

MEMORIA CIENTÍFICO-TÉCNICA DE PROYECTO PARA LA CONVOCATORIA 2015 DEL FONDECYT

(Fondo Nacional de Desarrollo Científico, Tecnología e Innovación Tecnológica)

joseubeda@ucm.es

Título

Análisis de las altitudes de la línea de equilibrio (ELA) presentes y pasadas, para evaluar el impacto del cambio climático y la evolución durante las próximas décadas de los glaciares de la vertiente del Pacífico de los Andes de Perú

Palabras clave

Cambio climático, glaciares, ELAs, dataciones, simulaciones climáticas

Línea de investigación

Los glaciares tropicales son indicadores sensibles de los cambios climáticos, especialmente en la temperatura y la precipitación. Esa propiedad permite analizar tres cuestiones: diagnosticar el estado de equilibrio o desequilibrio de los glaciares con el clima actual; deducir las condiciones paleoclimáticas durante sus avances pasados y simular su evolución en el futuro, teniendo en cuenta las previsiones sobre el calentamiento global del Panel Intergubernamental sobre el Cambio Climático (IPCC).

Resumen

Se pretende contribuir al conocimiento del cambio climático a escala global y evaluar el retroceso de los glaciares de Perú en las próximas décadas. Con ese fin, se analizarán glaciares actuales (reconocibles en fotografías aéreas o imágenes de satélite) y paleoglaciares (deducidos de las morrenas generadas por sus avances pasados). Las áreas de estudio están en la vertiente del Pacífico de los Andes, donde los glaciares tienen mayor sensibilidad al cambio climático y son una reserva hídrica fundamental para la árida región de la costa. Para comprender como es la relación actual glaciares-clima se realizarán las siguientes acciones: a) Reforzar una red estaciones de alta montaña transferida por proyectos de investigación extranjeros; b) Calcular las altitudes de la línea de equilibrio o *Equilibrium Line Altitudes* de los glaciares (ELA), deducidas

de su geomorfología (ELAg) y el clima (ELAc); c) Desarrollar simulaciones climáticas REMO (REgional MOdel) con datos procedentes de estaciones convencionales.

Los análisis actuales servirán para elaborar reconstrucciones del pasado y modelos futuros. Para el pasado se establecerán correlaciones cronológicas entre diferentes áreas de estudio, resultados y datos paleoclimáticos indirectos (proxies), mediante dataciones absolutas de fases de avance y retroceso de los paleoglaciares. Para el futuro se incluirá el calentamiento global previsto por el IPCC durante el siglo XXI, en cada escenario de emisión de gases de efecto invernadero.

Antecedentes

Entre 26 y 19 ka, la Tierra experimentó el mayor enfriamiento de los últimos 100 ka (1 ka=1000 años antes del presente). Entonces ocurrieron simultáneamente la última máxima expansión de los glaciares de montaña y los glaciares continentales de las altas latitudes (Norteamérica, Groenlandia, Eurasia y Antártida), y el mínimo nivel relativo del mar, con un descenso >100 m respecto al presente (Clark et al., 2009).

Después de 19 ka, la temperatura de la superficie del mar (TSM) muestra un comportamiento diferente en ambos hemisferios terrestres: el Hemisferio Sur se calentó progresivamente (Kaiser et al., 2005), pero el Hemisferio Norte experimentó fuertes enfriamientos con 1-2 ka de duración (Heinrich 1 y Younger Dryas), cuyas señales están reflejadas en la TSM al oeste de Europa en 16 ka y 12 ka (Bard et al., 2003). Dichos episodios fueron simultáneos a avances glaciares en los Andes Centrales (Zech et al., 2009; Kelly et al., 2012), a la aparición de plancton de agua dulce en el Lago Titicaca (Fritz et al., 2007) y a transgresiones de paleolagos en el altiplano boliviano (Blard et al., 2011). Son evidencias de un clima más húmedo, que sugieren que el enfriamiento del Hemisferio Norte pudo incrementar el desplazamiento hacia el sur de la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZICT) y las precipitaciones sobre la cordillera andina. La tendencia posterior al calentamiento boreal parece haber provocado un aumento de la aridez, reflejado en la extinción del plancton de agua dulce, la desaparición de los paleolagos y la deglaciación de las montañas. Después de 10 ka, el calentamiento global sólo fue interrumpido por la Pequeña Edad del Hielo (PEH), la última fase con avances glaciares en todo el planeta. Los isótopos de oxígeno del glaciar Quelccaya (Thompson et al., 1986) sugieren que ocurrió entre 1500 y 1890. Coincidió con un periodo húmedo (Thompson et al., 1992), que también pudo estar relacionado con un mayor

desplazamiento hacia el sur de la ZCIT (Sachs et al., 2009). El calentamiento global posterior (0,85°C en 1880-2012), se ha correlacionado con la emisión de gases de efecto invernadero (IPCC, 2013) y ha tenido como consecuencia el retroceso de los glaciares en los Andes de Perú. Las previsiones sugieren que la tendencia se mantendrá en las próximas décadas e implicará la desaparición de muchos glaciares y una considerable reducción de los recursos hídricos (Vuille et al., 2008).

