



PERÚ Ministerio del Ambiente



PERÚ Ministerio de Agricultura

Autoridad Nacional del Agua



Schweizerische Eidgenossenschaft
Confédération suisse
Confederazione Svizzera
Confederaziun svizra

Agencia Suíza para el Desarrollo y la Cooperación COSUDE



LÍNEA de BASE CLIMÁTICA CORDILLERA BLANCA (ANCASH)



PROYECTO GLACIARES

Adaptación al cambio climático y reducción de riesgos de desastres por el retroceso de los glaciares en la Cordillera de los Andes

Consorcio Ejecutor:



University of Zurich UZH



CARE



Autores:

Simone Schauwecker, Daniela Lorenzi, Mario Rohrer
Meteodat GmbH, Zurich, Suiza.

Índice

1	Resumen ejecutivo	4
2	Introducción	5
2.1	Objetivos.....	5
2.2	Antecedentes	5
3	Información utilizada.....	5
4	Análisis pluviométrico	9
4.1	Perfiles.....	11
1)	Caraz.....	11
2)	Huaraz.....	12
3)	Recuay	14
4)	Catac.....	15
4.2	Perfil general	17
4.3	Tendencias.....	19
4.4	Distribución de eventos extremos	20
5	Análisis de la temperatura.....	24
5.1	Tendencias de temperatura en los últimos 40 años	24
5.2	Tendencias de temperatura en los últimos 20 años	25
6	Impactos climáticos en los glaciares en la Cordillera Blanca	30
7	Escenarios del cambio climático para la Cordillera Blanca	31
7.1	Tendencias de temperatura	31
7.2	Tendencias de precipitación.....	31
7.3	Incertidumbres	31
8	Conclusiones.....	32
9	Bibliografía.....	33

1 Resumen ejecutivo

En el presente informe analizamos las características climáticas más importantes del presente y futuro en la Cordillera Blanca, Áncash, Perú. Ponemos especial énfasis en las tendencias actuales y futuras, además de los eventos extremos, los cuales pueden afectar la disponibilidad de recursos hídricos y el riesgo de desastres naturales.

Observamos que después de una fuerte tendencia positiva durante los años sesenta y setenta, la temperatura del aire en la Cordillera Blanca no aumentó significativamente durante los últimos 30 años (aprox.). En algunos lugares se observa aun una tendencia negativa en la temperatura mínima del aire de dicho período. Esto parece estar relacionado con una oscilación cíclica del sistema climático océano-atmósfera-tierra que contrarresta el calentamiento antropogénico de la atmósfera durante las últimas tres décadas (Falvey and Garreaud 2009; Chang et al. 2001; Jacques-Coper 2009).

Las observaciones analizadas contrastan con la tendencia general de los trópicos, que se caracteriza por una subida de la isoterma cero durante las últimas décadas. (Bradley et al. 2009). Aún más sorprendente parece que los glaciares de la Cordillera Blanca hayan retrocedido rápidamente en los últimos treinta años (Hastenrath and Ames 1995; Silverio and Jaquet 2005; Racoviteanu et al. 2008; Bury et al. 2010), a pesar de que no se observe una tendencia significativa en la temperatura del aire. Teniendo en cuenta que el tiempo de respuesta de estos glaciares de montaña se encuentra en el orden de magnitud de unos pocos años, este retroceso glaciar parece contra-intuitivo. Una razón para esto podría ser que la altura de la línea de equilibrio (ELA) se encuentra - ya hoy - a una elevación superior a las que resultan de suponer que los glaciares estén en equilibrio (Giraldez 2011; Rabatel et al. 2012).

Si el impacto de esta oscilación cíclica en la temperatura cambia de negativo a positivo y viene en línea con el calentamiento antropogénico, el retroceso glaciar en la región puede acelerar drásticamente y el “peak water” (Baraer et al. 2012) se puede retrasar durante los próximos uno o dos décadas. La disminución de los recursos hídricos procedentes de los glaciares puede ser a partir de entonces aún más abrupta que sólo evaluando los escenarios climáticos CMIP5.

2 Introducción

2.1 Objetivos

Uno de los impactos más dramáticos del calentamiento global es el retroceso de glaciares. Por eso es importante de entender la respuesta de glaciares al clima en el pasado y futuro. La reducción de glaciares está acompañada de cambios en los recursos hídricos que pueden ser un peligro para las cuencas andinas del Perú. El Proyecto Glaciares se inició con el fin de enfocar la adaptación al cambio climático y la reducción de riesgos de desastres por el retroceso de los glaciares en la Cordillera Blanca.

El objetivo general del presente informe es desarrollar una línea de base para el Proyecto Glaciares. Se realiza un estudio del clima en la región de Cordillera Blanca y Cordillera Negra (Departamento de Áncash) utilizando parámetros meteorológicos registrados por el SENAMHI y la Unidad de Glaciología. El trabajo pretende contribuir al conocimiento del clima en la Cordillera Blanca en el marco del cambio global a través del estudio de la evolución de las precipitaciones y temperaturas.

2.2 Antecedentes

- Climate Scenarios for the Santa River Basin to 2030 (SENAMHI)
– Versión en Inglés
- Escenarios Climáticos en la Cuenca del río Santa para el año 2030 (Obregón et al. 2009)
– Versión en Español

3 Información utilizada

La información utilizada en el presente estudio ha sido facilitada por las redes de estaciones meteorológicas del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI) y la Unidad de Glaciología. La ubicación de las estaciones está ilustrada en Figura 1, donde también se puede observar la densidad y distribución de las estaciones en el departamento de Áncash. El detalle para los datos disponibles para la Cordillera blanca está listado en la siguiente Tabla 1.

Tabla 1: Mediciones meteorológicas en la cuenca del río Santa. El periodo de registro varía entre las estaciones y la tabla sólo muestra el año en que la primera estación ha sido instalada. Las mediciones diarias de la Unidad de Glaciología se iniciaron a partir de 2002 e incluyen información registrada de seis estaciones.

	Resolución temporal	VARIABLES meteorológicas (utilizados para el presente estudio)	Periodo de registro	Número de estaciones
SENAMHI	diario	Temperatura máxima Temperatura mínima Precipitación	a partir de 1954	136
Unidad de Glaciología	diario	Temperatura del aire Precipitación	a partir de 2002	6
	mensual	Precipitación	a partir de 1953	36

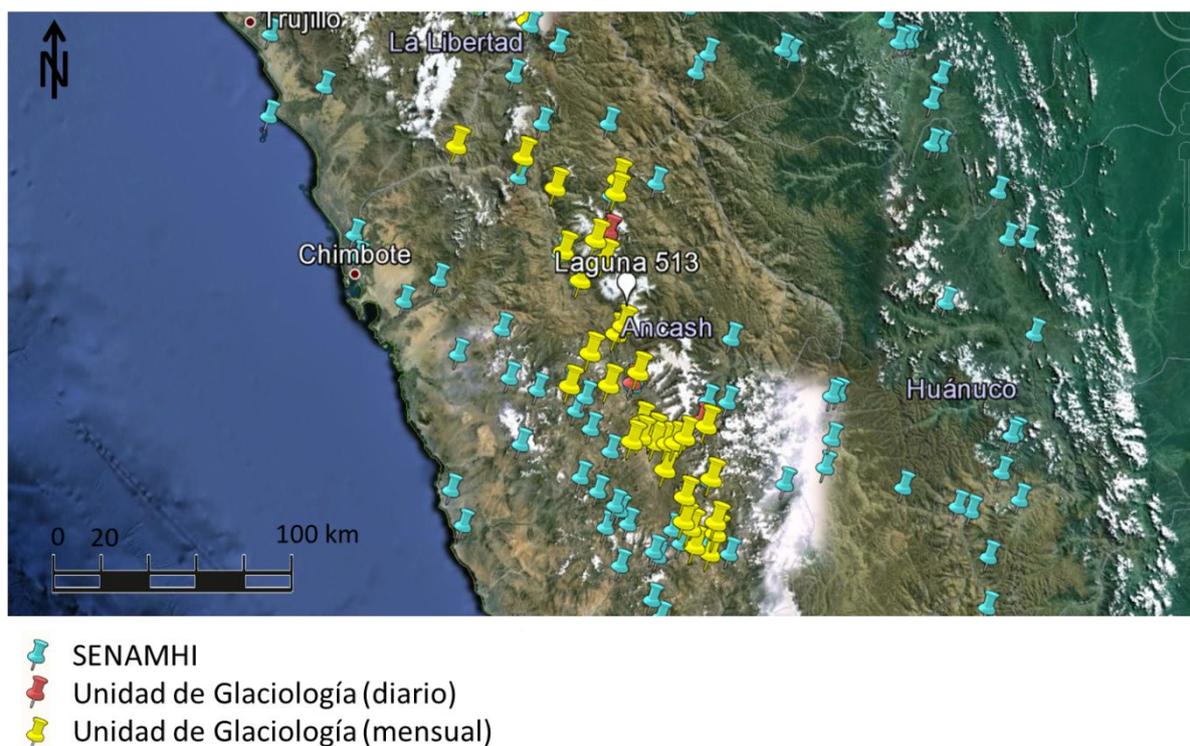


Figura 1: Mapa de GoogleEarth mostrando la ubicación de las estaciones del SENAMHI (azul) y de la Unidad de Glaciología a nivel diario (rojo) y mensual (amarillo). En la cuenca del río Santa existe una gran variedad de estaciones con datos disponibles. Sin embargo, hay que descartar algunas estaciones con un periodo de mediciones muy corto. En la Cordillera Blanca, la Unidad de Glaciología brinda información de varias estaciones a nivel mensual y de seis estaciones a nivel diario.

Los datos de más de 100 estaciones meteorológicas son accesibles en un portal de datos desarrollado en el marco del programa de adaptación al cambio climático en el Perú (PACC). El portal de datos permite, por ejemplo, la comparación de las series de datos o la interpolación de campos espaciales, así como la descarga de datos en varios formatos (Schwarb et al. 2011). Es por lo tanto una herramienta valiosa de apoyo en el proceso de homogeneización de datos y generación de una climatología de referencia regional.

El portal de datos se divide en dos portales nombrados “Proyecto GlacioRisk” y “Proyecto PACC”. El Portal de datos del proyecto GlacioRisk incluye información de estaciones en la región de la Cordillera Blanca y Negra. El portal PACC se ha desarrollado primero y cubre el área alrededor de Cusco y Apurímac en el Sureste del Perú. Figura 2 muestra el esquema del portal de datos donde el tercer nivel (a la derecha) muestra las fuentes de datos. La Figura 3 muestra la ubicación de las estaciones disponibles en el portal de datos. Se observan las dos áreas con la mayoría de las estaciones proveniente del SENAMHI (azul claro y azul oscuro).

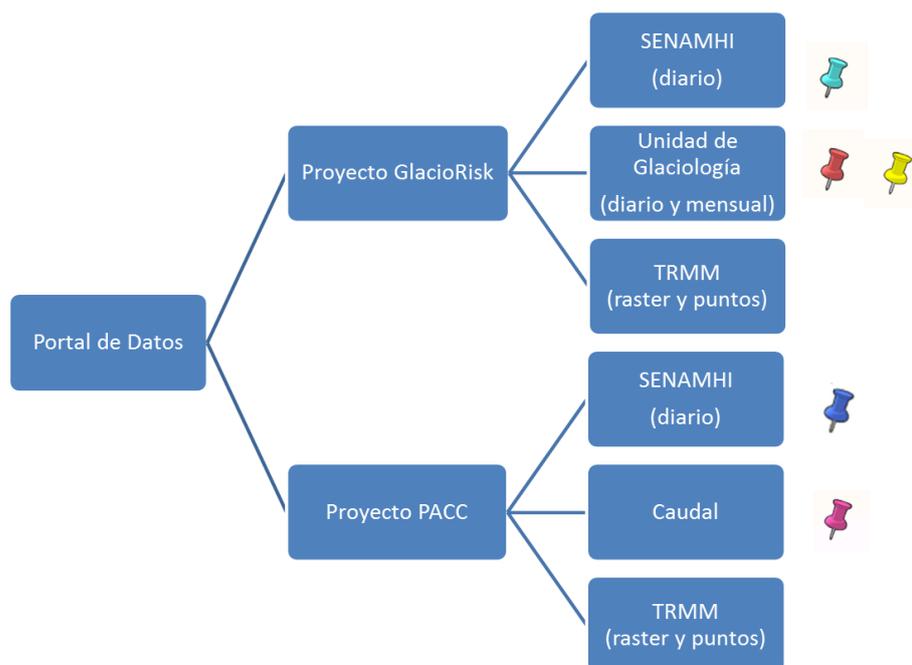


Figura 2: Esquema del portal de datos. La información es disponible en dos portales de datos nombrados “Proyecto GlacioRisk” para el departamento de Áncash (Cordillera Blanca y Cordillera Negra) y “Proyecto PACC” para los departamentos de Cusco y Apurímac. Cada portal permite acceder a la información de la red de monitoreo del SENAMHI, así como la información del producto satelital TRMM. El portal de GlacioRisk también incluye información adquirida de la Unidad de Glaciología. Los símbolos a la derecha representan el color usado para indicar la ubicación de las estaciones en **Figura 2**.

En el portal de datos se ha agregado información proveniente de diferentes fuentes a nivel nacional como internacional. La mayoría de las estaciones incluidas en el portal son parte de la red de monitoreo del Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI). Para el portal del proyecto GlacioRisk, una gran parte de la información proviene de la red de estaciones de la Unidad de Glaciología. Las estaciones de la red del SENAMHI registran las siguientes variables: temperatura máxima y mínima (°C), temperatura del aire (a las 07:00, 13:00, 19:00) (°C), temperatura media (°C), humedad relativa (a las 07:00, 13:00, 19:00) (%), humedad relativa (%), presión del aire (hpa), velocidad del viento (m/s), dirección del viento (°), precipitación (mm). Sin embargo, no todas las estaciones miden cada variable.

