

Trabajo Fin de Máster

IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA QUILLCAYHUANCA, PERÚ

Intensificación:

ANÁLISIS DE SISTEMAS DE RECURSOS HÍDRICOS

Autor:

RANDY MUÑOZ ASMAT

Director:

DR. JAVIER PAREDES ARQUILOA

MARZO, 2017



UNIVERSITAT
POLITÈCNICA
DE VALÈNCIA

máster en ingeniería
hidráulica y medio ambiente
mihma

Resumen del Trabajo de Fin de Máster

| Datos del proyecto |
|--|
| Título del TFM en español: IMPACTO DEL CAMBIO CLIMÁTICO EN LOS RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA QUILLCAYHUANCA, PERÚ |
| Título del TFM en inglés: IMPACT OF CLIMATE CHANGE ON WATER RESOURCES OF QUILLCAYHUANCA SUBBASIN, PERÚ |
| Título del TFM en valencino: IMPACTE DEL CANVI CLIMÀTIC EN ELS RECURSOS HÍDRICS DE LA SUBCONCA QUILLCAYHUANCA, PERÚ |
| Alumno: RANDY MUÑOZ ASMAT |
| Director: DR. JAVIER PAREDES ARQUILOA |
| Fecha de Lectura: Marzo, 2017 |

| Resumen |
|--|
| EN CASTELLANO |
| <p>Los últimos informes del IPCC clasifican a Perú como una de las naciones de mayor vulnerabilidad frente al cambio climático, entre otros debido a la variación en la disponibilidad de los recursos hídricos. De esta forma cuantificar y evaluar los cambios en el recurso hídrico es una tarea fundamental en el diseño e implementación de la gestión de cuencas. En el presente estudio se evalúan los impactos de dos escenarios de cambio climático en la subcuenca Quillcayhuanca, un sistema hidrológico con alta influencia glaciar. Ésta se encuentra ubicada en los Andes glaciares del norte de Perú y es uno de los afluentes de la cuenca del río Santa que fluye hacia el océano Pacífico. Esta cuenca y sus afluentes son de gran importancia socioeconómica ya que abastecen de agua a demandas urbanas, agroindustriales y energéticas de importancia nacional. Estudios previos en la región han hallado que en los siguientes 50 años la oferta de agua será cada vez menor. Desafortunadamente estos estudios a escala de cuenca no son lo suficientemente detallados y se requiere de nuevos estudios a escalas menores. Para ello, en Quillcayhuanca se implementó un modelo hidrológico semidistribuido a paso de tiempo mensual con la ayuda del software RS Minerve. La información hidrometeorológica provino de estaciones de terreno ubicadas alrededor de la zona de estudio. Debido a la limitada disponibilidad de datos, común en Perú, se evaluaron técnicas para extender la temperatura, interpolar la precipitación y estimar la altura glaciar. Los resultados muestran que el factor de corrección, el kriging ordinario y una combinación de la herramienta</p> |

GlabTop y la formulación de Bahr son las técnicas más adecuadas a usar en condiciones tropicales de alta montaña. Con la información disponible, Quillcayhuanca fue subdividida en 72 subcuencas que podían utilizar modelos glaciares, no glaciares o mixtos. Estos últimos se implementaron para lograr que el modelo simule la pérdida de volumen glaciar, factor determinante en la evaluación de este tipo de cuencas. Tres versiones de modelos glaciares y no glaciares se evaluaron para determinar el modelo más adecuado. La versión que usaba modelos GSM para las áreas glaciares y HBV para las no glaciares resultó en la más adecuada. Los escenarios de cambio climático evaluados fueron el RCP 2.6 y RCP 8.5 por ser los más y menos optimistas, en el periodo 2021 - 2050. Los datos se obtuvieron del modelo de circulación regional RCA4, uno de los pocos con dominio en Sudamérica. Los resultados muestran que tanto en el escenario RCP 2.6 y 8.5 habrá un incremento de temperatura no menor a 1 °C y una reducción generalizada de la precipitación. En consecuencia se espera una reducción no menor del 30 % del volumen glaciar para finales del 2050. Esta pérdida de volumen glaciar provocará un cambio en el régimen hidrológico de Quillcayhuanca que pasará de ser dependiente de los aportes glaciares, a depender de los aportes de precipitación y de coberturas del suelo con capacidad de almacenamiento de agua. Se espera además una reducción de las aportaciones totales anuales no menor al 22 %, y del 34 % durante el periodo de estío. Estos cambios provocarán que los criterios de garantía dejen de cumplirse para muchas de las demandas. Los resultados también dejaron al descubierto las limitadas medidas estructurales y no estructurales de la gestión de los recursos hídricos de Quillcayhuanca. Esto debido a que incluso en los escenarios más desfavorables ciertas demandas no tienen problemas de abastecimiento mientras que otras sí. Futuros estudios podrían enfocarse en evaluar las consecuencias económicas y ayudar a diseñar y evaluar medidas de gestión de los recursos hídricos y adaptación al cambio climático.