A pesar del amplio número de publicaciones existentes, todavía existen muchas incertidumbres, porque los trabajos sobre los Andes Centrales occidentales son limitados. Hasta ahora no había registros climáticos de alta montaña (>4500 m), apenas se han deducido reconstrucciones paleoclimáticas de la geomorfología glaciar, ni existen simulaciones climáticas a escala regional (presentes, pasadas o futuras). El proyecto contribuirá a solventar esas carencias, en diferentes áreas de estudio de los Andes Centrales occidentales, según se explica en los siguientes apartados.

Justificación

Como consecuencia de la influencia permanente del anticiclón del Pacífico, reforzado por la corriente marina fría de Humboldt, procedente de la Antártida, la costa de Perú es una de las regiones más áridas de la Tierra, con precipitaciones anuales <10 mm. Las precipitaciones que recibe la Sierra provienen de la Amazonía y están relacionadas con los ciclos estacionales de la ZCIT. La distribución de las precipitaciones está condicionada por la concurrencia de dos factores al sur de la latitud 9°S: la división de los Andes Centrales en dos cordilleras y la aparición del Altiplano, una meseta muy elevada (3700-4900 m) y extensa (hasta 700 km a 20°S), provoca que las masas de aire amazónicas que la cruzan pierdan gran parte de su contenido de humedad. Aunque en el Altiplano ocurren fenómenos convectivos favorecidos por la fuerte radiación solar, la recarga de las masas de aire no es suficientemente efectiva y la aridez se incrementa hacia el oeste y hacia el sur de los Andes Centrales, a medida que se aleja el área fuente de las precipitaciones y aumenta la influencia de la corriente de Humboldt.

A causa del contexto geográfico descrito, el retroceso de los glaciares será uno de los principales riesgos que afectarán a Perú durante las próximas décadas, por la importancia que las masas de hielo tienen como reserva hídrica para la costa del Pacífico, donde se concentra la mayor parte de la población del país. Por esa causa Perú se considera un país vulnerable a los efectos del cambio climático (IPCC, 2013).

La deglaciación de los Andes Centrales está relacionada con el calentamiento del Hemisferio Norte, que debilita el desplazamiento estacional de la ZCIT y reduce las precipitaciones sobre la cordillera. No obstante, la deglaciación no sucede simultáneamente, porque depende de diversos factores. A escala regional, de la altitud de cada montaña y su localización con respecto al área fuente de las precipitaciones, y a escala local, de la diferente insolación e innivación que reciben las masas de hielo en función de su orientación. Hacia el norte la insolación es mayor que hacia el sur y las laderas orientadas hacia la Amazonía reciben más precipitación que la vertiente del Pacífico, aunque el viento puede redistribuir la nieve depositándola a sotavento de los relieves de las montañas.

Desde un punto de vista científico, el proyecto se justifica por el interés que tienen los glaciares tropicales como indicadores del cambio climático, en escalas de décadas a decenas de miles de años. Además se alinea con el Plan Nacional Estratégico de Ciencia, Tecnología e Innovación para la Competitividad y el Desarrollo Humano 2006-2021, porque proporcionará instrumentos de análisis para contribuir al conocimiento de un problema que tiene gran interés para el desarrollo sostenible de Perú: la diferente respuesta de los glaciares al cambio climático, en función de los factores antes señalados, requiere comprender como sucederá la deglaciación durante las próximas décadas.

Problema identificado

La comunidad científica internacional (Vuille et al., 2008; IPCC, 2013), ha señalado que una de las consecuencias que tendrá el cambio climático durante el siglo XXI será la considerable reducción de las reservas de agua almacenadas en los glaciares de los Andes de Perú. Las estrategias de adaptación que las autoridades políticas deberán emprender durante las próximas décadas, implicarán largos periodos de planificación y ejecución, con costes socioeconómicos y medioambientales muy elevados. Por esas razones es necesario generar información, actualmente inexistente, para comprender el ritmo y la distribución territorial del proceso de deglaciación. Dicha información será esencial para priorizar la aplicación de las medidas de adaptación, dependiendo de cuándo sea afectado cada territorio. Este proyecto proporcionará criterios científicos para decidir dónde y cómo intervenir, en función de las tendencias pasadas observadas en los glaciares y su extrapolación a las próximas décadas.

Hipótesis (supuesto)

El parámetro que mejor expresa la relación de los glaciares con el clima es la ELA (m), que varía con el tiempo en función de la temperatura y la precipitación. La ELA es una línea teórica que separa dos partes de un glaciar:

- Zona de acumulación, donde predominan procesos que producen ganancia de masa (innivación, redistribución eólica de la nieve o avalanchas).
- Zona de ablación: donde predominan fenómenos que causan pérdida de masa (fusión y sublimación).

Por definición, la elevación de la ELA encima de un glaciar provocará la desaparición de la zona de acumulación: el resto de la masa de hielo será zona de ablación y desaparecerá en el tiempo que el clima necesite para fundirla. Elaborar pronósticos de la elevación de la ELA equivale a prever el futuro de los glaciares, pero es necesario comprender el pasado y el presente de la relación glaciares-clima.