A parte de la información proveniente de estaciones meteorológicas, el portal permite acceder a los datos del TRMM (3B42v7). Estimaciones de precipitación de TRMM no reemplazan mediciones, pero disponen información adicional para regiones donde registros de estaciones meteorológicas son escasos (Scheel et al. 2011). El producto de precipitación de TRMM se puede visualizar y bajar mediante i) un raster y ii) puntos especificados del raster.

- i. El raster permite observar la precipitación sobre la región de los Andes en Sudamérica entre 14°N a 38°S y 48° a 98° Oeste. El portal de datos ofrece la posibilidad de generar figuras o una animación con las imágenes disponibles cada tres horas. Figura 4 ilustra un ejemplo para la precipitación estimada por TRMM para el 31.03.2011 a las 00:00 horas (UTM).
- ii. La segunda opción para acceder al producto TRMM es elegir uno o varios puntos de la malla y generar un plot que muestra la serie de tiempo de la precipitación en los puntos elegidos.

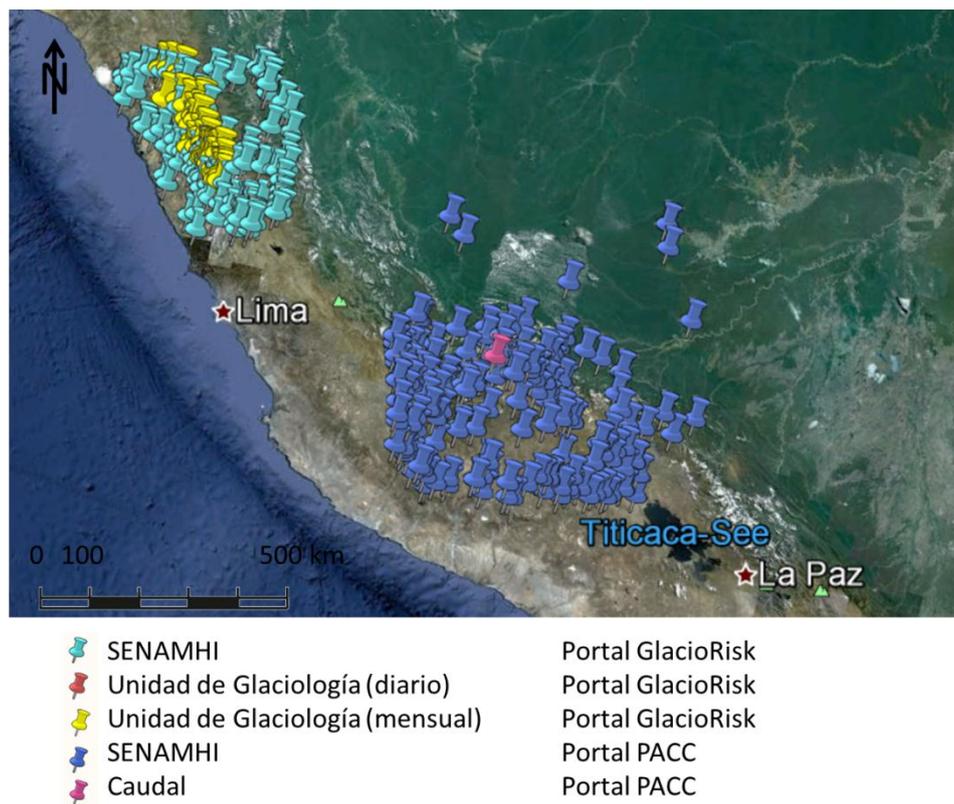


Figura 3: Mapa de GoogleEarth mostrando la posición de las estaciones incluidas en el portal de datos. El Portal GlacioRisk contiene información de estaciones en el departamento de Áncash, mientras que el portal PACC incluye las estaciones en los departamentos de Cusco y Apurímac. Hay seis estaciones de la Unidad de Glaciología con datos a nivel diario. Dos estaciones están midiendo caudal y no se aprecian bien en el mapa. Sobre todo para la región de la Cordillera Blanca, hay una gran densidad de estaciones que permite realizar un análisis detallado sobre el clima en la región.

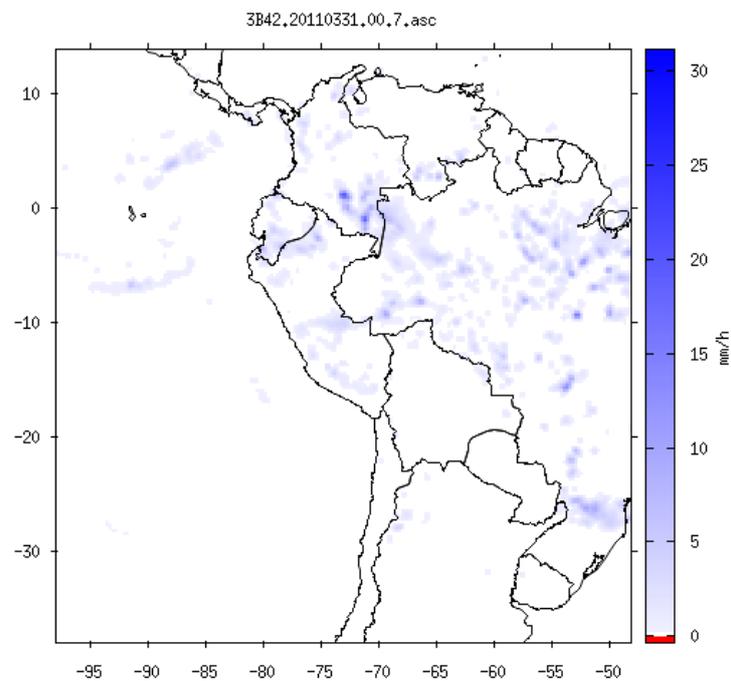


Figura 4: Precipitación sobre Sudamérica para el 31.03.2011 a las 00:00 horas (UTM) derivada por TRMM. La imagen fue generada por el portal de datos.

4 Análisis pluviométrico

Las siguientes figuras muestran la ubicación y los promedios mensuales multianuales de precipitación de diferentes estaciones en la cuenca del río Santa. La precipitación en el valle está representada por un color gris, mientras los colores azules y verdes ilustran la precipitación mensual del flanco de la Cordillera Blanca y de la Cordillera Negra, respectivamente. La oscuridad del color representa la elevación de la estación, mostrando precipitación en altas elevaciones con un color más oscuro. No obstante, la oscuridad sólo ayuda a estimar una elevación relativa de estaciones de una figura y no representa la elevación absoluta.

Para demostrar el efecto de elevación y topografía, se han elegido varios perfiles a lo largo de la cuenca. En cada perfil se dispone información de al menos dos estaciones ubicadas a diferentes alturas. La gran variedad de datos en distintas alturas y perfiles permite observar el gradiente de precipitación en función de la elevación.

El periodo de medición varía dentro de los datos disponibles. Para cada figura se ha elegido un periodo en que los datos de todas las estaciones del perfil están disponibles y por ello cada figura representa un periodo distinto. En la mayoría de las mediciones aparecen vacíos que se extienden entre un mes a varios años. Aun así se ha calculado el promedio mensual a lo largo de varios años, asumiendo que aquel promedio no es muy sensible a esos vacíos.

La siguiente Figura 5 da una primera orientación sobre las sumas de precipitación en la región de la Cordillera Blanca. Se muestran las precipitaciones en los meses de abril a septiembre en un color rojo y en octubre a marzo en un color azul. El monto de precipitación se representa por el área del círculo. Se aprecia que en cada estación meteorológica se mide menos precipitación durante el invierno austral (abril a septiembre).

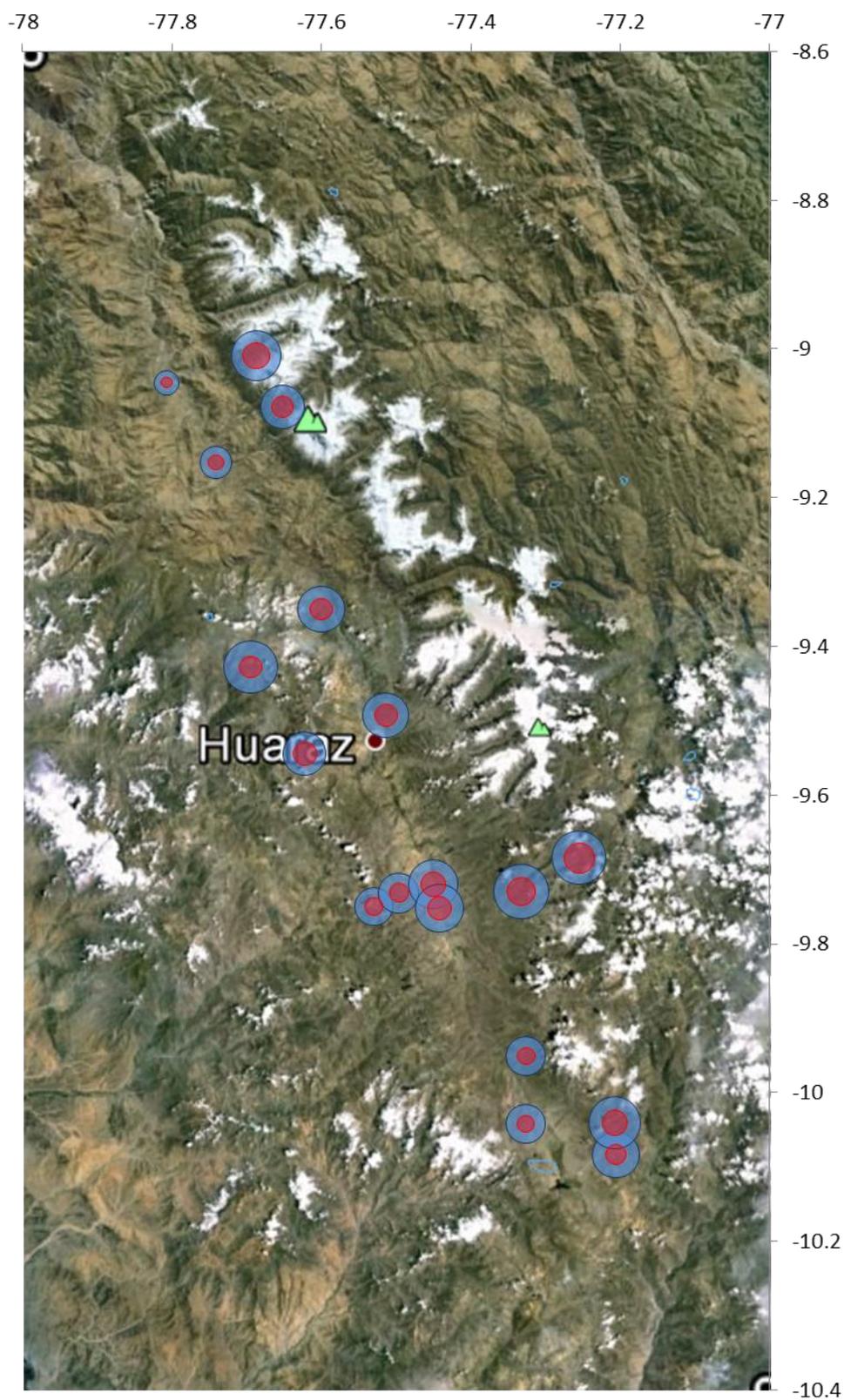


Figura 5: Sumas de precipitación de abril a septiembre (color rojo) y en octubre a marzo (color azul). El monto de precipitación es representado por el área del círculo. En cada estación meteorológica se mide menos precipitación durante el invierno austral (abril a septiembre).

4.1 Perfiles

En los siguientes subcapítulos se analizan los datos de cuatro grupos de estaciones ubicadas en la cercanía de Caraz, Huaraz, Recuay y Cátac. Los grupos son identificados y nombrados según la localidad más cercana como se observa en Figura 6. La Laguna 513 se encuentra entre las estaciones de los conjuntos Caraz y Huaraz.

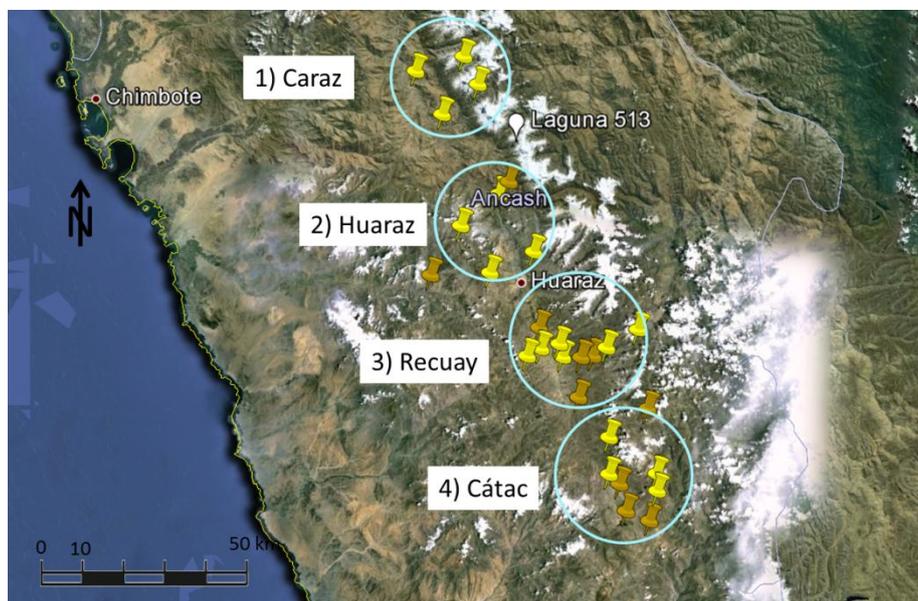


Figura 6: Mapa de GoogleEarth mostrando la ubicación de los perfiles analizados en los próximos subcapítulos. La Laguna 513 se encuentra entre el área de Caraz y Huaraz. Las estaciones con un color naranja no han sido utilizadas para el análisis de precipitación debido a sus series de tiempo cortas o incompletas.

