

Iniciación de un monitoreo del balance de masa en el glaciar Suyuparina, Cordillera Vilcanota, Perú

M. Edwin¹, S. Simone^{3,6}, H. Christian³, H. Wilfried³, C. Alejo², C. Thomas⁷, D. Fabian³⁾⁴⁾, G. Claudia³, S. Nadine³⁾⁵⁾, J. Luis¹, M. Nilton¹, R. Maxwell¹, CH. Nicacio¹, S. Jaime Samata¹, S. Wilson⁸, A. Sandro⁸, S. Felipe¹

¹ *Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, Vicerectorado de Investigación, Facultad de Ingeniería Geológica y Geografía, Departamento Académico de Geografía*

² *Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos, Autoridad Nacional del Agua, Huaraz, Perú*

³ *Geography Department, University of Zurich, Zurich, Switzerland*

⁴ *Pontificia Universidad Católica del Perú, Lima*

⁵ *Department of Geosciences, Unit of Geography, University of Fribourg, Fribourg, Switzerland*

⁶ *Meteodat GmbH, Zürich, Switzerland*

⁷ *University of Grenoble Alpes, Grenoble, Francia*

⁸ *Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú, SENAMHI, Perú*

Received 15 September 2015; Accepted 06 October 2015; Published online 29 December 2015

Copyright statement

Abstract The Cordillera Vilcanota is the second largest glacierized mountain range in Peru. The role of glaciers as temporal water storages is particularly relevant for tropical glaciers, due to the existence of two distinct seasons, one wet and one dry season. Despite of this fundamental importance, few studies exist on mass balance for glaciers of the Cordillera Vilcanota. In 2010/11, first point net mass balance measurements were realized on Suyuparina glacier and the adjacent Quisoquipina glacier. In 2013, field work was reinitiated in the frame of a monitoring campaign, and now shows first results. Measurements show that ablation is highly influenced by the microtopography of the glacier, causing a spatially heterogeneous ablation pattern. There is a large scatter in point mass balance in function of elevation, which makes it difficult to estimate accurately the equilibrium line altitude (ELA) and the annual total glacier mass balance. For the hydrological year 2013/14, stake measurements for sites on the lower part of the glacier varied between +0.2 y -4 m w.e., while accumulation in the uppermost part of the glacier showed values between +1.2 and +1.4 m w.e.. A seasonal pattern in ablation could be identified, with less loss in the wet season between December 2013 and May 2014. For future studies, it is important to understand the role of the irregular surface, especially the icecliffs, in the total annual mass balance of Suyuparina glacier and of similar glaciers in the Cordillera Vilcanota.

Resumen La Cordillera Vilcanota es la segunda cordillera nevada más grande del Perú. El papel de los glaciares como almacén temporal de agua es particularmente relevante en los trópicos debido a la existencia de dos estaciones marcadas, una lluviosa y una seca. A pesar de su importancia fundamental, existen pocos estudios sobre balance de masa en los glaciares de la Cordillera Vilcanota. En 2010/11 se realizaron las primeras mediciones puntuales de balance de masa en el glaciar Suyuparina y el adyacente glaciar Quisoquipina. En 2013 se retomaron las mediciones dentro de una campaña de monitoreo que ahora muestra los primeros resultados. Las mediciones muestran que la ablación está altamente influenciada por la microtopografía del glaciar, causando un patrón de ablación heterogéneo. Esto se refleja en una gran dispersión en el balance de masa puntual en función de la elevación y hace difícil estimar el balance de masa total del glaciar y la altura de la línea de equilibrio (ELA). Para el año hidrológico 2013/14, las mediciones en las balizas instaladas en la parte baja del glaciar varían entre +0.2 y -4 m equivalente de agua (water equivalent, w.e.), mientras que la acumulación en la zona alta del glaciar varía entre 1.2 a 1.4 m w.e.. Se han identificado patrones estacionales, con menor pérdida en la estación húmeda entre diciembre 2013 y mayo 2014. Para futuros estudios es importante entender el papel de la superficie irregular, sobre todo de los *icecliffs*, en el balance de masa total del glaciar Suyuparina y en similares glaciares en la Cordillera Vilcanota.

1. Introducción

La Cordillera Vilcanota concentra aproximadamente el 20% de los glaciares de todo el territorio peruano (UGRH, 2014). El río Vilcanota-Urubamba tiene su origen en la Cordillera Vilcanota y contribuye de forma importante a los recursos hídricos regionales. Entre 1988 y 2010, el área glaciar se redujo alrededor de 4 km² por año, de aproximadamente 360 km² a 270 km² (-25%, Hanshaw & Bookhagen, 2014). Se ha estimado una pérdida de volumen total de 40 a 45% (de 17-20 km³ a 9.2-12.4 km³) entre 1962 y 2006 (Salzmann et al., 2013). La mayor parte de esta pérdida de volumen ocurrió desde la década de 1980, a pesar de que el aumento de temperatura probablemente se ralentizó desde el cambio del siglo, como observado por ejemplo para la Cordillera Blanca (Schauwecker et al., 2014).

El recurso hídrico que nace en la Cordillera de Vilcanota provee de agua al gran valle del río Vilcanota, este valle es importante puesto que concentra el 75% de la población del Departamento del Cusco, es decir, 900 000 habitantes (INEI 2007) y el 82% de terrenos de cultivo, desarrollándose una agricultura intensiva, principalmente de maíz blanco, fresa, legumbres y frutas, en la parte intermedia del valle. En la parte baja se desarrolla cultivos tropicales como café, cacao, te, coca, frutas, etc., los cuales constituyen base de la economía de los pobladores. En valle se encuentran ciudades como Sicuani, Tinta, Combapata, Urcos, Písaq, Calca Urubamba, Ollantaytambo, Machupicchu, Quillabamba, etc. La Central Hidroeléctrica de Machupicchu, fuente de energía que abastece a todo el departamento está ubicado en el curso medio del río Vilcanota, el río proporciona 131 m³/s de gua promedio anual (2006 EGEMSA) para la Central Hidroeléctrica.

Por lo visto, la relación balance de masa glaciar, recurso hídrico y usuarios en la cuenca del río Vilcanota están muy articulados, puesto que, finalmente los afectados son los habitantes del valle y en el futuro sufrirán las consecuencias, de ahí la importancia del balance de masa en el glaciar Suyuparina. En la región del Cusco, hay una estación seca marcada con poca precipitación (abril, mayo, junio, julio, agosto, setiembre, octubre y noviembre). En esos meses, gran parte del caudal viene del derretimiento de los glaciares. Si los glaciares desaparecen, ya no existiría ese almacenamiento y - probablemente - el agua del río Vilcanota y sus afluentes sería muy escaso durante la estación seca.

Estudiar el balance de masa glaciar ayuda a entender cómo cambian los glaciares, es decir, cuantificar la pérdida de volumen anual (que ahora contribuyen al caudal aumentando el volumen anual) y también en qué momento desaparecen. Conociendo el comportamiento de

los glaciares, se puede manejar mejor el agua disponible en la temporada seca a largo plazo.

