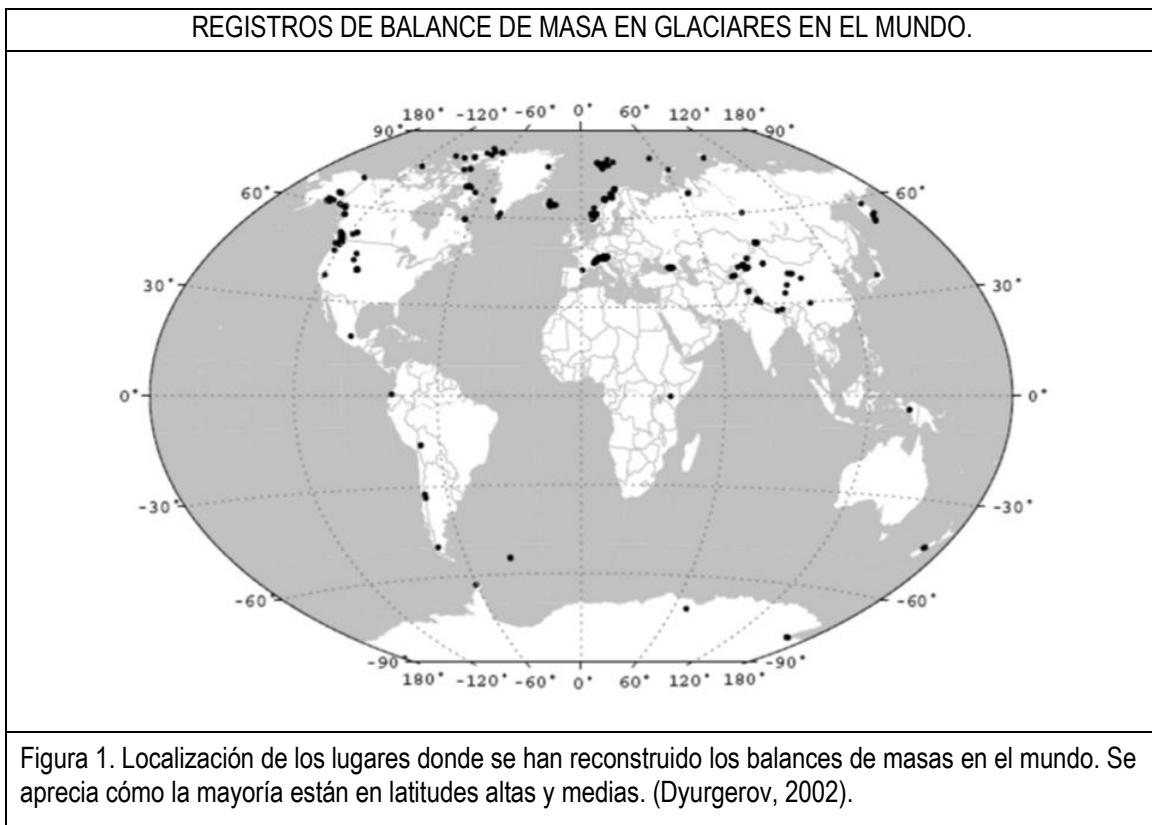
La ELA, calculada con carácter anual, depende de varios factores, entre los cuales, dos se presentan como fundamentales: por un lado la acumulación anual, expresada básicamente a través de la precipitación del período invernal, y la ablación anual, que viene dada por las temperaturas del período estival. Junto a las características del clima regional, las condiciones geográficas de cada macizo montañoso desempeñan un papel fundamental en el balance de masa de sus glaciares (Serrano y Cañadas, 2004).

Otros factores como la radiación solar, la inclinación de las pendientes, la geometría de la masa glaciar o las precipitaciones recibidas, pueden influir notablemente en la altitud de la ELA y el balance de masas de los glaciares.

La paleoELA se entiende como la Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar aplicada a un antiguo glaciar, es decir, a un paleoglaciado. La comparación entre la paleoELA y la ELA actual de un glaciar, al representar unas condiciones teóricas de equilibrio, permite hacer importantes deducciones climáticas y aportar interesantes interpretaciones paleoambientales (Serrano y Gutiérrez, 2002).

A pesar de la gran importancia de estas "masas heladas" en las regiones tropicales, a día de hoy la mayor parte de los estudios se han llevado a cabo en glaciares ubicados en regiones polares, subpolares, y templadas, tal como se aprecia en la Figura 1.

Además, suponen una reserva hídrica de carácter estratégico para el abastecimiento de agua de especial importancia en las áreas donde los recursos hídricos escasean y, además, el desagüe acelerado de las lagunas glaciares puede constituir un serio riesgo de inundación para las poblaciones cercanas y sus actividades económicas (Kaser y Osmaston, 2002). Por lo tanto, una recesión glaciar a nivel global significa también un cambio a gran escala que conlleva profundas consecuencias locales en lo que se refiere a los recursos hídricos y a las poblaciones que dependen de ellos para su sustento (Mark, 2008).



Teniendo en cuenta estas consideraciones, este Trabajo Fin de Master (TFM) se plantea con la finalidad de estudiar el estado y evolución de un conjunto de glaciares de los Andes Centrales (Perú), en concreto en la vertiente Norte del Nevado de Pariaqaqá, desde la Pequeña Edad de Hielo -PEH- (última etapa de enfriamiento global datada según los autores entre los siglos XIV y XVIII) hasta la actualidad (en base a la imágenes de satélite de 2010). Para ello con la ayuda de diversas tecnologías de la información geográfica (SIG, Google Earth, etc.) se calculan y analizan dos indicadores fundamentales en el estudio de la dinámica de los glaciares: la evolución de la superficie de los glaciares y la Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA), tanto la actual como de la PEH (paleoELA), cuyo análisis permitirá, además, calcular variaciones de temperatura, obtener tasas de deglaciación y crear escenarios futuros de la desaparición de los glaciares.

1.1. Objetivos del trabajo

El objetivo principal de este TFM –como se acaba de indicar- es registrar y analizar las variaciones en superficie experimentadas por los glaciares de la vertiente Norte del Nevado Pariaqaqá desde la Pequeña Edad del Hielo, hasta la actualidad (agosto de 2010), así como reconstruir la altitud de la línea de equilibrio glaciar en estos períodos

Este objetivo permitirá aumentar el conocimiento sobre los glaciares de este sector de los Andes Centrales, y profundizar en su comportamiento o tendencia histórica, por medio de la comparación, por un lado, de la superficie de los glaciares actuales con la

extensión que alcanzaron durante la PEH y, por otro, de sus respectivas ELAs. La relación de estos parámetros facilitará estimar la variación de la temperatura y establecer tasas de deglaciación en dicho periodo, proporcionando una mayor información sobre las causas o factores que explican su retroceso, lo que permitirá, finalmente crear escenarios futuros sobre la tendencia futura de los glaciares.

El desarrollo de estos objetivos precisa cumplir una serie de etapas específicas, que se indican a continuación:

1. Identificar, digitalizar y calcular la superficie de los glaciares en la actualidad (2010) y sus correspondientes ELAs.
2. Cartografiar las morrenas y/o formas morrénicas que, en función de sus características y contexto geomorfológico puedan ser asociadas al avance glaciar durante la PEH.
3. Reconstruir los paleoglaciares correspondientes a la PEH y calcular sus respectivas paleoELAs a partir de la cartografía de las morrenas de la PEH y la delimitación de los glaciares actuales.
4. Deducir la variación de temperatura sufrida en el área de estudio desde la PEH hasta la actualidad en función del retroceso altitudinal de la ELA.
5. Calcular las tasas de deglaciación entre la PEH y la actualidad teniendo en cuenta el retroceso de la superficie glaciar y las ELAs.
6. Tratar de establecer escenarios y pronósticos futuros de la desaparición de los glaciares.

1.2. Encuadre geográfico

Los Andes es un sistema de cordilleras que se extienden en toda la longitud de la costa Oeste de América del Sur a lo largo de más de 7500 km, siendo en conjunto la cordillera más larga del Planeta. Por su parte, su anchura general se sitúa entre los 400-500 km, alcanzando un máximo de 800 km en el sector de Bolivia. En esta cordillera se pueden encontrar también algunas de las montañas más altas del planeta, cuyas cimas o picos superan con holgura los 6.000 msnm, culminando a 6.962 msnm en el cerro del Aconcagua, la montaña más alta del planeta entre las no ubicadas en la Cordillera del Himalaya. Esta Cordillera se subdivide en varios grandes sectores: Andes del Norte o Septentriionales, la Cordillera Real, los Andes Centrales, y los Andes del sur o Meridionales.

El área de estudio de este TFM, el Nevado Pariaqaqá, se localiza en los Andes Centrales, que se extienden desde el Golfo de Guayaquil (4°S) en Ecuador, hasta el Golfo de Penas (46° S) en Chile. En esta región se disponen dos cordones montañosos

que discurren separados por el altiplano andino, la Cordillera Occidental, ligeramente de mayor altitud, y con presencia de una gran cantidad de volcanes y la Cordillera Oriental.



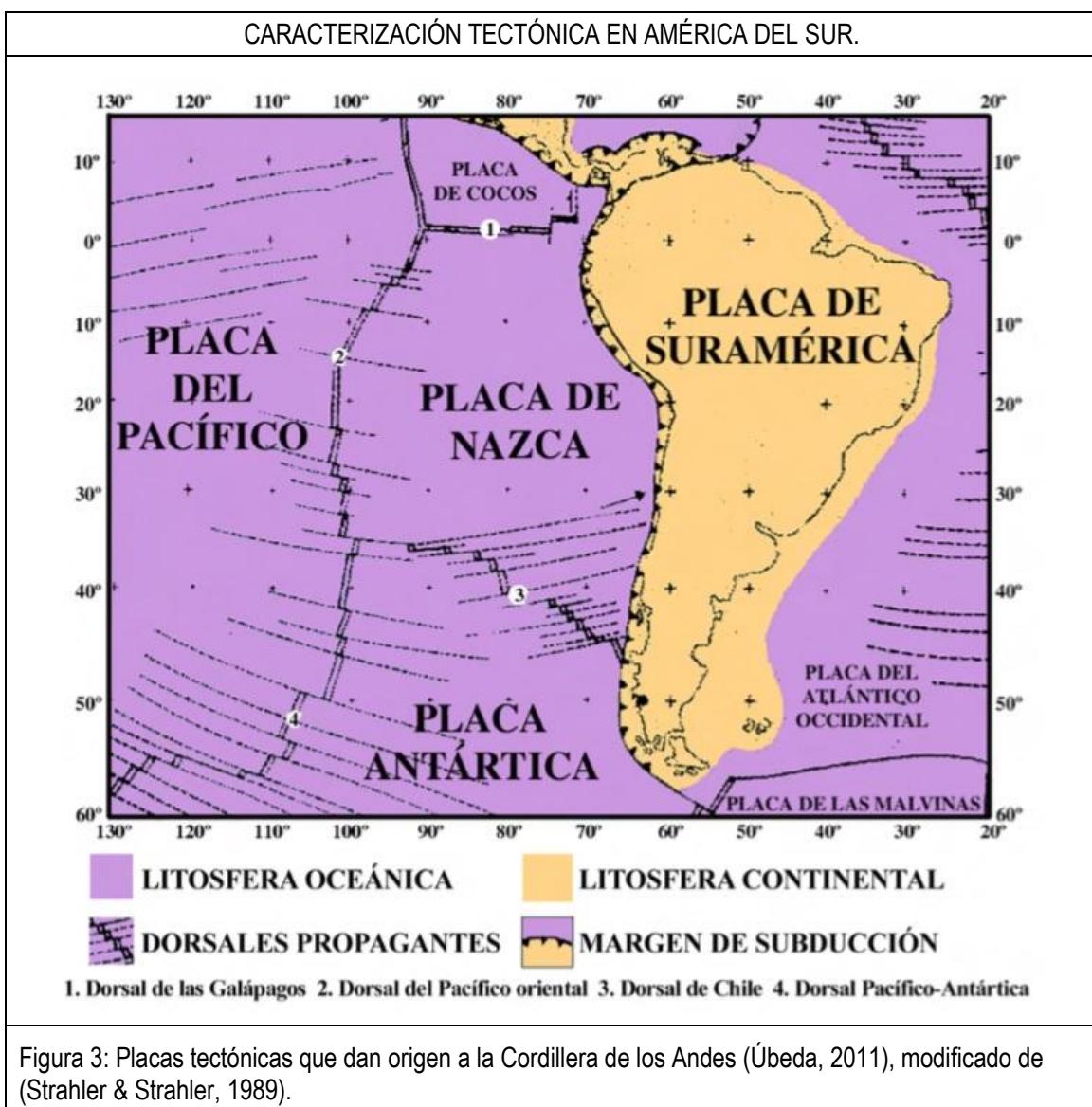
En concreto, la Cordillera Pariaqaqá, desde un punto de vista administrativo, se encuentra entre los departamentos de Lima y Junín, y se extiende en dirección NO - SE entre las latitudes $11^{\circ} 57' 29''$ S y $12^{\circ} 00' 18''$ S, y las longitudes $76^{\circ} 04' 12''$ W y $75^{\circ} 58' 16''$ W. Forma parte de la Cordillera Occidental, y aunque la Cordillera completa se extiende a lo largo de 30 km (Quirós, 2013), el área de estudio se reduce a 12 km de largo, desde el extremo Sur del pico de Pariaqaqá (5.750 m) hasta la laguna Cana, al Norte de Chollquepucro (5.650 m).

En la Cordillera de Pariaqaqá se han inventariado más de 60 glaciares, de los cuales 26 se emplazan en el sector estudiado en este TFM.

1.3. Caracterización geológica y geomorfológica

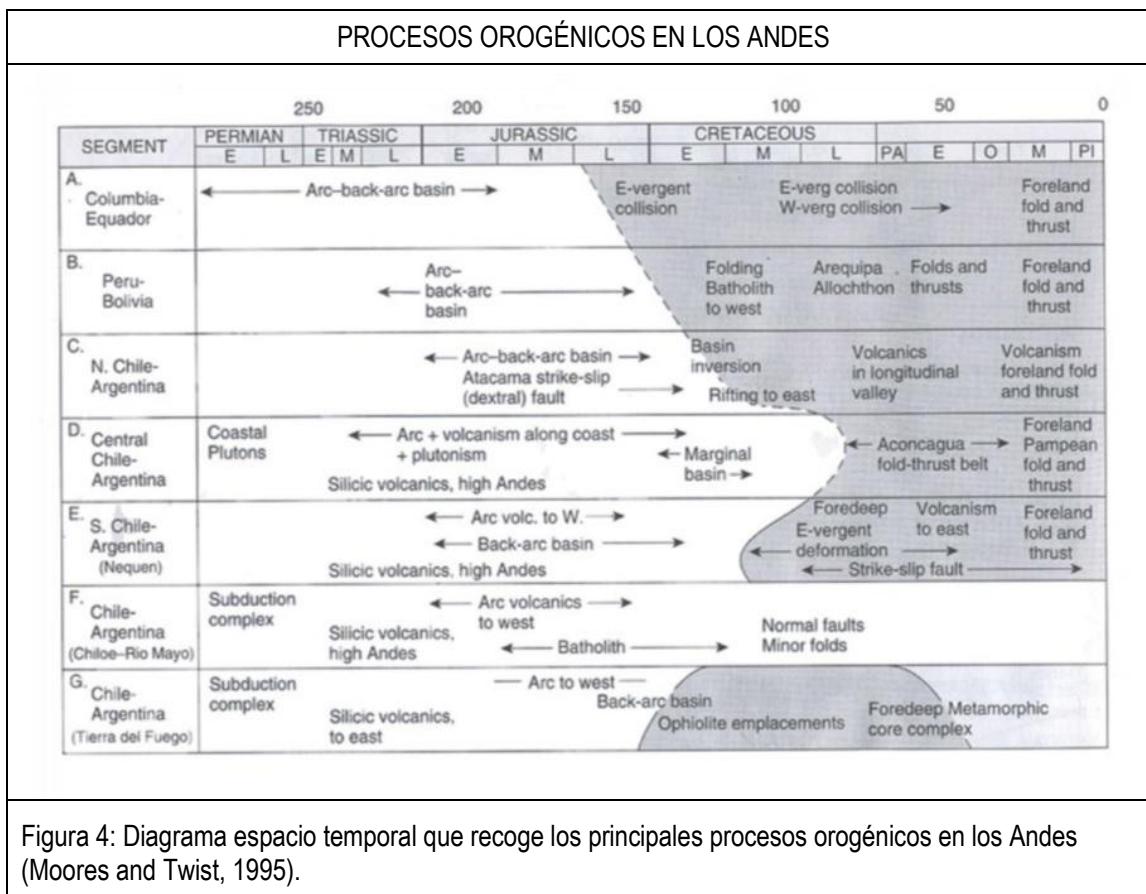
El levantamiento de la Cordillera de los Andes está directamente relacionado con complejos procesos tectónicos asociados, principalmente, al ciclo Alpino en relación con la peculiar distribución de las placas litosféricas. Así, a diferencia de la génesis de los Andes Meridionales debido a la subducción de la placa Antártica con la placa Suramericana, los Andes del Norte y Centrales, en los que se encuentra el Nevado Pariaqaqá, se levantaron debido al proceso de subducción de la Placa de Nazca por debajo de la placa Suramericana, en el intervalo de latitud entre 7°N y 46°S.

La placa de Nazca, conformada enteramente por litosfera oceánica, está compuesta por las emisiones de los volcanes submarinos de las dorsales oceánicas (o propagantes), que son básicamente basálticas. Esta Placa al ser más delgada y densa se hunde por debajo del margen occidental de la placa listosférica de Suramérica (Fig. 3).



La evolución tectónica de los Andes abarca un extenso periodo desde el Paleozoico, si bien las fases principales del levantamiento de la Cordillera tienen lugar durante el ciclo alpino entre los 40 y 10 Ma (Marocco, 1978) (Fig. 4).