Úbeda (2011) diferenció dos tipos de ELA:

- ELA geomorfológica (ELAg): deducida de la altitud y forma de los glaciares.
- ELA climática (ELAc): indicada por las variables implicadas en el balance de masa.

En ese marco teórico, la ELAc sería una altitud potencial a la que tiende la ELAg, buscando el equilibrio de los glaciares con el clima. Basándose en la diferenciación $ELAg \neq ELAc$, propuso un modelo de la respuesta de los glaciares a los cambios del clima, en tres escenarios posibles:

a) Clima favorable a la expansión glacial ($ELAg > ELAc$): avances glaciares por enfriamiento y/o mayor humedad.

- La ELAc responde inmediatamente al cambio climático, descendiendo por las vertientes hasta una altitud determinada por la temperatura y la precipitación.

- La respuesta de la ELAg es más lenta, porque requiere suficiente tiempo para que la nieve se transforme en hielo y el glaciar avance y alcance el nivel de la ELAc.

b) Glaciares en equilibrio con el clima ($ELAg = ELAc$): durante la culminación de la expansión, la ELAg y la ELAc se nivelan y el glaciar alcanza un estado de equilibrio con el clima, que se mantendrá mientras perduren las condiciones climáticas que lo propiciaron.

c) Clima favorable a la deglaciación ($ELAg < ELAc$): retroceso de los glaciares por calentamiento y/o incremento de la aridez.

- La ELAc asciende hasta una altitud determinada por la temperatura y la precipitación.
- La ELAg también tiende a elevarse, pero más lentamente, porque el clima necesita tiempo para fundir la masa de hielo.

Asumiendo el modelo descrito, el proyecto ensayará tres hipótesis:

1. El desnivel ELAg-ELAc indica el estado de equilibrio o desequilibrio de los glaciares con el clima actual.
2. El desnivel ELAg-paleoELAg indica el enfriamiento del clima cuando los paleoglaciares avanzaron.
3. El forzamiento del modelo actual de la ELAc permite:
 - Estimar la paleoprecipitación durante la expansión de los paleoglaciares, aplicando el enfriamiento y buscando la precipitación que generó el equilibrio paleoELAg=paleoELAc.
 - Elaborar pronósticos sobre la evolución futura de los glaciares, aplicando las previsiones del calentamiento global.

Objetivo general

Desarrollar modelos que expliquen el presente y el pasado de los glaciares de los Andes Centrales occidentales y como serán afectados por el cambio climático durante las próximas décadas:

- a) Ensayo de la hipótesis 1: calcular el desnivel ELAg-ELAc, para diagnosticar el estado de equilibrio o desequilibrio de los glaciares con el clima actual.
- b) Ensayo de la hipótesis 2: estimar el desnivel ELAg-paleoELAg, para evaluar el enfriamiento del clima cuando los paleoglaciares avanzaron.
- c) Ensayo de la hipótesis 3: elaborar un modelo actual de la ELAc, como medio para realizar dos experimentos:
 - Aplicar el enfriamiento indicado por el ensayo de la hipótesis 2 y buscar la precipitación que en el pasado generó el equilibrio paleoELAg = paleoELAc.
 - Probar las previsiones del calentamiento global para encontrar las que elevarían la ELAc sobre los glaciares y causarían la desaparición de la zona de acumulación, determinando la extinción posterior del resto de la masa de hielo.

Objetivos específicos

1. Caracterizar el clima actual, a escala regional, con datos de observatorios del SENAMHI, y a escala local, con registros de estaciones instaladas por el proyecto.
2. Realizar un diagnóstico de los glaciares actuales: superficies, ELAg y ELAc, y estado de equilibrio o desequilibrio con el clima.
3. Reconstruir los paleoglaciares y su registro paleoclimático: cronologías de fases de expansión y deglaciación, superficies, paleoELAg y paleoELAc, y enfriamiento y humedad del clima durante la culminación de los avances de las masas de hielo. Comparar los resultados con proxies paleoclimáticos, a escala regional y global.
4. Desarrollar modelos de la evolución de los glaciares en las próximas décadas, teniendo en cuenta las previsiones del IPCC sobre el calentamiento global, en los escenarios de emisión de gases de efecto invernadero.
5. Elaborar simulaciones climáticas pasadas, presentes y futuras, para contrastarlas con los resultados obtenidos para alcanzar los objetivos específicos 1-4.

Metodología de investigación / Plan experimental

ÁREAS DE ESTUDIO:

Se han seleccionado las montañas que conservan glaciares actuales en un transecto norte-sur de los Andes Centrales occidentales, para analizar las variaciones de los resultados y su relación con la tendencia de la aridez a incrementarse hacia el sur:

1. Cordillera Blanca (al norte de la división de los Andes Centrales en dos cordilleras y la aparición de altiplano): Hualcán y cuenca glaciar de la laguna Parón.
2. Andes Centrales occidentales: Cordillera Central y Coropuna.

PROCEDIMIENTO EN CADA ÁREA DE ESTUDIO:

1. Caracterización del clima regional

Elaboración de diagramas bioclimáticos con datos del SENAMHI, adaptando la propuesta de Rivas Martínez (1987) para definir, además de las estaciones húmeda y seca, los periodos de acumulación y ablación glaciar.