Para entender el reciente retroceso glaciar en la Cordillera Vilcanota, es fundamental establecer un programa de monitoreo. En 2010, se iniciaron las primeras mediciones de ablación y acumulación en los glaciares Suyuparina y Quisoquipina, en el marco de una expedición científica organizada por el Programa de Adaptación al Cambio Climático (proyecto PACC) con investigadores de varias instituciones de Perú y Europa. También se inició un monitoreo de la lengua glaciar por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos (UGRH), Huaraz. En 2011, se instaló una estación meteorológica en el glaciar Quisoquipina (5180 m snm, Figura 1) para medir temperatura del aire, velocidad y dirección de viento, flujos radiativos, humedad relativa, presión atmosférica y nivel de nieve (Suarez et al., 2014). La estación comenzó a operar desde el 27 de septiembre del 2011. El monitoreo de balance de masa del glaciar Suyuparina se reinició en 2013 en el marco de un proyecto de investigación de tres años liderado por científicos de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) con el apoyo del Proyecto Glaciares - financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación (COSUDE) - y la Universidad de Zurich. El objetivo principal de este estudio es estimar el balance de masa total del glaciar Suyuparina durante el periodo 2013-2015. Como objetivos específicos se pueden mencionar el monitoreo e investigación de la variación anual y estacional del balance de masa; la difusión de los resultados; y la sensibilización de la comunidad universitaria y la población en general sobre la importancia del desarrollo de semejantes estudios. El proyecto forma parte de una iniciativa conjunta, en la que intervienen otros proyectos (por ejemplo el proyecto "Recursos hídricos, glaciares e indicadores climáticos en la naciente del Río Vilcanota: Laguna de Sibinacocha y Nevado de Quisoquipina"), para desarrollar modelos hidrológicos de la Cordillera Vilcanota, en vistas a políticas de asesoramiento y gestión del impacto del cambio climático a escala local y regional.

A largo plazo, el objetivo es incluir las observaciones en la red internacional de monitoreo de glaciares (WGMS, 2013). El Servicio Mundial de Monitoreo de Glaciares (World Glacier Monitoring Service, WGMS) recoge observaciones de forma estandarizada sobre los cambios que se producen en la masa, volumen, superficie y longitud de los glaciares a lo largo del tiempo (fluctuaciones de glaciares), así como información estadística sobre la distribución espacial de la superficie de hielo perenne. La información se publica regularmente en un inventario de glaciares, boletines e informes (WGMS, 2008).

Los objetivos de la presente publicación son i) describir el glaciar Suyuparina y la geomorfología del ambiente proglacial; ii) analizar las mediciones puntuales de balance de masa con respecto a la variación estacional

y el patrón espacial; iii) estimar la velocidad del flujo glaciar y el retroceso de la lengua; iv) considerar necesidades importantes para futuros monitoreos en glaciares parecidos al Suyuparina.

2. Área de estudio

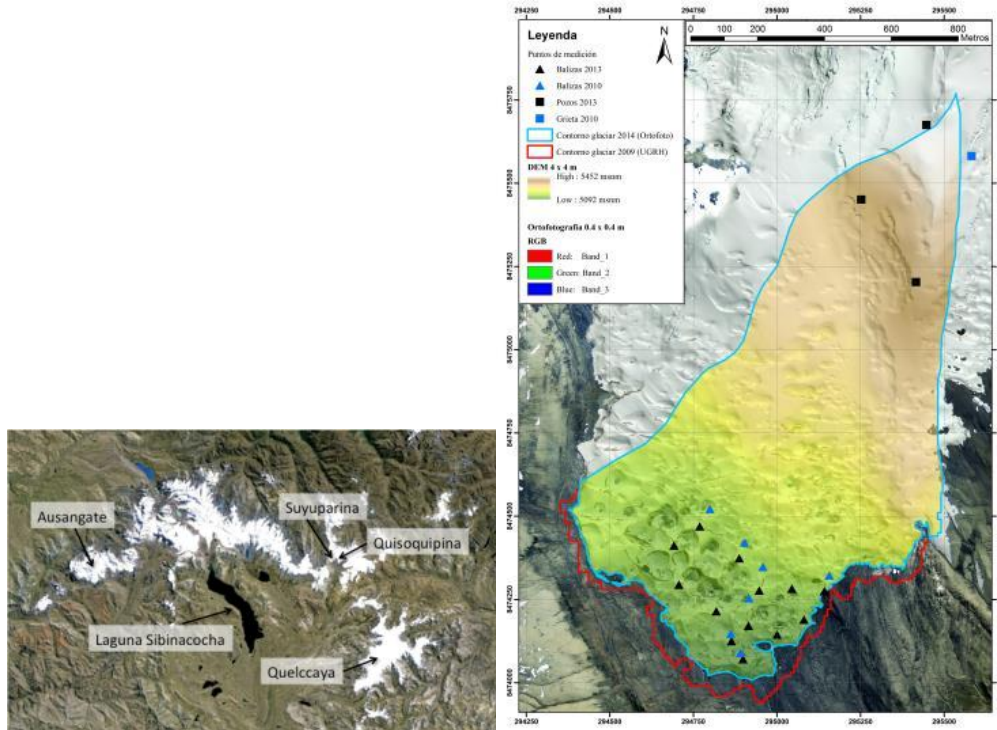


Figura 1: A la izquierda se ve una imagen de la Cordillera Vilcanota (GoogleEarth). Se han señalado, de Este a Oeste, la montaña más alta de la región, i.e Ausangate (6.384 m snm), la laguna Sibinacocha (aprox. 4873 m snm), el glaciar Suyuparina (5083 a 5452 m snm, objeto del presente estudio), el glaciar Quisoquipina y el casquete de hielo Quelccaya (4950 a 5645 m snm, Mark et al., 2002). En el mapa de la derecha se puede observar el glaciar de estudio, i.e. glaciar Suyuparina, con los puntos de mediciones y la estación meteorológica en Quisoquipina.

El presente estudio se está realizando en el glaciar Suyuparina, ubicado en la Cordillera de Vilcanota (Figura 1), en los Andes Peruanos. El glaciar Suyuparina (13.790S, 70.896W) es un glaciar tropical por encontrarse a baja latitud, entre el Ecuador y el Trópico de Capricornio. Políticamente, el glaciar se encuentra entre los Distritos de Pitumarca y Marcapata, Provincia de Canchis y Quispicanchi, Departamento del Cusco. El glaciar Suyuparina está situado unos 15 km al norte del casquete de hielo Quelccaya y unos 15 km al noroeste del gran embalse de la Laguna Sibinacocha (Figura1). Este glaciar ha sido elegido como sitio de estudio por su fácil acceso tanto a la zona de ablación, se puede llegar en vehículo a unos 100 m de la lengua glaciar, como a la zona de acumulación, cuyo acceso es generalmente difícil en los glaciares tropicales.