1) Caraz

La estación meteorológica Caraz está ubicada en el valle a orillas del río Santa, a una altura de 2286 msnm. A una distancia de aproximadamente 14 km se encuentra la estación de Parón a 4185 msnm y aproximadamente 14 km valle arriba se encuentra la estación Yungay y en el flanco oriental la estación Llanganuco. Aquellos dos perfiles atravesando el valle principal se parecen no sólo en las elevaciones de las estaciones sino también en la topografía como se aprecia en Figura 7. En cada perfil hay una estación en el valle, acompañada de una segunda estación ubicada en una subcuenca afluyente. Ambas cuencas desembocan en el valle principal del río Santa y están bordeadas por abruptas pendientes y cumbres por encima de 6000 msnm.



Figura 7: GoogleEarth mapa de las estaciones en Caraz y Yungay en el valle y de las estaciones Parón y Llanganuco en la Cordillera Blanca. El mapa muestra que la topografía y la elevación de los dos perfiles son semejantes. Las estaciones son parte de la red de monitoreo de la Unidad de Glaciología.

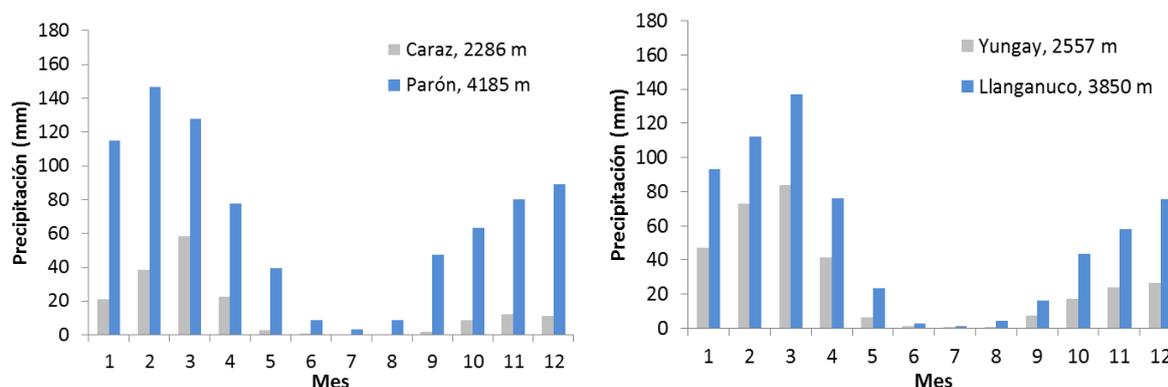


Figura 8: Montos de precipitaciones medias mensuales registradas en las estaciones pluviométricas Caraz y Parón entre 1953 y 1999 (izquierda) y en las estaciones Yungay y Llanganuco entre 1953 y 1999 (derecha). Las figuras muestran que la precipitación en la Cordillera Blanca es aproximadamente el doble que en el valle.

En Figura 8 se observa que la precipitación registrada en estaciones situadas en elevaciones altas es marcadamente más alta que en el valle principal. En ambos perfiles se aprecia que los promedios mensuales son máximos entre enero y marzo. En invierno austral (Junio a Agosto), las precipitaciones en el valle son muy bajas y casi despreciables, mientras que en los valles de la Cordillera Blanca – especialmente en la estación Parón – son de mayor frecuencia.

2) Huaraz

Registros de dos estaciones en el valle están disponibles para analizar perfiles para la cercanía de Huaraz. Para el perfil de Anta habría una estación adicional en el este, en la falda de la Cordillera Blanca a una elevación de 2895 msnm que no ha sido incluida al análisis. En comparación del perfil en Caraz, las estaciones elevadas se encuentran en las laderas de la Cordillera Negra y permiten obtener un vistazo a como se distribuye la precipitación este lado del valle. El mapa de GoogleEarth en Figura 9 muestra la ubicación de las estaciones en la cuenca del río Santa.



Figura 9: Mapa obtenido de GoogleEarth mostrando la posición de las estaciones alrededor de Huaraz. Mientras las estaciones Anta y Huaraz se encuentran en el valle, las dos estaciones Quitacocha y Punta Callán se encuentran en la ladera de la Cordillera Negra sobre 4000 msnm. Aquellas estaciones son representadas por un color verde. Las estaciones son parte de la red de monitoreo de la Unidad de Glaciología.

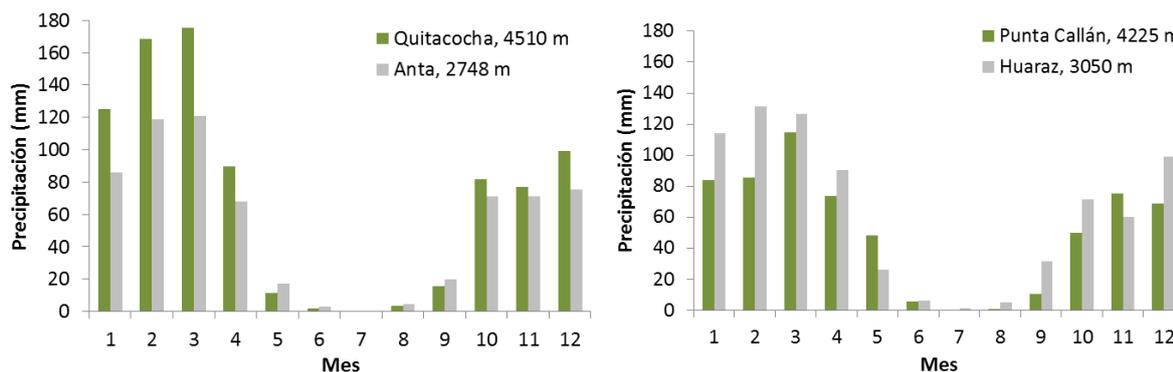


Figura 10: Montos de precipitaciones medias mensuales registradas en las estaciones pluviométricas Quitacocha, Anta y Chancos entre 1979 y 1991 (izquierda) y en las estaciones Punta Callán y Huaraz entre 1982 y 1999 (derecha). La precipitación medida por las dos estaciones en el valle es semejante, mientras la precipitación en las dos estaciones por encima de 4000 msnm muestran grandes diferencias, sobre todo entre enero a abril. Es decir que no hay un gradiente de precipitación único y homogéneo en el perfil de Huaraz.

La precipitación medida en el flanco de la Cordillera Negra no muestra un gradiente uniforme. La Figura 10 muestra que la precipitación mensual en la estación Quitacocha es mayor que en el valle. En el segundo perfil la precipitación de la estación Punta Callán es menor que en el valle.

La topografía de los dos perfiles es muy semejante y las dos estaciones Punta Callán y Quitacocha están separadas por sólo 15 km. Aquella gran diferencia en la precipitación resultada plausible tomando en cuenta estaciones del SENAMHI ubicadas alrededor de la estación Quitacocha que también muestran grandes variabilidades entre sí (la Figura no está incluida al presente informe).

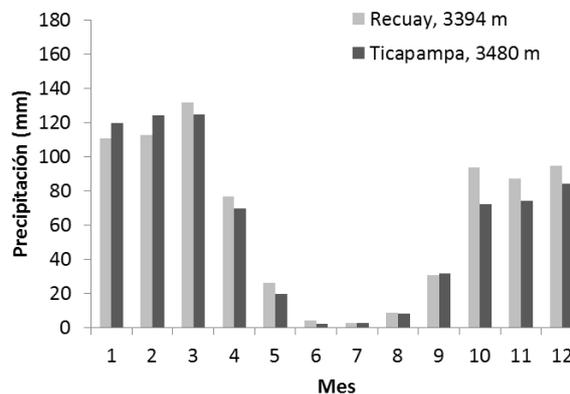
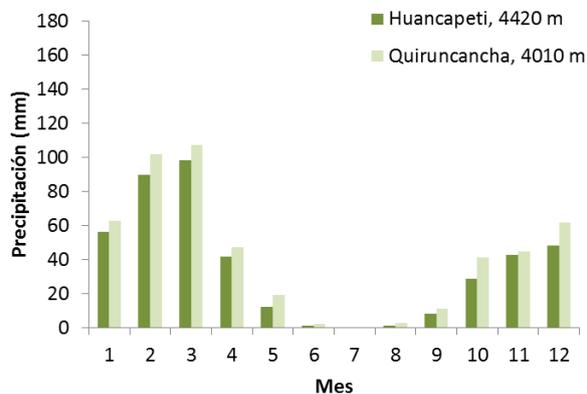
Una explicación detallada requiere mayor análisis de la precipitación en la Cordillera Negra, que no será parte de este informe. Lo que se puede concluir basándose en aquellos datos es que la precipitación suele mostrar gran variabilidad dentro de un área relativamente pequeño de 20 km.

3) Recuay

La gran densidad de estaciones en la cercanía de Recuay permite distinguir entre precipitación en la Cordillera Blanca, en la Cordillera Negra y en el valle en un perfil atravesando el valle principal. En ambos lados del perfil se dispone de datos de estaciones sobre 4400 msnm. Figura 11 muestra la distribución de las estaciones a lo largo del perfil transversal.



Figura 11: Mapa de GoogleEarth de las estaciones en el perfil cerca de Recuay. Estaciones en la ladera de la Cordillera Negra son representadas por un color verde, estaciones en la Cordillera Blanca con un color azul y estaciones en el valle con un color gris. La gran densidad de estaciones permite obtener un perfil de precipitación atravesando el valle del río Santa. Las estaciones son parte de la red de monitoreo de la Unidad de Glaciología.



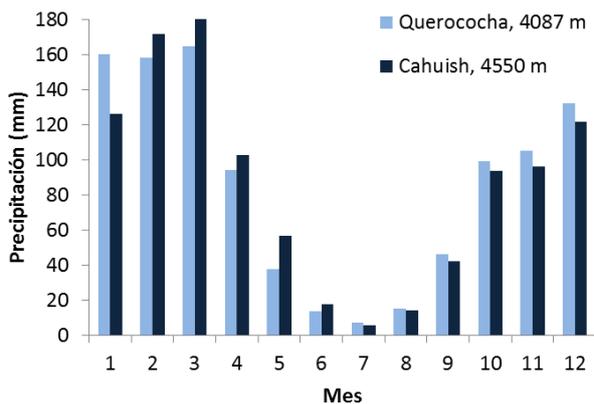


Figura 12: Montos de precipitaciones medias mensuales registradas en las estaciones Huancapeti y Quiruncancha (izquierda, arriba), Recuay y Ticapampa (derecha, arriba) y Querococha y Cahuish (Izquierda abajo). La precipitación en la Cordillera Negra es menor que en el valle principal, mientras que en la Cordillera Blanca se mide la mayor precipitación del perfil.

Como lo muestra la Figura 12, los valores mensuales son más altos para la Cordillera Blanca, seguido por el valle principal. En la Cordillera Negra hay menos precipitación. En el invierno austral (entre Junio y Agosto) predominan condiciones de sequedad. En comparación del área Huaraz, las dos estaciones en la Cordillera negra muestran precipitaciones semejantes. La precipitación en la Cordillera Blanca excede aquella de la Cordillera Negra por aproximadamente el doble.

4) Catac

En la parte alta de la cuenca del río Santa se encuentran varias estaciones de las cuales cuatro se seleccionaron para un breve análisis (Figura 13). Las estaciones no incluidas en el análisis no entregan un set de datos para más de 10 años. La estación Recreta se encuentra en el valle que se abre más arriba de la estación Recreta para formar un valle alto y plano. Las estaciones Collota, Punta Morón y Yanacocha están ubicadas en las laderas de la Cordillera Blanca, aunque la estación Collota se encuentre más abajo que Recreta. Las estaciones Yanacocha y punta Morón están separadas por una distancia de sólo 5 km y una altura de 60 m.

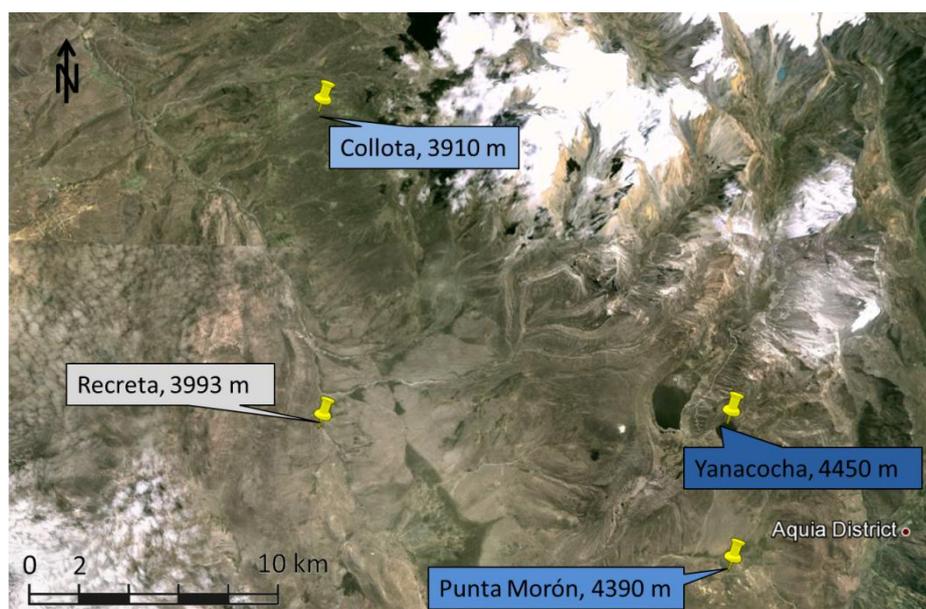


Figura 13: Mapa de GoogleEarth mostrando las estaciones con datos disponibles para la parte alta del valle principal. Colores azules representan estaciones en la Cordillera Blanca. La estación Collota está ubicada más abajo que la estación

Recreta que se encuentra en el valle. Las dos estaciones Yanacocha y Punta Morón se encuentran en alturas elevadas y están separadas por sólo 5 km. Las estaciones son parte de la red de monitoreo de la Unidad de Glaciología.