EN VALENCIANO

Els últims informes del *IPCC classifiquen a Perú com una de les nacions de major vulnerabilitat enfront del canvi climàtic, entre uns altres a causa de la variació en la disponibilitat dels recursos hídrics. D'aquesta forma quantificar i avaluar els canvis en el recurs hídric és una tasca fonamental en el disseny i implementació de la gestió de conques. En el present estudi s'avaluen els impactes de dos escenaris de canvi climàtic en la *subcuenca *Quillcayhuanca, un sistema hidrològic amb alta influència glacial. Aquesta es troba situada en els Andes glacials del nord de Perú i és un dels afluents de la conca del riu Santa que flueix cap a l'oceà Pacífic. Aquesta

conca i els seus afluents són de gran importància socioeconòmica ja que proveeixen d'aigua a demandes urbanes, agroindustrials i energètiques d'importància nacional. Estudis previs en la regió han trobat que en els següents 50 anys l'oferta d'aigua serà cada vegada menor. Desafortunadament aquests estudis a escala de conca no són prou detallats i es requereix de nous estudis a escales menors. Per a açò, en Quillcayhuanca es va implementar un model hidrològic semidistribuido a pas de temps mensual amb l'ajuda del programari RS Minerve. La informació hidrometeorològica va provenir d'estacions de terreny situades al voltant de la zona d'estudi. A causa de la limitada disponibilitat de dades, comuna a Perú, es van avaluar tècniques per a estendre la temperatura, interpolar la precipitació i estimar l'altura glacial. Els resultats mostren que el factor de correcció, el kriging ordinari i una combinació de l'eina GlabTop i la formulació de Bahr són les tècniques més adequades a usar en condicions tropicals d'alta muntanya. Amb la informació disponible, Quillcayhuanca va ser subdividida en 72 subcuencas que podien utilitzar models glacials, no glacials o mixts. Aquests últims es van implementar per a logar que el model simule la pèrdua de volum glacial, factor determinant en l'avaluació d'aquest tipus de conques. Tres versions de models glacials i no glacials es van avaluar per a determinar el model més adequat. La versió que usava models GSM per a les àrees glacials i HBV per a les no glacials va resultar en la més adequada. Els escenaris de canvi climàtic avaluats van ser el RCP 2.6 i RCP 8.5 per ser els més i menys optimistes, en el període 2021 - 2050. Les dades es van obtenir del model de circulació regional RCA4, un dels pocs amb domini a Sud-amèrica. Els resultats mostren que tant en l'escenari RCP 2.6 i 8.5 hi haurà un increment de temperatura no menor a 1 °C i una reducció generalitzada de la precipitació. En conseqüència s'espera una reducció no menor del 30 % del volum glacial per a finals del 2050. Aquesta pèrdua de volum glacial provocarà un canvi en el règim hidrològic de Quillcayhuanca que passarà de ser dependent de les aportacions glacials, a dependre de les aportacions de precipitació i de cobertures del sòl amb capacitat d'emmagatzematge d'aigua. S'espera a més una reducció de les aportacions totals anuals no menor al 22 %, i del 34 % durant el període de estí. Aquests canvis provocaran que els criteris de garantia deixen de complir-se per a moltes de les demandes. Els resultats també van deixar al descobert les limitades mesures estructurals i no estructurals de la gestió dels recursos hídrics de Quillcayhuanca. Açò a causa que fins i tot en els escenaris més desfavorables certes demandes no tenen problemes de proveïment mentre que unes altres sí. Futurs estudis podrien enfocar-se a avaluar les conseqüències econòmiques i ajudar a dissenyar i avaluar mesures de gestió dels recursos hídrics i adaptació al canvi climàtic.

EN INGLÉS

The latest reports from the IPCC classify Peru as one of the most vulnerable nations to climate change, among others due to the variation in the availability of water resources. In this way, quantifying and evaluating changes in water resources is a fundamental task in the design and implementation of watershed management. This study evaluates the impacts of two climate change scenarios in the Quillcayhuanca subbasin, a hydrological system with high glacial influence. It is located in the glacial Andes of northern Peru and is one of the tributaries of the Santa River basin that flows into the Pacific Ocean. This basin and its tributaries are of great socioeconomic importance as they supply water to urban, agroindustrial and energy demands of national importance. Previous studies in the region have found that in the next 50 years the supply of water will be decreasing. Unfortunately these basin-scale studies are not sufficiently detailed and further studies are required at smaller scales. To this end, a semi-distributed hydrological model was implemented in Quillcayhuanca on a monthly time step with the help of RS Minerve software. Hydrometeorological information came from land stations located around the study area. Due to the limited availability of data, common in Peru, different techniques were evaluated and used to extend the temperature, interpolate the precipitation and estimate the glacier height. The results show that the correction factor, ordinary kriging and a combination of the GlabTop tool and the Bahr formulation are the most suitable techniques to be used in tropical high mountain conditions. With the information available, Quillcayhuanca was subdivided into 72 subbasins that could use glacial, non-glacial or mixed models. The latter were implemented to enable the model to simulate the loss of glacial volume, a determining factor in the evaluation of this type of watershed. Three versions of glacial and non-glacial models were evaluated to determine the most appropriate model. The version that used GSM models for glacial areas and HBV for non-glaciers proved to be the most appropriate. The scenarios of climate change evaluated were RCP 2.6 and RCP 8.5 due being the most and least optimistic, in the period 2021-2050. The data were obtained from the regional circulation model RCA4, one of the few with dominion in South America. The results show that in both RCP 2.6 and RCP 8.5 scenarios there will be a rise of temperature not less than 1 ° C and a generalized reduction of precipitation. Consequently, a reduction of not less than 30% in the glacier volume is expected by the end of 2050. This loss of glacier volume will cause a change in the hydrological regime of Quillcayhuanca that will change from being dependent on the glacier contributions, to depending on the precipitation inputs and of soil coverings with capacity to store water. It is also expected a reduction in total annual contributions of not less than 22%, and of 34% during the summer

period. These changes will cause that warranty criteria failure for many water demands. The results also exposed the limited structural and non-structural measures in the water resources management of Quillcayhuanca. This is because even in the most unfavorable scenarios certain demands have no supply problems while others do. Future studies could focus on assessing economic consequences and help design and evaluate water management and climate change adaptation measures.