Climatología

La Cordillera Vilcanota está situada en un área climática compleja, en el límite sur de la Zona de Convergencia InterTropical (ZCIT) y por lo tanto entre patrones climáticos tropicales y subtropicales (Salzmann et al., 2013). La región se caracteriza por una estación húmeda en el verano austral (de diciembre a marzo) y una estación seca durante el resto del año. La precipitación media anual de la región altiplánica es aproximadamente de 700 mm (promedio de 7 estaciones meteorológicas en la región entre 2005-2010, Perry et al., 2013), que también se confirma por la estación meteorológica en Lampa. Perry et al., 2013 encontraron que la humedad para la precipitación viene mayormente de la cuenca Amazónica. Como la Cordillera Vilcanota está ubicada en una zona con grandes gradientes de precipitación de este a oeste, la precipitación medida en estaciones ubicadas en el altiplano probablemente subestima la precipitación en el glaciar Suyuparina. Los datos TRMM por ejemplo revelan montos grandes de precipitación de 2600 mm en

el periodo 1998-2013 para la célula de Suyuparina (13.875°S, 70.875°W).

Las tendencias en la temperatura varían estacionalmente y son diferentes entre temperatura máxima y mínima. Se ha reportado por ejemplo que la temperatura mínima diaria aumenta más fuerte que la temperatura máxima diaria (Salzmann *et al.*, 2013). La estación meteorológica de Lampa (15.4°S, 70.4°W, 3900 m snm, 180 km al sur-sureste de la Cordillera Vilcanota) muestra un aumento de 0.16°C por década entre 1966 y 2009.

Todavía no se entienden completamente los posibles impactos y teleconexiones de El Niño Oscilación del Sur (ENSO) al clima regional. Estudios previos no encontraron una relación clara entre cambios de temperatura o precipitación y eventos ENSO (Salzmann *et al.*, 2013; SENAMHI, 2009).

Parametrización del Glaciar Suyuparina

Para este estudio se ha adquirido un Modelo Digital de Elevación (DEM) mediante tecnología LIDAR aéreo (zona 19 UTM, sistema: WGS84/Modelo Geoidal Local 2008, control: AIRBORNE GPS – IMU.) de abril del 2013 que fue procesado a 4 m de resolución espacial mediante la interpolación Inverse Distance Weighting (IDW). La Figura 2 da una impresión visual del producto combinado con una ortofotografía de 0.4 m de resolución espacial. Según la delimitación en el Inventario Nacional de Glaciares (UGRH, 2014) el glaciar Suyuparina abarcó en el año 2009 un área de superficie (S) ~1.21 km² la cual ha disminuido a ~1.13 km² en 2013 (-7%). Abarca desde una altitud máxima (A_{max}) de 5452 m snm a un mínimo (A_{min}) de 5083 m snm con una longitud a lo largo de la línea central de flujo (L) de unos 1.90 km. Para determinar algunas características adicionales del glaciar se ha utilizado un esquema de parametrización glaciológica basado en datos cuantitativos de inventario (Haerberli & Hoelzle, 1995). Según estos parámetros – considerando la relación entre el área de acumulación y área total del glaciar (AAR, por sus siglas en inglés) de 0.8 para glaciares tropicales (Kaser & Osmaston, 2002) –

la Línea de Equilibrio Glaciar (ELA, por sus siglas en inglés) se ubica a ~5170 m snm (Figura 3). En promedio se puede determinar una tasa de flujo de hielo en la ELA de unos 10 m al año.

Adicionalmente, se estima que el glaciar Suyuparina presenta una pendiente media (α) de 11°, un espesor promedio de hielo (z_{med}) alrededor de 35 m, un espesor máximo (z_{max}) de hielo de unos 100 m y un volumen total (V) de unos 45×10^6 m³. Si se aplica un gradiente de balance de masa en la zona de ablación (db/dH) de unos 1.8 m w.e. por 100 m de elevación y año (Kaser & Osmaston, 2002), y se considera la ubicación de la ELA a ~5170 m snm, se puede inferir que el balance de masa en el término del glaciar (b_t) está alrededor de 3.2 m w.e. por año y el tiempo de respuesta dinámica del glaciar a las condiciones climáticas actuales (t_r) corresponde a unas pocas décadas (aproximadamente 30-40 años). Este último resultado significa que la tasa de retroceso glaciar todavía corresponde a condiciones climáticas alrededor de finales del siglo XX. En este periodo prevaleció un aumento significativo de la temperatura superficial terrestre, no dado en la última década, la cual indica una disminución en la tasa de este aumento en los Andes Tropicales (Schauwecker *et al.*, 2014). La Tabla 1 resume los cálculos indicados.

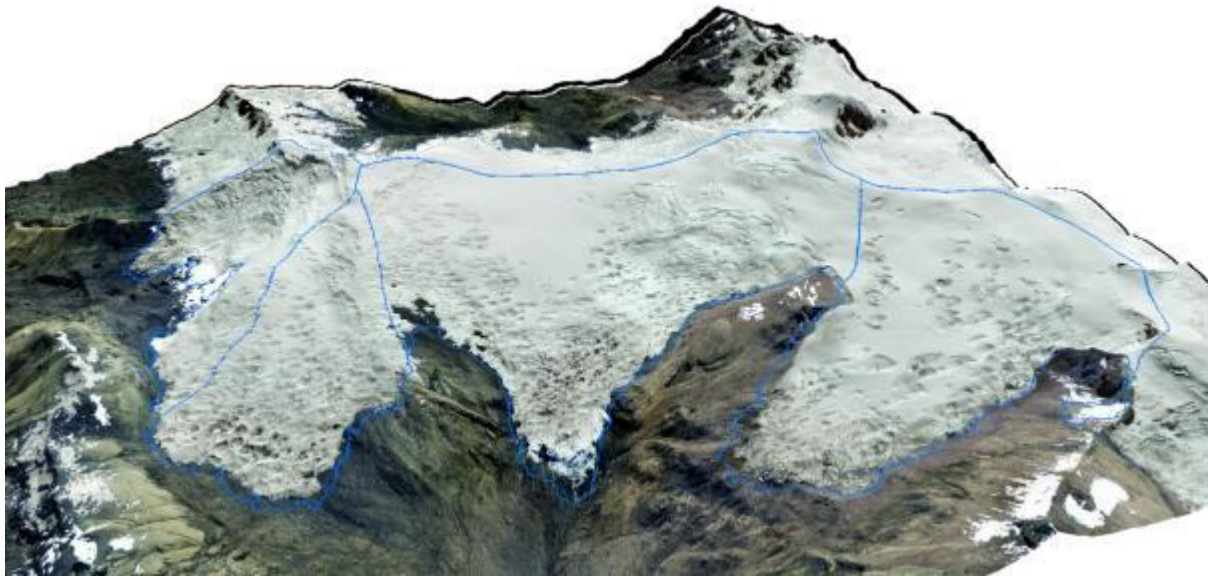


Figura 2: Visión general del área de interés. El contorno azul indica los principales glaciares adyacentes del Inventario Nacional de Glaciares (UGRH, 2014): Istalla, Suyuparina, Quisoquipina y Jurcay (de izquierda a derecha). La superficie irregular en las lenguas glaciares se observa en los tres glaciares Suyuparina, Quisoquipina y Jurcay.