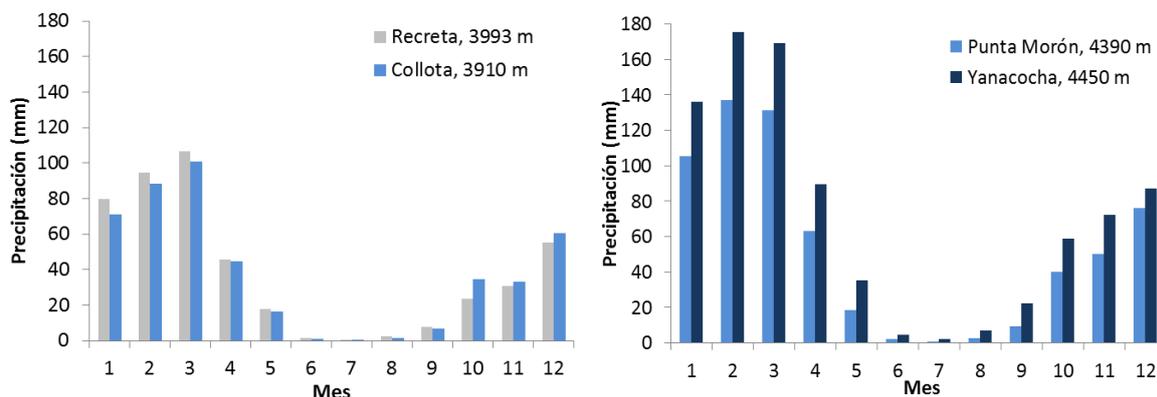


Figura 14: Montos de precipitaciones medias mensuales registradas en las estaciones Recreta y Collota (izquierda) y Punta Morón y Yanacocha (derecha). El promedio se ha calculado con datos del periodo 1964 a 1998. Las estaciones Recreta y Collota que están situadas debajo de 4000 msnm muestran menor precipitación que las dos estaciones en la montaña. Sobre todo la estación Yanacocha mide marcadamente más precipitación que las estaciones en el valle.

Figura 14 muestra la precipitación en la parte alta de la cuenca del río Santa. Como visto anteriormente, la precipitación en grandes elevaciones excede aquella medida en el valle. Sin embargo la estación Collota – ubicada en la ladera de la Cordillera Blanca – mide una precipitación semejante a aquella en el valle. Hay que destacar que la elevación de las dos estaciones Recreta y Collota es similar y por lo tanto se supone que la elevación influye el monto de precipitación.

Un hecho interesante es la gran variabilidad entre las dos estaciones Punta Morón y Yanacocha a pesar de que estén separadas por tan sólo 5 km. Como ya visto en Figura 10, la precipitación suele mostrar gran variabilidad espacial lo cual podría explicar los diferentes montos entre Punta Morón y Yanacocha.

4.2 Perfil general

Para el siguiente análisis se eligieron estaciones con una serie de datos disponible para al menos 10 años. La Figura 15 entrega información sobre una posible dependencia de la precipitación de i) la elevación y ii) de la zona. La red de estaciones se puede dividir en tres zonas de estaciones en la Cordillera Negra, en el valle y en la Cordillera Blanca.

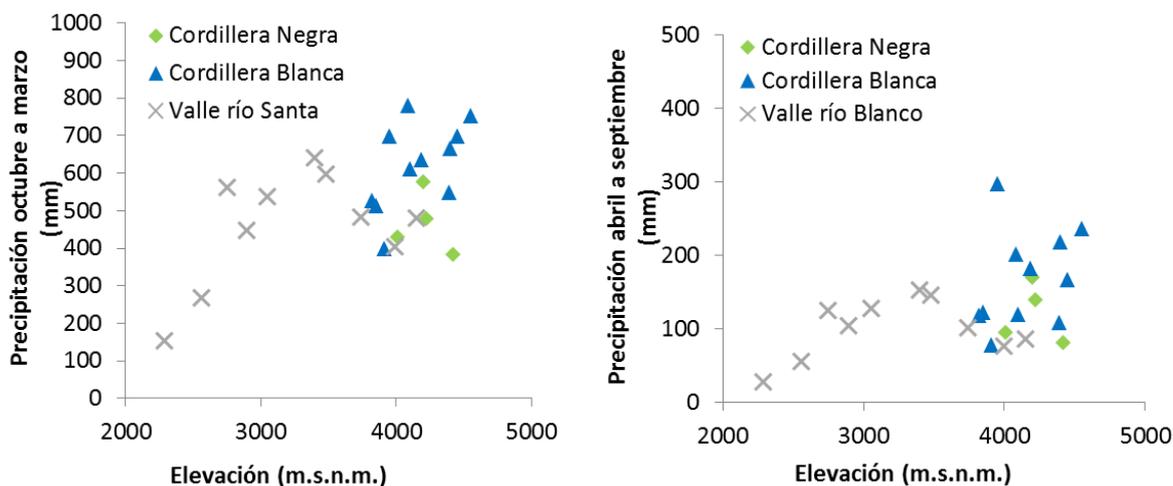


Figura 15: Suma de la precipitación estival entre octubre y marzo (izquierda) e invernal entre abril y septiembre (derecha) en función de la elevación. La precipitación en verano es marcadamente más alta que en invierno. En las estaciones del valle río Santa y de la Cordillera Blanca se aprecia un gradiente positivo en la precipitación en función de la elevación.

A lo largo del valle principal se observa un gradiente de precipitación. A medida que se aumenta la elevación, la precipitación se vuelve más pronunciada. Debido a la orientación del valle del río Santa, la precipitación aumenta de norte a sur.

La situación en la Cordillera Blanca es similar, pero con un gradiente más pronunciado que en el valle. Sin embargo la dispersión es grande y sería interesante investigar este gradiente mediante más mediciones. Para la Cordillera Negra es difícil concluir si hay un gradiente en precipitación. Las cuatro estaciones con datos disponibles no permiten dibujar un gradiente significativo y se necesitan más datos para confirmar una relación entre precipitación y elevación. Figura 15 también muestra que la precipitación en los meses abril a septiembre es marcadamente más escasa que en verano.

Las siguientes figuras (Figura 16 y Figura 17) muestran las precipitaciones temporales según ubicación y elevación. En Figura 17 se calcula el promedio multianual de precipitación temporal para los siguientes cuatro conjuntos de estaciones: Estaciones en la Cordillera Negra, en el valle, en la Cordillera Blanca inferior y superior a 4000 m. La temporada estival se extiende de octubre a marzo, mientras la temporada invernal representa la precipitación entre abril a septiembre.



Figura 16: Vista en corte de la elevación del valle del río Santa en la altura de Carhuaz y la Laguna 513. En el oeste la ladera de la Cordillera Negra sube a aproximadamente 4500 msnm, mientras que la Cordillera Blanca es más alta con elevaciones superior a 5000 msnm

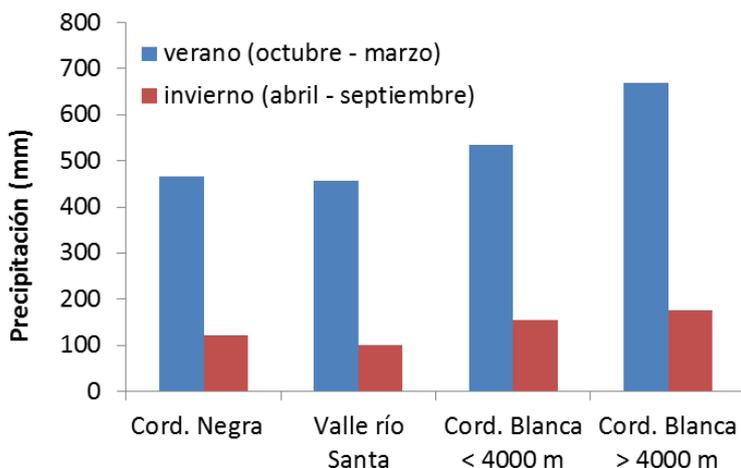


Figura 17: Distribución de precipitación como función de la ubicación y elevación. La precipitación registrada en la Cordillera Blanca se divide en dos clases sobre y debajo de 4000 msnm La precipitación es más alta medida en estaciones altas de la Cordillera Blanca. El valle del río Santa es el área más seca y en la Cordillera Negra la precipitación aumenta en comparación del valle principal. La precipitación en verano es marcadamente mayor que en invierno, es decir la precipitación invernal consiste en un porcentaje de aproximadamente 15 a 30% de la precipitación estival.

Los montos de precipitación en Figura 17 muestran que la precipitación en la Cordillera Blanca aumenta perceptiblemente con la elevación. El monto medio de la precipitación medida en la Cordillera Negra es semejante a aquella medida en el valle del río Santa, a pesar de que las estaciones se encuentren a mayores elevaciones. Como sólo se dispone de cuatro estaciones de la red de la Unidad de Glaciología, se requieren más datos para analizar la precipitación en la Cordillera Negra. El presente estudio se concentra en la Cordillera Blanca y no se investiga más en detalle la situación climática en el oeste del río Santa.

4.3 Tendencias

Mediciones de precipitación durante un mínimo de 20 años existen de cinco estaciones del SENAMHI ilustradas en Figura 18. Esas mediciones sirven para investigar las series de tiempo de la precipitación e identificar posibles tendencias en las últimas décadas.

Chavín 1 y Chavín no corresponden a una sola estación. Al cambiar la posición de Chavín 1, la nueva estación ha sido renombrada a “Chavín”, por lo cual las series de Chavín 1 y Chavín no se entrecruzan. Sin embargo, no se pueden unir los registros de las estaciones y por lo tanto se analizan por separado.

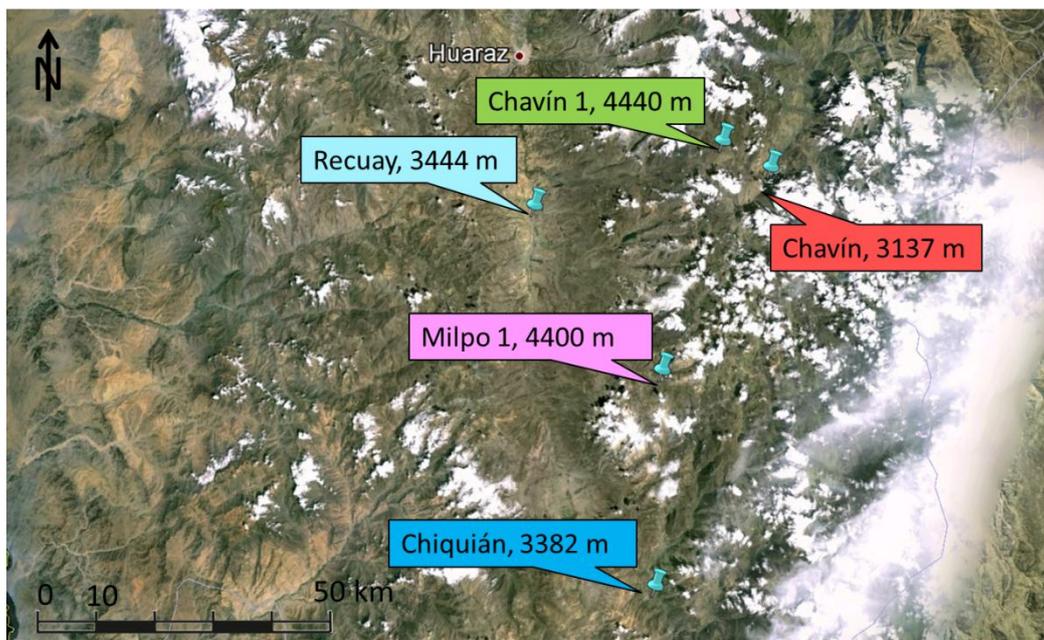


Figura 18: Mapa de GoogleEarth mostrando la ubicación de las estaciones del SENAMHI con mediciones de precipitación diaria durante mínimo 20 años. Los colores corresponden a aquellos de la siguiente **Figura 19**. Los registros de Chavín 1 y Chavín corresponden a una sola estación que ha sido cambiado de lugar. Al cambiar la posición de Chavín 1, el nombre ha sido cambiado a Chavín, por lo cual las series de Chavín 1 y Chavín no se entrecruzan.