2. Mapas geomorfológicos

Cartografía de glaciares actuales, morrenas depositadas por su expansión en el pasado y paleoglaciares durante dichos avances (deducidos de las morrenas y otras evidencias geomorfológicas).

3. Dataciones absolutas

Muestreo de superficies de bloques morrénicos y lechos rocosos pulidos, para datar respectivamente las fases de avance y retroceso de los paleoglaciares. El método consistirá en estimar las edades de exposición de las superficies a la radiación cósmica (cosmonucléidos ^{36}Cl y ^{10}Be). Las muestras serán procesadas en laboratorios del INGEMMET (Entidad Solicitante) y el GFAM (Entidad Colaboradora del proyecto). Los resultados serán tratados en una hoja de cálculo (Schimmelpfennig, 2009) para estimar las edades de exposición que datarán las fases de avance o retroceso de los paleoglaciares.

4. Monitoreo del clima local

Instalación de sensores en diferentes altitudes y orientaciones de las montañas, para medir las variables climáticas y glaciológicas que requiere la investigación.

5. Modelos de la ELAg y la paleoELAg

Reconstrucción de la ELAg y la paleoELAg de glaciares y paleoglaciares por el método *Area x Altitude Balance Ratio* o AABR (Osmaston 2005), por ser el que ofrece mejores resultados (Benn et al. (2005):

5.1. Medición de la superficie de los glaciares y sus bandas altitudinales, definidas por las curvas $e=50$ m del mapa topográfico nacional de Perú. En los paleoglaciares se reconstruirá la paleotopografía representando los valles llenos de hielo, como estarían cuando culminaron los avances. El resto del procedimiento es el mismo para la ELAg y la paleoELAg.

5.2. Reconstrucción de la ELAg por el método *Area x Atitude* o AA (Kurowski, 1891) resolviendo la ecuación propuesta por Sissons (1980) para simplificar los cálculos:

$$\text{ELAg} = \Sigma(\mathbf{Z} \cdot \mathbf{S}) / \Sigma \mathbf{S} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Donde:

ELAg-ELA (m). **Z**-altitud media de cada intervalo de altitud (m). **S**-superficie de cada intervalo de altitud del glaciar (m^2).

5.3. Cálculo de la ELAg AABR: ponderando la ELAg *Area x Atitude* con diferentes valores de Balance Ratio (BR), que expresa la relación entre los gradientes de acumulación y ablación a lo largo del perfil longitudinal del glaciar.

5.4. Tabulación de las ELAg AABR en series vinculadas con los valores de BR usados en su estimación.

5.5. Cálculo de promedios y desviaciones típicas de cada serie.

5.6. Selección del promedio vinculado con la desviación típica menor, el valor más probable de la ELA o la paleoELA (Osmaston, 2005).

6. Modelo del enfriamiento del clima durante la expansión glaciár (°C)

Resolviendo la ecuación propuesta por Úbeda (2011):

$$\Delta T = GTVa \cdot \Delta ELAg \quad (\text{Ecuación 2})$$

Donde:

ΔT -enfriamiento del clima en la culminación del avance glaciár (°C). $GTVa$ -gradiente térmico vertical del aire (°C/m). $\Delta ELAg$ -desnivel ELAg-paleoELAg (m).

El valor $GTVa$ se deducirá mediante la ecuación:

$$GTVa = \Delta T / \Delta Z \quad (\text{Ecuación 3})$$

Donde:

$GTVa$ -gradiente térmico vertical del aire (°C/m). ΔT -diferencia entre los promedios de las temperaturas del aire o la superficie del glaciár registradas en las estaciones localizadas a menor y mayor altitud (°C). ΔZ -desnivel entre dichas estaciones (m).

7. Modelo actual de la ELAc

Elaboración de un modelo del perfil vertical del balance de masa de los glaciares actuales (mm) e identificación de la altitud donde se equilibra el balance de masa ($b=0$ mm). Se usará la hoja de cálculo programada por Úbeda (2011) para resolver dos ecuaciones modificadas de Kaser et al. (2002); Klein et al. (1999) y Oerlemans et al., (1989), a lo largo del perfil longitudinal del valle glaciár:

$$b = a - c \quad (\text{Ecuación 4})$$

$$a = [Qr + (\tau m / Lm) \cdot \alpha (Ta - Ts)] \quad (\text{Ecuación 5})$$

Donde:

b -balance de masa (mm). a -ablación (mm). c -acumulación (mm). Qr -energía disponible para la fusión en forma de radiación neta (MJ/m²/día). τm -duración del periodo de ablación (días). Lm -calor latente de fusión (3,34•10⁵J/kg). α -coeficiente de masa transferida por calor sensible (1.5 MJ/m²/día). Ta -temperatura del aire. Ts -temperatura de la superficie del glaciár.

Los parámetros implicados en las ecuaciones 3 y 4 serán estimados del siguiente modo:

7.1. Temperatura del aire y temperatura de la superficie del glaciár (Ta y Ts)

Extrapolando a las demás altitudes los promedios anuales de T_a y T_s en las estaciones instaladas en cada área de estudio. Se emplearán gradientes térmicos verticales (GTVa y GTVs) calculados con la ecuación 3.