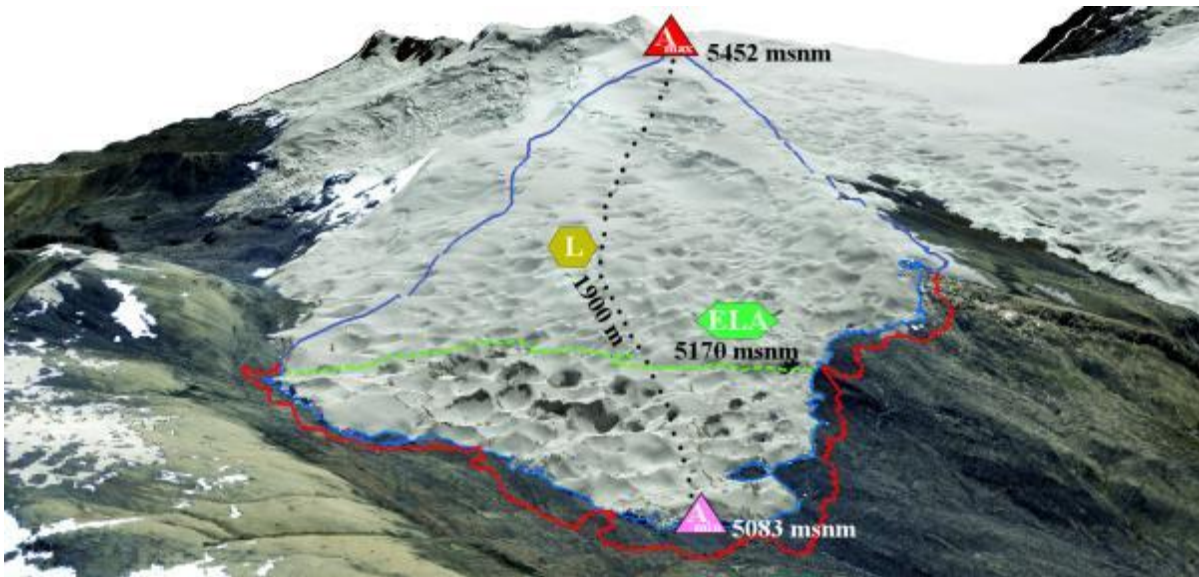


Figura 3: Glaciar Suyuparina con los principales parámetros determinados: A_{max} , A_{min} , ELA y L, véase también Tabla 1. El contorno rojo indica la extensión del glaciar en el año 2009 (UGRH, 2014) y el contorno azul la extensión actual (2013).

Tabla 1: Parámetros y resultados para el glaciar Suyuparina según el esquema de parametrización glaciológica (Haeberli & Hoelzle, 1995).

Parámetro		Método, fórmula	Resultado Suyuparina
A_{max}	Altitud máxima	Mediante DEM	5452 m snm
A_{min}	Altitud mínima	Mediante DEM	5083 m snm
ELA	Línea de Equilibrio Glaciar	AAR = 0.8 (según Kaser & Osmaston, 2002)	5170 m snm

ΔA	Rango de altura entre el punto más alto y más bajo del glaciar	$A_{\max} - A_{\min}$	369 m
L	Longitud (a lo largo de línea central de flujo)	Manualmente	1.90 km
S	Superficie	Mediante DEM	1.13 km²
α	Pendiente promedio de la superficie glaciar	$\tan^{-1} (\Delta A / L)$	11°
z_c	Espesor promedio en la línea central de flujo de la superficie glaciar	Basado en la pendiente y el esfuerzo de cizalla basal promedio (100 kPa)	60±20 m
z_{med}	Espesor promedio de la superficie glaciar	$z_c \times (2/3)$	40±13 m
z_{max}	Espesor máximo en la línea central de flujo	$z_c \times 2.25 \pm 0.25 \text{ m}$	140±60 m
V	Volumen	$z_{\text{med}} \times S$	45±15 x 10⁶ m³
db/dH	Gradiente promedio del balance de masa	1.75±0.25 ma⁻¹ 100 m⁻¹ (valor empírico)	
b_t	Balance de masa anual (del término del glaciar)	$db/dH \times (ELA - A_{\min})$	3.24±0.46 m a⁻¹
t_r	Tiempo de respuesta dinámica del glaciar a condiciones climáticas actuales	z_{max} / b_t	47±25 a

Evolución del frente glaciar

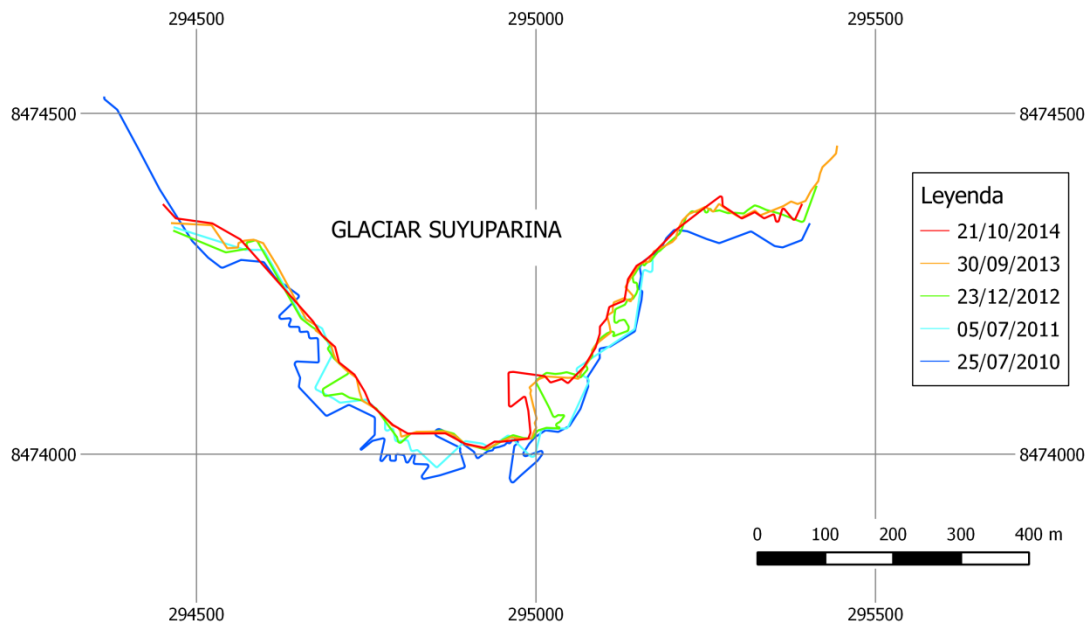


Figura 4: Frente glaciar entre 2010 y 2014

Evaluaciones anuales de la evolución del frente glaciar se han realizado utilizando equipos como la estación total para el levantamiento topográfico en campo. Los resultados muestran un retroceso promedio de 37.36 m para los años 2010-2011-2012 (Figura 8). La altitud mínima del glaciar en el 2010 era de 5095.71 m snm, en 2012 se elevó a 5107.15 m snm, es decir una diferencia de altura de 11.44 m. A partir del 2012 el proceso se desacelera. Para el periodo 2013-2014 se ha calculado 2.84 m de retroceso, la altitud mínima del último año es 5107.53 m snm. El frente glaciar ha retrocedido 48.49 m en cuatro años, de 2010 a 2014, con un promedio de 12.12 m/año.