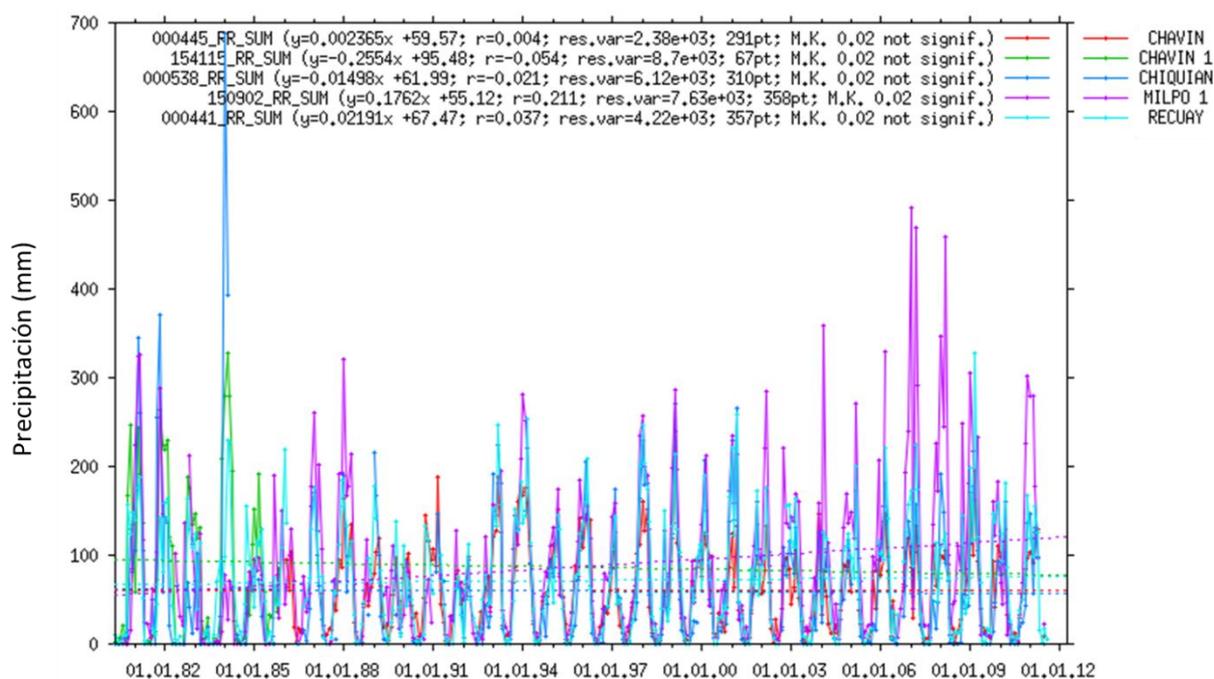


Figura 19: Serie de tiempo de precipitación mensual entre 1980 y 2012. No se observan tendencias significativas, con excepción de la estación Milpo 1 que muestra una tendencia positiva. Sin embargo, esta tendencia aparece principalmente a partir del año 2000. Las estaciones son parte de la red de monitoreo del SENAMHI. La Figura se generó a través del portal de datos.

Las estadísticas en Figura 19 no muestran tendencias significativas en la precipitación durante los últimos 30 años. Una excepción es la precipitación medida por la estación Milpo 1 con una tendencia positiva que es significativo. Sin embargo, el aumento se observa sobre todo a partir del año 2000. Entre 1980 y 2000 hay una tendencia levemente positiva, pero no significativa.

Esta información se contradice con los datos de TRMM. Según los datos adquiridos por el producto TRMM, la precipitación disminuye en los últimos 10 años los puntos de la maya más cercanos a la estación Milpo 1. Para encontrar posibles errores (valores atípicos o artefactos) se necesita mayor análisis de las mediciones en la estación Milpo 1.

4.4 Distribución de eventos extremos

Una distribución de eventos extremos se realiza mediante un análisis de frecuencia que es un método estadístico para examinar eventos extremos de precipitación. Es un método ampliamente usado en el estudio de eventos hidrológicos tales como crecidas, tormentas y sequías. El objetivo de este método es definir la relación entre el monto de precipitación medido, el periodo de retorno y la correspondiente probabilidad de excedencia de un cierto evento.

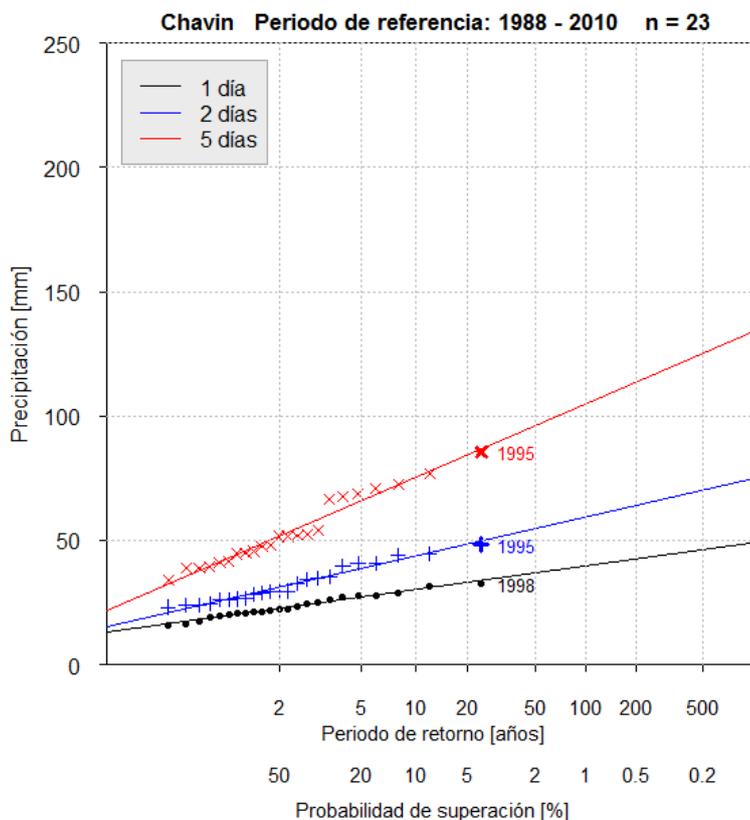
En el presente trabajo se han construido diagramas de frecuencia para examinar eventos extremos en la Cordillera Blanca. Se requiere datos de una estación pluviométrica con una serie de tiempo estacionaria que extienda a por lo menos 30 o 40 años. Para cada año se define el valor máximo diario, es decir el valor de precipitación del día más lluvioso. Se descartan los años con un registro incompleto. Los valores elegidos se ordenan según rango y se integran al diagrama semilogarítmico usando una función de distribución (en el presente trabajo se ha utilizado la distribución de Gumbel). El eje de abscisas es logarítmico para mostrar la distribución como línea recta. Una línea recta por los puntos permite extrapolar la relación entre precipitación y periodo de retorno. A través esta relación

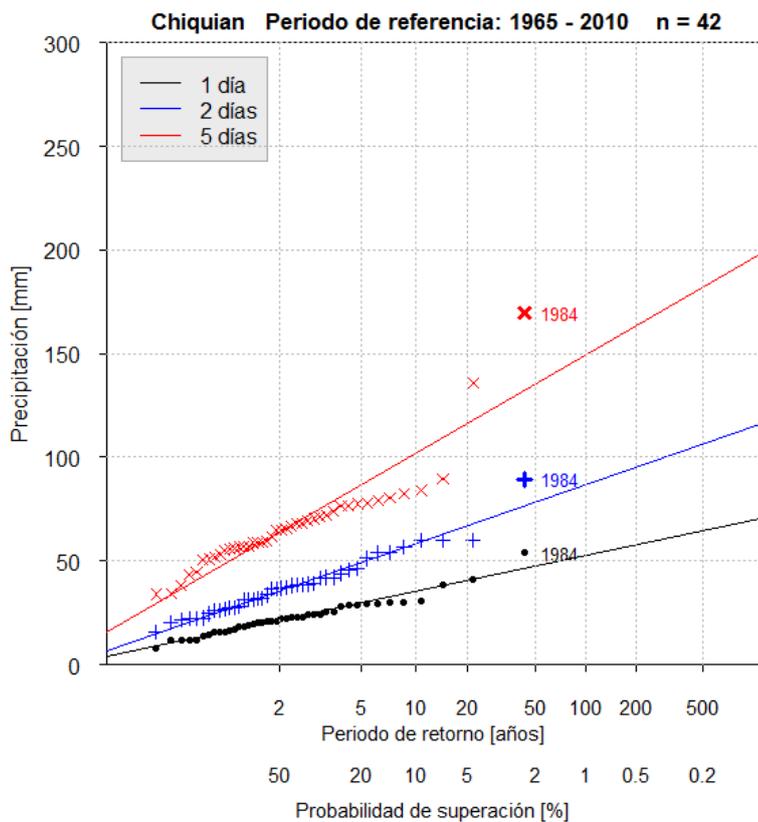
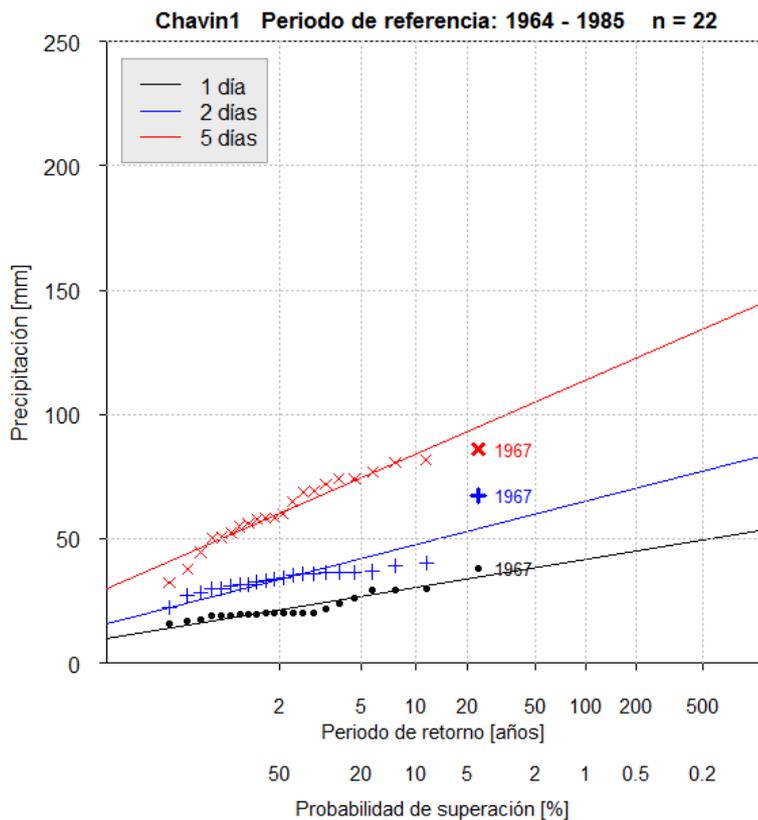
es posible estimar eventos extremos con mayor periodo de retorno o menor probabilidad de excedencia.

Aparte de los valores máximos diarios, se construye también un análisis de frecuencia con valores máximos registrado durante dos o cinco días seguidos. Eso permite estimar la probabilidad de eventos de alta precipitación durante varios días. La idea de considerar varios días es que un tiempo extenso con varios días lluviosos puede ser problemático aunque los valores máximos diarios del mismo periodo no resulten sobresalientes en la serie de tiempo.

Para generar un diagrama de frecuencia se requiere un periodo de mediciones suficientemente extenso y completo. Las series de tiempo de las tres estaciones Chiquián, Chavín 1 y Recuay (de la red de estaciones del SENAMHI) son aptas para conducir un análisis de frecuencia. Sin embargo el periodo de referencia de Chavín 1 incluye sólo 22 años que tiende a ser un periodo muy corto para un análisis de frecuencia y hay que interpretarlo con cuidado.

Esas curvas permiten estimar el periodo de retorno de un cierto evento. Para dimensionar obras hidráulicas como puentes, sistemas de drenaje, bocatomas o canales se requiere estimar el caudal que corresponde a cierta probabilidad de excedencia. Con un diagrama de frecuencia se puede estimar la precipitación con un cierto periodo de retorno o probabilidad de excedencia. Sin embargo el diagrama de frecuencia llega a un límite si la serie de tiempo es muy corta. Para una obra se calcula con frecuencias de retorno de por ejemplo 100 o 500 años, que son difíciles de estimar si las mediciones se extienden a sólo veinte o treinta años.





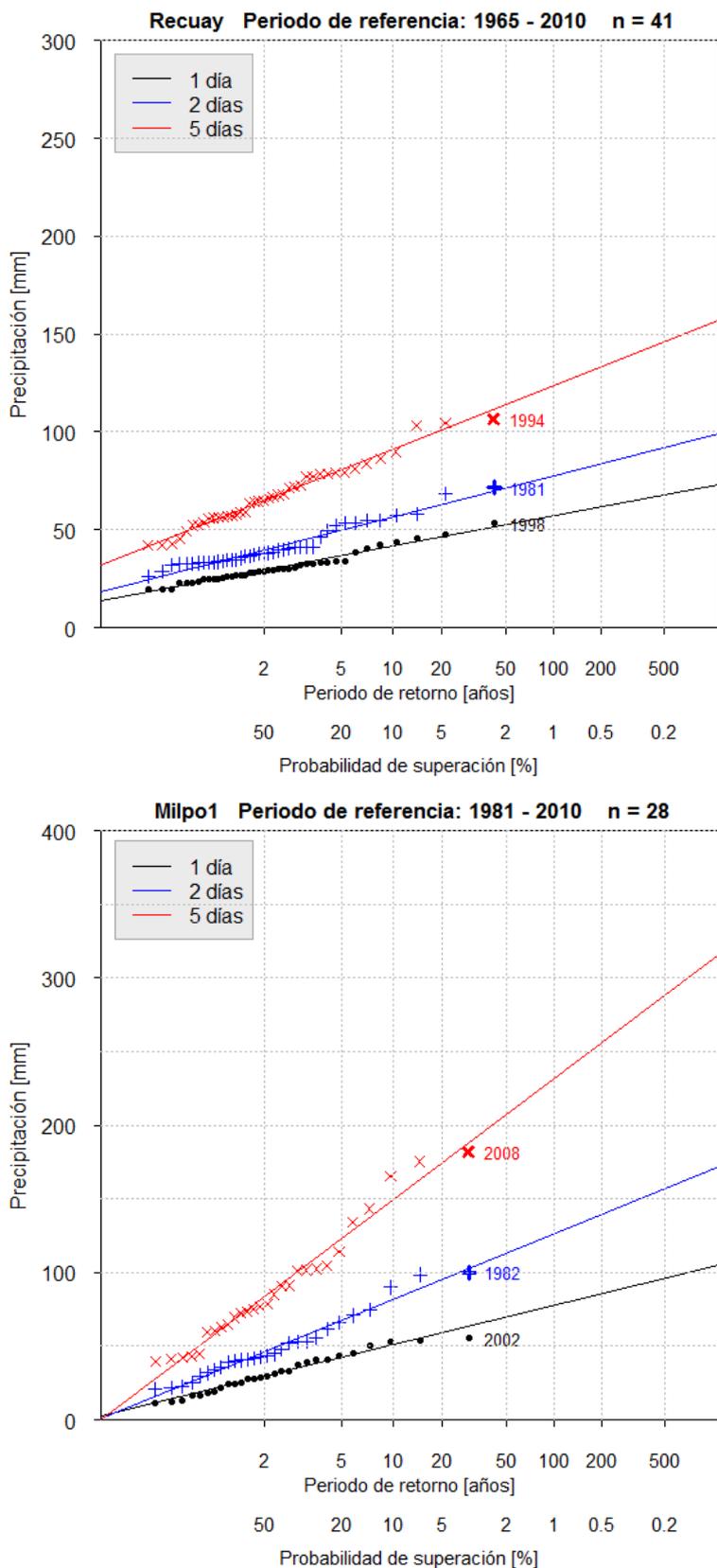


Figura 20: Diagramas de frecuencia para valores máximos diarios registrados durante 1, 2 o 5 días. Los diagramas se han realizado utilizando registros de precipitación de las estaciones Chavín, Chavín 1, Chiquián, Recuay y Milpo 1.