La evolución tectónica de los Andes abarca un extenso periodo desde el Paleozoico hasta el Mesozoico, aunque algunas teorías también apuntan a la formación íntegra de la cordillera durante este último periodo. Estas deformaciones que se han venido sucediendo corresponden a una tectónica plástica (pliegues) y también a una tectónica de fracturación importante (fallas) (Marocco, 1978).



El levantamiento de la cordillera tiene importantes consecuencias en las características climáticas, en la extensión de las glaciaciones, en la red de drenaje y en la dinámica de laderas y (Clapperton, 1993).

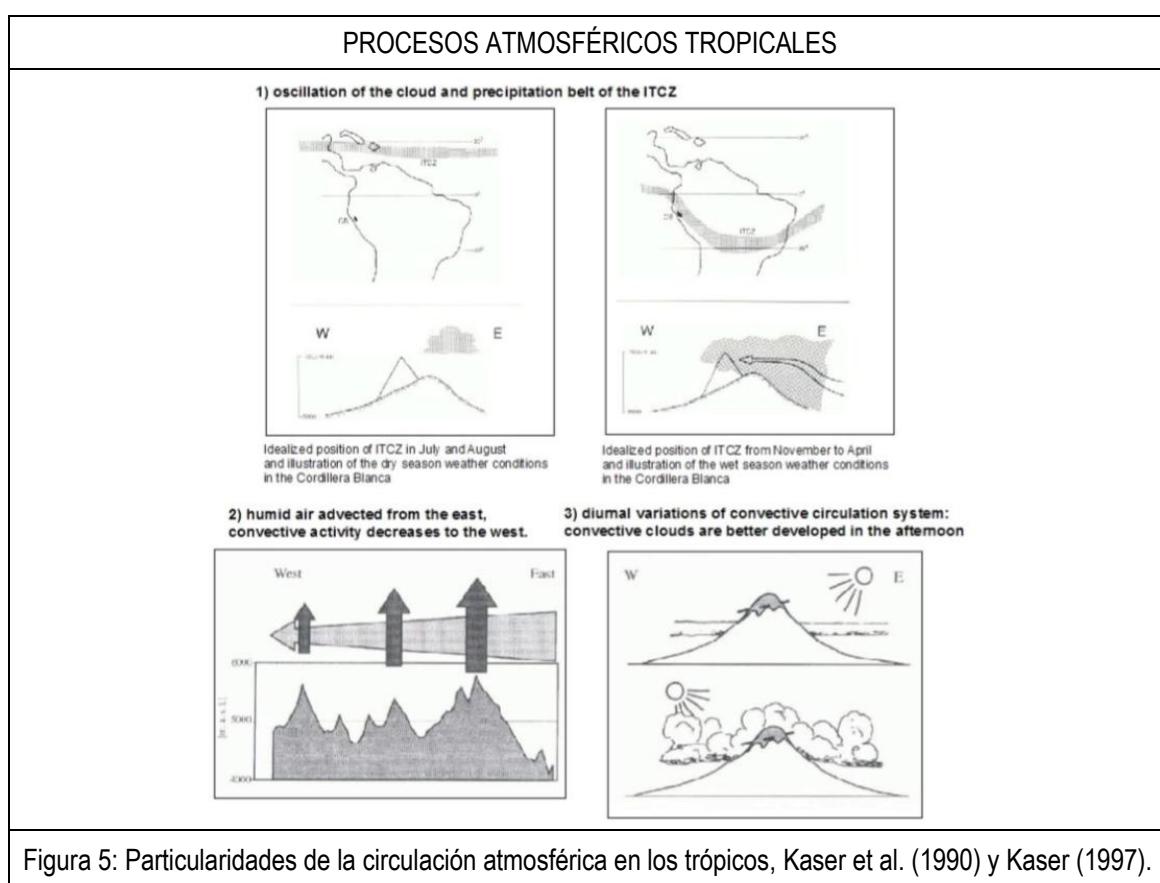
1.4. Caracterización climática.

La barrera montañosa de Los Andes, que por término medio se eleva por encima de los 4000 m, ocasiona una marcada disimetría térmica y pluviométrica entre las dos vertientes de los Andes Centrales, provocando que la vertiente pacífica sea seca y templada, mientras que la atlántica se caracterice por ser cálida y mucho más húmeda (Martín, 2014). Los principales agentes o factores que condicionan el clima de Los Andes en general, y en concreto, en el área de estudio, son la corriente marina fría de

Humboldt, el régimen anual de circulación atmosférica de la Zona de Convergencia Intertropical (ZCIT) y la elevada altitud.

Este último factor condiciona el marcado clima de alta montaña de la región y explica la existencia de niveles tan bajos de presión atmosférica: 620 hpa / 4.000 msnm, lo que supone un 40% menor que al nivel del mar. Por otra parte, la densidad del aire es considerablemente más baja que al nivel del mar (un 35% menos) y la humedad atmosférica es escasa (Aceituno, 1999). Desde el punto de vista geomorfológico, estas cumbres de gran altitud son muy susceptibles a la presencia de nieve, hielo, y "Nevados", que pueden derivar en la formación de glaciares.

La Corriente Fría de Humboldt condiciona notoriamente la temperatura y la aridez de la zona, provocando que la temperatura en la costa pacífica sea varios grados inferior a la costa atlántica a igualdad de latitud. Además, el enfriamiento de la troposfera provoca una inversión térmica en altura ocluyendo la precipitación e impidiendo que la región reciba los aportes de lluvias procedentes del océano. Por lo tanto, las precipitaciones recibidas en la cordillera proceden de la cuenca amazónica.



Los ciclos de evolución anual de la ZCIT influyen severamente en estas precipitaciones (Fig. 5). En el verano austral (de diciembre a marzo) la ZCIT se desplaza hacia el Sur, y es cuando se reciben los mayores aportes de precipitación en el área de estudio provenientes de las masas de aire tropical del Amazonas. La influencia del mayor desplazamiento hacia el sur de la ZCIT se ha considerado como una de las causas

probables de la aparición de grandes lagos en las áreas actualmente más áridas del altiplano boliviano (Blard et al., 2011). También se ha relacionado con avances glaciares, por ejemplo en el casquete glaciar Quelccaya (Kelly et al., 2012), en el Nevado Coropuna (Úbeda, 2013) y en las cordilleras oriental y occidental de los Andes Centrales del sur de Perú, respectivamente. En invierno, en cambio, la ZCIT se desplaza hacia el Norte recuperando su circulación habitual sobre el Ecuador y se instala la estación seca, en la que los Andes Centrales quedan aislados de la cuenca amazónica y las precipitaciones son nulas.

Estos factores son modificados periódicamente por el fenómeno de la Oscilación del Sur El Niño (o ENSO, *-El Niño Southern Oscillation-*) (Úbeda, 2011), que tiene en un período de recurrencia de entre tres y ocho años y aproximadamente un año de duración (Burroughs, 2003). El fenómeno ENSO puede afectar el proceso de acumulación de nieve en los glaciares de las cordilleras al estar relacionado con sequías excepcionalmente intensas (Aceituno, 1998; Francou y Pizarro, 1985; Francou y Sémiond, 1997; Thompson et al., 1984).

1.5. La evolución glacial

En los últimos años se han realizado diversos estudios en diferentes ámbitos de montaña de Perú, y en otras áreas de montaña de Los Andes, enfocados a establecer la cronología y el retroceso de los glaciares, con la finalidad de analizar el cambio climático y sus consecuencias en los glaciares (Giráldez, 2011). Algunos de los métodos que se emplearon en dichos estudios 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 glaciares (Jomelli et al., 2009). A partir de estos estudios se han precisado las fases glaciares, que pueden ser agrupadas en cuatro grandes etapas: Último Máximo Glacial (LGM, *Last Glacial Maximum*), Dryas Reciente (YD, *Young Dryas*), Pequeña edad del Hielo (LIA, *Little Ice Age*) y fluctuaciones glaciares recientes.

- El Último Máximo Glacial (LGM):

Esta etapa coincide con el último gran avance de los glaciares a nivel global, entre el 23.000 y el 19.000 A.C, y su magnitud fue muy diferente según la latitud. Aunque hay un acuerdo generalizado sobre el hecho de que durante el Último Máximo Glacial se produjo una depresión de la paleotemperatura, las conclusiones alcanzadas por algunos trabajos no han estado exentas de polémicas. En este sentido, las discrepancias también se han encaminado a la magnitud del enfriamiento, y a sobre si esto sucedió en un contexto más árido o más húmedo que el actual.

Las conclusiones de los trabajos desarrollados en los Andes Centrales sugirieron inicialmente un enfriamiento moderado, en consonancia con las reconstrucciones realizadas a través del proyecto CLIMAP (*Long range Investigation, Mapping, and Prediction*) -enfocado a establecer las condiciones climáticas durante el máximo

Avance Glaciar (LGM)- con opiniones partidarias de un ambiente manifiestamente más árido que en el presente, pero desde mediados de los años 90' la tendencia se ha decantado hacia las teorías favorables a una mayor depresión de la paleotemperatura en condiciones más húmedas que las actuales (Úbeda, 2011).

La Fontaine (1988) en sus estudios recreó la situación climática tratando de encontrar una justificación para las hipótesis partidarias de un incremento de la aridez. Su conclusión fue que durante el Último Máximo Glacial, la ZCIT no se desplazaría hacia el Sur como en el presente durante el verano austral.

Por su parte, Markgraf (1989) y Seltzer (1990) revisaron los estudios polínicos y glaciológicos publicados con anterioridad y concluyeron que el clima había sido más árido que en el presente, conclusión a la que llegaron también en sus trabajos Fox (1993) y Fox y Bloom (1994). La única excepción hasta los 90's es el estudio de Wright (1983), que llegó a la conclusión de que las condiciones para aquel periodo fueron más húmedas que en la actualidad. A mediados de la década de los 90' los análisis de testigos de sedimentos procedentes de diversas lagunas andinas (Seltzer, 1994; Seltzer et al., 1995) sugirieron que el clima de la región de los Andes Centrales durante Último Máximo Glacial había sido más húmedo que el actual, iniciando la publicación de nuevas evidencias que revolucionaron la interpretación de ese periodo (Úbeda, 2011).

- *Dryas Reciente (YD):*

Esta etapa, cuya denominación se debe a la abundancia en los registros polínicos de la planta *Dryas octopetala*, una especie de la familia de las rosáceas, tuvo lugar a finales del pleistoceno, desde hace unos 13.000 años hasta aproximadamente unos 11.000, y se caracterizó porque el área de distribución de la vegetación de la Tundra descendió durante algunos cientos de años hacia latitudes más templadas. En los Andes Centrales parece que esta etapa tuvo poco impacto, y apenas quedan evidencias de avances glaciares en este periodo.

- *Pequeña Edad del hielo (LIA, PEH):*

El concepto Pequeña Edad del Hielo fue utilizado por primera vez a finales de la década de los años 30' del pasado siglo XX por Matthes (1939) para referirse al periodo durante el que se había producido un avance significativo de los glaciares de las latitudes medias entre los siglos XVI y XVII. Aunque esos avances han sido bien documentados en el Hemisferio Norte todavía permanecen insuficientemente conocidos en los trópicos (Rabatel et al., 2008; Grove, 1988) y muchas incertidumbres concernientes a la cronología y el contexto paleoclimático en el que sucedieron están todavía pendientes de resolución (Úbeda, 2011).

El método de datación más común para este periodo está basado el análisis de tasas de crecimiento de especies liquénicas primicolonizadoras en morrenas depositadas por las masas de hielo al culminar sus avances. El método asume que una vez conocido el ritmo de crecimiento de los líquenes se puede estimar una fecha aproximada para el depósito

de las morrenas (Quirós, 2013). Dataciones de esa naturaleza fueron realizados tanto en la Cordillera Blanca (Solomina et al., 2007), como en la Cordillera Real de Bolivia (Rabatel et al., 2008), basándose en la especie liquénica *Rhizocarpon*.

Otro importante estudio fue llevado a cabo por Thompson et al. (1986) en el glaciar Quelccaya (Perú, 5670m) a partir del análisis del isótopo de oxígeno O^{18} , cuyos resultados revelaron que la concentración de O^{18} en los testigos de hielo tenía valores especialmente negativos entre 1500 y 1890 (>-18‰), poniendo de manifiesto que en ese intervalo se produjo un marcado enfriamiento que indicaba el periodo durante el que tuvo lugar la Pequeña Edad del Hielo en los Andes Centrales (Úbeda, 2011).

El posterior estudio de la acumulación neta registrada en la estratigrafía de los testigos permitió establecer dos fases diferenciadas en la Pequeña Edad del Hielo. La primera de ellas, entre 1500 y 1720 estuvo caracterizada por una mayor acumulación de masas de hielo (condiciones más húmedas), y la segunda, que tuvo lugar desde 1720 hasta 1880, marcada por unas condiciones más áridas que pudieron estar relacionadas con un aumento de la frecuencia e intensidad de los eventos El Niño-ENSO- (Thompson et al., 1984), lo mismo 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 1870 y 1880 (Úbeda, 2011).



El comienzo de la regresión glaciar a partir de la PEH es difícil de determinar (Kaser, 1999), aunque es posible afirmar gracias a estudios como el de Jomelli et al. (2008) que entre finales del S.XVII y S.XIX hubo una disminución de precipitaciones que condujo al retroceso de los glaciares, como indica la caída de O^{18} en ese periodo en la regiones polares.

- Fluctuaciones glaciales recientes:

El 99% de los glaciares tropicales del mundo se encuentra en los Andes (Kaser, 1999), y además aproximadamente un 70% de ellos están ubicados en los Andes peruanos.

Durante los últimos 15 años se han observado cambios que indican una disminución similar del área de acumulación en glaciares de dimensiones equivalentes tanto en Bolivia como en Ecuador (Francou et al., 2007) determinando un balance de masas negativo, por lo que se puede afirmar que se está produciendo una tendencia hacia un retroceso continuado de la superficie y volumen de los glaciares. Los pequeños avances de las masas de hielo que se produjeron a principios del siglo XX son inapreciables dentro del proceso generalizado de retroceso de los glaciares en el contexto actual del calentamiento global (Martín, 2014).

En este sentido, parece existir una relación directa entre el retroceso de los glaciares desde la Pequeña Edad del Hielo y la disminución de la precipitación, que puede ser deducida de los datos indirectos o *proxies* basados en los valores del isótopo O¹⁸ extraídos de los núcleos de hielo del Nevado de Huascarán. Los resultados generan una discrepancia en la comunidad científica, ya que algunos investigadores sostienen una relación con la temperatura y otros con la precipitación.

1.6. Recursos hídricos y riesgos asociados a los glaciares

Los glaciares actuales se suelen situar en laderas empinadas sobre materiales poco consolidados. Los riesgos asociados con la fusión y el continuo retroceso de los glaciares, entre los que destacan las avalanchas de hielo, la formación de nuevos lagos glaciares, las inundaciones por desbordamiento de lagunas glaciares y la formación de lahares, constituyen una causa importante de potencial impacto en áreas de montaña habitadas (Huggel et al., 2004).

El aumento generalizado de temperatura a nivel global en los últimos tiempos está jugando un papel fundamental en el desencadenamiento de estos procesos, provocando el retroceso de los glaciares y contribuyendo a la formación de lagos glaciares donde anteriormente había hielo, que con frecuencia se encuentran represados precariamente tras débiles morrenas (Giráldez, 2011).

La población peruana ha sufrido "la ira" del deshielo glaciar como ninguna otra sociedad en la Tierra (Carey, 2010) debido a que una gran parte de la población está asentada en áreas potencialmente vulnerables a los procesos de deshielo.

La gestión de estos riesgos es una tarea compleja que implica el análisis, la evaluación y la comunicación, así como la prevención y la mitigación de los mismos (Greminger 2003). Desde los años 40 se están llevando a cabo en Perú programas para profundizar en el conocimiento de los glaciares y proyectos de ingeniería con el objetivo de represar y drenar los lagos de origen glacial para prevenir estos desastres. Desde entonces, 34

lagos glaciales han sido drenados y nuevamente represados, y más de 600 glaciares y 400 lagos están siendo continuamente supervisados. Como consecuencia, se ha desarrollado la investigación sobre dinámicas glaciales más extensa en estas latitudes. Los desastres relacionados con los glaciares afectan a diferentes grupos sociales, incluyendo los residentes locales urbanas y rurales, los científicos, los ingenieros, los funcionarios del gobierno, y los turistas (Carey, 2010), con diferentes consecuencias para cada grupo social.

2. METODOLOGÍA.

2.1. Materiales.

En la realización de este Trabajo Fin de Máster (TFM) se han utilizado y/o consultado los siguientes materiales:

Material	Fuente
Imagen de satélite	Google Earth
Modelo Digital de Elevaciones 50x50 m	<i>National Aeronautics and Space Administration (NASA)</i>
Hoja de cálculo programada ELA por el método AABR, Osmaston (2005).	Guías de Espeleología y Montaña (GEM)
Hoja Carta Nacional Perú 1:50.000	Instituto Geográfico Nacional (IGN) Perú

Las imágenes de satélite de *Google Earth* constituyen la base principal para llevar a cabo este TFM, ya que presentan una alta resolución que permite operar incluso a escalas alrededor de 1/100. Esto ha facilitado la labor de fotointerpretación la identificación y delimitación de los glaciares y sus formas geomorfológicas.

El Modelo Digital de Elevaciones fue obtenido de la página web de la NASA (<https://earthdata.nasa.gov/>), que recoge información altitudinal de todo el mundo mediante el satélite ASTER y puede ser solicitada previo registro en su página web. El MDE, cuya resolución es de 50 metros, constituye la variable básica o fundamental para el proceso de cálculo de ELAs. Así, en un en un Sistema de Información Geográfica (SIG), el MDE se utilizó para obtener las curvas de nivel del área de estudio, necesarias para reconstruir posteriormente la paleotopografía de los valles glaciados durante el último avance y durante la Pequeña Edad del Hielo.