Geomorfología



Figura 5: Glaciar Suyuparina, Cordillera Vilcanota, en Julio 2010 y 2014 con una marcada microtopografía (Fotografía: N. Salzmann, W. Haeberli)



Figura 6: Patrón topográfico en la superficie del glaciar Suyuparina. Para la escala, véa los glaciólogos tomando mediciones en las balizas (Fotografía: W. Haeberli, Julio 2014)



Figura 7: Margen glaciar empinado, en contacto con múltiples pequeñas morrenas terminales (Fotografía: W. Haeberli, Julio 2014)



Figura 8: Pequeñas morrenas estacionales que cruzan secuencias de estriaciones longitudinales sobre sedimento fino en el entorno del glaciar Suyuparina (Fotografía: W. Haeberli, Julio 2014)



Figura 9: Microformas del suelo con dibujos de los ciclos diarios de hielo/deshielo. (Fotografía: W. Haeberli, Julio 2014)

El glaciar se caracteriza por tener una superficie muy irregular con depresiones marcadas y acantilados de hielo (en adelante *icecliffs* según el término en inglés, Figuras 5 y 6). Los *icecliffs* generalmente están orientados hacia el Norte y tienen un albedo relativamente bajo en comparación con las superficies planas, cubiertas en su mayoría con nieve. Este patrón microtopográfico se observa también en otros glaciares de la región. Los márgenes de los glaciares son empinados y, en algunos sitios, están en contacto con pequeñas morrenas terminales (Figura 7). También se observan paredes verticales en otros glaciares tropicales como en el glaciar de la cumbre del Kilimanjaro (Mölg et al., 2003). Algunas de las morrenas terminales se cruzan perpendicularmente con estrías longitudinales (flutes) en el ambiente proglacial (Figura 8). El ambiente proglacial mayormente no tiene vegetación y el suelo está cubierto por sedimento con microformas pronunciadas debido a los ciclos diarios de hielo/deshielo del sedimento fino (Figura 9). El glaciar tiene un lecho constituido por una mezcla de roca y sedimento y probablemente es temperado. Pese al retroceso marcado, el glaciar probablemente se encuentra en un estado próximo al equilibrio. En algunos glaciares en los Alpes se observa un derretimiento y adelgazamiento paulatino hasta colapso de la lengua glaciar (“downwasting”). En cambio, el glaciar Suyuparina se caracteriza por un retroceso activo (“active retreat”).

3. Mediciones de campo

El **trabajo de campo** está siendo realizado por el equipo de investigadores del departamento académico de Geografía de la Universidad Nacional San Antonio de Abad del Cusco (UNSAAC) con el apoyo científico de la Universidad de Zurich y otras instituciones Peruanas y Europeas. El balance de masa total del glaciar se determinará utilizando dos métodos, el método glaciológico directo (con balizas y pozos), y el geodético (mapeo repetido y diferenciación de DEMs). El principio del año hidrológico ha sido establecido el 1 de octubre.

Los detalles del monitoreo en el glaciar Suyuparina se encuentran en la Tabla 2.

En los **años 2010 y 2011** se iniciaron las primeras mediciones en el glaciar Suyuparina en el marco del proyecto PACC. En Julio 2010, se instalaron siete balizas en la zona de ablación y dos pozos en la zona de acumulación. El año siguiente, cinco balizas fueron encontradas y monitoreadas. Además, en Julio 2010, se realizaron mediciones de acumulación de seis capas anuales en una grieta. Con mediciones del espesor de cada capa y la densidad estimada según Tompson et al. (1980), se estima el equivalente en agua que resulta de la

acumulación y la ablación (fusión y sublimación) de cada año hidrológico al nivel de la grieta.

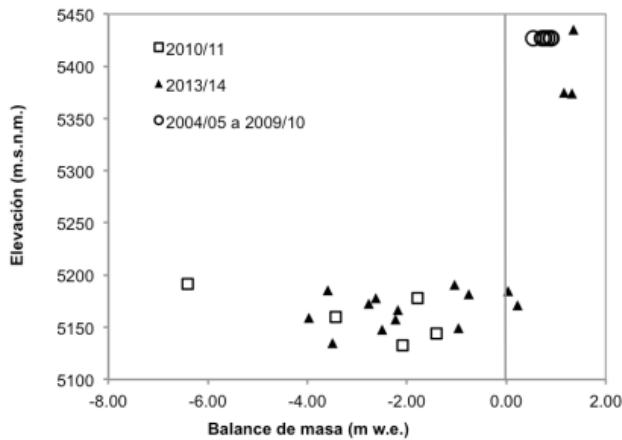
Para medir la **ablación** del año hidrológico **2013/14** se han instalado 13 balizas en la lengua del glaciar realizando perforaciones con profundidades de 6 metros. Cada una de estas balizas ha sido referenciada y codificada para su respectivo monitoreo. Las medidas de ablación se realizan directamente sobre las balizas emergidas del hielo, a partir de la diferencia respecto a la lectura anterior. La ablación en las balizas se monitorea cada dos a cinco meses (Tabla 2). Para estimar valores de ablación en equivalente de agua (w.e.), se estima una densidad de 0.9 g/cm^3 para hielo y 0.2 g/cm^3 para nieve.

La **acumulación** del año hidrológico **2013/14** se midió mediante la excavación de dos pozos en octubre 2013. La conversión del material (nieve o neviza) al equivalente en agua se calcula midiendo su densidad. La primera estimación se realizó el 30 de septiembre de 2013, cuyos datos corresponden al periodo 2012-2013. El 1 de octubre del año 2014 se realizó la segunda estimación para los años 2013-2014.