El análisis de eventos extremos de la estación Chiquián muestra que para el año 1984 se ha registrado un valor muy alto para un periodo de retorno de aproximadamente 40 años. Este extremo aparece sobre todo en los valores máximos de 2 y 5 días. Con la línea de regresión se sobreestimaría el periodo de retorno de este evento llegando a aproximadamente 400 años en lugar de 50. Un evento extremo puede aumentar marcadamente la pendiente de la línea de regresión.

Todo eso hay que tomar en cuenta antes de aplicar el análisis de frecuencia para dimensionar una obra o estimar una crecida. Sobre todo en el análisis de Chavín hay que tener cuidado debido a la serie de datos corta (22 años).

5 Análisis de la temperatura

Para el análisis de la temperatura se han utilizado datos del SENAMHI, así como de la Unidad de Glaciología. La temperatura del aire depende fundamentalmente de la altitud y sería interesante analizar patrones de temperatura en función de la elevación. El presente trabaja enfoque solamente en las tendencias de temperatura.

El capítulo se divide en dos partes. Para la primera parte se utilizaron registros de temperaturas (mínimas, máximas y medias) mensuales del aire para el periodo de 1965 a 2012. Es de resaltar que hay sólo dos estaciones disponibles para registros largos de temperatura sobre 3000 msnm. La segunda parte enfoca tendencias en la temperatura del aire durante las últimas dos décadas. Para el dicho periodo existe una variedad de datos disponibles de más de 10 estaciones en la cuenca del río Santa.

5.1 Tendencias de temperatura en los últimos 40 años

Para analizar una tendencia en la temperatura se requiere una serie de tiempo de temperatura. Para la zona de estudio existen dos estaciones superiores a 3000 msnm con un largo periodo de mediciones. Aquellas estaciones Recuay y Chiquián son parte de una red de monitoreo del SENAMHI y poseen datos disponibles a partir de 1965 (Figura 21). Los datos disponibles son temperatura máxima y mínima que además permiten calcular una temperatura media.

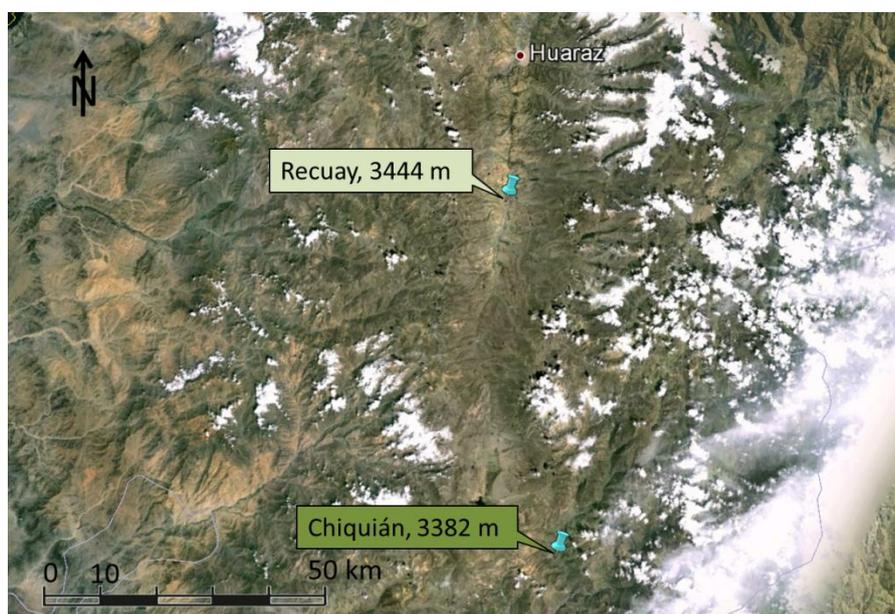


Figura 21: Mapa de GoogleEarth mostrando la ubicación de las estaciones Chiquián y Recuay del SENAMHI. De todas las estaciones en la región situadas sobre 3000 msnm, aquellas son las únicas con información disponible para un periodo extenso de más de 40 años. Las estaciones son parte de la red de monitoreo del SENAMHI.

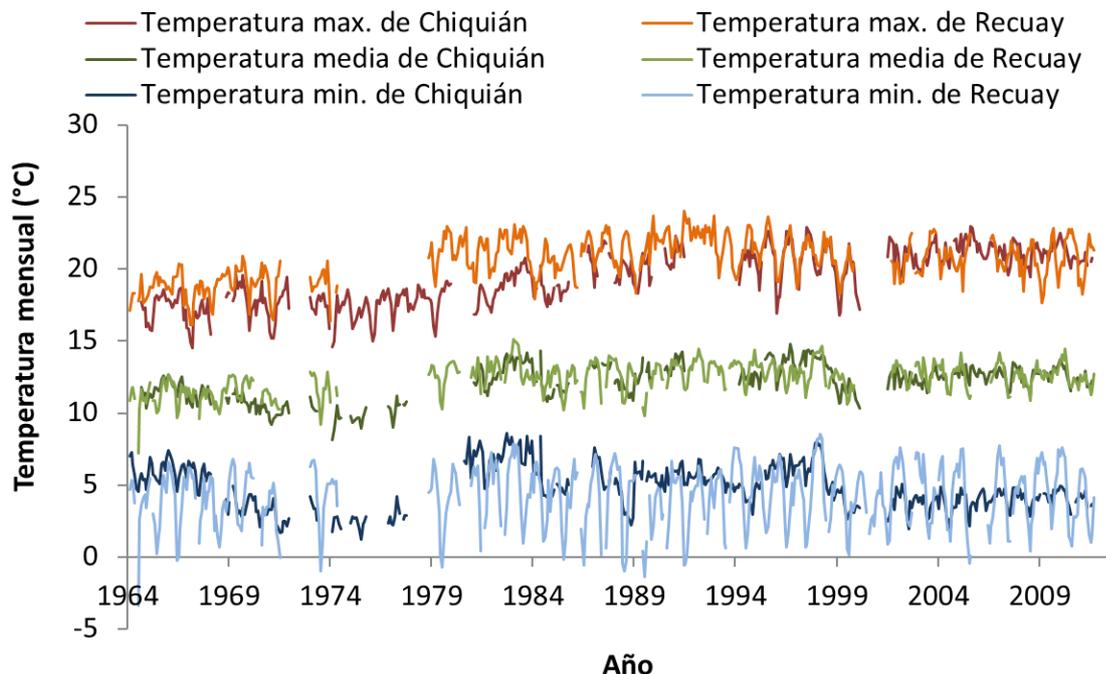


Figura 22: Temperatura mensual máxima y mínima y el promedio calculado para las estaciones Chiquián y Recuay. El periodo de mediciones se extiende a más de 40 años que permite estimar la tendencia de temperatura en las últimas cuatro décadas. Entre aproximadamente 1975 y 1980 se aprecia un aumento significativo en la temperatura del aire. Sin embargo, después de aproximadamente 1985 la temperatura no muestra una tendencia significativa. Lo mismo se observa en la temperatura máxima. La temperatura mínima en Chiquián disminuye en más o menos las últimas tres décadas en modo significativo.

La Figura 22 muestra las series de tiempo de ambas localidades con datos disponibles a partir de 1965. Entre aproximadamente 1975 y 1980 se observa un incremento en las temperaturas de aire. La temperatura de Chiquián disminuye entre alrededor de 1965 y 1975, por lo cual se observa un salto aún más grande entre aprox. 1975 y 1980.

A partir de 1985, los datos no muestran tendencias significativas en la temperatura media. A pesar de que haya variaciones interanuales, no es posible constatar un cambio en la temperatura media mensual. También la temperatura máxima pertenece al mismo nivel. Una excepción es la temperatura mínima mensual de la estación Chiquián que muestra una tendencia negativa significativa en las últimas tres décadas. Mientras la temperatura máxima ha aumentado, la temperatura mínima disminuyó en los últimos 40 años.

5.2 Tendencias de temperatura en los últimos 20 años

Para estimar los impactos del cambio climático en el clima de la Cordillera Blanca, es importante entender las tendencias de temperatura en el pasado reciente de los últimos 20 años. Para cuatro estaciones de la red de monitoreo del SENAMHI existen registros en las últimas dos décadas. Sin embargo, mediante los datos disponibles de las seis estaciones de la Unidad de Glaciología es sólo posible estimar una tendencia en los últimos 10 años. Como las mediciones se iniciaron a partir de 2002, no es posible estimar una tendencia más extensa. La Figura 23 muestra la ubicación de las estaciones de la Unidad de Glaciología midiendo temperatura promedio a nivel diario.

Las tres estaciones Artesonraju, Artesoncocha y Arteson-Plataforma se encuentran cerca o sobre un glaciar a una elevación superior a 4000 msnm. Debido a la topografía y elevación semejante, es posible utilizar esos datos para estimar la tendencia de temperatura de la Laguna 513.

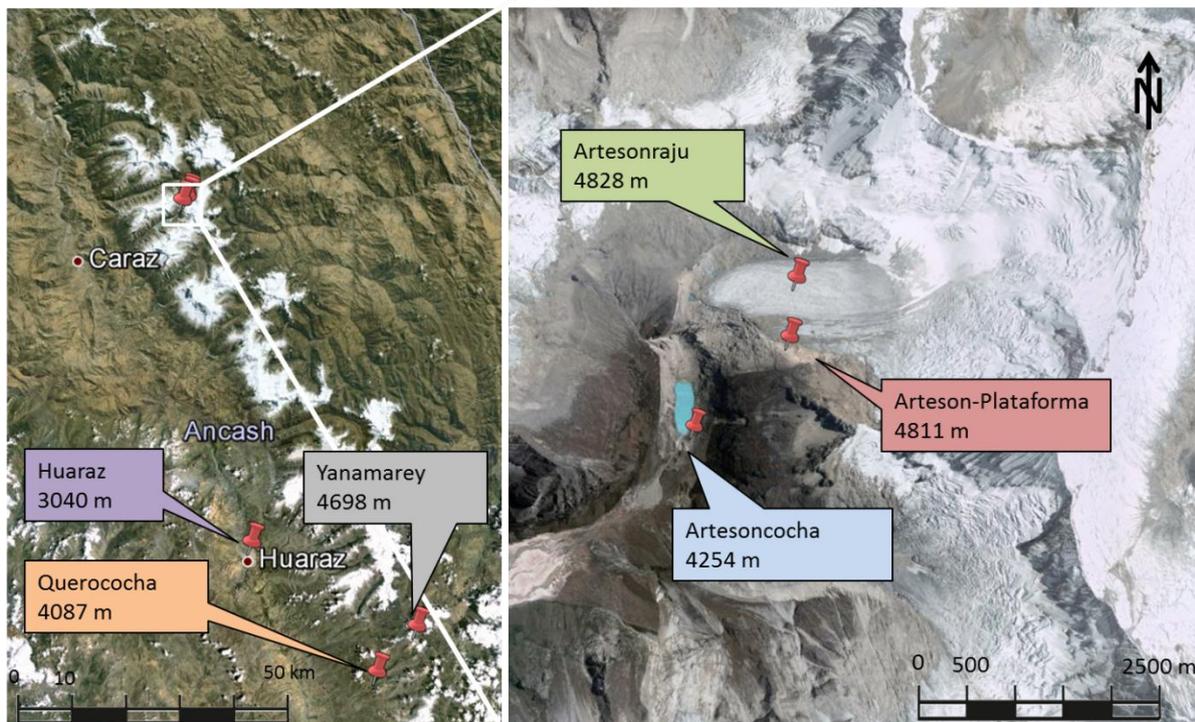


Figura 23: Mapa de GoogleEarth mostrando la ubicación de las estaciones de la Unidad de Glaciología. Los colores corresponden a aquellos de la siguiente **Figura 24**. Las tres estaciones Artesoncocha, Arteson-Plataforma y Artesonraju (en el glaciar) se encuentran cerca de la Laguna Parón. Los colores corresponden a aquellos de la siguiente **Figura 24**.