Palabras clave español: cambio climático, Perú, glaciares, Quillcay, río Santa

Palabras clave inglés: climate change, Perú, glaciers, Quillcay, Santa river

Palabras clave valenciano: canvi climàtic, Perú, , Quillcay, glaceres, riu Santa

Fecha: Marzo del 2017

Fdo. (Alumno)

*A Dios,
a mis padres Robin y Elisa,
y a mis hermanos Richard y Jesús,
fundamento de mi vida familiar y espiritual que guiaron mi camino*

Agradecimientos

*A Dios, por darme la oportunidad de avanzar en el camino del conocimiento para
ayudar a los que lo necesiten.*

*A mi tutor Javier Paredes por la confianza depositada en mí y su apoyo para
desarrollar, superar y concluir este trabajo.*

*A Javier García, Fabian Drenkhan y Christian Huggel por su apoyo y disponibilidad
durante todo el proceso de la investigación.*

*A mis profesores del Máster de Hidráulica y Medio Ambiente, su conocimiento,
dedicación y sencillez fueron mi inspiración para seguir adelante y superarme*

*A mis compañeros y amigos del Máster, por su amistad y compañía que alegraron mis
días en este viaje.*

Y al gobierno del Perú y PRONABEC por confiar en mí para representar a mi país.

Contenido

| | |
|--|-----------|
| 1 INTRODUCCIÓN | 1 |
| 1.1 OBJETIVOS..... | 2 |
| 1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO | 4 |
| 2 ESTADO DEL ARTE | 5 |
| 2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS..... | 5 |
| 2.2 EXTENSIÓN E INTERPOLACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS..... | 7 |
| 2.2.1 Temperatura | 7 |
| 2.2.2 Precipitación | 8 |
| 2.3 DINÁMICA DE LOS GLACIARES TROPICALES | 8 |
| 2.3.1 Procesos de acumulación y ablación | 10 |
| 2.3.2 Glaciares tropicales y cambio climático | 12 |
| 2.4 CAMBIO CLIMÁTICO | 13 |
| 3 ZONA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE..... | 15 |
| 3.1 EL SISTEMA HIDROLÓGICO QUILLCAYHUANCA..... | 15 |
| 3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE..... | 16 |
| 3.2.1 Datos hidrometeorológicos | 16 |
| 3.2.2 Datos del territorio y uso del suelo | 19 |
| 3.2.3 Demandas de agua | 21 |
| 4 METODOLOGÍA..... | 25 |
| 4.1 SOFTWARE RS MINERVE..... | 25 |
| 4.2 DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS..... | 32 |
| 4.3 EXTENSIÓN DE LA TEMPERATURA..... | 35 |
| 4.4 INTERPOLACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN | 37 |
| 4.5 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA GLACIAR | 40 |
| 4.5.1 Delimitación del área glaciar | 40 |
| 4.5.2 Herramienta GlabTop | 42 |
| 4.5.3 Método de Bahr..... | 43 |
| 4.6 CÁLCULO DE LAS DEMANDAS..... | 44 |
| 4.7 IMPLEMENTACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN | 45 |
| 4.7.1 Estructura de los subcuencas | 45 |
| 4.7.2 Red de demandas | 47 |
| 4.7.3 Calibración y validación | 50 |

| | | |
|----------|---|------------|
| 4.8 | SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO | 53 |
| 4.8.1 | Ajuste del periodo histórico | 54 |
| 4.8.2 | Generación de series futuras..... | 56 |
| 5 | RESULTADOS Y DISCUSIÓN..... | 57 |
| 5.1 | EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN..... | 57 |
| 5.1.1 | Evaluación de la extensión de la temperatura | 57 |
| 5.1.2 | Evaluación de la interpolación de la precipitación..... | 62 |
| 5.1.3 | Evaluación de la estimación de altura glaciar | 71 |
| 5.1.4 | Evaluación de la generación de clima futuro | 77 |
| 5.1.5 | Evaluación de la demanda urbana | 81 |
| 5.2 | MODELO HIDROLÓGICO DE QUILLCAYHUANCA..... | 82 |
| 5.3 | SIMULACIÓN DEL PERIODO HISTÓRICO | 95 |
| 5.3.1 | Condiciones meteorológicas..... | 96 |
| 5.3.2 | Dinámica glaciar..... | 99 |
| 5.3.3 | Caudales..... | 101 |
| 5.3.4 | Garantías de las demandas..... | 106 |
| 5.4 | CONDICIONES METEOROLÓGICAS 2021 – 2050..... | 107 |
| 5.4.1 | Cambios en la temperatura mensual | 107 |
| 5.4.2 | Cambios en la precipitación..... | 112 |
| 5.5 | CAMBIOS EN LOS GLACIARES EN EL PERIODO 2021 – 2050..... | 115 |
| 5.6 | CAMBIOS EN LAS APORTACIONES EN EL PERIODO 2021 - 2050 | 116 |
| 5.6.1 | Escenario RCP 2.6 | 116 |
| 5.6.2 | Escenario RCP 8.5 | 121 |
| 5.7 | COMPARATIVA DE ESCENARIOS | 125 |
| 6 | CONCLUSIONES..... | 133 |
| 7 | BIBLIOGRAFÍA | 137 |