Tabla 2: Cronograma de mediciones de campo

Fecha	Mediciones	Proyecto
25 de julio 2010	Instalación de 7 balizas Medición de acumulación en una grieta con seis capas anuales	PACC
06 de julio 2011	Instalación de 2 pozos Lectura de 5 balizas instaladas en Julio 2010	PACC
01 de octubre 2013	Instalación de 13 balizas en nuevas posiciones Levantamiento topográfico de balizas Instalación de 2 pozos en nuevas posiciones y estimación de acumulación del año 2012/13	UNSAAC
07 de diciembre 2013	Lectura de 13 balizas	UNSAAC
10 de mayo 2014	Lectura de 13 balizas	UNSAAC
13 de julio 2014	Lectura de 13 balizas Nueva instalación de la baliza S13	UNSAAC
07 de septiembre 2014	Lectura de 13 balizas Observaciones geomorfológicas	UNSAAC
01 de octubre 2014	Medición de acumulación en 2 pozos Instalación de un nuevo pozo	UNSAAC
13 de noviembre 2014	Lectura de balizas (3 quedaron afuera)	UNSAAC

4. Resultados



La Figura 10 muestra el balance de masa puntual anual de cada baliza en función de la elevación para los dos años con mediciones 2010/11 y 2013/14. Entre 5200 y 5350 m.s.n.m. todavía no existen mediciones porque la superficie es irregular con depresiones y acantilados de hielo que dificultan la instalación de balizas.

Los valores máximos de ablación son -6.4 m w.e. en 2010/11 y -4.0 m w.e. en 2013/14. Los coeficientes de determinación de $R^2=0.49$ (2010/11, correlación negativa y no significativa porque son sólo 5 mediciones) y $R^2=0.11$ (2013/14, correlación positiva) indican que la correlación entre las mediciones de ablación (balizas) y la elevación es baja hasta no existente. Sin embargo, las balizas sólo tienen una diferencia de elevación de 50 m entre sí que probablemente no permite estimar una relación entre ablación y elevación.

Figura 10: Balance de masa puntual en balizas y pozos a distintas elevaciones.

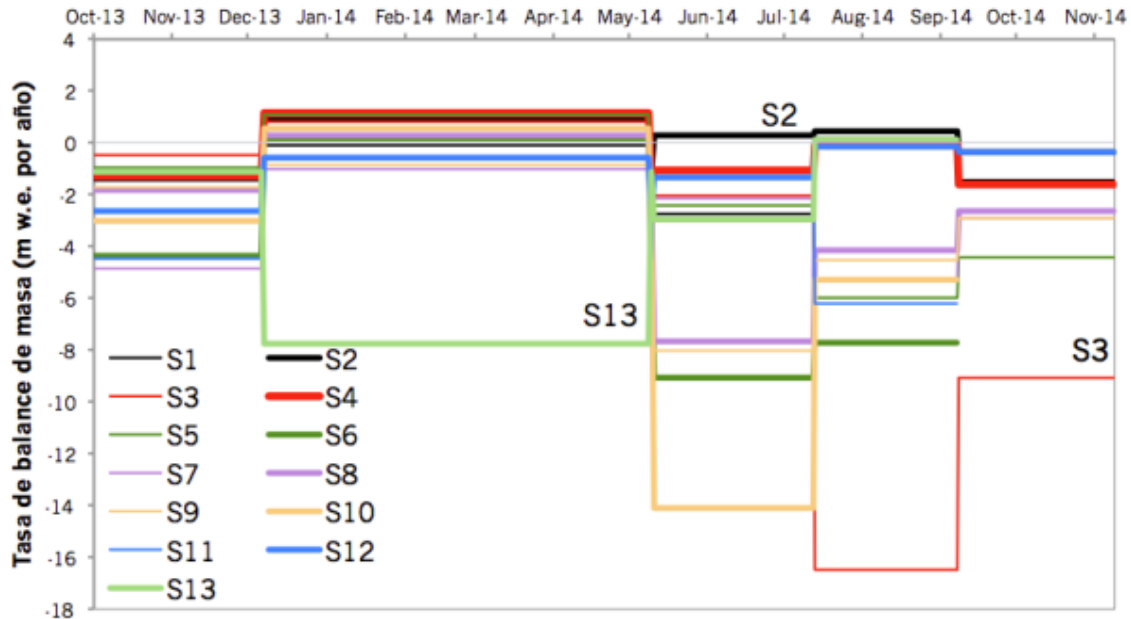


Figura 11: Tasas de balance de masa para cada baliza y periodo. Los valores están en m.w.e. por año.



Figura 12: Baliza S13 en mayo y julio 2014 (Fotografía: E. Molina). Se observa que el *icecliff* se desplaza aproximadamente 2 m en este periodo.



Figura 13: Baliza S3 en julio, septiembre y noviembre 2014 (Fotografías: E.Molina, S.Schauwecker). Se observa que la ablación en la baliza está afectada por la ablación horizontal en el *icecliff*.



Figura 14: Baliza S2 en julio 2014 (Fotografía: S. Schauwecker). Se observa que la ablación en una superficie plana cubierta con nieve puede ser muy baja.

En la estación de lluvias entre **diciembre 2013 y mayo 2014**, el balance de masa puntual neto es positivo en siete sitios (Figura 11). En un caso (baliza S13) se observa un máximo de ablación de -7.8 m w.e. por año (-3.3 m w.e. entre diciembre 2013 y mayo 2014), las otras balizas tienen valores de ablación neta menor a -0.5 m w.e. por año. La baliza S13 con la tasa alta ha quedado fuera del hielo debido al avance de un *icecliff* (Figura 12) entre diciembre 2013 y mayo 2014.

En los periodos **mayo-julio 2014, julio-septiembre 2014 y septiembre-noviembre 2014** (estación seca) se observa una gran dispersión de la ablación. Se ha registrado una ablación muy alta en balizas situadas cerca de un *icecliff*, donde predomina una alta fusión en dirección horizontal. En algunos casos, las balizas han

sido alcanzadas por estos *icecliffs*, mostrando grandes tasas de ablación independientemente de su elevación (véase por ejemplo la baliza S3 en Figura 13). En comparación, las balizas situadas en sitios planos y cubiertos con nieve muestran menor ablación o incluso acumulación (véase por ejemplo la baliza S2 en la Figura 14).

Las fotos tomadas en mayo, julio, septiembre y noviembre 2014 ayudan a estimar aproximadamente los avances de los *icecliffs* en algunos sitios. Cerca de la baliza S13, el *icecliff* avanzó aproximadamente 2 m entre mayo y julio 2014. Cerca de la baliza S3, el *icecliff* mostró un desplazamiento horizontal de 0.94 m entre julio y noviembre 2014.



Figura 15: Capas de nieve cerca de la baliza 5 en julio

2014 (Fotografía: S.Schauwecker).

En octubre 2014 se ha medido la **acumulación** en dos pozos para el período 2013-2014. Se instaló uno nuevo donde se estimó la acumulación del último año. Los valores son 1.2, 1.3 y 1.4 m w.e. en los tres pozos. En las depresiones en la zona baja del glaciar se observa acumulación posiblemente de varias estaciones o eventos de precipitación. Las capas de nieve tienen espesores en un orden de magnitud de 0.1 a 0.4 m. La Figura 15 muestra capas de un espesor de varios decímetros.