Asimismo, la Hoja de cálculo de la ELA en formato Excel* es un material imprescindible para la realización del TFM pues todos los cálculos posteriores dependen en mayor o menor medida de ELA. Esta hoja fue diseñada por Osmaston

(2005), ha sido adaptada por J. Úbeda (2011) y se encuentra disponible en la web de la ONG “Guías de Espeleología y Montaña (GEM, <http://onggem.wordpress.com/>). La Hoja está programada para agilizar de manera casi automática todos los cálculos necesarios para obtener la ELA según el método AABR, que será explicado más adelante.

2.2. Desarrollo metodológico

Una vez expuestos los materiales empleados, a continuación se explica el desarrollo metodológico llevado a cabo, que ha cubierto seis etapas:

2.2.1. Obtención del mapa topográfico del área de estudio

Por su parte, la capa de curvas de nivel será obtenida a partir del procesamiento de un MDE de la zona, que fue facilitado por la NASA a través de uno de sus proyectos que se dedica a recoger información altitudinal de todo el mundo. Curiosamente el nevado Pariaqaqá se sitúa en la intersección entre 4 hojas del Mapa Topográfico de Perú, con las que coinciden la extensión de los MDEs, por lo deben ser unidos en uno sólo mediante la herramienta *Merge* en ArcGIS.

Dado que los MDEs son archivos digitales muy pesados y por consiguiente consumen muchos recursos del ordenador, fueron recortados mediante la herramienta *Intersect* con un cuadrado que se corresponde con la superficie deseada, dibujado con las herramientas de dibujo en otra capa (shp*) en blanco. Posteriormente, mediante la herramienta *Contour* se obtienen las curvas de nivel estableciendo intervalos hipsométricos de 50 metros, que son los necesarios para introducirse después en la hoja de cálculo de ELA.

2.2.2. Identificación y digitalización de glaciares actuales (2010)

La identificación y delimitación de los glaciares actuales se ha realizado directamente en el programa de información geográfica *Google Earth* al disponer para el área de estudio de imágenes de alta resolución. En concreto, la digitalización se ha llevado a cabo con la herramienta “añade un polígono” del Menú de Google Earth. Esta herramienta permite editar un fichero vectorial (con extensión *kmz) de geometría tipo: polígono. A continuación se ha procedido a digitalizar el contorno de los glaciares de la manera más exacta posible, al mantener durante esta operación la visualización del relieve en 3D activada, y con una exageración que permitiera reconocer la morfología del terreno. Y, aunque, el análisis visual “a primera vista” permite reconocer a grandes rasgos la extensión de los respectivos glaciares, se hace necesario interactuar con la herramienta de “zoom” (alejar o acercar la imagen) para escrutar o examinar o distinguir diversos detalles.

VISUALIZACIÓN TRIDIMENSIONAL PARIAQAQÁ NORTE

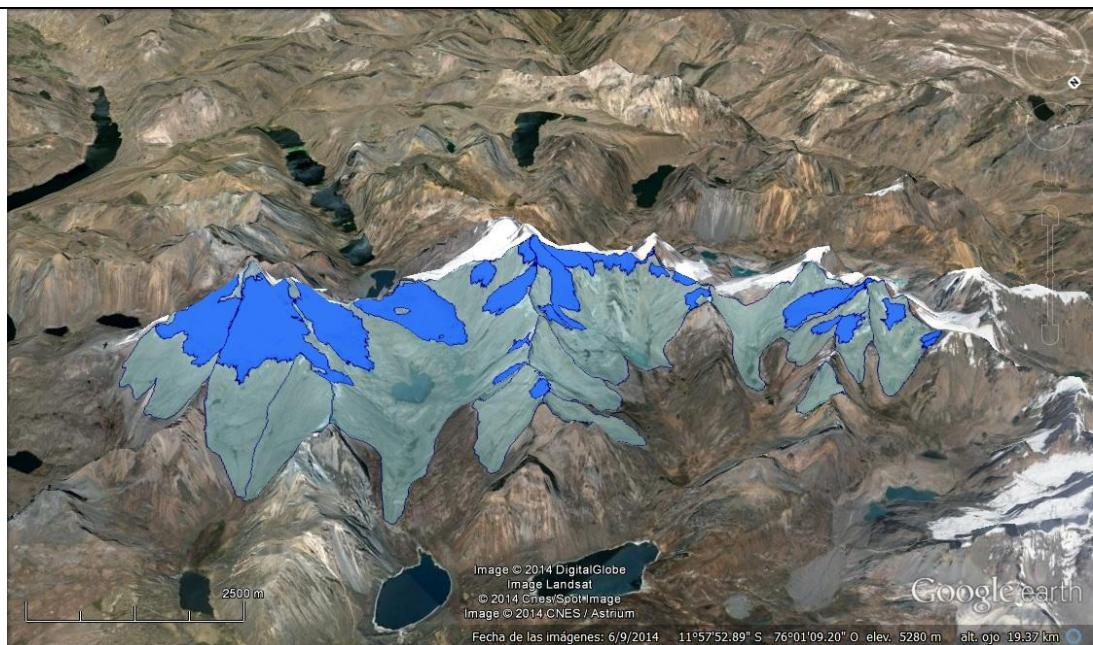


Figura 7: Imagen tridimensional de los glaciares y paleoglaciares cartografiados en el Pariaqaqá Norte. La opción de exagerar el relieve fue de gran utilidad para interpretar la geomorfología. Captura de pantalla de Google Earth. Elaboración propia.

A pesar de ello, durante la tarea de digitalización han surgido algunos problemas que se exponen a continuación, en las cuales se ha tenido un especial cuidado:

- La fotointerpretación de zonas de sombra. A pesar de que las sombras no son muy acusadas en las imágenes, en algunas áreas éstas dificultan la identificación correcta del límite de los glaciares, donde en ocasiones el color oscuro de la masa glaciar al coincidir con un área de sombra se confunde con afloramientos rocosos.
- La presencia de nieve y su diferenciación con el hielo. Este escollo se presenta tanto en las cumbres, impidiendo identificar correctamente la rimaya, como en forma de aludes en las partes inferiores, donde pueden ser frecuentes los aludes. En el primer caso, el problema se pudo solucionar de manera relativamente fácil conociendo el contexto geomorfológico, observando la continuidad de las rimayas, en cambio, en el segundo caso, la solución es compleja por la dificultad de distinguir entre hielo y nieve, y sólo a través de la experiencia (u observando fotografías aéreas tomadas en fechas sin cubierta de nieve, etc) es posible solventar el problema.
- La acumulación de derrubios sobre la masa de hielo. En la base de los escarpes de los circos glaciares se pueden encontrar derrumbamientos o desprendimientos de material rocoso sobre el hielo glaciar. Gracias a la gran calidad de las imágenes de Google Earth, que permiten a través de la herramienta de "zoom" acercarse sin perder

resolución, es bastante sencillo resolver este problema, examinando la diferencia de textura entre la roca y los derrubios y la masa de hielo.

La opción de digitalizar y editar posteriormente el fichero vectorial (polígonos) con las herramientas de Google Earth presenta numerosas limitaciones, a diferencia de los programas de SIG o CAD que disponen de herramientas específicas, sin embargo, una de sus ventajas es la posibilidad de trabajar con imágenes de satélite recientes de alta resolución y la visualización del relieve en tres dimensiones.

Por tanto, en Google Earth se creó un archivo vectorial con extensión *kmz conteniendo la información digital del límite de los glaciares actuales. Este archivo se exportó a un fichero “shapefile” (*shp) con el programa de SIG Global Mapper, que destaca por la capacidad que tiene para importar y exportar ficheros de innumerables formatos.

Finalmente, el SIG ArcGIS se ha utilizado para corregir y arreglar todos los problemas de la base digital de los glaciares, derivados al digitalizar con la herramienta de Google Earth, como son:

- a) El solapamiento entre diferentes glaciares, ya que Google Earth no ofrece la posibilidad de que los polígonos puedan compartir lados. Para solventar este escollo, durante la digitalización en Google Earth fue necesario trazar los glaciares de tal forma que siempre que dos de ellos tuvieran que compartir lado, uno de ellos sería digitalizado de forma exagerada, sobrepasando el borde que tienen en común. Una vez en ArcGIS fue posible corregir el error utilizando las herramientas *Merge* (*ArcToolBox/DataManagementTools/General/Merge*) y *Erase* (*ArcToolBox/Analysis Tools/Overlay/Erase*). Esta operación se realizó en cada polígono uno por uno, eliminando el área poligonal adicional con la herramienta *Erase* para después volver a agregar el glaciar "reparado" al grupo mediante la herramienta *Merge*.
- b) La delimitación de las áreas no glaciadas. Generalmente afloramientos de rocas (picos, cumbres) que quedan a modo de islas entre la masa glaciar. El problema reside en que desde Google Earth no se puede digitalizar un polígono dentro de otro... Este programa ha sido utilizado para corregir y editar algunos aspectos en los glaciares, como los solapamientos de glaciares (ya que en Google Earth los polígonos no pueden compartir lados) mediante las herramientas *Merge* y *Erase*. También se establecieron los "huecos" de roca en los glaciares con esta última herramienta, que tampoco pueden ser modificados en Google Earth (Fig. 8).

En definitiva con estas herramientas se ha obtenido el inventario con la extensión actual de los glaciares de la cordillera de Pariaqaqá. Finalmente es posible visualizar nuevamente el archivo digital en Google Earth en una vista del relieve en 3D. Para ello se exporta, desde ArcGIS (*ArcToolBox/ConversionTools/ToKML/LayerToKML*), el fichero *shp a un fichero con extensión *kml, que reconoce Google Earth, y permite representar datos geográficos en tres dimensiones.



2.2.3. Digitalización de morrenas.

La identificación de morrenas es el segundo paso a la hora de reconstruir los paleoglaciares. Es importante comprender e interpretar adecuadamente la geomorfología del área de estudio para diferenciar las morrenas pertenecientes a la Pequeña Edad del Hielo (PEH), puesto que, como ya se indicó, el objetivo fundamental es reconstruir los paleoglaciares sólo durante ese último avance glaciar. Para ello, se han digitalizado tanto las morrenas que marcan el máximo avance durante la PEH como aquellas pertenecientes a pulsaciones y avance posteriores, intentando obviar aquellas en las que puedan surgir dudas en cuanto a su identificación.

La fuente de información base para este proceso es nuevamente las imágenes de satélite de Google Earth. Para la digitalización de las morrenas se utilizó la herramienta "Añade una ruta", que permite editar un fichero digital, y digitalizar elementos lineales sobre la imagen de fondo. Al igual que en el apartado anterior, la posibilidad que ofrece el programa de exagerar el relieve hasta tres veces fue de gran utilidad para identificar algunas de las morrenas en las que había dudas e interpretar mejor la topografía del área de estudio.

El resultado de este proceso ha sido la realización de un mapa con la distribución espacial de las morrenas (en formato kmz*), que también se exportó a formato shp* (de ArcGIS) mediante el programa GlobalMapper. Esta compatibilidad entre Google Earth

y ArcGIS y la facilidad para convertir los archivos de uno a otro formato es la clave en la elección de estas herramientas de trabajo.

Esta cartografía de las morrenas del área de estudio constituye la base para la reconstrucción de los paleoglaciares. Para ello se utiliza -como se explicara a continuación- la cresta de las morrenas para estimar el máximo avance durante la PEH.

2.2.4. Reconstrucción de paleoglaciares

Como se acaba de indicar, para el proceso de reconstrucción de los paleoglaciares es fundamental contar previamente con la cartografía tanto de la distribución de los glaciares actuales como de la cresta de las morrenas, cuya obtención se explicó en los apartados anteriores.

El mapa de glaciares actuales servirá para definir el límite superior de los paleoglaciares, que prácticamente coincide con los actuales, ya que el deshielo glaciar se produce fundamentalmente por la zona de ablación (inferior). A pesar de ello en varios casos, y teniendo en cuenta la interpretación de la geomorfología, se ha considerado que el límite superior puede coincidir con la divisoria de aguas o la cumbre.

Por su parte en el mapa de morrenas, las morrenas pertenecientes al último avance de la PEH interesarán para acotar y establecer los límites inferiores de cada paleoglaciado, utilizando como límite la cresta de la morrena.

Los límites laterales son sin duda los más difíciles de definir, ya que en ocasiones son difusos. Los principales indicadores de estos límites son los escarpes laterales, aunque a veces no los hay o son poco visibles. También hay que tener en cuenta a la hora de identificar estos paleoglaciares otros indicadores geomorfológicos como las rocas aborregadas, que por su textura indicarían el paso de un antiguo glaciar.

El mayor escollo en la reconstrucción de los paleoglaciares es la separación (o unión) de los mismos y requiere no sólo de un gran conocimiento en geomorfología, sino también del contexto geomorfológico en el que se encuadra el área de estudio, para decidir por ejemplo si estos paleoglaciares fluían en paralelo o confluyían formando uno mayor. Algunos de los criterios de separación paleoglaciado han sido los siguientes:

- Análisis de las depresiones o cubetas glaciares generadas por sobreexcavación de los paleoglaciares.
- Análisis de la verticalidad del flujo (por la gravedad).
- Interpretación del cambio de textura y/o color del lecho rocoso debido a la recolonización por vegetación y/o líquenes.
- Verificación de la correspondencia altitudinal entre ambos lados del valle glaciar.

Todo este proceso se realiza de forma bastante similar al de la delimitación de glaciares, a excepción de la necesidad del mapa de morrenas para este cometido.

Previamente el fichero del mapa de los glaciares actuales se duplicó, y sobre esta base, y teniendo en cuenta los criterios geomorfológicos, se digitalizó el contorno probable de los paleoglaciares hasta conectarlos con el límite de los glaciares actuales con la herramienta de Google Earth "Añade un Polígono". Se obtiene así una nueva capa o fichero vectorial (en formato *kmz) con la distribución de los paleoglaciares durante el máximo avance de la PEH. De nuevo, con el SIG Global Mapper se exporta este fichero a formato "shapefile" (*shp) para poder trabajar con ArcGIS.

El siguiente paso, ya desde ArcGIS, ha consistido en preparar este mapa para los posteriores cálculos de la "Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA)" de los glaciares. Para ello fue necesario agrupar, teniendo en cuenta criterios geomorfológicos y topográficos, los glaciares que en el pasado formaron parte de un mismo paleoglaciado mediante la función *Dissolve* (*ArcToolbox/DataManagementTools/Generalization/Dissolve*). Esta herramienta permite fusionar polígonos adyacentes en uno solo, y requiere que los polígonos que se desea unir tengan un campo de la tabla de atributos en común, por lo cual se creó un campo nuevo con el nombre "Paleoglaciado" en la tabla de atributos al que se agregó para cada glaciar el código de paleoglaciado al que pertenecían en el pasado.

2.2.5. Cálculo de la Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA)

La denominada "Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (*Equilibrium Line Altitude*, ELA, en inglés) es la línea teórica que separa la zona de acumulación, donde predominan los procesos de ganancia que propician la conservación de la nieve y su transformación en hielo, de la zona de ablación, donde prevalecen la fusión y la sublimación que favorecen la pérdida de masa glaciar (Úbeda, 2011). Osmaston (2005) por su parte, utiliza el término ELA en referencia a un glaciar en un estado de equilibrio hipotético, es decir, cuando el balance de masa neta de todo el glaciar es, o podría ser cero.

La definición tradicional de la ELA en la que la altitud donde el saldo neto de masa al final de la temporada de la ablación es nulo se basaba en los estudios llevados a cabo inicialmente en los glaciares de latitudes medias y alta. Sin embargo, es obviamente menos aplicable a los glaciares tropicales, donde hay ablación durante todo el año (Benn et al., 2005).

Estos métodos de reconstrucción de las ELAs y paleoELAs pueden tomar en cuenta diferentes variables o parámetros de tipo geomorfológico y morfométrico, lo que ha dado lugar a diferentes aproximaciones de cálculo. Su fundamento y características están ampliamente desarrolladas en el trabajo de J. Úbeda (2011), y en este TFM se presentan de manera sintética:

- *AA (Area x Altitude)*: El método AA asume que en los glaciares que se van a analizar el *Balance Ratio* (cociente de los gradientes de ablación y acumulación) es $BR=1,0$ (Osmaston, 2005). Para poder aplicar el método AA es necesario disponer de la topografía del glaciar, con el fin de generar la capa que representa sus bandas altitudinales. Esa es la principal diferencia con respecto a otras técnicas menos precisas y laboriosas que sólo requieren conocer determinadas altitudes del glaciar (Úbeda, 2010).

- *AAR (Accumulation Area Ratio)*: el método AAR considera que cuando los paleoglaciares alcanzaron su máxima expansión existía una relación constante entre la superficie de la zona de acumulación y la superficie total de las masas de hielo. Kaser & Osmaston (2002) estimaron que el valor $AAR=0,67$ era el más apropiado para los glaciares tropicales. También, en glaciares de valle de latitudes medias y en condiciones de equilibrio, recientes estudios asumen que el porcentaje del área de acumulación de un glaciar con respecto a su área total (AAR), se sitúa en torno a 0,67, o lo que es lo mismo una proporción de 2:1 (Meierding, 1982, Serrano y González-Trueba, 2004).

- *THAR (Terminus Headwall Altitude Ratio)*: el método THAR (Meierding, 1982; Porter, 1981), consiste en asumir que durante la máxima expansión de un glaciar se podía encontrar una relación constante entre la altitud del frente y la cabecera de los paleoglaciares. Lo cierto es que no existe un consenso pleno sobre cuál es el valor más apropiado (Úbeda, 2010). Según algunos estudios, el valor adecuado para los paleoglaciares de los Andes Tropicales es un THAR de 0,45 (Klein et al., 1999).

- *MELM (Maximum Elevation of Lateral Moraines)*: el método de la máxima elevación de las morrenas laterales (Lichtenecker, 1938; Visser, 1938) se fundamenta en la consideración de que cuando los paleoglaciares culminaron su expansión, las acciones de deposición en sus márgenes sólo se produjeron por debajo de la paleoELA, que por ese motivo equivale a la máxima altitud alcanzada por las formas morrénicas (Úbeda, 2010). Es un método totalmente dependiente de la buena conservación de las morrenas laterales, de modo que si estas están muy deterioradas o son inexistentes no puede llevarse a cabo.