Lista de Figuras

| | |
|--|----|
| Figura 1. Delimitación de los trópicos desde un punto de vista glaciológico. Fuente: (Kaser 1999) | 9 |
| Figura 2. Esquema de una cuenca glaciar tropical. Fuente: (Chevallier et al. 2011) | 10 |
| Figura 3. Mapa de ubicación del sistema hidrológico Quillcayhuanca | 15 |
| Figura 4. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas | 17 |
| Figura 5. Mapa de la cobertura del suelo de Quillcayhuanca | 19 |
| Figura 6. Mapa de pendientes de Quillcayhuanca | 20 |
| Figura 7. Mapa de captaciones de las demanda de agua en Quillcayhuanca..... | 21 |
| Figura 8. Esquema del modelo HBV. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016) | 27 |
| Figura 9. Esquema del modelo GR4J. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016) | 28 |
| Figura 10. Esquema del modelo SOCONT. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016) | 30 |
| Figura 11. Esquema del modelo GSM. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016) | 32 |
| Figura 12. Esquema de la metodología para la delimitación de subcuencas | 33 |
| Figura 13. Esquema de subcuencas de Quillcayhuanca..... | 34 |
| Figura 14. Mapa de ubicación de estaciones ficticias | 39 |
| Figura 15. Esquema del procedimiento para la delimitación glaciar | 41 |
| Figura 16. Esquema del uso de la herramienta GlaTop | 43 |
| Figura 17. Clasificación de los subcuenca de Quillcayhuanca..... | 46 |
| Figura 18. Funcionamiento de los subcuenca mixtos | 47 |
| Figura 19. Esquema de la red de demandas del modelo de Quillcayhuanca..... | 49 |
| Figura 20. Esquema de la generación de series futuras de cambio climático | 54 |
| Figura 21. Mapa de estaciones usadas para generar las series de cambio climático | 55 |
| Figura 22. Tendencia espacial de la precipitación..... | 64 |
| Figura 23. Interpolación de la precipitación de marzo (izquierda) y junio (derecha) con IDW .. | 65 |
| Figura 24. Semivariogramas del mes de marzo en distintas direcciones | 69 |
| Figura 25. Interpolación de la precipitación de marzo (izquierda) y junio (derecha) con KO..... | 71 |
| Figura 26. Resultados del proceso de delimitación del área glaciar | 73 |
| Figura 27. Mapa de ejes glaciares del 2009 | 74 |

| | |
|--|-----|
| Figura 28. Mapa de espesor glaciar de Quillcayhuanca del año 2009 con GlabTop..... | 74 |
| Figura 29. Esquema del modelo de Quillcayhuanca con RS Minerve | 83 |
| Figura 30. Esquema de las subcuencas mixtas, simples y red de demandas en RS Minerve | 84 |
| Figura 31. Altura glaciar simulada y observada | 92 |
| Figura 32. Mapa de temperatura promedio anual del periodo histórico | 97 |
| Figura 33. Mapa de precipitación total promedio del periodo histórico..... | 98 |
| Figura 34. Mapa del retroceso glaciar en el periodo histórico | 99 |
| Figura 35. Mapa de la anomalía de la temperatura promedio anual en el escenario RCP 2.6. | 111 |
| Figura 36. Mapa de la anomalía de la temperatura promedio anual en el escenario RCP 8.5. | 111 |

Lista de Gráficos

| | |
|--|-----|
| Gráfico 1. Precipitación y caudales promedio en la estación Huaraz | 18 |
| Gráfico 2. Temperatura mensual en la estación Huaraz y Uruashraju | 18 |
| Gráfico 3. Porcentajes de cobertura del suelo en Quillcayhuanca | 20 |
| Gráfico 4. Porcentajes de pendientes de Quillcayhuanca | 21 |
| Gráfico 5. Censos poblacionales de la ciudad de Huaraz. Fuente: (INDECI 2002; INEI 2015)..... | 23 |
| Gráfico 6. Correlación lineal de la temperatura de la estación Huaraz y datos de Reanálisis NCEP-NCAR..... | 57 |
| Gráfico 7. Correlación lineal de temperatura de la estación Uruashraju y datos de Reanálisis NCEP-NCAR..... | 58 |
| Gráfico 8. Temperatura observada y corregida de la estación Huaraz..... | 59 |
| Gráfico 9. Temperatura observada y corregida de la estación Uruashraju | 59 |
| Gráfico 10. Temperatura final observada y corregida de la estación Huaraz..... | 61 |
| Gráfico 11. Temperatura de Huaraz y extendida de Uruashraju | 61 |
| Gráfico 12. Semivariogramas experimentales y teóricos de precipitación..... | 68 |
| Gráfico 13. Validación cruzada del mes de marzo y junio con KO | 70 |
| Gráfico 14. Relación altura y volumen glaciar de Quillcayhuanca | 75 |
| Gráfico 15. Relación volumen de Bahr y volumen calibrado vs volumen GlabTop | 76 |
| Gráfico 16. Temperatura mensual del RCA4 corregida y sin corregir para la estación Huaraz .. | 77 |
| Gráfico 17. Precipitación mensual del RCA4 corregida y sin corregir para la estación Huaraz .. | 78 |
| Gráfico 18. Función de distribución de los caudales máximos anuales | 80 |
| Gráfico 19. Función de distribución de los caudales mínimos anuales..... | 81 |
| Gráfico 20. Variación de la población de Huaraz con el tiempo | 81 |
| Gráfico 21. Caudales observados y simulados en la estación Quillcay | 89 |
| Gráfico 22. Diferencia entre el caudal simulado y el observado en la estación Quillcay | 90 |
| Gráfico 23. Caudales observados y simulados del año medio | 90 |
| Gráfico 24. Caudales de las subcuencas en zonas no glaciares | 94 |
| Gráfico 25. Temperatura mensual y tendencia en el periodo histórico | 97 |
| Gráfico 26. Precipitación mensual y tendencia en el periodo histórico | 98 |
| Gráfico 27. Áreas y volumen glaciar observado en el periodo 1986 – 2016..... | 99 |
| Gráfico 28. Evolución del volumen glaciar | 100 |
| Gráfico 29. Caudales del año medio en el periodo histórico en Quillcayhuanca..... | 102 |
| Gráfico 30. Porcentajes de aportación en el año medio del periodo histórico | 102 |