7.2. Acumulación (c)

Asumiendo la equivalencia acumulación-precipitación, se emplearán los registros totales anuales de los pluviómetros instalados en cada área de estudio, extrapolando los datos a las demás altitudes con un GPV deducido con la ecuación:

$$\text{GPV}=\Delta\text{P}/\Delta\text{Z} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Donde:

GPV-gradiente de precipitación vertical (mm/m). **ΔP** -diferencia entre la precipitación total anual en las estaciones localizadas a menor y mayor altitud del mismo valle glaciar (mm). **ΔZ** -desnivel entre dichas estaciones (m).

7.3. Energía disponible para la fusión en forma de radiación neta (Q_r) y duración del periodo de ablación (τ_m)

Siguiendo los criterios de Klein et al (1999) se asumirá que en la altitud de la isoterma 0°C de T_a , la energía disponible para la fusión es nula ($Q_r=0 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$) y no existe la ablación ($\tau_m=0$ días). Para estimar su valor en las demás altitudes se aplicará el GTVa (para Q_r) y el gradiente de ablación vertical $GAV=0,4 \text{ días/m}$, en ambos casos con signo positivo por debajo y negativo por encima del nivel de congelación (altitud de la isoterma 0°C de T_a). La utilización del gradiente $GAV=0,4 \text{ días/m}$ en el Coropuna (Úbeda, 2011) indicó $\tau_m=180$ días en la estación localizada a menor altitud (4886 m). Es un resultado coherente con el régimen tropical del balance de masa, en el que la ablación sucede todo el año, pero sólo durante las 12 horas de insolación diurna.

7.4. Calor latente de fusión (L_m) y Coeficiente de masa transferida por calor sensible (α)

Se asumirá que L_m y α no varían y permanecen constantes en todas las altitudes (Klein et al (1999):

- L_m expresa el calor latente liberado durante la fusión del hielo y tiene un valor convencionalmente aceptado: $3,34 \times 10^5 \text{ J/kg}$.
- α representa los efectos de la conducción del calor y el intercambio turbulento en la capa límite de la atmósfera en contacto con la superficie del glaciar (Kaser et al, 2002). El proyecto empleará el valor $\alpha=1,5 \text{ MJ/m}^2/\text{día}$, deducido por Kaser et al. (2002) de

observaciones 1966-1967 en el glaciar Hintereisferner (Alpes). El valor $\alpha=1,5$ MJ/m²/día indicó la mejor correspondencia entre las estimaciones del balance de masa basadas en datos climáticos y las que se dedujeron de mediciones glaciológicas, y se ha considerado válido para glaciares tropicales Kaser et al. (2002).

La resolución de las ecuaciones 4 y 5 proporciona un modelo del perfil vertical del balance de masa de los glaciares actuales. La ELAc se identificará en el modelo buscando la altitud donde $b=0$ mm.

7. Modelo de paleoELAc

El modelo actual de la ELAc servirá para reconstruir la paleoELAc:

7.1. En el nivel (m) de la estación más baja se aplicará el enfriamiento (°C) indicado por la ecuación 2.

7.2. Los valores QR y τ_m se adecuarán al nuevo nivel de congelación.

7.3. Se identificará el valor de acumulación que genere el estado de equilibrio paleoELAg=paleoELAc definido en la hipótesis de la investigación.

8. Modelo del impacto del calentamiento global en ELAc

El modelo actual de ELAc se empleará para analizar la evolución futura de la misma variable.

8.1. En el nivel (m) de la estación más baja se ensayarán los valores del calentamiento global (°C) deducidos por el IPCC para cada escenario de emisión de gases de efecto invernadero.

8.2. Los valores QR y τ_m se adaptarán al nuevo nivel de congelación.

8.3. La ELAc futura se detectará identificando la altitud donde se equilibre el balance de masa ($b=0$ m).

8.4. Los diferentes valores obtenidos para la ELAc futura (uno por escenario) se integrarán en los mapas de los glaciares actuales.

8.5. Se comprobará qué escenarios elevarían la ELAc futura sobre la altitud máxima de cada glaciar, provocando la desaparición de la zona de acumulación y el resto de la masa de hielo. Para estimar cuando podría suceder, se emplearán las proyecciones temporales de los escenarios del IPCC.

9. Comparación de los resultados

9.1. *Presente:*

ELAg y ELAc: con la ELA obtenida mediante monitoreo de glaciares (ELAm) por la ANA, Entidad Colaboradora del proyecto.

9.2. Pasado:

Enfriamiento y humedad del clima en el pasado (deducidos de los paleoglaciares): con observaciones instrumentales (IPCC) y proxies paleoclimáticos. Las dataciones cosmogénicas permitirán realizar las correlaciones cronológicas.

9.3. Futuro:

Previsiones de la evolución futura de la ELAc: con modelos de predicción del calentamiento global, a escala regional y global.

9.4. Simulaciones por computadora:

Los resultados obtenidos en las áreas de estudio también se contrastarán con simulaciones climáticas REMO (Kotlarski et al., 2010), presentes, pasadas y futuras, que el proyecto desarrollará a escala América del Sur.