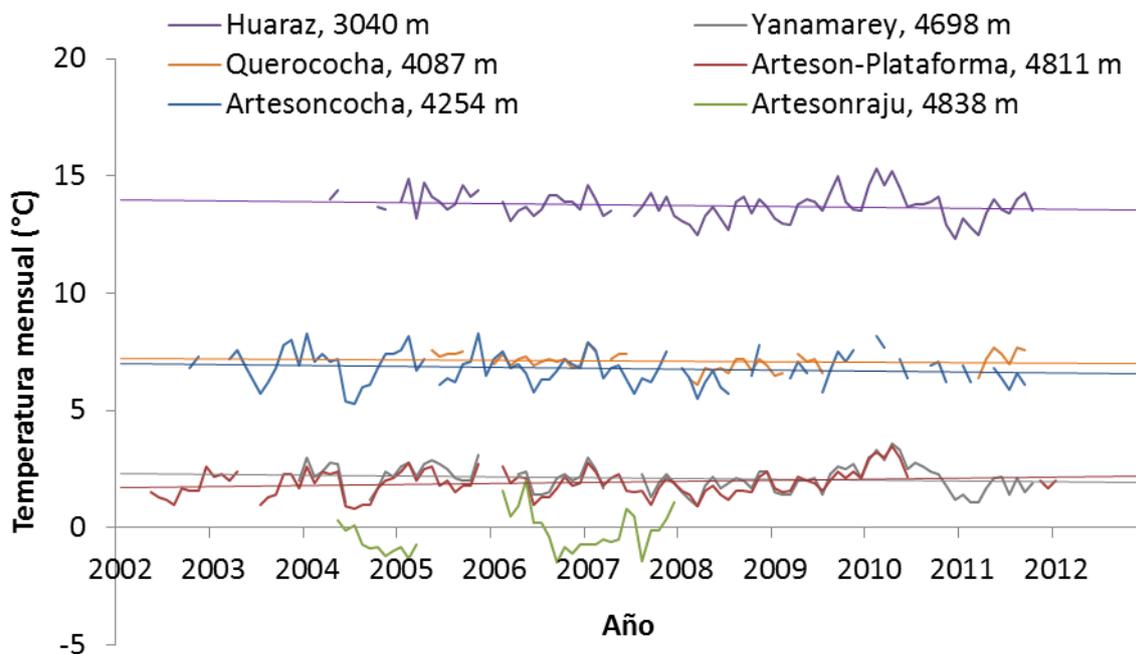


Figura 24: Temperatura mensual de seis estaciones meteorológicas en el periodo entre 2002 y 2012. Ninguna de las estaciones muestra una tendencia significativa en los registros de temperatura. Para la estación Artesonraju los datos disponibles incluyen menos de cuatro años y por lo tanto no es posible estimar una tendencia.

Tabla 2: Detalle sobre las tendencias lineares para las seis estaciones de la Unidad de Glaciología entre 2002 y 2012

	Temperatura media
Artesoncocha	+ no signif.
Arteson-Plataforma	+ no signif.
Artesonraju	+ no signif.
Huaraz	- no signif.
Yanamarey	- no signif.
Querococha	- no signif.

Las mediciones realizadas en las estaciones escogidas parecen ser homogéneas, con la excepción de la estación Artesonraju que entrega solamente información entre 2004 y 2007 y no es apta para mayor análisis. Las series de tiempo parecen ser coherentes, mostrando historiales muy similares entre sí (Figura 24).

Las dos estaciones Arteson-Plataforma y Artesonraju están ubicadas a una distancia de sólo 500 m. Mientras que Artesonraju está instalada en el glaciar, la estación Arteson-Plataforma se encuentra en aproximadamente la misma elevación, pero en el borde del glaciar en una terraza de roca. Los pocos datos de la estación en el glaciar muestran temperaturas más bajas y no muy realistas comparando la serie de tiempo con la estación vecina.

Con los datos disponibles de la Unidad de Glaciología se puede concluir que en la última década no aparece una tendencia significativa en la temperatura medida (Tabla 2).

La siguiente Figura 25 muestra la ubicación de las estaciones del SENAMHI con datos disponibles entre 1992 y 2012.

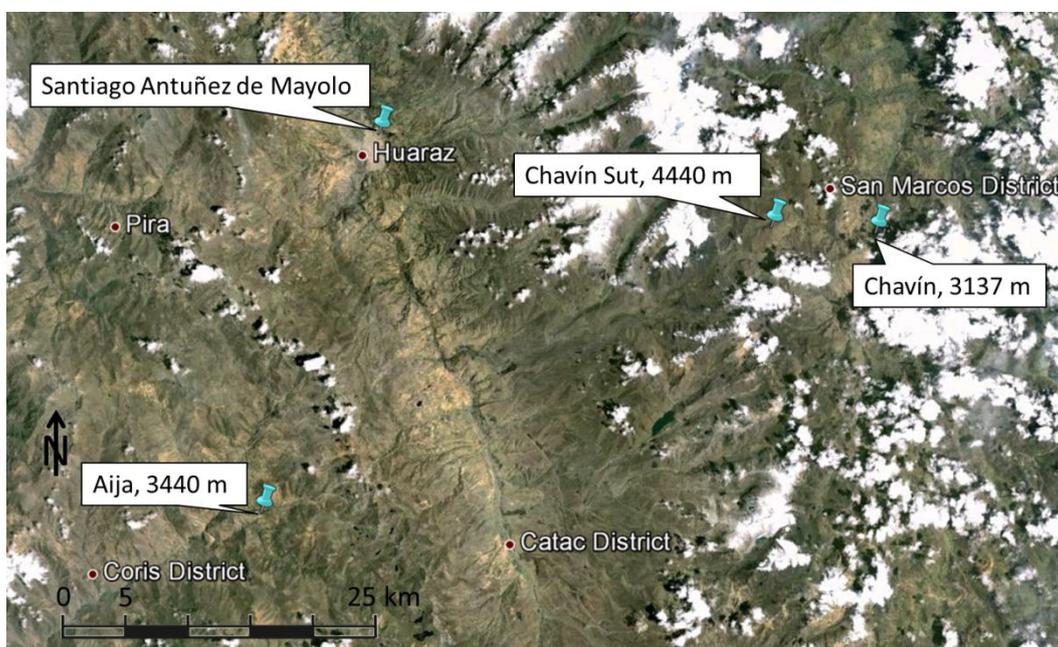
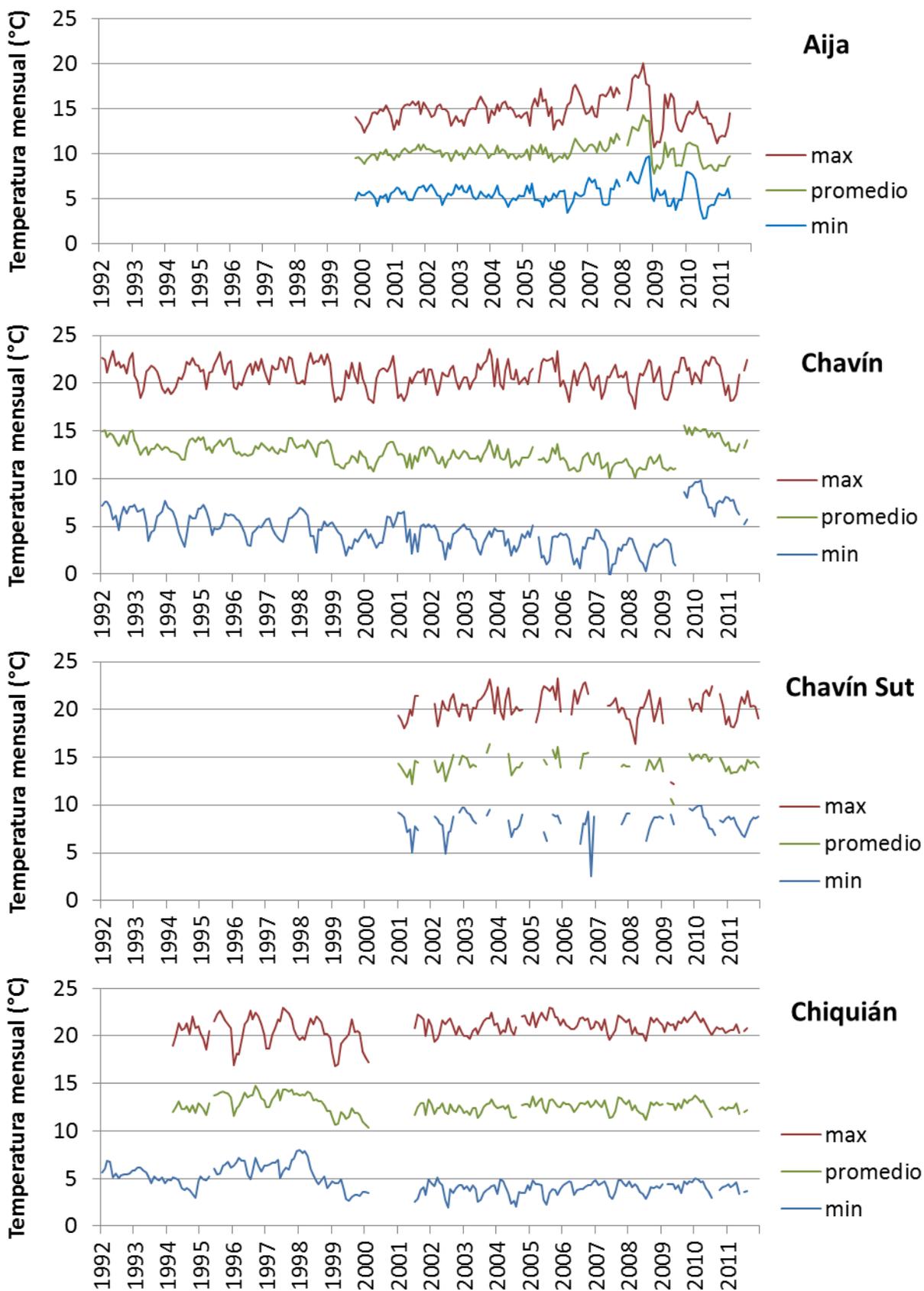


Figura 25: Mapa de GoogleEarth mostrando la ubicación de las estaciones con datos de temperatura disponible desde hace aproximadamente 20 años. Las estaciones Chiquián y Recuay analizadas en el capítulo anterior no se incluyen en las siguientes figuras. Las estaciones Chavín Sut y Chavín se encuentran al este de las cumbres de la Cordillera Blanca. La estación Aija está instalada en la Cordillera Negra y la estación Santiago Antúñez de Mayolo en el valle río Santa. Las estaciones son parte de la red de monitoreo del SENAMHI.



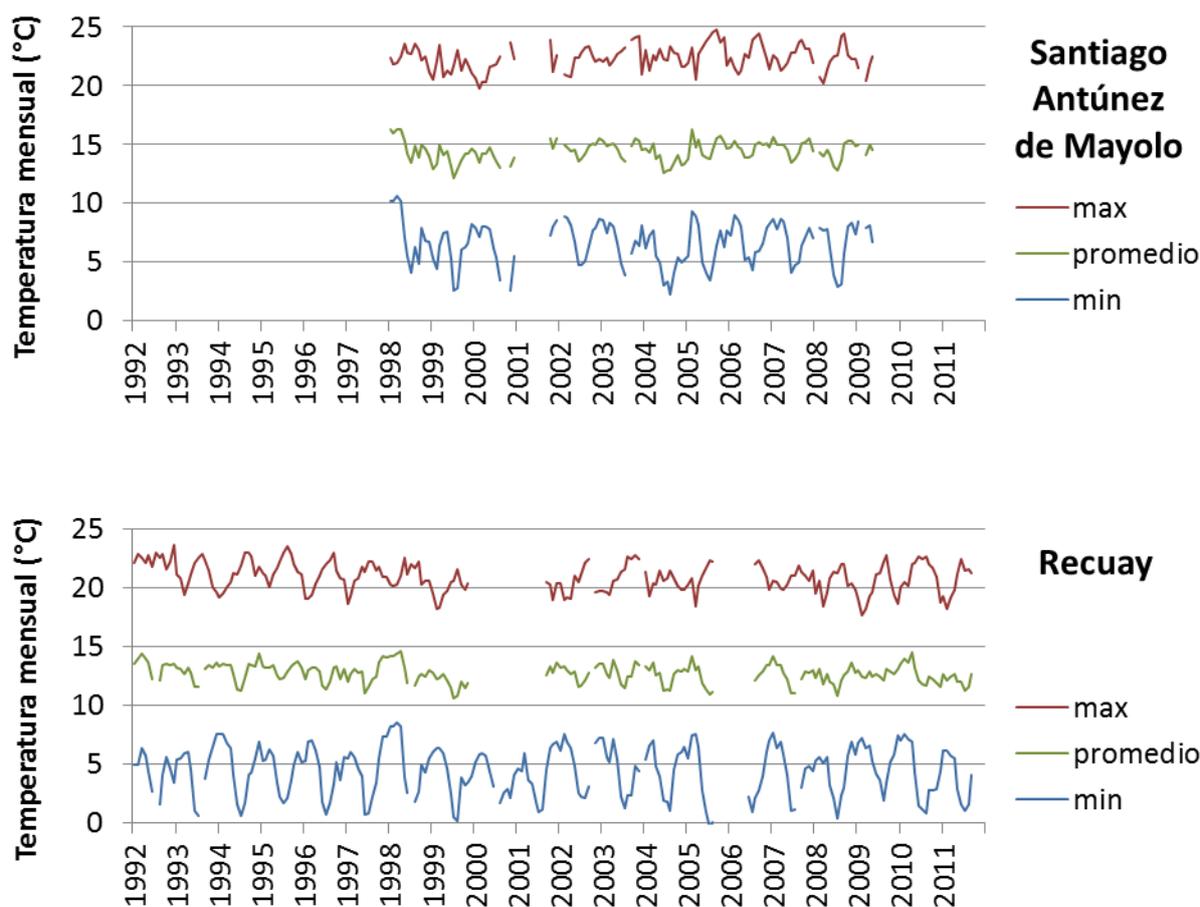


Figura 26: Temperatura máxima y mínima mensual y el promedio calculado para cuatro estaciones. En ninguna estación se aprecia un aumento de la temperatura del aire. Por el contrario, la temperatura mínima medida en Chavín disminuye en forma significativa.