| | |
|---|-----|
| Gráfico 31. Porcentajes de aportaciones de caudales estacionales en el año medio | 103 |
| Gráfico 32. Aportaciones anuales de Quillcayhuanca durante el periodo histórico..... | 104 |
| Gráfico 33. Porcentajes de aportación anual de Quillcayhuanca en el periodo histórico | 104 |
| Gráfico 34. Caudales mensuales de los ríos Paria, Auqui y Quillcay en el periodo histórico.... | 105 |
| Gráfico 35. Serie de temperatura media de la estación Huaraz en el periodo 2021 – 2050.... | 108 |
| Gráfico 36. Anomalía de la temperatura media en la estación Huaraz | 108 |
| Gráfico 37. Temperatura media de la estación Uruashraju en el periodo 2021 – 2050..... | 109 |
| Gráfico 38. Anomalía de la temperatura media en la estación Uruashraju..... | 110 |
| Gráfico 39. Anomalía de la temperatura mensual..... | 110 |
| Gráfico 40. Precipitación de la estación Huaraz en el periodo 2021 – 2050 | 113 |
| Gráfico 41. Anomalía de la precipitación mensual en la estación Huaraz | 113 |
| Gráfico 42. Precipitación de la estación Uruashraju en el periodo 2021 – 2050..... | 114 |
| Gráfico 43. Anomalía de la precipitación mensual en la estación Uruashraju | 114 |
| Gráfico 44. Anomalías de la precipitación media mensual..... | 115 |
| Gráfico 45. Evolución del volumen glaciar en el periodo 2021 – 2050..... | 115 |
| Gráfico 46. Caudales del año medio el periodo 2021 -2050 en el escenario RCP 2.6 | 116 |
| Gráfico 47. Porcentajes de aportación en el año medio del periodo 2021 – 2050 en el escenario RCP 2.6..... | 117 |
| Gráfico 48. Porcentajes de aportaciones de caudales estacionales en el año medio en el escenario RCP 2.6..... | 118 |
| Gráfico 49. Aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 2.6 | 118 |
| Gráfico 50. Porcentajes de aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 2.6 | 120 |
| Gráfico 51. Caudales del año medio el periodo 2021 -2050 en el escenario RCP 8.5 | 122 |
| Gráfico 52. Porcentajes de aportación en el año medio del periodo 2021 – 2050 en el escenario RCP 8.5..... | 122 |
| Gráfico 53. Porcentajes de aportaciones de caudales estacionales en el año medio en el escenario RCP 8.5..... | 123 |
| Gráfico 54. Aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 8.5 | 123 |
| Gráfico 55. Porcentajes de aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 8.5 | 124 |
| Gráfico 56. Aportaciones del año medio en el punto de aforo Quillcay..... | 126 |
| Gráfico 57. Fuentes de aportación a la oferta total anual en el punto de aforo Quillcay para el año medio..... | 126 |
| Gráfico 58. Aportaciones en la época húmeda en el punto de aforo Quillcay | 127 |
| Gráfico 59. Aportaciones en la época seca en el punto de aforo Quillcay | 128 |
| Gráfico 60. Serie de aportes anuales según fuente en el periodo 2021 – 2050 | 128 |

| | |
|--|-----|
| Gráfico 61. Función de distribución de los caudales máximos en el punto de aforo Quillcay . | 129 |
| Gráfico 62. Función de distribución de los caudales mínimos en el punto de aforo Quillcay .. | 130 |
| Gráfico 63. Aportaciones en los ríos Paria y Auqui | 131 |

Lista de Cuadros

| | |
|---|-----|
| Cuadro 1. Demandas agrícolas en Quillcayhuanca. Fuente: (Quesquén 2008) | 22 |
| Cuadro 2. Demandas acuícolas. Fuente: (Tarazona 2008) | 23 |
| Cuadro 3. Demanda poblacional rural. Fuente: (Tarazona 2008) | 23 |
| Cuadro 4. Parámetros y condiciones iniciales del modelo HBV..... | 26 |
| Cuadro 5. Parámetros y condiciones iniciales del modelo GR4J..... | 28 |
| Cuadro 6. Parámetros y condiciones iniciales del modelo SOCONT | 30 |
| Cuadro 7. Parámetros y condiciones iniciales del modelo GSM..... | 31 |
| Cuadro 8. Clases de cobertura del suelo..... | 34 |
| Cuadro 9. Estaciones de temperatura..... | 35 |
| Cuadro 10. Gradientes de temperatura de los Andes en Perú en °C/100m (Rau, Condom, y Lavado 2013) | 36 |
| Cuadro 11. Imágenes satelitales usadas para la delimitación glaciaria | 40 |
| Cuadro 12. Destino de los retornos de las demandas de Quillcayhuanca..... | 47 |
| Cuadro 13. Parámetros tomados de observaciones en campo | 53 |
| Cuadro 14. Factores de corrección de temperatura | 60 |
| Cuadro 15. Gradientes térmicos altitudinales (°C/100m) de la zona de estudio..... | 60 |
| Cuadro 16. Factores de corrección finales de la estación Huaraz | 61 |
| Cuadro 17. Estadísticos de la serie de precipitación observada y del modelo RCA4 en la estación Huaraz..... | 79 |
| Cuadro 18. Probabilidad de precipitación cero estacional de la estación Huaraz..... | 79 |
| Cuadro 19. Estadísticos de los caudales observados y generados del RCA4 | 80 |
| Cuadro 20. Demanda poblacional urbana calculada de Huaraz | 82 |
| Cuadro 21. Información ingresada al modelo de Quillcayhuanca | 85 |
| Cuadro 22. Parámetros de mayor sensibilidad de los modelos..... | 85 |
| Cuadro 23. Indicadores de bondad de ajuste de las versiones de Quillcayhuanca | 86 |
| Cuadro 24. Coeficiente de Pearson mensual | 88 |
| Cuadro 25. Coeficiente de Pearson de época húmeda y seca | 88 |
| Cuadro 26. Parámetros calibrados del modelo GSM para Quillcayhuanca | 91 |
| Cuadro 27. Parámetros calibrados del modelo HBV de las distintas zonas de Quillcayhuanca .. | 93 |
| Cuadro 28. Garantías y déficit característico de las demandas en el periodo histórico | 106 |
| Cuadro 29. Gradientes altitudinales (°C/100m)..... | 111 |

| | |
|--|-----|
| Cuadro 30. Garantías y déficit característicos de las demandas bajo el escenario RCP 2.6 | 121 |
| Cuadro 31. Garantías y déficit característicos de las demandas bajo el escenario RCP 8.5 | 125 |
| Cuadro 32. Comparación de garantías de las demandas en los diferentes escenarios de evaluación | 131 |