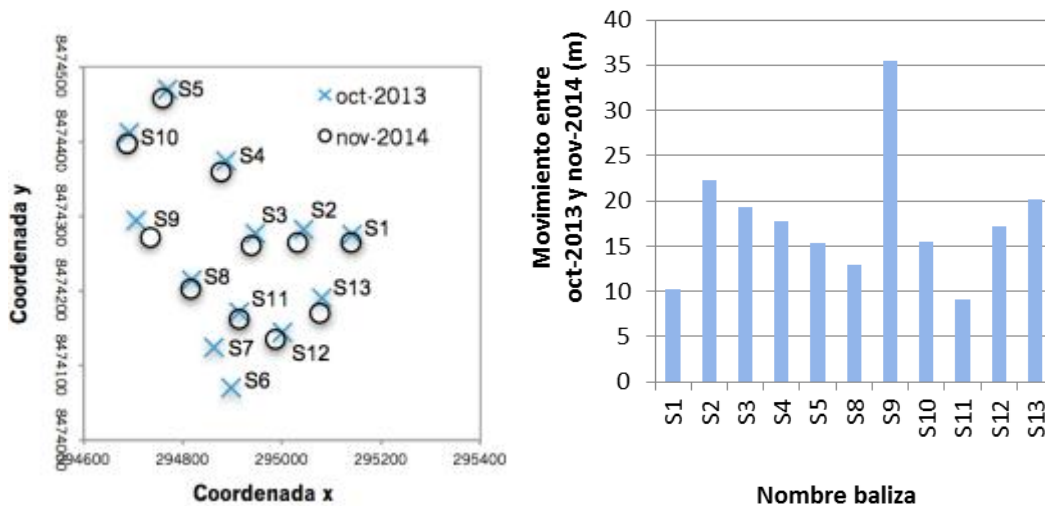


Figura 16: (a) Posición de las balizas en octubre 2013 y noviembre 2014 (b) movimiento horizontal de las balizas entre octubre 2013 y noviembre 2014.

En la Figura 16 se puede observar que el movimiento horizontal de las balizas (entre octubre 2013 y noviembre 2014) es en dirección sur para la mayoría de las balizas. El movimiento es aproximadamente de 10 a 20 m en los 13 meses. El desplazamiento de la baliza S9 es más alto, 35 m, probablemente debido a un error en las mediciones.

5. Discusión

Las observaciones indican una extrema **variabilidad local en los valores de ablación** debido a una microtopografía pronunciada con acantilados de hielo (*icecliffs*) casi verticales orientados hacia el sol en la mayoría de los casos. Probablemente, estos *icecliffs* tienen un efecto predominante en la ablación total del glaciar, a través del derretimiento lateral. Se observa por ejemplo tanto acumulación como ablación en la misma elevación a distancias de unos pocos metros. Concluimos que en la lengua del glaciar, la microtopografía y la microclimatología tienen una influencia importante en los procesos de ablación.

La línea de equilibrio (ELA) se determina normalmente con una regresión lineal entre ablación y elevación de distintos puntos con mediciones. Considerando la regresión lineal de los puntos medidos en Suyuparina en el año hidrológico 2013/14, la ELA se encuentra a 5166 m snm. A través del esquema de parametrización glaciológica, se obtiene un valor de ELA de 5170 m snm, similar al valor de ELA encontrada mediante la regresión lineal para el año hidrológico

2013/2014. Esto indica, igual que las observaciones de la geomorfología, que el glaciar probablemente está en un estado cercano al equilibrio.

Sin embargo, el valor para la ELA considerando la regresión lineal tiene gran incertidumbre debido a la dispersión de los datos y al pequeño rango de elevaciones de las mediciones puntuales. De igual manera, la compleja microtopografía del glaciar hace que sea muy difícil estimar **el balance de masa total** con el método glaciológico y la interpolación de los datos puntuales.

Probablemente el avance de los *icecliffs* - gobernado por la ablación horizontal - es variable durante el año. Más mediciones ayudarán a interpolar los datos puntuales (medidos con balizas y pozos) y estimar un balance de masa total anual para el glaciar Suyuparina. Próximamente se **medirá la ablación horizontal** (es decir perpendicular a la superficie del glaciar) en los *icecliffs*.

La reducida ablación en la estación de lluvias se debe con mucha probabilidad a varios factores. En primer lugar, probablemente la existencia de precipitación en forma de nieve en la lengua del glaciar causa

temporalmente acumulación en algunas balizas. En segundo lugar, cuando se acumula nieve en la superficie del glaciar, el albedo es más alto que el de una superficie con hielo. En los glaciares tropicales, el balance de radiación es altamente importante para el balance de masa. Por eso, la energía disponible para la ablación se reduce en una superficie glaciar cubierta por nieve, en comparación con una superficie de hielo o cubierta con finos sedimentos.

La estrategia internacional de monitoreo de balance de masa glaciar indica que es necesario combinar **diferentes métodos de medición**, por ejemplo, el método glaciológico directo y el método geodético por mapeo repetido (WGMS, 2013). Del método glaciológico se obtiene información para entender la variabilidad interanual o estacional en el balance de masa, así como los procesos que intervienen. En el caso del glaciar Suyuparina con su topografía heterogénea se hace aún más indispensable estimar el balance de masa total del glaciar mediante el método geodético, utilizando dos DEMs de alta resolución de dos fechas distintas. Calculando la diferencia entre una imagen y la otra, asumiendo un valor para la densidad de hielo, es posible determinar con más certeza el cambio en volumen de todo el glaciar, y calibrar los valores de las mediciones directas.

El método de parametrización glaciológica (Haeberli & Hoelzle, 1995) brinda una buena aproximación para adquirir de manera rápida y eficiente una visión general sobre las principales características y dimensiones de un glaciar. Debido al gran margen de incertidumbre en los resultados, este método no debe sustituir sino complementar el trabajo de campo mediante la comprensión de los procesos físicos específicos en el glaciar investigado.

Por otro lado, no debemos olvidar que el presente estudio contribuirá a una mejor comprensión de las variables que interactúan en la cuenca del río Vilcanota; balance de masa glaciar, recurso hídrico y sociedad.

6. Conclusiones

Los primeros años de medición (2010/11, 2013/14) representan una etapa fundamental e indispensable para entender mejor las interacciones entre el clima y los glaciares en una región con importancia alta en términos de recursos hídricos. Las conclusiones más importantes para el glaciar Suyuparina son las siguientes:

- El balance de masa neto puntual en la lengua del glaciar es altamente variable con valores entre +0.2 m w.e. (acumulación) y hasta -4 ó -6 m w.e. (ablación), dependiendo de la microtopografía del sitio. La acumulación en la zona de acumulación en

2013/14 fue del orden de magnitud entre 1.2 y 1.4 m w.e..