Sólo en tres estaciones se registró una tendencia significativa: Para Chavín y Chavín Sut se observan disminuciones significativas en la temperatura mínima, mientras Recuay registró una disminución en la temperatura máxima. Sin embargo, la disminución significativa desaparece para Chiquián si se considera solamente el periodo de 2001 a 2012. Esta serie de tiempo probablemente no es homogénea, debido a un cambio en la variación que se observa después del vacío en el año 2000. Para la estación Chavín se considera solamente el periodo entre 1992 y 2008 debido a un salto en la temperatura mínima en 2009 de lo cual el origen no es conocido.

Tabla 3: Detalle sobre las tendencias lineares para las seis estaciones.

		Temperatura máxima		Temperatura mínima	
		°C / 10 años	signifi- cancia	°C / 10 años	signifi- cancia
Aija	1992 - 2011	+	no signif.	+	no signif.
Chavín	1992 - <u>2008</u>	-	no signif.	-2.34	signif.
Chavín Sut	1992 - 2011	-	no signif.	+	no signif.
Chiquián	1992 - 2011	+	no signif.	-1.07	signif.
Chiquián	<u>2001</u> - 2011	+	no signif.	+	no signif.
Santiago Antúnez de Mayolo	1992 - 2011	+	no signif.	-	no signif.
Recuay	1992 - 2011	-0.49	signif.	-	no signif.

En general, no se observan aumentos significativas en temperatura media mensual en las últimas dos décadas. El análisis no muestra una tendencia clara asociable a un calentamiento reciente.

6 Impactos climáticos en los glaciares en la Cordillera Blanca

Según Racoviteanu et al. (2008) el área englacada disminuyó un 22.4% entre 1970 y 2003. Giraldez (2011) concluye que la línea de equilibrio del Nevado Hualcán se desplazó por 106 m verticalmente entre 1962 y 2003. ¿Cómo entonces retrocedieron los glaciares en la Cordillera Blanca en los últimos 30 años donde no se observa tendencia significativa en la temperatura?

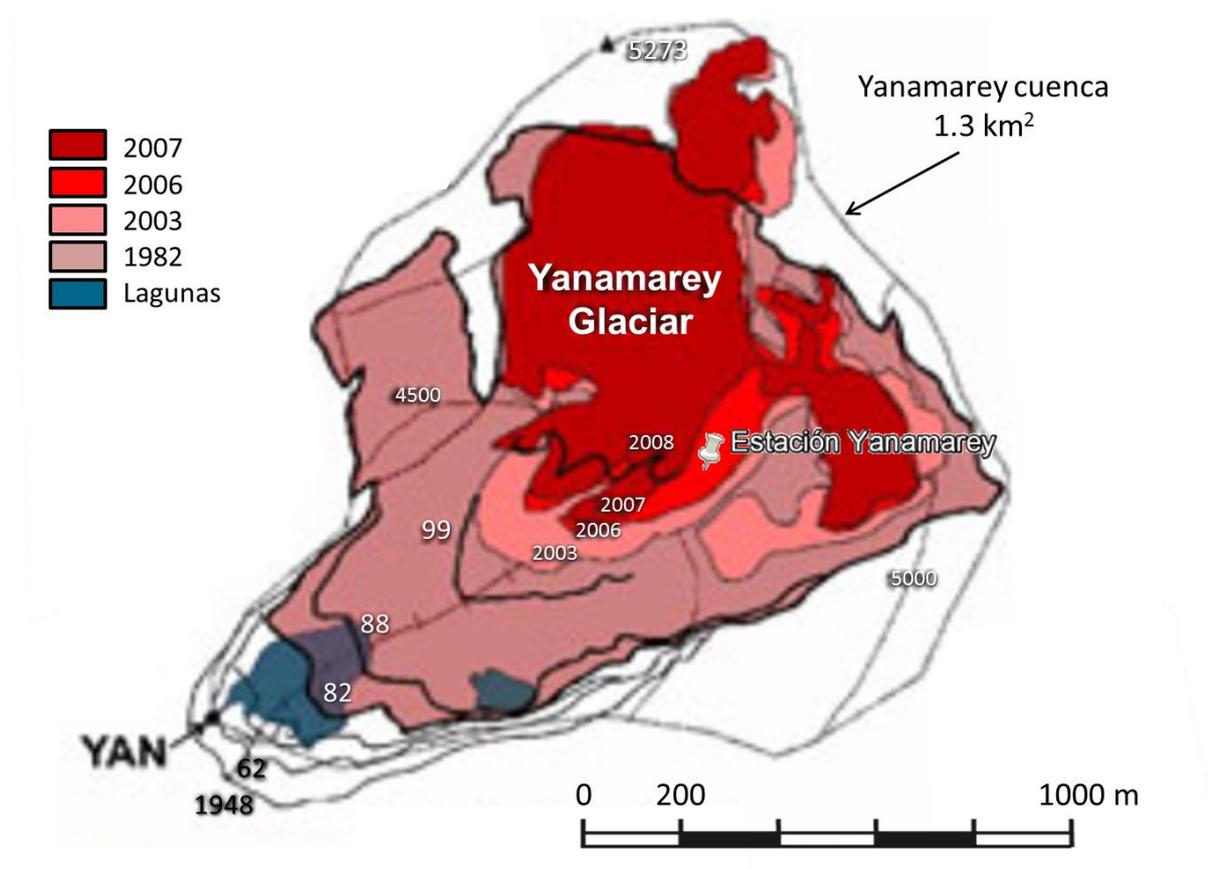


Figura 27: La Cuenca del Glaciar Yanamarey y el retroceso del glaciar entre 1948 y 2008. Se observa un retroceso grande entre 1982 y 2008. La estación meteorológica Yanamarey es parte de la red de monitoreo de la Unidad de Glaciología. Se encuentra aproximadamente 30 m al oeste del glaciar (estimado utilizando la imagen de GoogleEarth del año 2011) en un lugar que según este mapa ha estado cubierto de hielo hasta 2006. Vea Figura 23 para la ubicación de la estación Yanamarey a escala pequeña. (Fuente: Bury et al. 2010)

Aunque los datos de temperatura no muestran un aumento en los últimas tres décadas, los glaciares en la Cordillera Blanca retrocedieron marcadamente, como por ejemplo descrito por Bury et al. (2010) para el glaciar Yanamarey. Es importante saber que una temperatura constante no significa que el glaciar muestre pérdida de masa. Un retroceso de los glaciares de la Cordillera Blanca bajo una temperatura constante (es decir sin tendencia significativa) puede tener varias explicaciones. Una explicación puede ser proporcionada por un decrecimiento de lluvia. Sin embargo, la lluvia en la

Cordillera Blanca no muestra tendencia en las últimas décadas. Un receso de glaciares indica entonces que probablemente los glaciares no estén en un estado de equilibrio.

Glaciares tropicales son altamente vulnerables a un cambio climático, porque la línea de nieve se encuentra a una elevación crítica. Es decir, si la línea de nieve sube por ejemplo de 5000 a 5500 msnm, la línea de equilibrio sube y el glaciar responde con una pérdida en extensión y volumen. Si la línea de equilibrio sobrepasa la elevación del límite superior del glaciar, la zona de acumulación desaparece y con ella la zona con un balance de masa positiva. En este caso, el glaciar va a desaparecer a largo plazo.

Si la temperatura aumenta, la precipitación cambia su estado y cae en forma de lluvia en vez de nieve. Una falta de nieve tiene dos importantes efectos para un glaciar. Primero, menos nieve significa menos material para acumular el volumen del glaciar. Segundo, el cambio de nieve a lluvia también provoca una reducción en el albedo que a la vez acelera aún más el retroceso del glaciar.

7 Escenarios del cambio climático para la Cordillera Blanca

7.1 Tendencias de temperatura

7.2 Tendencias de precipitación

7.3 Incertidumbres

8 Conclusiones

Precipitación

- Se presenta un gradiente pronunciado de precipitación en función de la elevación en la ladera de la Cordillera Blanca con más precipitación en estaciones altas
- Gran valores de precipitación en estaciones ubicadas sobre 4000 msnm
- En general, la precipitación aumenta de norte a sur y de oeste a este
- Máximas precipitaciones se presentan entre enero a marzo y un invierno seco entre junio y agosto
- No se observa una tendencia significativa en la precipitación durante los últimos 30 años

Temperatura

- La temperatura del aire presenta un incremento significativo entre aproximadamente 1975 y 1980
- Después de 1980 la temperatura no muestra tendencia significativa
- Se observa un retroceso glacial en la Cordillera Blanca, a pesar de que no se hayan registrado tendencias de la temperatura en las últimas tres décadas
- Para algunas estaciones se observa que las temperaturas mínimas disminuyen en las últimas aproximadamente 30 décadas.

9 Bibliografía

Los mapas se realizaron utilizando el software GoogleEarth ([http:// earth.google.com/](http://earth.google.com/))

Baraer, Michel, Bryan Mark, Jeffrey McKenzie, Thomas Condom, Jeffrey Bury, Kyung-In Huh, Cesar Portocarrero, Jesus Gomez, and Sarah Rathay. 2012. "Glacier Recession and Water Resources in Peru's Cordillera Blanca." *Journal of Glaciology* 58 (207) (February 15): 134–150. doi:10.3189/2012JoG11J186. <http://www.igsoc.org/journal/current/207/j11J186.pdf>.

Bradley, Raymond S., Frank T. Keimig, Henry F. Diaz, and Douglas R. Hardy. 2009. "Recent Changes in Freezing Level Heights in the Tropics with Implications for the Deglaciation of High Mountain Regions." *Geophysical Research Letters* 36 (17) (September 4): L17701. doi:10.1029/2009GL037712. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2009GL037712.shtml>.

Bury, Jeffrey T., Bryan G. Mark, Jeffrey M. McKenzie, Adam French, Michel Baraer, Kyung In Huh, Marco Alfonso Zapata Luyo, and Ricardo Jesús Gómez López. 2010. "Glacier Recession and Human Vulnerability in the Yanamarey Watershed of the Cordillera Blanca, Peru." *Climatic Change* 105 (1-2) (June 15): 179–206. doi:10.1007/s10584-010-9870-1. <http://www.springerlink.com/index/10.1007/s10584-010-9870-1>.

Chang, Ping, Benjamin S Giese, Link Ji, Howard F Seidel, and Fan Wang. 2001. "Decadal Change in the South Tropical Pacific in a Global Assimilation Analysis." *Geophysical Research Letters* 28 (18): 3461–3464.

Falvey, Mark, and René D. Garreaud. 2009. "Regional Cooling in a Warming World: Recent Temperature Trends in the Southeast Pacific and Along the West Coast of Subtropical South America (1979–2006)." *Journal of Geophysical Research* 114 (D4) (February 18): 1–16. doi:10.1029/2008JD010519. <http://www.agu.org/pubs/crossref/2009/2008JD010519.shtml>.

Giraldez, Claudia. 2011. "Glacier Evolution in the South West Slope of Nevado Hualcán". Universidad Complutense de Madrid.

Hastenrath, Stefan, and Alcides Ames. 1995. "Recession of Yamanarey Glacier in Cordillera Blanca , Peru , During the 20th Century." *Journal of Glaciology* 41 (137): 191–196.

Jacques-Coper, Martin. 2009. "CARACTERIZACIÓN DEL SALTO CLIMÁTICO DE MEDIADOS DE LOS 1970s EN SUDAMÉRICA". Universidad de Santiago de Chile.

Obregón, Guillermo, Amelia Díaz, Gabriela Rosas, Grinia Avalos, Delia Acuña, Clara Oria, Alan Llacza, and Richard Miguel. 2009. *Escenarios Climaticos En La Cuenca Del Rio Santa Para El Año 2030*. Lima.

Rabatel, Antoine, Ana Bermejo, Edwin Loarte, Alvaro Soruco, Jesus Gomez, Gonzalo Leonardini, Christian Vincent, and Jean Emmanuel Sicart. 2012. "Can the Snowline Be Used as an Indicator of the Equilibrium Line and Mass Balance for Glaciers in the Outer Tropics?" *Journal of Glaciology* 58 (212): 1027–1036. doi:10.3189/2012JoG12J027. <http://www.igsoc.org/journal/58/212/J12J027.html>.

Racoviteanu, Adina E, Yves Arnaud, Mark W Williams, and Julio Ordon. 2008. "Decadal Changes in Glacier Parameters in the Cordillera Blanca , Peru , Derived from Remote Sensing" 54 (186): 499–510.

Scheel, M. L. M., M. Rohrer, Ch. Huggel, D. Santos Villar, E. Silvestre, and G. J. Huffman. 2011. "Evaluation of TRMM Multi-satellite Precipitation Analysis (TMPA) Performance in the Central Andes Region and Its Dependency on Spatial and Temporal Resolution." *Hydrology and Earth System Sciences* 15 (8) (August 25): 2649–2663.

Schwarb, M., D. Acuña, Th. Konzelmann, M. Rohrer, N. Salzmann, B. Serpa Lopez, and E. Silvestre. 2011. "A Data Portal for Regional Climatic Trend Analysis in a Peruvian High Andes Region." *Advances in Science and Research* 6 (August 16): 219–226. doi:10.5194/asr-6-219-2011. <http://www.adv-sci-res.net/6/219/2011/>.

SENAMHI. *Climate Scenarios for the Santa River Basin to 2030*.

Silverio, Walter, and Jean-Michel Jaquet. 2005. "Glacial Cover Mapping (1987–1996) of the Cordillera Blanca (Peru) Using Satellite Imagery." *Remote Sensing of Environment* 95 (3): 342 – 350.