Lista de Abreviaturas

- GRA: Gobierno Regional de Ancash – Perú
- IPCC: Intergovernmental Panel on Climate Change (Grupo Intergubernamental de Expertos sobre el Cambio Climático)
- NOAA: National Oceanic and Atmospheric Administration U.S. (Administración Nacional Oceánica y Atmosférica)
- Reanalysis: Reanalysis NCEP – NCAR
- UGRH: Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos de la Autoridad Nacional del Agua – Ministerio de Agricultura – Perú
- USGS: United States Geological Service (Servicio Geológico de los Estados Unidos)

1 INTRODUCCIÓN

La adecuada gestión de los recursos hídricos de una cuenca requiere un conocimiento amplio y apropiado sobre los procesos y fenómenos que ocurren en dicha cuenca. Este entendimiento permite planificar actuaciones que aseguren una demanda sostenible y, una oferta de agua permanente ahora y hacia el futuro.

Durante muchos años el entendimiento de las cuencas y sus procesos ha promovido una planificación estratégica en base al conocimiento de lo ocurrido en el pasado. Sin embargo el cambio climático rompe con esta tradición. Cada vez resulta más importante conocer cómo será el futuro y esto se logra con la planificación por escenarios que se convierte así en una nueva herramienta complementaria a la planificación estratégica.

En las cuencas de la vertiente del Pacífico de América del Sur, los recursos hídricos se componen básicamente de 2 fuentes: las precipitaciones durante la época de lluvias y deshielo de los glaciares durante la época de estiaje. Como es de esperar, el cambio climático representa una gran presión a estos sistemas hidrológicos. Una serie de estudios existentes en la región concluyen que durante los siguientes 50 años la oferta de agua será cada vez menor. Los motivos principales son el cambio en la estacionalidad de las precipitaciones y el deshielo acelerado de los glaciares por el incremento de la temperatura.

En particular, el sistema hidrológico¹ Quillcayhuanca ubicado en los Andes glaciares del norte del Perú y que fluye hacia el océano Pacífico, es un sistema del que dependen más de cien mil habitantes, y que junto con otras sistemas glaciares son la fuente de agua para muchos proyectos agroindustriales y energéticos de importancia nacional. Diversos estudios realizados han mencionado los posibles efectos del cambio climático de los que destaca la reducción en los caudales, concordantes con resultados a nivel regional.

Sin embargo los estudios existentes en Quillcayhuanca son generales, y aunque útiles, son limitados para realizar una adecuada planificación basada en escenarios. Incluso la

¹ La denominación común es “subcuenca Quillcayhuanca”. Para evitar confusiones con otras definiciones usadas en el presente estudio, se ha optado por utilizar el término “sistema hidrológico Quillcayhuanca”.

planificación estratégica puede resultar difícil debido a la escasa sistematización de la información hidrometeorológica existente.

Frente a estas circunstancias, es necesario caracterizar el sistema hidrológico, superar la limitación de información hidrometeorológica, identificar escenarios de cambio climático a escala regional y evaluar la respuesta del sistema frente a estos cambios, acciones que se desarrollan en el presente estudio.

Así, se prevé que el sistema Quillcayhuanca sufrirá cambios en el régimen hidrológico y una reducción de la oferta hídrica en los siguientes años como resultado del cambio climático, siendo importante además la cuantificación dicha reducción y la identificación de periodos clave.

La herramienta para el logro de todas estas acciones es el uso de modelos. Pero los modelos, independientemente de su tipo, acarrearán consigo incertidumbre asociada a nuestro limitado conocimiento del sistema natural. Tal incertidumbre se incrementa cuando la información no es abundante, y si se suma el uso de escenarios de cambio climático, las incertidumbres pueden ser mayores.

Por ello es necesario aclarar que los resultados del presente estudio sean tomados con cautela. Por un lado, se busca evaluar el comportamiento del sistema Quillcayhuanca frente al cambio climático, pero por otro lado también se busca identificar los aspectos que requieren mayores estudios para reducir las incertidumbres. Sólo así se podrá realizar una adecuada gestión de los recursos hídricos y se facilitará la planificación estratégica y por escenarios en el sistema hidrológico.

1.1 OBJETIVOS

El objetivo principal del presente estudio es evaluar el impacto del cambio climático en los recursos hídricos del sistema hidrológico Quillcayhuanca. Dentro de ello, los objetivos específicos son:

- Simular el estado de Quillcayhuanca en el periodo histórico 1983 - 1998
- Cuantificar la variación de la oferta hídrica y el régimen hidrológico bajo los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 de cambio climático entre el 2021 y 2050.

- Identificar periodos clave, como aquél periodo en el que ocurre un cambio importante del comportamiento de los caudales.

Las metas claves que permiten el logro de los objetivos son:

- la implementación de un modelo hidrológico que represente el sistema hidrológico de estudio incluyendo las ofertas y demandas.

Para ello se ha seleccionado el software RS Minerve, una aplicación que permite el uso de diferentes modelos hidrológicos semidistribuidos que representan tanto los sistemas glaciares y no glaciares. Con el modelo se evalúan las ofertas. La información concerniente a las demandas se obtiene a partir de estudios existentes.

- Sistematizar, extender y ampliar información meteorológica para el sistema hidrológico de estudio.

La información existente se encuentra a paso de tiempo mensual, la misma que luego de ser sistematizada, es extendida y/o interpolada con diferentes técnicas según el tipo de variable: temperatura media mensual y precipitación mensual. Adicionalmente se estima el área y volumen glaciar para diferentes años.