10. Duración del proyecto:

Obtener resultados durante el periodo de vigencia requiere descargar datos de los instrumentos cada 12 meses. Por ese motivo y para evitar trabajos de campo en la estación de las lluvias, el proyecto se desarrollará en el periodo 04/2016-12/2018 (32 meses).

Resultados esperados

1. RESULTADOS CIENTÍFICOS

1.1. Diagnóstico de los glaciares actuales

Incluyendo para cada fecha, en función de las fotografías aéreas o imágenes de satélite analizadas:

- Superficies (km²).
- ELAs (m) deducidas de la geomorfología (ELAg) o el clima (ELAc).
- Tendencias de superficies (km²/año) y ELAs (m/año) en escalas de décadas.
- Estado de equilibrio o desequilibrio de los glaciares con el clima actual, basado en el desnivel ELAc-ELAg (hipótesis 1).

1.2. Análisis del registro glacial del cambio climático, en escalas desde un siglo hasta decenas de miles de años

Incluyendo para cada fase de avance de los paleoglaciares y el proceso de deglaciación:

- Dataciones cosmogénicas (edades de exposición de cloro-36 o berilio-10).
- Superficies (km²).
- PaleoELAs (m) deducidas de datos geomorfológicos (paleoELAg) o climáticos (paleoELAc).
- Tendencias de superficies (km²/ka) y paleoELAs (m/ka) en escalas de siglos a decenas de miles de años (1 ka=1000 años).
- Evaluación del enfriamiento (hipótesis 2) y humedad (hipótesis 3a) del paleoclima, durante el estado de equilibrio paleoELAg=paleoELAc (escenario b definido en el marco teórico).
- Modelos integrando los resultados obtenidos por el proyecto con datos instrumentales (IPCC) y proxies paleoclimáticos a escala regional y global. Se incluirán las fases de enfriamiento o calentamiento de ambos hemisferios terrestres, y sus efectos en el mayor o menor desplazamiento hacia el sur de la ZCIT y la humedad del clima en los Andes de Perú.

1.3. Pronósticos sobre la evolución de los glaciares durante las próximas décadas

Basados en las tendencias observadas en superficies y ELAg y en el forzamiento del modelo actual de la ELAc con las previsiones del calentamiento global del IPCC, para cada escenario de emisión de gases de efecto invernadero (hipótesis 3b).

1.4. Simulaciones por súper-computación del clima y los glaciares a escala nacional, para el presente, el pasado y el futuro

- Simulación para el presente, con un forzamiento por re-análisis y otro por el modelo global ECHAM6-MPIOM.
- Simulaciones para el futuro (en tres escenarios).
- Simulación para el pasado (desde 1850).

2. INDICADORES DE RESULTADOS (apartado 1.4. de las bases del concurso)

- Se ha previsto publicar al menos 14 artículos en revistas científicas indexadas, 12 sobre las áreas de estudio, 1 de síntesis y 1 de las simulaciones.
- Se presentarán, como mínimo, 12 ponencias en congresos nacionales e internacionales, 6 en el Congreso Peruano de Geología y 6 en la European Geosciences Union General Assembly (ambos en 2018).
- Se espera que se realicen 14 tesis, 5 de pregrado y 9 de postgrado.

- Participan 13 tesistas y una gestora de CTI menores de 35 años. Recibirán capacitación internacional, aplicarán técnicas novedosas y participarán en la publicación final de los resultados.

3. SOSTENIBILIDAD DEL PROYECTO

Finalizada la vigencia del proyecto (2018) se mantendrá la red de estaciones, cuyo interés aumentará en la misma medida que la representatividad temporal de los registros.

Impacto de los resultados

1. IMPACTO CIENTÍFICO

La evaluación del estado actual de equilibrio o desequilibrio de los glaciares con el clima, y el análisis de dicha relación en el pasado, servirán para comprender la evolución de los glaciares durante las próximas décadas. Los tres aspectos (presente, pasado y futuro) tienen gran interés científico para entender el cambio climático a escala regional y global. La hipótesis de la investigación, y la metodología para ensayarla, son uno de los resultados de proyectos internacionales que se han desarrollado en los Andes de Perú desde 2004. Las simulaciones climáticas REMO (pasadas, presentes y futuras), constituirán la primera contribución de América del Sur al proyecto CORDEX (COordinated Regional climate Downscaling Experiment), una iniciativa internacional para reducir la escala de modelos climáticos globales. Para hacer posible dicha contribución, las simulaciones se realizarán en el dominio definido por CORDEX para la región de América del Sur, con la frontera oeste desplazada hasta 120°W, de manera que la región Niño1+2 quede en el interior del dominio. Con esta extensión las simulaciones tendrán 25 km de resolución.

2. COOPERACIÓN CIENTÍFICA Y TRANSFERENCIA DE CONOCIMIENTO

En el proyecto participan 7 instituciones peruanas y 3 entidades españolas, además de la oficina de la UNESCO en Lima. La alianza podría consolidarse mediante su transformación en círculos de investigación, o formar un centro de excelencia dedicado a la investigación de los glaciares y el cambio climático. El proyecto es una oportunidad para la transferencia de conocimiento y fortalecimiento de capacidades que permitan a investigadores peruanos liderar las investigaciones y ampliar las áreas de estudio al resto del territorio nacional.