- La velocidad del flujo glaciar en la lengua entre octubre 2013 y noviembre 2014 está en el rango de 10 a 20 m.
- Se observa un patrón estacional en el balance de masa puntual, con menos ablación en la estación de lluvias entre diciembre y mayo. Esto corresponde con resultados en el glaciar Shallap donde hay más ablación en la temporada seca debido al balance de radiación neta más positivo (Gurgiser et al., 2013). Sin embargo, estos resultados van en contra con los resultados del glaciar Zongo en Bolivia donde la tasa de derretimiento es muy pequeña o zero en la temporada seca (Favier et al., 2004; Sicart et al., 2011).
- La gran dispersión de la ablación en función de la elevación, observada en los dos años de mediciones, se debe a la importante influencia de la superficie irregular del glaciar. Para estimar un balance de masa anual total del glaciar por el método glaciológico directo, hay que considerar este patrón topográfico en la interpolación de los valores para toda el área glaciar. Futuras investigaciones deberían enfocarse en desarrollar un método para estimar el balance de masa total en este tipo de glaciares.
- Glaciares pequeños como el Suyuparina, son los más vulnerables a cambios en el clima y probablemente desaparecerán dentro de pocas décadas. Como los glaciares en la cordillera Vilcanota actúan como almacenamientos estacionales de agua, es fundamental estudiar su comportamiento y su rol en el sistema hídrico. El conocimiento de este estudio ayuda a mejorar el monitoreo del balance de masa en los glaciares de la cordillera de Vilcanota y - finalmente - dispone información importante para tomar medidas de adaptación al cambio climático.

Próximamente se calibrarán las mediciones directas con resultados del método geodético. Al calcular la diferencia entre un DEM de alta resolución de 2013 y un futuro DEM del año 2015, se puede estimar el cambio en el

volumen del glaciar durante este periodo y compararlo con las mediciones en los pozos/balizas. Esto permitirá calibrar el balance de masa obtenido por el método glaciológico y desarrollar una técnica adecuada de interpolación de los datos puntuales.

La existencia de superficies irregulares y *icecliffs* no ha sido descrita en otros estudios sobre glaciares en el Perú. Consideramos importante incluir mediciones de ablación en esas paredes de hielo en el futuro monitoreo glaciar de la zona. Futuras investigaciones podrían incluir i) estimar la proporción entre la ablación vertical y la ablación horizontal en las partes inclinadas; ii) estimar y comparar los flujos de energía en un *icecliff* con una superficie plana (cubierta de nieve) con un modelo de balance de energía; iii) el rol de las superficies irregulares con marcada microtopografía en la estimación del balance de masa; iv) la transferibilidad de las observaciones a otros glaciares de la región, ya que se encuentran superficies heterogéneas como las observadas en Suyuparina en otros glaciares de la Cordillera Vilcanota.

7. Agradecimientos

Estos estudios están financiados por la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco (UNSAAC) a través del proyecto “Balance de masa glaciar en la Cordillera de Vilcanota” con el apoyo científico-técnico del Proyecto Glaciares en colaboración con CARE Perú y la Universidad de Zurich y financiado por la Agencia Suiza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE. Los estudios se han iniciado dentro del Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC) en colaboración con HELVETAS Swiss Intercooperation y financiado por COSUDE.

8. Referencias

- Favier, V., Wagnon, P., & Ribstein, P. (2004). *Glaciers of the outer and inner tropics: A different behaviour but a common response to climatic forcing*. *Geophysical Research Letters*, 31(16).
- Gurgiser, W., Marzeion, B., Nicholson, L., Ortner, M. & Kaser, G. (2013). *Modeling energy and mass balance of Shallap Glacier, Peru*. *The Cryosphere* 7(6): 1787–1802.
- Haerberli, W. & Hoelzle, M. (1995). *Application of inventory data for estimating characteristics of and regional climate-change effects on mountain glaciers: a pilot study with the European Alps*. *Annals of Glaciology* 21: 206–212.
- Hanshaw, M.N. & Bookhagen, B. (2014). *Glacial areas, lake areas, and snow lines from 1975 to 2012: status of the Cordillera Vilcanota, including the Quelccaya Ice Cap, northern central Andes, Peru*. *The Cryosphere* 8(2): 359–376.
- Kaser, G. & Osmaston, H. (2002). *Tropical Glaciers*. New York: Cambridge University Press.
- Mark, B.G., Seltzer, G.O., Rodbell, D.T. & Goodman, A.Y. (2002). *Rates of Deglaciation during the Last Glaciation and Holocene in the Cordillera Vilcanota-Quelccaya Ice Cap Region, Southeastern Peru*. *Quaternary Research* 57(3): 287–298.
- Mölg, T., Hardy, D.R. & Kaser, G. (2003). *Solar-radiation-maintained glacier recession on Kilimanjaro drawn from combined ice-radiation geometry modeling*. *Journal of Geophysical Research* 108(D23): 4731.
- Perry, L.B., Seimon, A. & Kelly, G.M. (2013). *Precipitation delivery in the tropical high Andes of southern Peru: new findings and paleoclimatic implications*. *International Journal of Climatology* 34(1): 197–215.
- Salzmann, N., Huggel, C., Rohrer, M., Silverio, W., Mark, B.G., Burns, P. & Portocarrero, C. (2013). *Glacier changes and climate trends derived from multiple sources in the data scarce Cordillera Vilcanota region, southern Peruvian Andes*. *The Cryosphere* 7(1): 103–118.
- Schauwecker, S., Rohrer, M., Acuña, D., Cochachin, A., Dávila, L., Frey, H., Giráldez, C., Gómez, J., Huggel, C., Jacques-Coper, M., Loarte, E., Salzmann, N., Vuille, M. (2014). *Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited*. *Global and Planetary Change* 119: 85–97.
- SENAMHI (2009). *Escenarios Climáticos en el Perú para el año 2030. – Segunda Comunicación Nacional de Cambio Climático. Resumen técnico*. Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología (SENAMHI), Lima, 26 pp.
- Sicart, J. E., Hock, R., Ribstein, P., Litt, M., & Ramirez, E. (2011). *Analysis of seasonal variations in mass balance and meltwater discharge of the tropical Zongo Glacier by application of a distributed energy balance model*. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres* (1984–2012), 116(D13).

- Suarez, W., Macedo, N., Montoya, N., Arias, S. & Huggel, C. (2014). *Balance radiativo neto y evolución temporal del Nevado Quisoquipina en la Región de Cusco*. (en preparación).
- UGRH (2014). *Inventario Nacional de Glaciares y Lagunas*. Ministerio de Agricultura y Riego, Autoridad Nacional del Agua, Dirección de Conservación y Planeamiento de Recursos Hídricos. UGRH-ANA-MINAGRI, Lima, 81 pp.
- WGMS. (2008). *Global glacier changes: facts and figures*. (M. Zemp, I. Roer, A. Kääb, M. Hoelzle, F. Paul & W. Haeberli, eds.). Zurich, Switzerland: UNEP, World Glacier Monitoring Service. University of Zurich.
- WGMS (2013). *Glacier Mass Balance Bulletin No. 12 (2010–2011)*. (Zemp, M., S.U. Nussbaumer, K. Naegeli, I. Gärtner-Roer, F. Paul, M. Hoelzle & W. Haeberli, eds.). Zurich, Switzerland: ICSU (WDS) / IUGG (IACS) / UNEP / UNESCO / WMO, World Glacier Monitoring Service.