- Identificar un modelo de cambio climático y generar series meteorológicas futuras para el sistema hidrológico de estudio.

Se ha seleccionado el modelo RCA4, uno de los pocos modelos regionales de cambio climático para Sudamérica y que incluye los escenarios del AR5. Las series futuras de temperatura y precipitación se generan aplicando una corrección del sesgo comparada con las estaciones de terreno.

La evaluación de los recursos hídricos se realiza entonces a través de un modelo semidistribuido, con información meteorológica extendida y/o ampliada a paso de tiempo mensual.

1.2 ESTRUCTURA DEL DOCUMENTO

La estructura general de cada capítulo es un espejo de las metas clave. Así, los capítulos están subdivididos en generar el modelo hidrológico, analizar la información hidrometeorológica y generar las series de cambio climático.

En el capítulo 2 se describe el estado del arte. Se tratan los principales conceptos y metodologías en la modelación hidrológica haciendo énfasis en su aplicación en cuencas glaciares tropicales y de topografía accidentada como Quillcayhuanca. Además se hace referencia a estudios existentes en la región y en el hidrológico que tratan la relación de hidrología y el cambio climático.

En el capítulo 3 se describe la zona de estudio. Una caracterización general del sistema hidrológico Quillcayhuanca a nivel geográfico, meteorológico y socioeconómico. Además se indican las fuentes de información.

En el capítulo 4 se describe la metodología usada para el logro de los objetivos. Al inicio del capítulo indica de manera rápida el procedimiento general.

En el capítulo 5 se muestran y se discuten los resultados del estudio. El modelo calibrado, la información extendida y/o interpolada, el comportamiento futuro de los caudales y en el general el impacto del cambio climático en el sistema hidrológico Quillcayhuanca se detalla en este capítulo.

En el capítulo 6 se describen las conclusiones y recomendaciones. Finalmente, el capítulo 7 presenta la bibliografía usada en el presente estudio.

2 ESTADO DEL ARTE

2.1 MODELOS HIDROLÓGICOS

Un modelo es cualquier representación del mundo real. Proveen explicaciones simplificadas de sistemas complejos que permiten entender mejor el funcionamiento de dicho sistema. Así, los modelos hidrológicos forman la base de mucha de la hidrología moderna (Watts 1997).

Sin embargo, el término modelo es en sí mismo un justificante. El uso de las frases “este es mi modelo del fenómeno”, “esto proviene del modelo que...”, “nuestro modelo no captura algunos aspectos...” permite desde ya afirmar que los modelos tendrán errores, incertidumbres y aun así deberán proveer resultados adecuados y coherentes con la información disponible (Morton y Suárez 2001).

Una clasificación de los modelos es en términos de su formulación. Los modelos empíricos se concentran en describir el mundo como es, dando poca importancia a describir los principios físicos que lo rigen. Los modelos conceptuales por su lado están basados en la representación de los procesos que ocurren en el sistema hidrológico. Los modelos físicamente basados intentan representar rigurosamente los procesos que ocurren en el mundo real. Por ejemplo, un modelo físicamente basado de la hidrología del suelo usará la ecuación de Richards, mientras que un modelo conceptual usará simplificaciones e hipótesis como que la humedad del suelo es proporcional al flujo de agua en este (Watts 1997).

Otra clasificación está relacionada con la representación espacial. Los modelos agregados representan todo el sistema hidrológico como una unidad, se predicen unas salidas para las entradas sin informar de lo que ocurre dentro del sistema. En un modelo distribuido el área de estudio está dividida en porciones cada una de ellas con su propio conjunto de parámetros y sus propias variables de estado, cada porción recibe un flujo de materia y energía de algunas de sus vecinas que a su vez reemite a otras. Los modelos semidistribuidos se construyen a partir de la yuxtaposición de diversos modelos agregados que representan unidades de respuesta hidrológica homogénea. Se trata de segmentos de ladera homogéneos en cuanto a su pendiente, orientación, litología y uso a los que se asume una respuesta hidrológica única. En un modelo semidistribuido las

diferentes unidades generan sus propias salidas de forma agregada pero aparecen entradas y salidas de unas a otras (Alonso y Palazón 2008).

Diferentes tipos de modelos son apropiados para diferentes situaciones y propósitos. Ningún modelo puede ser considerado mejor que otro, cada uno posee sus propias ventajas y desventajas.

Los elementos esenciales de los modelos son los parámetros y las variables. Las variables son la cuantificación física de ellas mismas, por ejemplo: velocidad media, esorrentía, temperatura, etc. Los parámetros son los valores que controlan el comportamiento de las variables. De esta manera la calibración es el proceso por el cual se identifican los valores de los parámetros para que las variables observadas y simuladas coincidan en una situación particular (Ponce 1989). En el caso de los modelos agregados y semidistribuidos la mayoría de los parámetros no pueden ser calibrados por mediciones de campo, bien porque no tienen un significado físico o porque se aplican sobre un área bastante amplia (Watts 1997).

El grado de ajuste entre los valores de las variables observadas y simuladas se realiza a través de indicadores de bondad de ajuste. Los indicadores como Nash-Sutcliffe, el Nash-In, SESGO y el coeficiente de correlación de Pearson son algunos de los más usados en estudios hidrológicos.

Una forma complementaria a la evaluación individual de los indicadores de bondad de ajuste es el uso de las funciones multiobjetivo. En estas se combinan diferentes indicadores, cada uno con un peso específico. La calibración consiste entonces en hallar un conjunto de valores de los parámetros que maximicen la función objetivo.