- *AABR (Area x Altitude Balance Ratio)*: como el método AA, el método AABR se basa en ponderar el balance de masa en las áreas que se localizan muy por encima o por debajo de la ELA en mayor medida que en las áreas que se encuentran inmediatamente por encima o por debajo de ese nivel. Sin embargo, en el método AABR 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). Debido a su carácter reciente (Osmaston, 2005) y a que requiere un esfuerzo considerablemente mayor que otros métodos, apenas ha sido aplicado en los Andes Centrales; aunque en los últimos año lo utilizan en sus trabajos Úbeda en 2010, Giráldez en 2011, Alcalá et al., (2011), Campos en 2012 y García en 2013, Quirós en 2013, y Martín en 2014.

Por lo tanto, para una discusión más representativa de los resultados que se obtengan en este TFM y los de los trabajos que se acaban de citar, y en vista de que este método está considerado como el procedimiento más riguroso (Benn et al., 2005), y por tanto que mejores garantías ofrece, será el empleado en el cálculo de las ELAs de los glaciares actuales y paleoELAs durante último avance glaciar de la PEH en la cordillera Pariaqaqá (Andes Centrales occidentales de Perú). Su cálculo contempla dos etapas:

2.2.5.1. Generación de intervalos o bandas altitudinales.

Esta etapa conlleva dos fases independientes, por un lado la obtención de las bandas o intervalos altitudinales de los glaciares actuales a partir de la topografía actual, y por otro, la reconstrucción de la paleotopografía de los paleoglaciares durante el máximo avance.

a) La generación de las bandas altitudinales de los glaciares actuales. Para ello se dispone de la capa de glaciares actuales y las curvas de nivel del área de estudio. Desde ArcGIS se procede a recortar las curvas de nivel tomando como referencia los polígonos representados por cada uno de los glaciares. Este proceso se efectúa, con las herramientas de edición un “*Split polygons*” (*AdvancedEditingTools/SplitPolygons*), siendo el resultado una nueva capa que muestra para cada polígono (o glaciar) la división en numerosos polígonos por las curvas de nivel, es decir, se obtienen unas bandas poligonales cuya diferencia de altitud exceptuando los polígonos superiores e inferiores es de 50 metros. Aquellos polígonos que no quedaron bien desagrupados, aunque sí divididos, fueron reparados con la herramienta *Multipart to singlepart* (*ArcToolBox/DataManagement ToolsFeatures/MultipartToSinglePart*)

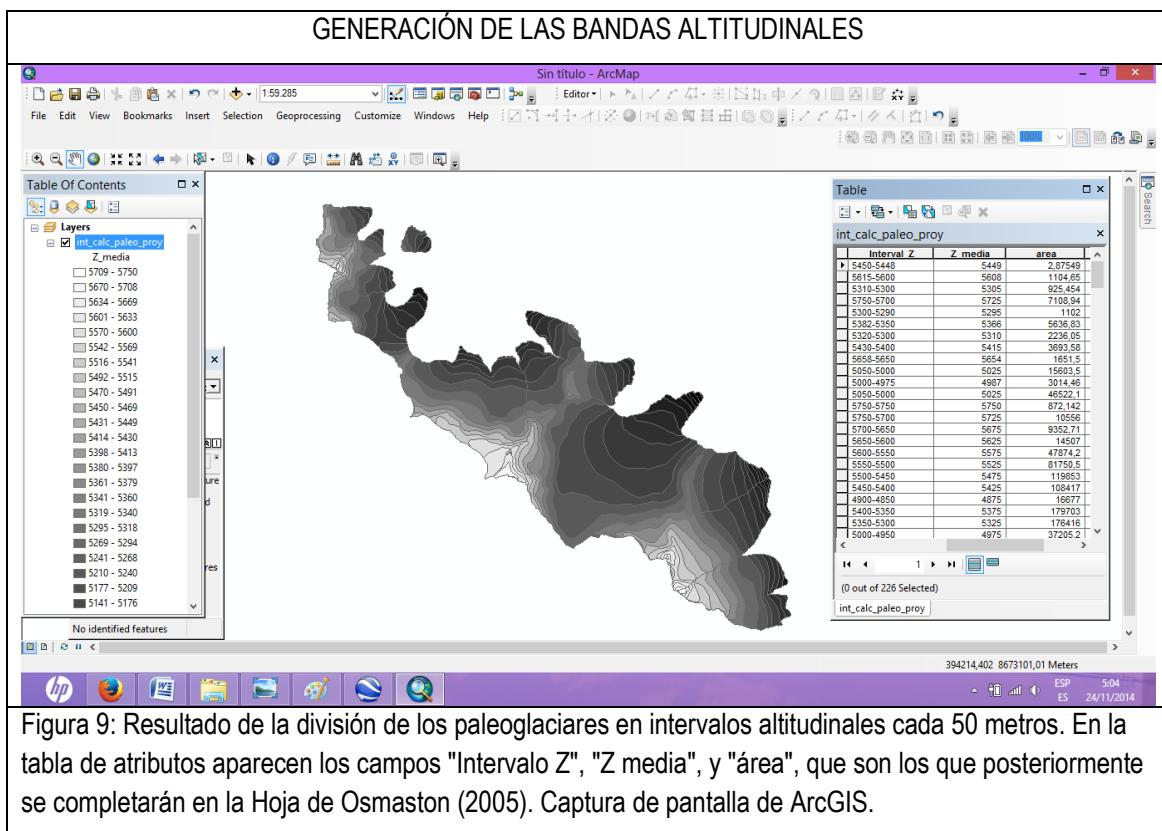


Figura 9: Resultado de la división de los paleoglaciares en intervalos altitudinales cada 50 metros. En la tabla de atributos aparecen los campos “Intervalo Z”, “Z media”, y “área”, que son los que posteriormente se completarán en la Hoja de Osmaston (2005). Captura de pantalla de ArcGIS.

Una vez se tienen las bandas altitudinales para cada uno de los glaciares, se completa la base de datos (o tabla de atributos), añadiendo nuevos campos: Intervalo altitudinal, Z ó altitud media (m) y Área (m²). El primero de estos campos se obtiene a partir de la diferencia entre la altitud máxima y la altitud mínima del polígono, extraída tanto en función de las curvas de nivel como del MDE cuando sea necesario. El segundo representa la altitud media, derivada de la siguiente fórmula: altitud máxima - altitud mínima/2. Finalmente, el tercero se ha calculado mediante la herramienta *Calculate Geometry* de la tabla de atributos. Estos tres campos son los que posteriormente aparecerán en la hoja de Excel para el cálculo de ELAs.

b) Reconstrucción de la paleo-topografía de los paleoglaciares del máximo avance (PEH). Para el caso de los paleoglaciares, la generación de los intervalos altitudinales requiere un paso intermedio adicional. Mientras que la topografía de los glaciares actuales está disponible en los mapas topográficos, no ocurre lo mismo en valles que estuvieron ocupados por glaciares. Esto es debido a que el relieve de los antiguos paleoglaciares no es igual al que se puede observar en la actualidad. Los glaciares están dotados de una capacidad morfogenética importante (Muñoz, 1995), por la cual van transformando lenta y casi imperceptiblemente el entorno a su paso mediante procesos de abrasión y sobreexcavación. Además, después de la retirada de los hielos los procesos geomorfológicos posteriores (encajamientos de la red fluvial, dinámica de laderas) han transformado aún más la topografía previa.

Por tanto es necesario reconstruir la paleotopografía modificando las curvas de nivel actuales siguiendo criterios geomorfológicos (Serrano y González-Trueba, 2004), es decir, tratando de representar las antiguas lenguas de hielo. Los pasos seguidos se detallan a continuación:

* Se abre el mapa (o la capa) de las curvas de nivel del área de estudio, y se duplica, guardándola con otro nombre ("paleotop"). Con la herramienta *Erase* (*ArcToolBox/AnalysisTools/Overlay/Erase*) se eliminan las curvas de nivel del interior de los polígonos definidos por cada uno de los paleoglaciares.

* Se utiliza la barra de herramientas *Editor*, para llevar a cabo la reconstrucción de las isolíneas o curvas de nivel de los paleoglaciares por medio de su digitalización. Esta acción se debe llevar a cabo curvando las isohipsas de forma levemente convexa en dirección a la caída del paleoglaciado, para simular el antiguo relleno glacial (Fig.10). Para esta operación es posible guiarse con la creación de un *TIN* (*Triangle Irregular Network*), que muestra el relieve actual de una forma bastante más visual que las curvas de nivel, y en función de este relieve reconstruir la paleotopografía.

El resto de operaciones necesarias hasta obtener los intervalos altitudinales de los paleoglaciares son exactamente iguales a las descritas para la generación de intervalos altitudinales en el caso de los glaciares actuales.



Figura 10: Edición de la topografía modificando las curvas de nivel para adaptarlas a la paleotopografía de la PEH. Captura de pantalla de ArcGIS.

2.2.5.2. Cálculo de ELAs y paleoELAs

En esta última etapa se utiliza la hoja de cálculo Excel programada por Osmaston (2005) para el tratamiento estadístico en el cálculo de las paleo-ELAs con el método AABR, y , recientemente diseñada y adaptada por Úbeda (2011), lo que facilita su uso y su aplicación de manera más sencilla y casi automática.

La hoja presenta una serie de columnas que incluyen los campos: Intervalo Z, Z Media y Área, cuyos datos se obtuvieron cuando se generaron las bandas altitudinales de los glaciares y paleoglaciares. Estos datos se incorporan a la Hoja de Excel.

La aplicación del método AABR con el uso de la Hoja de Excel se realiza en dos fases:

- En la primera las ELAs y paleoELAs son calculadas utilizando el método AA (*Area x Altitude*) mediante la siguiente ecuación:

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

Donde:

Z = Altitud media de cada banda altitudinal.

A= Área de las bandas altitudinales.

- En la segunda, se eligen los valores BR (Balance Ratio), que es el gradiente de equilibrio en la zona de ablación dividido por el gradiente de equilibrio en la zona de acumulación (Ramage, 2005) y se calculan las ELAs y paleoELAs mediante la siguiente ecuación:

$$\mathbf{BR} = \mathbf{Bn}_{\mathbf{ab}} / \mathbf{Bn}_{\mathbf{ac}}$$

Donde:

Bn_{ab} = Gradiente de equilibrio en la zona de ablación.

Bn_{ac} = Gradiente de equilibrio en la zona de acumulación.

Según el coeficiente BR utilizado se obtiene un diferente valor de la ELA y paleoELA. Osmaston (2005), que utilizó en su trabajo los valores BR 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, y 3.0, estableció que debe prevalecer el resultado con el valor de la desviación típica más reducido, al considerarse que este es el más probable.

El procedimiento debe repetirse sistemáticamente con todos los glaciares y paleoglaciares. Los resultados de los cálculos de la ELA y paleoELA para cada glaciar y paleoglaciado aparecen compilados en la tabla de la primera hoja, que también calcula la ELA y paleoELA promedio con su desviación típica. Nuevamente, será el resultado que presente una menor desviación típica aquel que se tomará como definitivo para la discusión.

2.2.6. Zonas de acumulación y ablación

Como se mencionó anteriormente, se define como zona de acumulación de un glaciar a aquella donde predominan los procesos de ganancia que propician la conservación de la nieve y su transformación en hielo, y zona de ablación a aquella en la que prevalecen la fusión y la sublimación que favorecen la pérdida de masa glaciar, estando ambas separadas por la Línea de Equilibrio denominada ELA. Conociendo la ELA, por tanto, es posible establecer de forma modelica las zonas de acumulación y ablación para un glaciar.

Para este cometido es necesario disponer de la capa de distribución espacial de los glaciares duplicada (para no alterar la original), el MDE de la zona de estudio, y conocer el valor de la ELA que fue calculado en el apartado anterior.

El primer paso consiste en generar a partir del MDE la curva de nivel correspondiente a la ELA, para lo que se utilizó la herramienta *Contour List (ArcToolBox/SpatialAnalyst Tool/Surface/ContourList)* introduciendo el valor de la ELA. El resultado de esta acción es la obtención de la curva de nivel individualizada con el valor de la ELA.

A continuación se utilizó esta curva de nivel para dividir los polígonos de la capa de glaciares mediante la herramienta *Split Polygons*, y se agregó un nuevo campo en la tabla de atributos llamado "zona", que fue rellenado con las opciones "ablación/ acumulación" según correspondiese, para poder expresar de forma correcta la simbología posteriormente.

El proceso fue exactamente el mismo para el cálculo de las zonas de acumulación y ablación para los paleoglaciares, exceptuando que se utilizó la capa duplicada de distribución espacial de los paleoglaciares, y su respectivo valor de paleoELA.

3. RESULTADOS.

Tal como se explicó al plantear los objetivos de este TFM, el objetivo general del TFM se alcanza a través de la ejecución de una serie de objetivos específicos, cada uno los cuales se aborda según una metodología, que ha permitido obtener los resultados que a continuación se exponen:

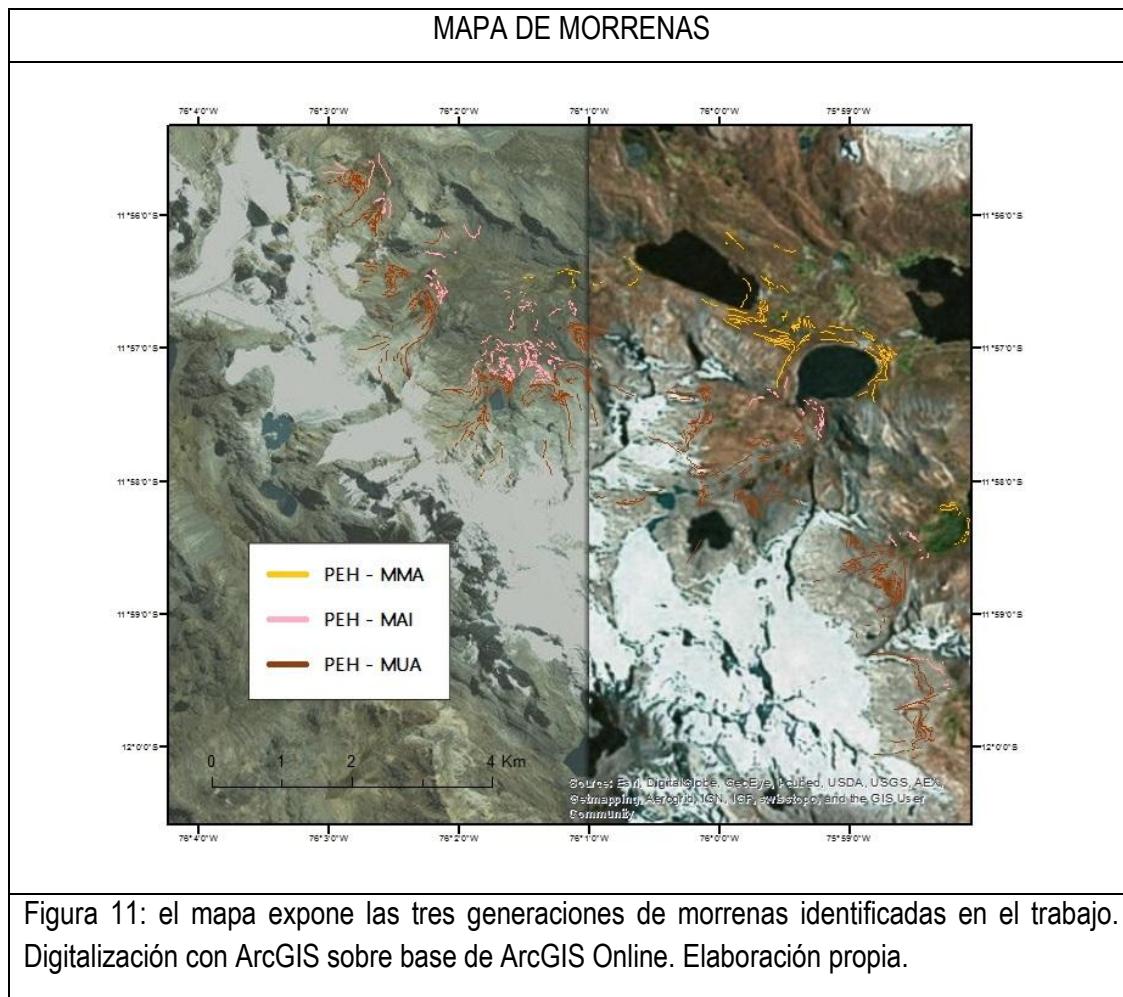
3.1. La cartografía de las morrenas de la Pequeña Edad del Hielo.

El primer resultado visible de este trabajo es la cartografía de morrenas del área de estudio. En los tratados de Geomorfología se define con el término morrena al conjunto del material detrítico transportado, y llegado el caso depositado por los glaciares (Muñoz, 1995). La cartografía de morrenas es, como se ha explicado en apartados anteriores, imprescindible para comprender la geomorfología y reconstruir los paleoglaciares, ya que éstas son las huellas que dejaron los glaciares en el pasado, y por lo tanto están relacionadas con sus pulsaciones y la máxima extensión de los glaciares en el momento de la historia a la que pertenecen.

La cartografía, que se ha realizado mediante la digitalización directa sobre las imágenes de satélite de Google Earth, se ha centrado en la identificación y reconocimiento de las formas morrénicas que pueden ser atribuidas a la Pequeña Edad del Hielo, que constituye el último avance glaciar de cierta magnitud y ha dejado una serie de morrenas a mayor altitud.