3. IMPACTO SOCIOECONÓMICO

Los resultados del proyecto contribuirán a priorizar la planificación y ejecución de las estrategias de adaptación al cambio climático, que Perú deberá emprender durante el siglo XXI (ver apartado Justificación).

Referencias

Bard, E., 2003. North-Atlantic Sea Surface Temperature Reconstruction. Data Contribution Series #2003-026. NOAA Paleoclimatology Program, EEUU.

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

Blard, P.-H., Sylvestre, F., Tripathi, A.K., Claude, C., Causse, C., Coudraing, A., Condom, T., Seidel, J.-L., Vimeux, F., Moreau, C., Dumoulin, J.-P., 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.

Clark, P.U., Dyke, A.S., Shakun, J.D., Carlson, A.E., Clark, J.F., Wohlfarth, B., Mitrovica, J.X., Hostetler, S.W., McCabe, A.M., 2009. The Last Glacial Maximum. *Science* 325, 710-714.

Fritz, S.C., Baker, P.A., Seltzer, G.O., Ballantyne, A., Tapia, P., Cheng, H., Edwards, R.L., 2007. Lake Titicaca 370 KYr LT01-2B Sediment Database. Data Contribution Series #92-008. NOAA Paleoclimatology Program, EEUU.

Hastenrath, S.L., 1985. *Climate and Circulation of the Tropics*. D. Reidel Publishing Co., Dordrecht, Holland.

Hastenrath, S., Ames, A., 1995. Recession of Yanamaery glacier in Cordillera Blanca, Perú during the 20th century. *Journal of Glaciology* 41 (137), 191-196.

IPCC, 2013. *Climate Change 2013. The Physical Science Basis*. Working Group I Contribution to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change.

Kaiser, J., Lamy, F., Ninnemann, U., Hebbeln, D., Arz, H.W., Stoner, J., 2005. Southeast Pacific High Resolution Alkenone SST Reconstruction. Data Contribution Series #2005-073. NOAA Paleoclimatology Program, EEUU.

- Kaser, G., Osmaston, H., 2002. *Tropical Glaciers*. Cambridge University Press, Cambridge (Reino Unido.).
- Kelly, M.A., Lowell, T.V., Applegate, P.J., Smith, C.A., Phillips, F.M., Hudson, M.A., 2012. Late glacial fluctuations of Quelccaya Ice Cap, southeastern Peru. *Geology* 40 (11), 991-994.
- Klein, A.G., Seltzer, G.O., Isacks, B.L., 1999. Modern and Last Local Glacial Maximum snowlines in the Central Andes of Peru, Bolivia, and Northern Chile. *Quaternary Research Reviews* 18, 3-84.
- Kotlarski, S., Jacob, D., Podzun, R., Paul, F., 2010. Representing glaciers in a regional climate model. *Climate Dynamics* 34, 27–46.
- Kurowski, L., 1891. Die Höhe der Schneegrenze. *Geogr. Abh.* 5 I (124), 119-160.
- Oerlemans, J., Hoogendoorn, N.C., 1989. Mass-balance gradients and climatic change. *Journal of Glaciology* 35, 399-404.
- Osmaston, H., 2005. Estimates of glacier equilibrium line altitudes by the Area x Altitude, the Area x Altitude Balance Ratio and the Area x Altitude Balance Index methods and their validation. *Quaternary International* 22–31, 138–139.
- Rivas Martínez, S., 1987. *Bioclimatología, Memoria del Mapa de series de vegetación de España*. Instituto Nacional para la Conservación de la Naturaleza, p. 268.
- Sachs, J.P., Sachse, D., Smittenberg, R.H., Zhang, Z., Battisti, D.S., Golubic, S., 2009. Southward movement of the Pacific intertropical convergence zone AD 1400–1850. *Nature Geoscience* 554, 1-7.
- Schimmelpfennig, I., 2009. *Cosmogenic ³⁶Cl in Ca and K rich minerals: analytical developments, production rate calibrations and cross calibration with ³He and ²¹Ne*. Tesis Doctoral. Universite Paul Cezanne Aix-Marseille III - CEREGE, p. 342.
- Sissons, J.B., 1980. The Loch Lomond advance in the Lake District, northern England. *Transactions Royal Society Edinburgh. Earth Sciences.* 71, 13-27.
- Thompson, L., 1992. *Quelccaya Ice Core Database*. Data Contribution Series #92-008. NOAA Paleoclimatology Program, EEUU.
- Thompson, L.G., Mosley-Thompson, E.E., Dansgaard, W., Grootes, P.M., 1986. The Little Ice Age as recorded in the stratigraphy of the tropical Quelccaya ice cap. *Science* 234, 361-364.

Úbeda, J., 2011. El impacto del cambio climático en los glaciares del complejo volcánico Nevado Coropuna (cordillera occidental de los Andes, Sur del Perú). Tesis Doctoral. Universidad Complutense de Madrid, p. 558.