En concreto, en el área de estudio, han sido cartografiadas todas las morrenas que, por su contexto geomorfológico fueron consideradas correspondientes a la PEH. Aunque para la reconstrucción de los paleoglaciares se utilizaron las morrenas correspondientes al último avance en la PEH, también se consideró de interés la inclusión en la cartografía de las morrenas de transición pertenecientes a pequeñas fluctuaciones intermedias y las relativas al máximo avance de la PEH, ya que su plasmación cartográfica contribuye al reconocimiento con mayor precisión de las morrenas del último avance de la PEH. En la representación cartográfica, por tanto, se diferencian estos tres tipos de morrenas en función de su antigüedad (Fig.11), aunque todas ellas son atribuibles a la PEH:

- *Morrenas de máximo avance (PEH-MMA)*: corresponden a la máxima extensión de los glaciares durante la PEH, y están situadas entre 4450 y los 4800 metros.
- *Morrenas de reavances intermedios (PEH-MAI)*: se sitúan en el intervalo comprendido entre los 4500 y 5100 m, y están relacionadas con pequeños reavances sucedidos entre el máximo avance de la PEH y el último avance.
- *Morrenas del último avance (PEH-MUA)*: Estas morrenas son las que están situadas a mayor altitud (4650 - 5200 m), y fueron las utilizadas para todos los cálculos en el presente trabajo.



Las morrenas cartografiadas, pertenecientes al avance glaciar sucedido en la PEH, en la vertiente Norte del Pariaqaqá se localizan en su mayoría en un intervalo altitudinal entre los 4450 y 5200 metros y aunque gran parte de ellas son morrenas de fondo también se pueden encontrar algunas morrenas laterales. La correspondencia altitudinal entre las morrenas pertenecientes a esta etapa de avance de los glaciares es un factor clave a la hora de su identificación, ya que esta correspondencia altimétrica permite fácilmente intuir la existencia de nuevas morrenas que sigan un patrón de continuidad espacial.

3.2. La cartografía de la extensión de los glaciares actuales y cálculo de sus áreas.

En total en la vertiente Norte del Pariaqaqá se han delimitado e inventariado, a partir de la interpretación de las imágenes de Google Earth, 26 glaciares en el año 2010. A partir de la delimitación de los depósitos morrénicos de la PEH, es posible interpretar que durante este periodo, los glaciares actuales confluían formando 11 grandes paleoglaciares. Aunque los glaciares en ambas épocas prácticamente compartían las mismas cuencas o circos de alimentación, en la actualidad, el frente de los glaciares no desciende por debajo de los 5100 m, mientras que durante el último avance de la PEH, éstos descendían hasta cotas inferiores a los 4700m.

Además de la distribución espacial de los glaciares y paleoglaciares (Fig. 12), también se aprecia una notable diferencia de la superficie, indicando un gran retroceso glaciar en el intervalo comprendido entre ambos periodos.

UBICACIÓN DE LOS GLACIARES ACTUALES Y PALEOGLACIARES

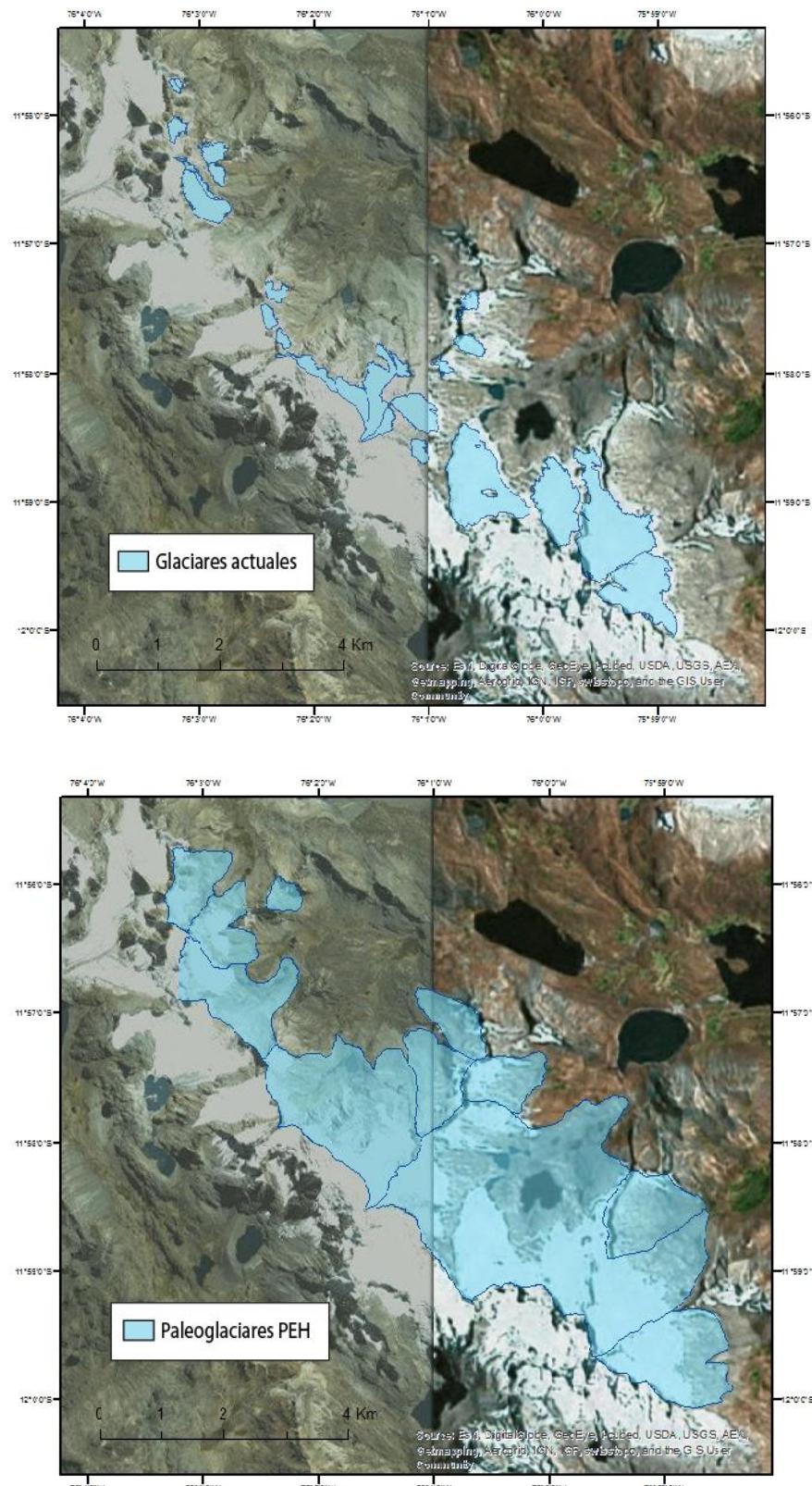


Figura 12: Mapa que muestra la localización de los glaciares en la vertiente Norte del Pariaqaqá para el año 2010. Digitalización con ArcGIS sobre mapa base de ArcGIS Online. Elaboración propia.

La superficie total que ocupaban los glaciares en 2010, fecha a la que corresponden las imágenes de Google Earth, era de 5.588 km², mientras que los paleoglaciares correspondientes a la PEH ocupaban un total de 22.142 km². El retroceso desde la PEH hasta la actualidad, como se puede observar en la Fig. 13, es de 16.554 km², lo que supone un descenso del 74,76% de la superficie glaciar.

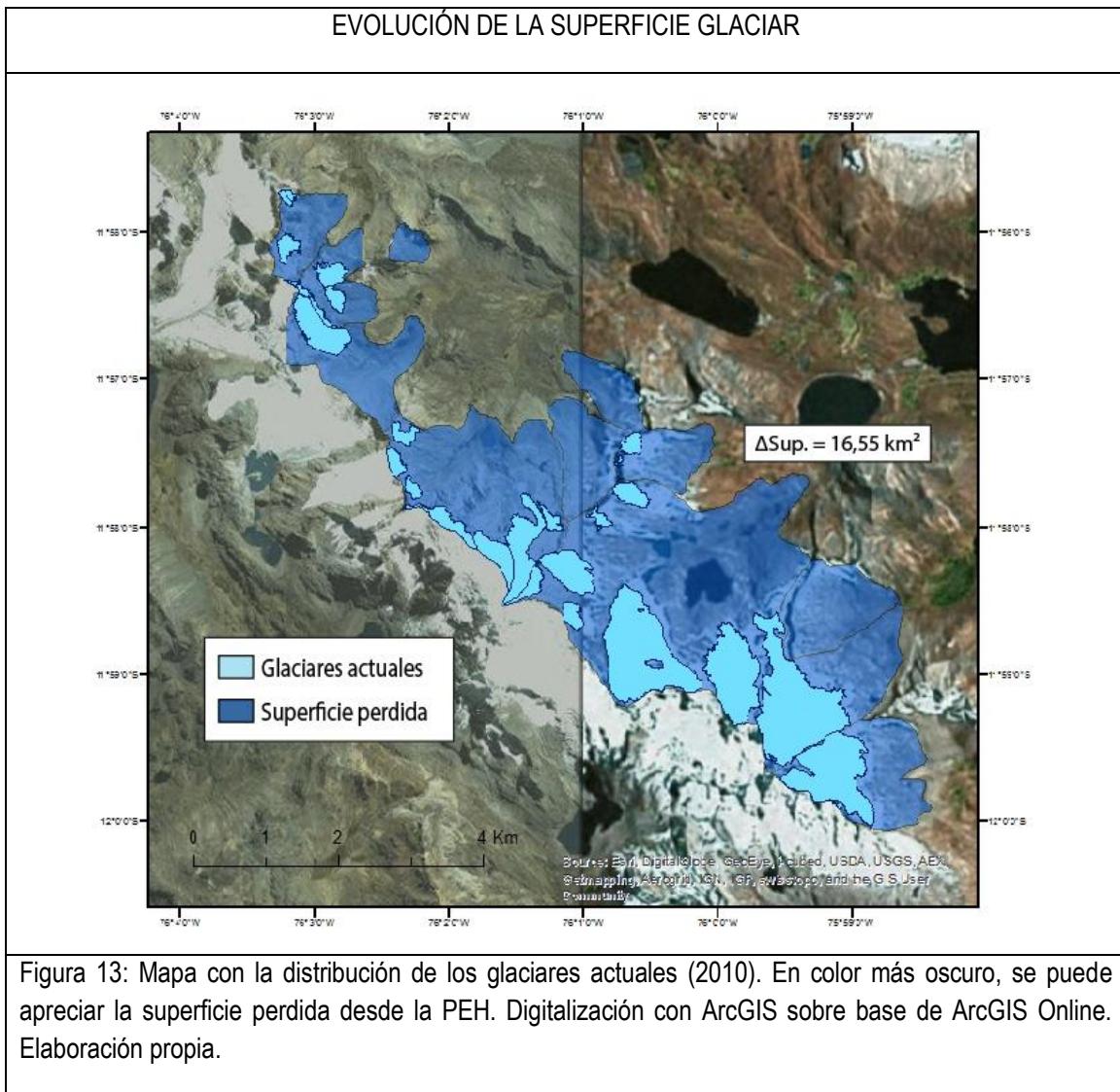


Figura 13: Mapa con la distribución de los glaciares actuales (2010). En color más oscuro, se puede apreciar la superficie perdida desde la PEH. Digitalización con ArcGIS sobre base de ArcGIS Online. Elaboración propia.

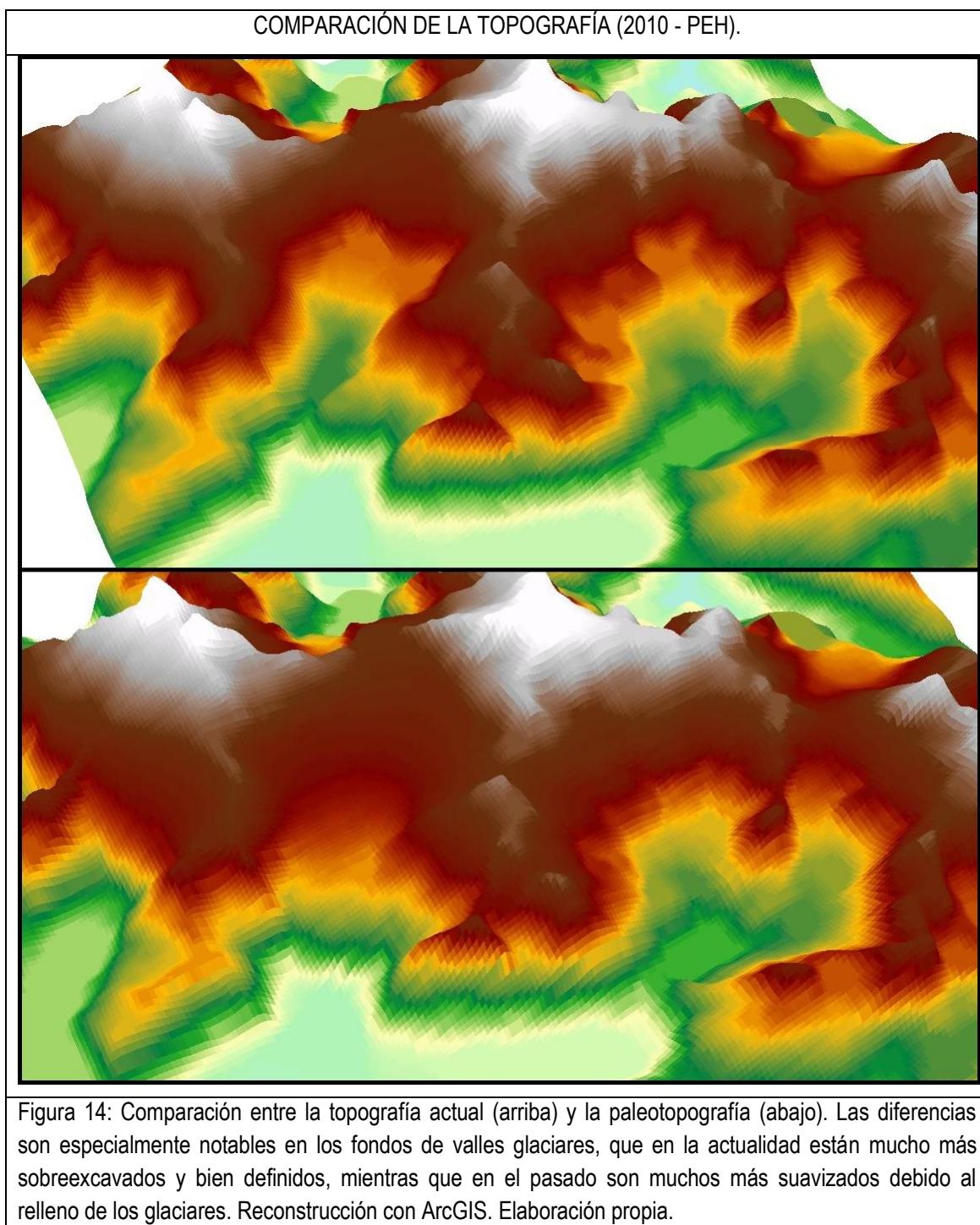
3.3. La Altitud de la Línea de Equilibrio de los Glaciares (ELA).

La ELA, como se explicó en apartados anteriores, es la línea de equilibrio en la cual el balance de ganancia y pérdida de masas del glaciar es nula, constituyendo un buen indicador para determinar el estado del clima, debido a que incluso minúsculos cambios en el mismo pueden hacer variar sensiblemente la altitud de la ELA de los glaciares.

En este TFM, el cálculo de la ELA se obtiene a través del método AABR (*Area x Altitude Balance Ratio*), desarrollado por Osmaston (1965). La particularidad de este método es que tiene en cuenta la distribución de la superficie de la masa de hielo con respecto a la altitud, para lo cual es preciso conocer la superficie de la misma por franjas

o rangos altitudinales. Esto se puede realizar en un SIG o CAD superponiendo la topografía (o paleotopografía) de cada glaciar (capa de líneas) con respecto a su extensión (capa de tipo polígono), para posteriormente dividir el glaciar por sus respectivas bandas altitudinales, tal como se explicó en el apartado de metodología.

Como se detalló en la metodología, en el caso de los paleoglaciares de la PEH se precisó de una reconstrucción previa de la paleotopografía. Las reconstrucciones tridimensionales de la topografía actual y la paleotopografía relativa a la PEH (Fig. 14) tienen un gran valor para el análisis geovisual y la interpretación del relieve glacial.



Osmaston (2005) programó una hoja de cálculo para facilitar las operaciones, que posteriormente ha sido modificada por Úbeda (2011) para agilizar el proceso de cálculo de la ELA. Con este método, por tanto, se ha calculado la ELA de los 26 glaciares actuales, así como la paleo-ELA de los 11 glaciares de la PEH.

A continuación se exponen todos los resultados de las ELAs obtenidas para cada glaciar en función de la relación de equilibrio considerada (BR -Balance Ratio-), junto al valor promedio y la desviación típica para cada resultado. La ELA con una menor desviación estándar, indicaría una mayor probabilidad, desde el punto de vista estadístico, de ser correcta.

RESULTADOS ELAS AABR					
<u>ELA AABR PARIQAQÁ NORTE</u>					
<u>GLACIARES</u>	BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
Glaciar 1	5402	5412	5421	5427	5432
Glaciar 2	5405	5412	5423	5431	5437
Glaciar 3	5334	5317	5306	5301	5308
Glaciar 4	5232	5224	5218	5214	5211
Glaciar 5	5451	5456	5462	5465	5468
Glaciar 6	5637	5633	5629	5626	5624
Glaciar 7	5420	5408	5401	5404	5407
Glaciar 8	5277	5271	5267	5264	5261
Glaciar 9	5244	5235	5229	5225	5222
Glaciar 10	5307	5304	5303	5302	5301
Glaciar 11	5287	5282	5279	5276	5273
Glaciar 12	5319	5312	5308	5306	5303
Glaciar 13	5475	5451	5464	5475	5484
Glaciar 14	5565	5558	5553	5550	5551
Glaciar 15	5505	5500	5501	5503	5504
Glaciar 16	5372	5365	5360	5357	5355
Glaciar 17	5329	5324	5320	5317	5315
Glaciar 18	5258	5253	5250	5252	5253
Glaciar 19	5285	5273	5265	5259	5255
Glaciar 20	5537	5527	5519	5514	5510
Glaciar 21	5560	5556	5553	5551	5550
Glaciar 22	5560	5556	5553	5551	5550
Glaciar 23	5560	5556	5553	5551	5550
Glaciar 24	5381	5375	5370	5367	5364
Glaciar 25	5344	5337	5332	5328	5325
Glaciar 26	5326	5320	5317	5314	5312
Media	5399	5393	5391	5390	5389
Desviación típica	118	119	120	121	122

Tabla 1: Resultados pertenecientes al cálculo de ELAs en el Pariaqaqá Norte según el método AABR. En amarillo, el resultado con menor desviación típica asociada. Resultados obtenidos a partir de la hoja de Osmaston (2005).