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

Zech, R., Smith, J., Kaplan, M.R., 2009. Chronologies of the Last Glacial Maximum and its Termination in the Andes (~10-55°S) based on Surface Exposure Dating, en: Vimeux, F., Sylvestre, F., Khodri, M. (Eds.), *Past Climate Variability in South America and Surrounding Regions, Developments in Paleoenvironmental Research*. Springer, pp. 61-87.

ANEXO

Simulaciones climáticas con el modelo regional REMO

El modelo regional REMO ha sido utilizado para simular los glaciares de las montañas de los Alpes (1) y de la región del Caracorum and Himalaya (2) y se ha demostrado su habilidad.

Para hacer posible la contribución de nuestras simulaciones al proyecto CORDEX, se realizarán simulaciones en el dominio definido en este proyecto para la región de América del Sur con la frontera oeste desplazada hasta 120W, de manera que la región Niño1+2 quede en el interior del dominio. Con esta extensión del dominio podemos realizar las simulaciones con una resolución de REMO de 25 km.

La elección de los experimentos está orientada a la obtención, en primer lugar, de un diagnóstico de la influencia de los distintos forzamientos climáticos en el territorio peruano y en particular en la región andina del Perú para el tiempo presente. Para ello se simulará el período 1980-2010 usando como condiciones de contorno los datos del reanálisis ERA-INTERIM. Los resultados de de esta simulación histórica se validarán los datos atmosféricos con distintos conjuntos de datos procedentes de observaciones y simulaciones de reanálisis. ***Para esta fase de validación, los datos proporcionados por el SENHAMI serán de gran importancia ya que permitirán calibrar el modelo para una simulación óptima del clima de tiempo presente en la región.***

Los resultados del módulo de simulación de glaciares se validarán con los datos recopilados por el proyecto “Análisis de las altitudes de la línea de equilibrio glaciar

presentes y pasadas para evaluar el impacto del cambio climático y la evolución durante las próximas décadas de las reservas de agua congelada de los Andes de Perú” (CRYOPERU 2.0).

Tras la validación y diagnóstico, se simulará el clima de tiempo presente con el modelo regional forzado por el modelo climático global ECHAM6-MPIOM. Estas simulaciones también serán validadas y comparadas con la simulación forzada con ERA-Interim. Finalmente, se procederá a la preparación de simulaciones que permitirán estudiar la evolución de los glaciares andinos peruanos según los distintos escenarios contemplados en los itinerarios de concentraciones RCP4.5, RCP8.5 y RCP2.6. El ensamblaje de las distintas simulaciones permitirá evaluar la incertidumbre en las proyecciones asociadas a la variabilidad natural.

Nikolai Koldunov trabaja en el Climate Service Centre, institución con la que colaboran estrechamente Dmitry Sein y William Cabos. Esta colaboración facilita, entre otras cosas, el acceso a la totalidad de los datos de las simulaciones llevadas a cabo para el Cuarto Informe del IPCC, lo que nos permitirá generar un ensemble de simulaciones regionalizadas que nos permitirá estudiar las proyecciones de cambio climático según los escenarios elegidos y la variabilidad natural asociada.

Además, gracias a la colaboración con el Climate Service Center, tenemos la posibilidad de acceder a simulaciones de cambio climático llevadas a cabo con REMO sin la componente de simulación de la evolución de los Glaciares. Estas simulaciones se han llevado a cabo con condiciones de contorno tomadas de ECHAM6-MPIOM para los escenarios RCP4.5 y RCP8.5 y servirán para contrastar nuestras simulaciones de clima futuro.

Referencias

Kotlarski, S., D. Jacob, R. Podzun, and F. Paul (2010), Representing glaciers in a regional climate model, *Clim. Dyn.*, **34**, 27–46, doi:[10.1007/s00382-009-0685-6](https://doi.org/10.1007/s00382-009-0685-6).

Kumar, P., S. Kotlarski, C. Moseley, K. Sieck, H. Frey, M. Stoffel, and D. Jacob (2015), Response of Karakoram-Himalayan glaciers to climate variability and climatic change: A regional climate model assessment. *Geophys. Res. Lett.*, **42**, 1818–1825. doi:[10.1002/2015GL063392](https://doi.org/10.1002/2015GL063392).

FICHAS DE LAS INSTITUCIONES COLABORADORAS

Tipo de Entidad	Instituciones que participan en el proyecto	
Solicitante	INGEMMET	Instituto Geológico Minero y Metalúrgico
Asociada 1	SENAMHI	Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología
Asociada 2	GFAM-UCM	Grupo de Investigación en Geografía Física de Alta Montaña Universidad Complutense de Madrid
Colaboradora 1	UNESCO	Organización de las Naciones Unidas para la Educación la Ciencia y la Cultura
Colaboradora 2	SERNANP	Servicio Nacional de Áreas Naturales Protegidas por el Estado
Colaboradora 3	ANA	Autoridad Nacional del Agua
Colaboradora 4	DFM-UAH	Departamento de Física y Matemáticas Universidad de Alcalá de Henares
Colaboradora 5	UNSAAC	Universidad Nacional San Antonio Abad del Cuzco
Colaboradora 6	GEM	Guías de Espeleología y Montaña