El resultado seleccionado para cálculos posteriores es aquel que muestra una menor desviación típica, ya que es considerado el más probable (Osmaston, 2005). En el caso de los glaciares actuales (2010) el valor de ELA media con menos desviación típica es 5399 m, que se corresponde con un BR = 1 (Tab.1).

RESULTADOS DE PALEOELAS AABR.					
ELA AABR PARIQAQÁ NORTE					
PALEOGLACIARES	BR=1,0	BR=1,5	BR=2,0	BR=2,5	BR=3
Paleoglaciario 1	5274	5250	5267	5279	5287
Paleoglaciario 2	5218	5206	5222	5233	5241
Paleoglaciario 3	5150	5165	5175	5182	5188
Paleoglaciario 4	5179	5161	5151	5160	5167
Paleoglaciario 5	5115	5101	5113	5121	5127
Paleoglaciario 6	5177	5162	5152	5155	5161
Paleoglaciario 7	5300	5322	5337	5346	5353
Paleoglaciario 8	5177	5154	5161	5172	5180
Paleoglaciario 9	5256	5261	5272	5280	5285
Paleoglaciario 10	5316	5303	5316	5326	5333
Paleoglaciario 11	5142	5130	5120	5113	5107
Media	5209	5201	5208	5215	5221
Desviación típica	68	73	79	82	84

Tabla 2: Resultados pertenecientes al cálculo de paleoELAs en el Pariaqaqá Norte según el método AABR. En amarillo, el resultado con menor desviación típica asociada. Resultados obtenidos a partir de la hoja de Osmaston (2005).

En cambio, la paleoELA de los paleoglaciares de la PEH, se encuentra a una altitud más baja que en el caso de los glaciares actuales, como cabría esperar. El valor asociado a la paleoELA media con menor desviación típica es 5209 metros, también correspondiente a un BR = 1 (Tab.2)

Por tanto, la variación de altitud de la ELA desde la PEH hasta el año 2010 fue de 190 metros. Este aumento en la altitud está directamente relacionado con un cambio en las condiciones climáticas, que deben ser más cálidas en la actualidad que en el pasado.

ELAS Y PALEOELAS.

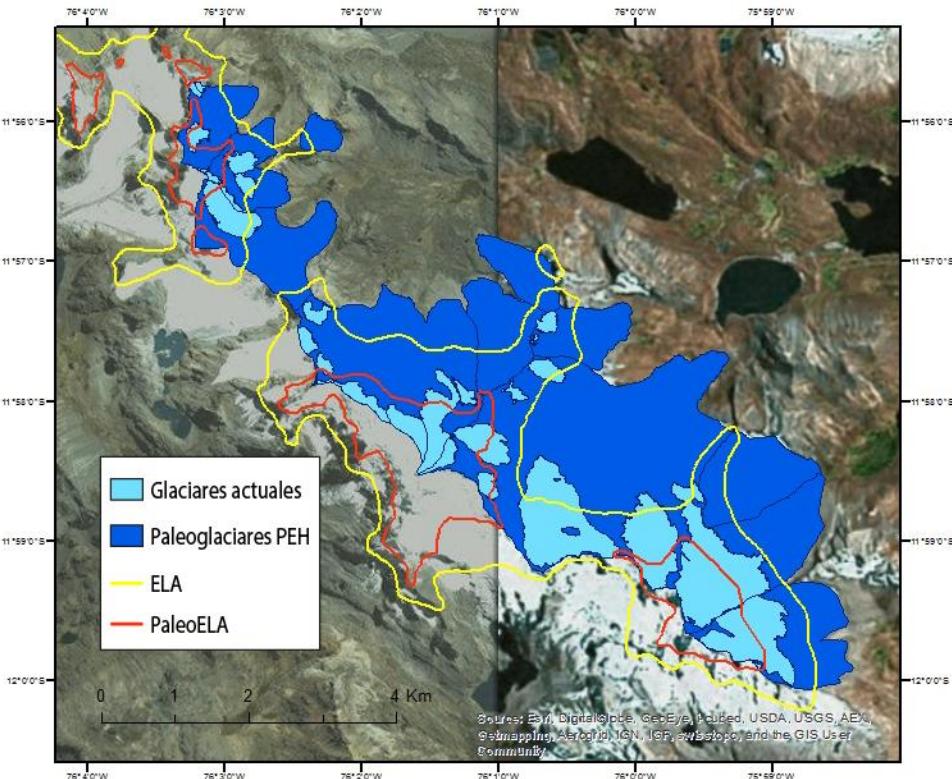


Figura 15: El mapa representa la comparación espacial entre la ELA actual (2010) y la paleoELA en la vertiente Norte del Pariaqaqá. Digitalización con ArcGIS sobre base de ArcGIS Online. Elaboración propia.

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

Una vez que se conoce la ELA media de los glaciares del conjunto del área de estudio, que como ya se ha indicado representa la línea imaginaria que separa la zona de acumulación y de ablación, es posible establecer modelos teóricos en los que se diferencien ambas zonas en los respectivos glaciares, y detectar su estado actual en relación con las características climáticas.

Respecto a la extensión de los glaciares actuales, la ELA media se sitúa a una altitud de 5399 m, cuya relación con la distribución altitudinal de los glaciares significa que la zona de acumulación ($1,96 \text{ km}^2$) ocupa una superficie que es prácticamente la mitad que la de ablación ($3,63 \text{ km}^2$) (Fig. 16). Además, es importante señalar que algunos de los glaciares ni siquiera presenten zona de acumulación, es decir la ELA ha superado altitudinalmente el límite superior del glaciar. En estos glaciares, los procesos predominantes favorecen la pérdida de masa de hielo, de modo que están “condenados” a su desaparición si se mantienen las actuales condiciones climáticas.

COMPARACIÓN DE LAS ZONAS DE ACUMULACIÓN Y ABLACIÓN

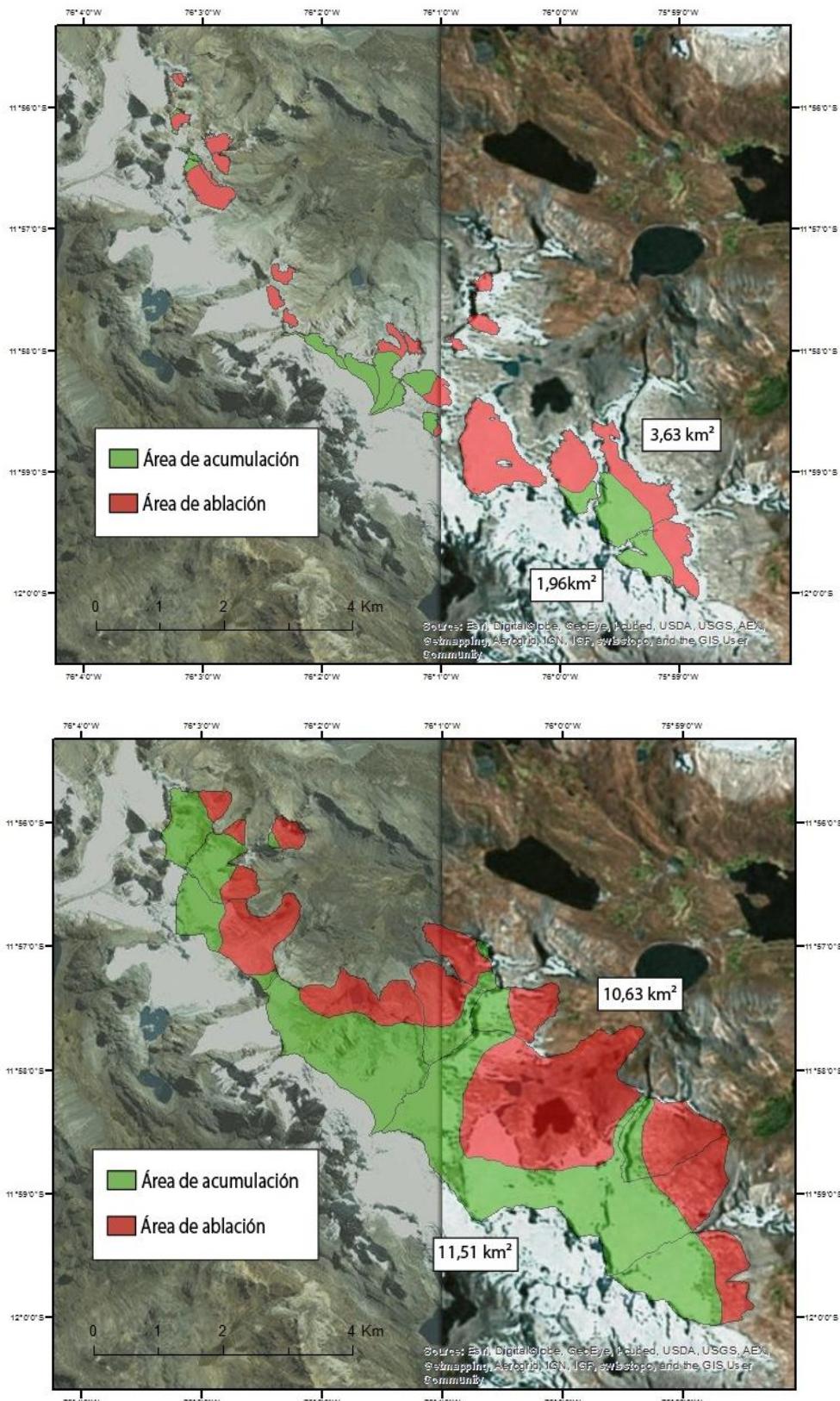


Figura 16: Mapas de modelización de las zonas de acumulación y ablación en los glaciares actuales (superior) y los paleoglaciares de la PEH (inferior). Realizado con ArcGIS sobre base de ArcGIS Online. Elaboración propia.

Por otro lado, la paleoELA de los paleoglaciares correspondientes al último avance de la PEH se situaba, como se ha indicado, a 5209 m. La relación entre esta altitud y la extensión de los glaciares muestra que la zona de acumulación, que alcanzaba una superficie de 11,51 km², era incluso sensiblemente superior a la zona de ablación (10,63km²).

3.5. La variación de temperatura entre la PEH y la actualidad.

Algunos autores señalan que un glaciar se comporta como un termómetro (Kaser et al., 2003) ya que cualquier variabilidad climática se manifiesta rápidamente en la masa de hielo del glaciar, y, por tanto, en su balance de masa. En este sentido, la ELA puede considerarse un buen indicador climático que refleja directamente el clima (Osmaston, 2005), por lo que una variación en la ELA está asociada a una variación en el clima. Partiendo de esta premisa es posible calcular la variación de temperatura en una región en función de la variación de la ELA de los glaciares de dicha región en un determinado intervalo de tiempo.

Aunque no se dispone del Gradiente Térmico Vertical (GTV) para el área del Nevado de Pariaqaqá que tenga en cuenta las características climáticas de la zona a nivel local, en este TFM se ha utilizado el GTV global para la Tierra, 6,5°C/km (0,0065°C/m), establecido a partir de los trabajos de Klein et al., (1999) y Smith et al., (2005), y que ha sido empleado también por Giráldez (2011) con éxito en su estudio en la Cordillera Blanca. Por su parte, la variación de la ELA entre la PEH y la actualidad en el Nevado de Pariaqaqá es de 190 m

A partir de estos valores, el cálculo para estimar la variación de la temperatura emplea la siguiente ecuación propuesta por J. Úbeda (2011):

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

Donde:

ΔT = variación de la temperatura

GTV = gradiente térmico vertical de aire (6,5º/km)

ΔELA = variación de la ELA

El resultado de la ecuación arroja, para el caso de la vertiente Norte del Pariaqaqá, un aumento de la temperatura de 1,23 °C desde la PEH hasta la actualidad. Este resultado no dista mucho de los de otros trabajos en regiones cercanas de los Andes, como se verá en la discusión.

3.6. La tasa de deglaciación y posibles escenarios de futuro.

El cálculo de las tasas de deglaciación utiliza geoindicadores como pueden ser la superficie glaciar y la ELA. Si se asume que el final del enfriamiento de la PEH sucede a partir de 1890 (Thompson et al., 2000), es posible emplear esta fecha como fecha inicial para el cálculo de las tasas de deglaciación.

La ecuación para obtener la tasa de deglaciación, por tanto, emplea la variación de la ELA y el intervalo de tiempo, resultado la siguiente fórmula o relación:

$$Td\ ELA = \Delta ELA / \Delta t$$

Donde:

ΔELA = variación de la ELA

Δt = intervalo de tiempo

El resultado de la tasa de deglaciación tras aplicar la fórmula en los glaciares de la vertiente Norte del Pariaqaqá es de 1,58 m. Este valor indicaría el retroceso medio anual de la ELA durante el periodo comprendido entre 1890 y 2010.

También, resulta de interés calcular la tasa de deglaciación en función de la variación de la superficie ocupada por los glaciares entre la PEH y la actualidad, que es de 16,55 km^2 . Asimismo se asume el mismo intervalo temporal. La fórmula propuesta es la siguiente:

$$Td\ S = \Delta S / \Delta t$$

Donde:

ΔS = variación de la superficie

Δt = intervalo de tiempo

El resultado obtenido aplicando la fórmula mencionada arroja en los glaciares estudiados una tasa de deglaciación de 137.956 $m^2/año$.

Ambos resultados son poco representativos debido a que el aumento de la temperatura no ha sido lineal, sino que ésta se ha incrementado de forma exponencial en las últimas décadas.

Por otro lado, es posible generar predicciones de futuro empleando el valor de la tasa de deglaciación en función de la variación de la ELA entre los periodos considerados, Tomando como referencia el trabajo de Úbeda (2011), se pueden contemplar dos posibles escenarios de futuro para la vertiente Norte del Nevado de Pariaqaqá.

- **Escenario 1:** Se parte del supuesto de que el incremento de temperatura y las tasas de deglaciación en el futuro se mantendrán constantes con respecto a lo observado entre la PEH y la actualidad.

- **Escenario 2:** Se utilizarán tasas de deglaciación equivalentes al triple de las observadas durante la PEH y la actualidad, partiendo de la premisa de que el aumento de temperatura en el futuro será igualmente el triple del experimentado durante estos últimos 120 años.

RESULTADOS ESCENARIO DE FUTURO 1.						
Glaciar	TdELA (m/año)	ELA	Zmáx	Zmáx-ELA	años ELA = Zmáx	fecha ELA = Zmáx
1	1,58	5399	5700	301	191	2201
2	1,58	5399	5730	331	209	2219
3	1,58	5399	5582	183	116	2126
4	1,58	5399	5402	3	2	2012
5	1,58	5399	5552	153	97	2107
6	1,58	5399	5660	261	165	2175
7	1,58	5399	5620	221	140	2150
8	1,58	5399	5322	-77	-	-
9	1,58	5399	5328	-71	-	-
10	1,58	5399	5322	-77	-	-
11	1,58	5399	5310	-89	-	-
12	1,58	5399	5391	-8	-	-
13	1,58	5399	5654	255	161	2171
14	1,58	5399	5616	217	137	2147
15	1,58	5399	5538	139	88	2098
16	1,58	5399	5494	95	60	2070
17	1,58	5399	5362	-37	-	-
18	1,58	5399	5300	-99	-	-
19	1,58	5399	5537	138	87	2097
20	1,58	5399	5622	223	141	2151
21	1,58	5399	5608	209	132	2142
22	1,58	5399	5349	-50	-	-
23	1,58	5399	5436	37	23	2033
24	1,58	5399	5440	41	26	2036
25	1,58	5399	5404	5	3	2013
26	1,58	5399	5380	-19	-	-

Tabla 3: Esta tabla recoge los resultados correspondientes al Escenario de futuro 1, con una TD igual a la registrada entre la PEH y la actualidad. En rojo los glaciares que están en fase terminal actualmente. Realizado con Excel. Elaboración propia.

La interpretación de los resultados obtenidos de aplicar el primer escenario a los glaciares del área de estudio refleja que la gran mayoría de estos glaciares entrarían en fase terminal durante los dos próximos siglos. Alguno de ellos, de hecho, ya se encuentran en esta fase en la actualidad, y sólo una alteración drástica de las condiciones climáticas a corto plazo podría evitar su desaparición en el futuro. Según estos cálculos, como límite, en el año 2219 todos los glaciares habrían alcanzado ya la fase terminal.

RESULTADOS ESCENARIO DE FUTURO 2.						
Glaciar	TdELA (m/año)	ELA	Zmáx	Zmáx-ELA	años ELA = Zmáx	fecha ELA = Zmáx
1	4,74	5399	5700	301	64	2074
2	4,74	5399	5730	331	70	2080
3	4,74	5399	5582	183	39	2049
4	4,74	5399	5402	3	1	2011
5	4,74	5399	5552	153	32	2042
6	4,74	5399	5660	261	55	2065
7	4,74	5399	5620	221	47	2057
8	4,74	5399	5322	-77	-	-
9	4,74	5399	5328	-71	-	-
10	4,74	5399	5322	-77	-	-
11	4,74	5399	5310	-89	-	-
12	4,74	5399	5391	-8	-	-
13	4,74	5399	5654	255	54	2064
14	4,74	5399	5616	217	46	2056
15	4,74	5399	5538	139	29	2039
16	4,74	5399	5494	95	20	2030
17	4,74	5399	5362	-37	-	-
18	4,74	5399	5300	-99	-	-
19	4,74	5399	5537	138	29	2039
20	4,74	5399	5622	223	47	2057
21	4,74	5399	5608	209	44	2054
22	4,74	5399	5349	-50	-	-
23	4,74	5399	5436	37	8	2018
24	4,74	5399	5440	41	9	2019
25	4,74	5399	5404	5	1	2011
26	4,74	5399	5380	-19	-	-

Tabla 4: La tabla recoge los resultados correspondientes al Escenario de futuro 2, con una tasa de deglaciación igual a la registrada entre la PEH y la actualidad. En rojo los glaciares que están en fase terminal actualmente. Realizado con Excel. Elaboración propia.

Con respecto al Escenario 2, que utiliza una tasa de deglaciación tres veces superior a la que se utilizó en el Escenario 1, los resultados arrojan que los glaciares tan sólo necesitarán un tercio del tiempo previsto en el anterior escenario para entrar en fase terminal. Según estos cálculos, varios glaciares entrarán en esa fase incluso durante la próxima década, y se podría esperar que para el año 2080 los glaciares que aún se conserven no presentaran la zona de acumulación.

A pesar de que los cálculos podrían ser bastante más exactos si la ELA se hubiera obtenido a partir de un GTV local adaptado al Pariaqaqá en lugar del GTV global, como hizo Úbeda (2011) en el Nevado Coropuna, se refleja la importancia de la ELA como un indicador valioso generar predicciones climáticas.

4. DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS.

En este TFM se han utilizado herramientas SIG (*ArcGIS*) y visualizadores cartográficos y de imágenes (*Google Earth*) para estudiar la evolución glaciar en la vertiente Norte del Nevado de Pariaqaqá (Perú), desde la Pequeña Edad de Hielo (PEH) hasta la actualidad (año de 2010). Con la ayuda de aplicar estas técnicas de información geográfica ha permitido obtener la cambios en superficie y la variación de la Altitud de la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA) de un conjunto de glaciares del citado Nevado, que han permitido, además, deducir las variación de la temperatura y estimar de manera aproximada las tasas de deglaciación, e incluso plantear escenarios de futuro. A continuación, estos resultados se analizan y se relacionan a escala local/regional con aquellos obtenidos en otros ámbitos de montaña glaciarizados en zonas tropicales.

4.1. La evaluación de las TIGs en la investigación.

Los avances en las nuevas tecnologías durante las últimas décadas permiten llevar a cabo una amplio abanico de proyectos en diversos campos de investigación que hubieran parecido impensables hace unos años. Gracias a las TIGs hoy en día un alumno puede hacer desde su propia casa un estudio sobre el estado de los glaciares en una cordillera situada a miles de kilómetros de distancia, analizar la distribución de la población en una gran urbe, o estudiar los usos del suelo de una comarca en una nación extranjera.

En la realización de este TFM no han sido solamente fundamentales las TIGs, sino también el alto grado de compatibilidad entre las mismas y la posibilidad de trabajar y transferir indistintamente información entre los diferentes programas utilizados.

La cartografía de las morrenas de la PEH se ha elaborado mediante la interpretación de las imágenes de satélite disponibles en el servidor cartográfico de Google Earth, al igual que la delimitación del contorno actual de los glaciares y el de los paleoglaciares de las PEH, en este caso apoyado en la cartografía de las morrenas del último avance glaciar (PEH-UA).

La digitalización de los glaciares y paleoglaciares como se ha mencionado previamente, se ha efectuado directamente en pantalla sobre las imágenes de Google Earth, activando la vista tridimensional hasta un determinado acercamiento o *zoom*. El problema a la hora de digitalizar con el modelo tridimensional de Google Earth es que está levemente desplazado (aproximadamente 80 metros) respecto a las curvas de nivel extraídas a partir del MDE de la NASA, por lo que generación de las bandas altitudinales, y los cálculos posteriores realizados con ellas acumulan un pequeño error, aunque se puede considerar despreciable en el cómputo global del trabajo. A pesar de este leve inconveniente, la digitalización sobre las imágenes de Google Earth ha resultado ser relativamente cómoda, y además ofrece las ventajas de la escala de detalle, debido en este caso a la alta resolución y calidad de las imágenes, y de la posibilidad de exagerar el relieve, muy útil para la interpretación de geomorfología.

Las numerosas limitaciones que presenta Google Earth para la edición se solventaron eficazmente con ArcGIS, un programa que ofrece herramientas más avanzadas y mejores opciones de digitalización. Además, toda la información geográfica fue procesada con este SIG, mediante diversas operaciones y cálculos con las capas (shp*), desde la generación de los intervalos altitudinales hasta los cálculos de ELAs y paleoELAs y el establecimiento de las áreas de acumulación y ablación.

La compatibilidad entre estos programas no habría sido posible sin el conversor de formatos GlobalMapper, ya que ArcGIS permite exportar capas vectoriales shp* a formato kmz*, compatibles con Google Earth, pero este último programa no tiene la capacidad de hacer lo propio en sentido opuesto.

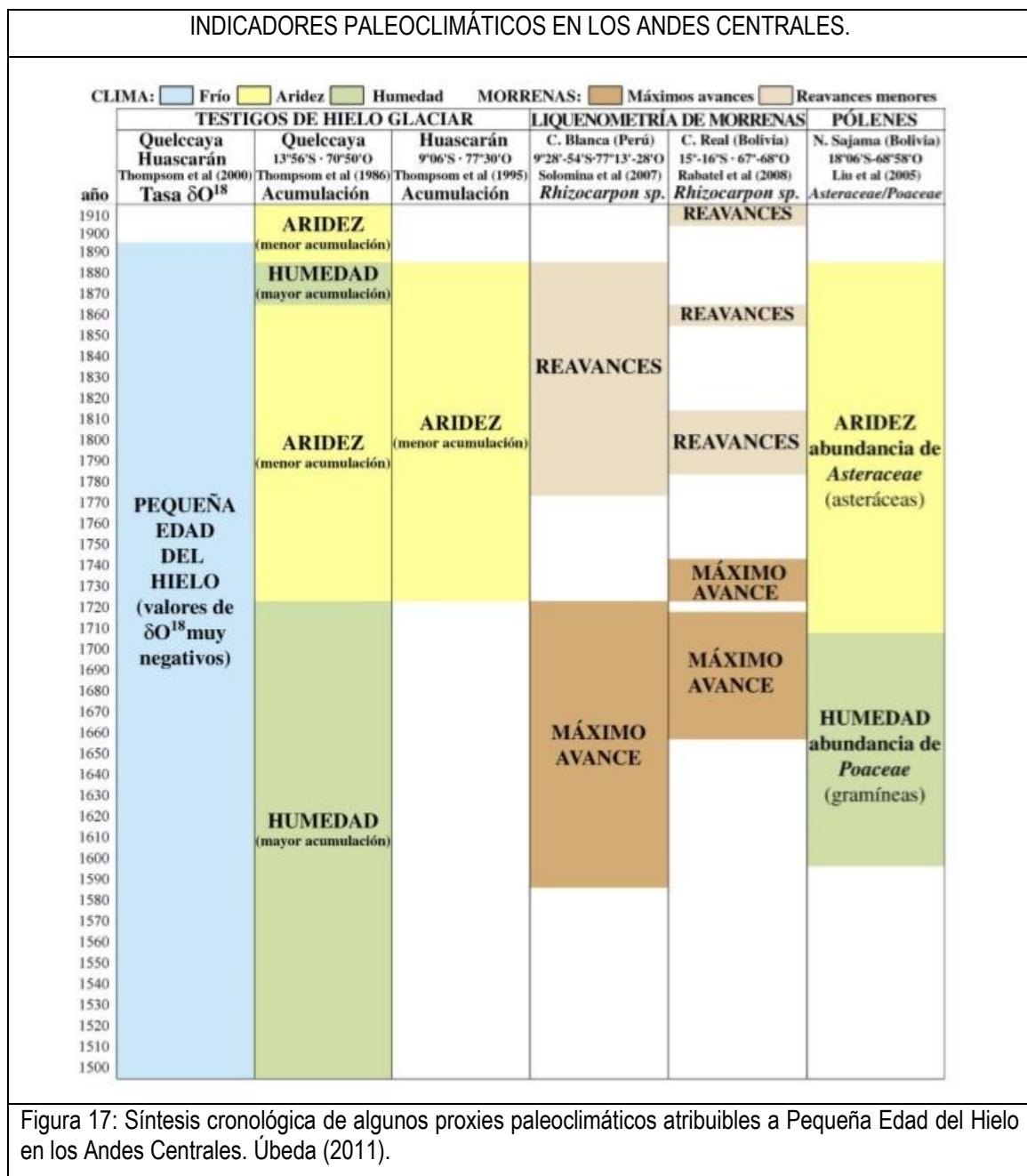
4.2. La extensión de los glaciares en la PEH y en la actualidad.

En la vertiente septentrional del Nevado Pariaqaqá las morrenas pertenecientes a la PEH se sitúan entre los 4450 m y los 5200 m. Tal como muestra la cartografía (Fig. 11) se corresponden a varias pulsaciones ocurridas durante la PEH. La presencia de estas generaciones de morrenas está acorde con la cronología establecida a partir de *proxies* paleoclimáticos en otras regiones de los Andes Centrales, que parecen confirmar varias etapas glaciares durante la PEH. Así, por ejemplo, en la figura 17 se puede observar como a partir de la datación de líquenes en bloques morrénicos se revela la existencia de reavances glaciares posteriores al máximo avance glacial de la PEH (PEH-MA) en la Cordillera Blanca (Perú) y la Cordillera Real (Bolivia) (Solomina et al., 2007; Rabatel et al., 2008). A falta de estudios más profundos en el Nevado de Pariaqaqá (que incluya dataciones), la identificación y cartografía de varias generaciones de morrenas en su vertiente Norte pueden ser atribuidas a la PEH, a tenor de los resultados de estos trabajos.

Las diferencias altitudinales que se pueden apreciar entre las morrenas pertenecientes a unos paleoglaciares u otros son debidas a factores morfotopográficos, como son la orientación, la pendiente, la anchura o dimensiones de los circos, que condicionan el mayor o menor desarrollo de los glaciares. Entre estos factores, la orientación es el más condicionante debido a la diferencia de insolación solar en función de la vertiente. De este modo, en el Hemisferio Sur, los glaciares reciben una mayor insolación cuanto más encarados hacia el Norte se encuentran, y por tanto se desarrollan menos y dejan las morrenas a mayor altitud.

La altitud a la que se encuentran las morrenas de la PEH en otros “nevados” de los Andes Centrales, también difiere con la obtenida en el Nevado de Pariaqaqá. En el Nevado de Coropuna, Úbeda (2011) identificó morrenas entre los 4735 y 6300 metros en los cuadrantes Noreste y Sureste, y García (2013) hizo lo propio entre los 5400 y 5800 metros en su sector Noroeste. Por el contrario, Campos (2012) obtuvo resultados bastante diferentes, ya que registró los cordones morrénicos entre los 3460 y 4070 en el sector Suroeste, observándose por tanto una clara relación con la orientación de los

circos. Por su parte, en otros ámbitos de montaña, Giráldez (2011) inventarió las morrenas de Suroeste del Nevado Hualcán en un intervalo situado entre los 3460 y 4070, mientras que un poco más al Sur, en el Nevado del Salkantay, Martín (2014) estableció las morrenas entre los 4100 y los 4800 metros.



La falta de registros sobre la altitud de las morrenas en la vertiente Sur del Pariaqaqá en el trabajo de Quirós (2013) impide una comparación entre la disposición altitudinal de las morrenas en ambas vertientes, aunque cabe suponer que debido a la causa expuesta anteriormente las morrenas se encuentran a mayor altitud en la vertiente septentrional.

En definitiva, las variaciones de estos resultados muestran la particularidad y singularidad de los efectos de la PEH en los Andes Centrales, que como se puede

observar no tuvo las mismas repercusiones en todas las áreas de la cordillera sino que fue más intensa en unas áreas que otras. Además, a nivel local, estas diferencias pueden atribuirse a las condiciones propias de cada zona, e incluso cada glaciar tiene cierta singularidad en función de las características topográficas y geomorfológicas que se mencionaron anteriormente.

Por otra parte, respecto a extensión de los glaciares, la delimitación de los glaciares ha permitido obtener el área o superficie de cada glaciar inventariado para ambos períodos, cuya variación constituye un buen indicador para evaluar la evolución de los glaciares y su relación con las condiciones climáticas. En este sentido, la superficie o área total de los glaciares de la vertiente Norte del Pariaqaqá para junio de 2010 era de 5,59 km², que contrasta claramente con el área mucho mayor de los paleoglaciares, atribuible al último avance de la PEH, de 22,14 km², llegando a limitar con la divisoria de aguas con los paleoglaciares cartografiados en la vertiente meridional del Pariaqaqá en el TFM de Quirós (2013). La diferencia de superficie, 16,55 km² supone por tanto un retroceso del 75 % en tan sólo 120 años, si consideramos 1890 como la fecha en la que produce el último avance de la PEH.

A escala local, este impresionante retroceso de la masa glaciar es similar a los resultados obtenidos en la vertiente Sur del Pariaqaqá: Así, Quirós (2013), utilizando la misma metodología que la seguida en este trabajo, calculó una superficie de 21,27 km² para la PEH, mientras que para el 2010 la superficie se redujo hasta 3,13 km², un drástico retroceso del 85% de la superficie inicial.

Por su parte, desde una perspectiva regional, diversos estudios llevados a cabo en otros lugares de los Andes Centrales arrojan unos resultados más moderados. En la Cordillera Blanca Giráldez (2011) estimó una superficie de 29,73 km² para la PEH y de 18,55 km² para los glaciares en 2003, lo que significa una reducción de un 38%. En el Nevado Coropuna, Úbeda (2011) identificó una superficie de 3,32 km² en los paleoglaciares de la PEH y de 2,27 km² para el año 2007 (-32%), mientras que García (2013) en la vertiente Noroeste del mismo Nevado, obtuvo un área de 3,53 km² para la PEH y 1,87 km² para los glaciares de 2010, lo que supone un 48% menos. El trabajo que más se acerca a los resultados del Pariaqaqá es el de Martín (2014), que en el Salkantay fijó la superficie de los paleoglaciares de la PEH en 11,77 km² y la de los glaciares en 2009 en 2,77 km², siendo el retroceso superficial de un 73% entre ambas fechas, aunque hay que tener en cuenta que en este trabajo los paleoglaciares estudiados no se corresponden con el máximo avance de la PEH, como sí sucede en los demás.

Hay que tener en cuenta que en este trabajo los paleoglaciares estudiados no se corresponden con el máximo avance de la PEH, como sí sucede en los demás. Un cálculo realizado con paleoglaciares del último avance daría un retroceso más elevado (ya que los glaciares actuales serían los mismos, pero los paleoglaciares algo más extensos), por lo que los resultados se acercarían más aún a los del trabajo de Quirós (2014) sobre la cara Sur.

4.3. La variación de las ELAs y zonas de acumulación y ablación en la PEH y actualidad.

La ELA es el parámetro que mejor expresa la relación glaciares - clima, y por tanto permite conocer la dinámica y evolución de los glaciares y proporciona información de excepcional valor sobre las condiciones climáticas y su variación desde el pasado. Entre los diferentes métodos para obtener la ELA de los glaciares, en este TFM se ha utilizado el método AABR (*Area x Altitude Balance Ratio*) para calcular las ELAs de los glaciares actuales (2010) y la de los paleoglaciares correspondientes al último avance de la PEH (PEH-UA) en la vertiente Norte del Pariaqaqá.

La ELA media para el conjunto de los glaciares inventariados en junio de 2010 se ha establecido en 5399 metros, mientras que en los paleoglaciares de la PEH se situaba en 5209 m; por lo tanto la variación altitudinal o depresión de la ELA es de 190 metros, para un periodo de 120 años. Esto a su vez supone una tasa aproximada de deglaciación en función de la ELA de 1,58 metros al año.

La variación de la ELA en el Nevado de Pariaqaqá es similar con lo que se observa en otras áreas de montaña de los Andes Centrales (Tabla 5). Por un lado, el estudio de Úbeda en el sector Noreste del Nevado Coropuna Úbeda (2011) dedujo una paleoELA situada a 5886 m durante la PEH, que se elevó a 5968 m en los glaciares de 2007, y 5776 m y 5884 m respectivamente para el cuadrante Sureste. Por su parte Campos (2012) estableció la ELA para el año 2007 en 5854 m y la paleoELA en 5823 m en el sector Suroccidental, mientras que García (2013) en el sector Noroeste reconstruyó la ELA a 6041 m para el año 2010 y una paleoELA de 5961 m para la PEH. Por otro lado, en la Cordillera Blanca, Giráldez (2011) fijó la ELA en el sector SO del Nevado Hualcán en 5124 para el año 2003, y la paleoELA para la PEH en 4994 metros. Por su parte Martín (2014) en la vertiente meridional del Salkantay calculó una ELA de 5012 m para el año 2009 y una paleoELA de 4757 m, y Quirós (2013) obtuvo una ELA de 5138 en el 2010 y una paleoELA de 4998 para la PEH en la vertiente sur del Nevado de Pariaqaqá.

La interpretación de estos datos revela que la principal variable que condiciona la altitud de la ELA a nivel local es la orientación. Una orientación Norte lleva asociada (en el Hemisferio Sur) una mayor insolación anual, y por tanto la ELA se dispondrá a una mayor altura en estos glaciares que en aquellos acogidos en exposiciones Sur, quedando de manifiesto, por ejemplo, en los trabajos del Pariaqaqá N y Pariaqaqá Sur. A nivel regional por otra parte, el factor que más condiciona al altitud de la ELA es la aridez, que en esta región aumenta de Norte a Sur y de Este a Oeste. El incremento de la aridez se traduce en un aumento altitudinal en la disposición de la ELA.

COMPARACIÓN DE RESULTADOS CON LOS DE OTROS TRABAJOS EN LOS ANDES CENTRALES

Autor	J. Úbeda		C. Giráldez	N. Campos	E. García	T. Quirós	A. Martín	D. Pérez
Año	2010		2011	2012	2013	2013	2014	2014
Zona	Coropuna NE	Coropuna SE	Hualcán SO	Coropuna SO	Coropuna NO	Pariaqaqá S	Salkantay	Pariaqaqá N
Latitud	16° S	16° S	9° S	16° S	16° S	12° S	13° S	12° S
GTV (°C/km)	8,4	8,4	6,5	8,4	8,4	6,5	6	6,5
ELA (m)	5968	5862	5124	5992	6034	5138	5012	5399
PaleoELA (m)	5886	5776	4994	5823	5936	4998	4757	5209
Δ ELA (m)	82	86	130	169	98	140	255	190
Δ T (°C)	-0,69	-0,72	-1,01	-1,42	-0,82	-0,91	-1,53	-1,23
Z morrenas (m)	4735 - 6300	4735 - 6300	3460 - 4070	5200 - 6100	5400 - 5800	-	4100 - 4800	4450 - 5200*
Área actual (km ²)	2,27	-	18,55	-	1,87	3,13	3,24	5,59
Área PEH (km ²)	3,32	-	29,73	-	3,54	21,27	11,77	22,14
Δ Área (%)	-32	-	-38	-	-48	-85	-73	-75

*Se han tenido en cuenta tanto las morrenas del máximo avance de la PEH como las del último avance.

Tabla 5: La tabla refleja los resultados de algunos de los trabajos en los Andes Centrales en los últimos años que han seguido una metodología similar. Realizado con Excel. Elaboración propia.

Por otro lado, el análisis de la variación de la Altitud de la Línea de Equilibrio (ELA) de los glaciares actuales y de los paleoglaciares de la PEH ha permitido deducir la evolución de la paleotemperatura en dicho periodo, estableciéndose que en la vertiente norte del Nevado de Pariaqaqá la temperatura fue 1,23°C más baja que la actual. Este registro muestra un resultado relativamente dispar con la evolución de la temperatura en otras áreas de los Andes centrales, tal como se observa en la Tabla 5. En este sentido, cabe hacer mención a la diferencia del Gradiente Vertical de la Temperatura (GTV) utilizado para los cálculos, ya que sólo se ha calculado a nivel local el GTV para el Nevado de Coropuna, por lo que los resultados en esta área deberían ser más precisos.

A nivel local, se observan diferencias con los resultados de Quirós (2013), que apreció una variación de la temperatura de 0,91°C para las mismas fechas. La diferencia en los resultados en este caso, se debe principalmente a diferencias metodológicas, ya que esta autora utilizó la misma fecha inicial (1890) para calcular la variación de temperatura a pesar de que atendiendo a los *proxies* paleoclimáticos, no corresponde al máximo avance de la PEH, cuyos paleoglaciares utiliza para los cálculos.

Por otra parte, a escala regional, se ponen de manifiesto ciertas diferencias de la evolución de la temperatura, donde el registro obtenido por Martín (2014) en el Nevado de Salkantay, que se asemejaría al valor de la vertiente Norte del Nevado de Pariaqaqá, refleja, por el contrario, un calentamiento que es más del doble que el registrado por Úbeda (2011) en el Nevado de Coropuna.

En definitiva, se acusa un claro retroceso en todos los glaciares tropicales inventariados en los trabajos sobre los Andes Centrales. Las variaciones en los resultados obtenidos en estos trabajos dependerá de diversos factores: altitud, influencia de la ZCIT, que determina un mayor innivación en unas vertientes u otras, la mayor o menos influencia de la corriente fría de Humboldt, etc.

5. CONCLUSIONES

El presente Trabajo Fin de Master se ha centrado en analizar los glaciares en la vertiente norte del Nevado de Pariaqaqá (Perú), cuyos resultados han permitido interpretar de forma cuantitativa el estado actual de los glaciares y su evolución histórica desde la Pequeña Edad del Hielo.

En concreto, las principales conclusiones derivadas del estudio de los glaciares en este sector de los Andes centrales han sido las siguientes:

- Se han identificado y cartografiado, sobre las imágenes de Google Earth, las morrenas en la vertiente septentrional del Nevado Pariaqaqá, que sirvieron de referencia para reconstruir los paleoglaciares atribuibles al último avance de la Pequeña Edad del Hielo. Asimismo, la interpretación de las imágenes de Google Earth con fecha de junio de 2010 ha permitido delimitar un conjunto de 26 glaciares.
- Partiendo de la delimitación de glaciares, fueron calculadas y comparadas sus áreas. Los resultados arrojan que la superficie glacial disminuyó en 16,55 km² entre la PEH y 2010, una pérdida del 75 % a un ritmo de 0,14 km² al año. Estos resultados concuerdan con la tendencia al retroceso glacial observada por otros autores en sus trabajos, a pesar de las características singulares de cada ámbito de montaña. Este ritmo de deglaciación tan acelerado al afectar a áreas tropicales áridas traerá consigo la pérdida de esta reserva de agua en estado sólido.
- A partir del polígono que define cada uno de los glaciares inventariados, se calcularon las ELAs según el método AABR. El método se ha mostrado como el más fiable y preciso, y por eso es el que se está imponiendo en los últimos años, aunque conviene comparar sus resultados con los otros métodos de cálculo de las ELAs. Los resultados indican que la variación o depresión altitudinal de la ELA muestra un aumento de 190 metros, desde los 5209 de la PEH hasta los 5399 en 2010, a un ritmo anual de 1,58 metros.
- La ELA es el parámetro que mejor expresa la relación glaciar-clima. Asumiendo, ya que intervienen otros factores, que los cambios en la ELA correspondan únicamente a factores de temperatura, se estimó que el incremento de temperatura desde el final de la PEH hasta 2010 fue de 1,23°C.
- En base a la tasa de deglaciación en función de la ELA se establecieron dos escenarios para los cuáles se generaron modelos de futuro. En ambos escenarios puede decirse que

la mayoría de los glaciares estudiados se encuentran ya en fase terminal en la actualidad, y el resto, incluso en el escenario más benigno, acabarán desapareciendo durante los próximos 200 años si las condiciones climáticas no cambian repentinamente.

Estas conclusiones ponen de manifiesto la importancia de estudiar glaciares tropicales ya que son indicadores clave del cambio climático (Úbeda et al. 2014, Hastenrath 1994; Kaser y Osmaston 2002), de modo que cualquier mínima variación de las condiciones climáticas tiene una rápida respuesta en el balance de masa de los glaciares. En este sentido, con la idea de mejorar este estudio o la realización de estudios similares se presentan a continuación unas posibles líneas de investigación futuras.

6. FUTURAS LÍNEAS DE TRABAJO

A partir de los resultados obtenidos, y plasmados en las conclusiones que se acaban de exponer, se pueden señalar algunas líneas de trabajo futuras que podrían contribuir a completar la investigación realizada en este TFM o, incluso, constituir un nuevo proyecto en el futuro. Se proponen como ideas las siguientes:

- Calcular la tasa de deglaciación (TD) en función de la superficie de forma individualizada para cada glaciar, lo que requiere la división de los flujos glaciares dentro de cada paleoglaciario. Este proceso permitiría posteriormente generar una predicción de futuro basada en la TD en función de la superficie, que podría ser comparada con los resultados obtenidos para la predicción generada a partir de la TD basada en la ELA, que sí ha sido calculada en este trabajo.
- Realizar el cálculo del retroceso glacial a partir de la diferencia del volumen de las masas de hielo. Estos cálculos pueden llevarse a cabo a partir de operaciones básicas con los MDEs de la topografía actual y la paleotopografía reconstruida. Restar con la calculadora ráster (*ArcToolBox/SpatialAnalystTools/MapAlgebra/RasterCalculator*) ambos MDEs, otorgando previamente resoluciones de celda de 1m x 1m, da lugar a que la diferencia de altitud obtenida corresponda al volumen de hielo en cada celda, y su sumatorio sería el volumen total perdido (m^3). Otra alternativa sería comparar los valores obtenidos mediante esa técnica (sujeta a un error muy alto por la necesidad de alta resolución en los MDEs) con las nuevas técnicas de reconstrucción de paleotopografía glaciar automática que se están imponiendo actualmente, como el sistema de reconstrucción de Benn y Hulton (2010).
- Reconstruir los paleoglaciares del máximo avance durante la PEH y a partir de ellos realizar los mismos cálculos realizados en este trabajo para los paleoglaciares del último avance de la PEH. La justificación de esta posibilidad reside en obtener unos datos más fácilmente extrapolables a los de otros estudios glaciares en los Andes Centrales, que generalmente han utilizado los paleoglaciares relativos a ese máximo avance para sus cálculos.

7. BIBLIOGRAFÍA UTILIZADA.

- Aceituno, P. (1997): Aspectos generales del clima en el altiplano sudamericano. En: Charrier R, P Aceituno, M Castro, Allanos & LARaggi (eds) El Altiplano: ciencia y conciencia de Los Andes: 63- 69. Actas del Segundo Simposio Internacional de Estudios Altiplánicos, Santiago, Chile.
- Alcalá, J. (2014). La evolución volcánica, glaciar y periglaciar del complejo volcánico Ampato (sur de Perú). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, 535 págs. (inédita).
- Alcalá, J., Palacios, D., Zamorano, J.J. y Vázquez-Sellem, L. (2011). Last Glacial Maximum and deglaciation of Ampato volcanic complex, Southern Peru. Cuaternario & Geomorfología, 25 (1-2), 121-136.
- 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., Hulton, N.R., 2010. An Excel spreadsheet program for reconstructing the surface profile of former mountain glaciers and ice caps. Computers and Geosciences, 36(5), 605–610.
- 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.
- Blard, P.-H., Sylvestre, F., Tripati, A.K., Claude, C., Causse, C., Coudraing, A., Condom, T., Seidel, J.-L., Vimeux, F., Moreau, C., Dumoulin, J.-P. y Lavé, J. (2011). Lake highstands on the Altiplano (Tropical Andes) contemporaneous with Heinrich 1 and the Younger Dryas: new insights from ^{14}C , U-Th dating and $\delta^{18}\text{O}$ of carbonates. Quaternary Science Research 30, 3973-3989.
- 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 ^{3}He . Journal of Quaternary Science, 26(1), 37-43.
- Burroughs, W. (2003). Climate: Into the 21st Century.
- Campos, N. (2012). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Coropuna (Cordillera Ampato, Perú). Master Thesis. Universidad Complutense de Madrid.
- Carey, M. (2010). In the shadow of melting glaciers. Climate change and Andean society. Oxford University Press.
- Dyurgerov, M.B (2002). Glacier Mass Balance and Regime: Data of Measurements and Analysis. Institute of Arctic and Alpine Research, University of Colorado. Occasional paper, Boulder, 275 pp.
- Fox, A.N. (1993). Snowline altitude and climate in the Central Andes (5-28° S) at present and during the late pleistocene glacial maximum, Cornell University. Tesis doctoral. 527 pp.
- Fox, A.N., y Bloom, A.L. (1994). Snowline altitude and climate in the Peruvian Andes (5°-17° S) at present and during the Latest Pleistocene Glacial Maximum. Chigaku-Zusshi (Journal of Geography, Japan) 103: 867-885.
- 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. y Sémiond, H. (1997). Estado de la red de monitoreo existente e impacto de los eventos ENSO sobre el balance de masa de los glaciares en Bolivia y en el Perú. In: R. Galárraga and B. Ibarra (Editors), Seminario Montañas, Glaciares y Cambios Climáticos. Escuela Politécnica Nacional. EPN - Institut Français de Recherche Scientifique pour le Développement en Coopération. ORSTOM - FUNDACYT, 1997, Quito (Ecuador), pp. 43-51.
- 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. Trabajo de Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid.
- Giráldez, C. (2011). Glacier evolution in the South West slope of Nevado Hualcán (Cordillera Blanca, Perú). Trabajo de Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid.
- Greminger, P. (2003). Managing the risks of natural hazards. In Debris-flow hazards mitigation: Mechanics, prediction, and assessment: Proceedings, 3rd International DFHM Conference, Davos, Switzerland, September 10–12, 2003, ed. D. Rickenmann and C. L. Chen, 39–56. Rotterdam: Millpress.
- Grove, J.M. (1988). The Little Ice Age, Londres (Reino Unido), 1049 pp.
- Hastenrath, S. (1994). "Recession of tropical glaciers". *Science*, 265, 1790–1791.
- Huggel, C., Haeberli, W., Kääb, A., Bieri, D. and Richardson, S: (2004). An assessment procedure for glacial hazards in the Swiss Alps. *Canadian Geotechnical Journal*, 41, 1068-1083.
- IPCC (2007). Cambio climático 2007: Informe de síntesis. Contribución de los Grupos de trabajo I, II y III al Cuarto Informe de evaluación del Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático. En: R.K. Pachauri and A. Reisinger (Editores), Ginebra (Suiza), pp. 104.
- 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.
- Jomelli, V., Favier, V., Rabaté, 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.
- 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., Ames, A. and Zamora, M. (1990). Glacier fluctuations and climate in the Cordillera Blanca, Perú. *Annals of Glaciology*, 14, 136 – 140.
- Kaser, G., y Osmaston, H. (2002): Tropical Glaciers. Cambridge University Press: Cambridge, UK.
- Kelly, M.A., Lowell, T.V., Applegate, P.J., Smith, C.A., Phillips, F.M. y Hudson, M.A., (2012). Late glacial fluctuations of Quelccaya Ice Cap, southeastern Peru. *Geology* 40 (11), 991-994.

- Klein, A.G., Seltzer, G.O. y 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.
- 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.
- Lichenecker, N. (1938). Die gegenwärtige und die eiszeitliche Schneegrenze in den Ostalpen, Verhandl. d., III Intern. Quartär-Konferenz (1936), Wien (Österreich), pp. 141-147.
- 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., y García-Zabaleta, F. (1974). Estudio geológico de la región entre Cuzco y Machu Picchu. *Bull. Inst. Fr. Et. And.*, 3(2), 1-27.
- Martín, A. (2014). Evolución reciente de los glaciares de la vertiente Sur del Nevado Slakantay (Perú). Trabajo de Fin de Máster. Universidad Complutense de Madrid.
- Matthes, F. (1939). Report of committee on glaciers. *Transactions American Geophysical Union*, 20: 518-535.
- Meierding, T.C. (1982). Late Pleistocene glacial equilibrium-line altitudes in the Colorado Front Range: A comparison of methods. *Quaternary Research*, 18: 289–310.
- Moores, E., y Twiss, R. J. (1995). *Tectonics*. W. H. Freeman and Co.
- Muñoz, J. (1995). *Geomorfología General*. Madrid, Editorial Síntesis.
- Osmaston, H.A. (2005). Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the AreaxAltitude, the AreaxAltitude Balance Ratio and the AreaxAltitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International*, 138– 139, 22–31.
- Porter, S.C. (1981). Pleistocene glaciacion in the Southern Lake District of Chile. *Quaternary Research*, 16: 263-292
- Pelto, M. From a glaciers perspective. Glacier change in A world of climate change. *Manon Glacier Retreat Lake Formation, Peru* [en-linea]. Dirección URL: <http://glacierchange.wordpress.com/2012/10/28/manon-glacier-retreat-lake-formation-peru/> [Fecha de consulta: 20 de noviembre de 2014].
- Quirós, T. (2013). Impacto del Cambio Climático en los glaciares de las montañas Chollquepucro y Pariaqaqá (Perú). Trabajo de Fin de Grado. Universidad Complutense de Madrid.
- Rabatel, A., Francou, B., Jomelli, V., Naveau, P. and Grancher, D. (2008). A chronology of the Little Ice Age in the tropical Andes of Bolivia (16°S) and its implications for climate reconstruction. *Quaternary Research*, 70: 198-212.
- 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.

- Seltzer, G.O. (1994). A lacustrine record of late Pleistocene climatic change in the subtropical Andes. *Boreas*, 23: 105-111.
- Seltzer, G. O. (1990). Recent glacial history and paleoclimate of the Peruvian-Bolivian Andes. *Quaternary Sciences Reviews*, 9, 137-152.
- Seltzer, G.O., Rodbell, D.T. & Abbott, M. (1995). Last Glacial Maximum: Andean glacial lakes & climate variability. *Bulletin de l'Institut français d'études andines*, 24 (3): 539- 549.
- Serrano Cañadas, E., y González Trueba, J.J., (2004). El método AAR para la determinación de paleo-ELAs: análisis metodológico y aplicación en el macizo de Valdecebollas (Cordillera Cantábrica). *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 30: 7-34 pp.
- SERRANO, E. y GUTIÉRREZ, A. (2002). El glaciarismo pleistoceno en la vertiente meridional de la Cordillera Cantábrica (montañas de Palencia, Cantabria y Burgos). *Geomorfología y Paisaje. Guía de excursiones.*, pp. 91-161.
- Smith, J.A., Seltzer, G.O., Farber, D.L., Rodbell, D.T. and Finkel, R.C. (2005). Early Local Last Glacial Maximum in the Tropical Andes. *Science*, 308, 5722, 678-681.
- Solomina, O., Jomelli, V., Kaser, G., Ames, A., Berger, B. and Pouyaud, B. (2007). Lichenometry in the Cordillera Blanca, Peru: "Little Ice Age" moraine chronology. *Global and Planetary Change* 59 225–235.
- Strahler, A.N. y Strahler, A.H. (1989). *Geografía Física*. Editorial Omega, Barcelona, 549 pp.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, H. and Morales Amao, B. (1984). El Niño-Southern Oscillation events recorded in the stratigraphy of the Tropical Quelccaya Ice Cap. *Science*, 22: 50-53.
- 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.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E. and A., H.K. (2000). Ice-core palaeoclimate records in tropical South America since the Last Glacial Maximum. *Journal of Quaternary Science*, 15 (4): 377-394.
- 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., y Palacios, D. (2014 -en prensa-). Evaluación del enfriamiento del clima durante la Pequeña Edad del Hielo en los Andes Centrales deducido de la Altitud de la Línea de Equilibrio de glaciares actuales y pasados. *Boletín del Colegio de Geógrafos del Perú*, 1.
- Visser, P.C. (1938). *Wissenschaftliche Ergebnisse der Niederländischen Expeditionen in den Karakorum und die angrenzenden Gebiete in den Jahren 1922- 1935 II Glaziologie*, Leiden (Netherland), 216 pp.
- Wright, H.E. (1983). Late-Pleistocene glaciation and climate around the Junin Plain, central Peruvian highlands. *Geografiska Annaler*, 65A: 35-43.