Es inusual que un modelo genere resultados en el que los valores de las variables observadas se ajustan 100 % a las simuladas. Por ello es necesario identificar en qué condiciones se desea el mejor desempeño del modelo. Por ejemplo, en un modelo de crecidas los caudales pico serán lo esencial, pero en un modelo de gestión de recursos hídricos los caudales base serán de mayor interés (Watts 1997). Por lo tanto, definir el objetivo de la modelación permitirá identificar qué indicadores o función multiobjetivo se deben evaluar, así como los pesos que se deben asignar a cada indicador (Moriassi et al. 2007; Legates y McCabe 1999).

La validación tiene por objetivo la verificación del modelo. Se toman los parámetros calibrados y se procede a la simulación en un escenario distinto al usado en la calibración (Palacios 1986). Con este proceso se pretende demostrar que los componentes hidrológicos dominantes de una cuenca son adecuadamente simulados por el modelo. Esto es importante porque ningún modelo es diseñado sólo para mostrar cuán bien se ajusta a los datos usados en su implementación (Klemeš 1986).

En general el ajuste entre los resultados simulados y observados durante la calibración suelen ser más satisfactorios que los obtenidos en el proceso de validación (Palacios 1986). Una ventaja de los modelos distribuidos y semidistribuidos en este aspecto es que permiten tanto la validación temporal como la validación espacial o ambos a la vez (Francés, Vélez, y Vélez 2007).

2.2 EXTENSIÓN E INTERPOLACIÓN DE DATOS METEOROLÓGICOS

La limitada disponibilidad de registros de temperatura y precipitación en las zonas montañosas de Perú es bastante conocida, siendo necesario el uso de metodologías de extensión e interpolación de los datos existentes (Rau, Condom, y Lavado 2013).

2.2.1 Temperatura

La extensión de series de temperatura en los Andes ha sido llevada a cabo en los últimos años mediante el uso de datos de Reanálisis NCEP-NCAR siendo aplicada en múltiples estudios con resultados bastante adecuados (Schauwecker et al. 2014; Rau, Condom, y Lavado 2013; Vuille et al. 2008; Francou et al. 2004).

Los datos de Reanálisis son el resultado de un proyecto implementado por el National Center for Environmental Prediction (NCEP) y el National Center for Atmospheric Research (NCAR) de los Estados Unidos. El propósito del proyecto es la generación de una serie continua de datos atmosféricos a nivel global cuya fuente de información son datos proporcionados por diversas organizaciones y países. La base de datos tiene una resolución espacial de 2.5° y 17 diferentes niveles de presión atmosférica que proveen una serie de datos continua desde 1948 (Kalnay et al. 1996).

Los datos de Reanálisis deben ser corregidos para generar series a escala local. Francou et al. (2004) realizó una simple correlación lineal para corregir los datos de Reanálisis a 500 hPa (5572 m.s.n.m. aproximadamente) y así reproducir la serie de temperatura del

glaciar Zongo en Bolivia con resultados bastante buenos. Por su parte Rau, Condom y Lavado (2013) propusieron una metodología basada en la aplicación de un factor corrector mensual que depende entre otros del gradiente de temperatura local. En este caso los datos usados correspondieron a 8 estaciones meteorológicas de Perú ubicadas por encima de los 3000 m.s.n.m. con resultados igualmente aceptables.

2.2.2 Precipitación

La correcta estimación de la distribución espacial de la precipitación y la posterior extracción de datos puntuales son procesos complicados, situación que es mucho más crítica en zonas de montaña. Además de la naturaleza estocástica de la precipitación, se debe sumar la topografía irregular y la gran variabilidad de la altitud, pendientes y orientación que influyen en los vientos y otros factores que modifican las precipitaciones (Bettina Schaepli 2005; Buytaert et al. 2006).

En las interpolaciones, algunos autores usan la relación precipitación altura. Schaepli, B. (2005) halló un gradiente que se aplicaba a cuencas en los Alpes Suizos. Sin embargo el mismo autor señala la dificultad de aplicar y justificar físicamente dicho gradiente, siendo considerado un parámetro de calibración en modelos hidrológicos.

Entre los métodos más avanzados en zonas de montaña está el uso del Inverso de la Distancia Ponderada (IDW) debido a su fácil aplicación y bajo coste computacional (T. Condom et al. 2011; Schwarb et al. 2011). Mientras que otros autores han explorado el uso de técnicas geoestadísticas como el Kriging Ordinario comparando sus resultados con metodologías como el IDW. En la comparación de estas dos metodologías el uso del kriging ordinario ha generado mejores resultados simulando la precipitación en las zonas de alta montaña. Sin embargo los requerimientos computacionales son más complejos y se requiere plantear la hipótesis que la distribución espacial será constante bien para el área de estudio o bien para el periodo de estudio (Izquierdo y Márquez 2006; Ochoa et al. 2014; Olave 2015).

2.3 DINÁMICA DE LOS GLACIARES TROPICALES

Desde un punto de vista glaciológico, la zona tropical se caracteriza por: estar ubicada dentro de los paralelos tropicales (delimitación radiativa), la variación diaria de la temperatura es mayor a la variación anual (delimitación termal) y, se encuentran dentro

de la Zona de Convergencia Inter Tropical ITCZ ² (delimitación híbrida). Estas características atmosféricas tienen un efecto particular sobre los glaciares que los distinguen de otros ubicados en latitudes medias o superiores (Kaser 1999), por lo que se les denomina en conjunto glaciares tropicales.

En la Figura 1 se esquematiza la delimitación tropical según Kaser (1999) y al mismo tiempo se muestra la ubicación de los glaciares tropicales (circunferencias) y sus tamaños respectivos. Así estos glaciares se distribuyen en Sudamérica, África y Nueva Guinea. Sin embargo el 99 % se ubica en los Andes entre Perú (70 %), Bolivia (22 %), Ecuador (4 %) y Colombia (4 %) (Chevallier et al. 2011) donde además los glaciares se ubican a grandes altitudes por encima de los 4800 m.s.n.m. (Suarez et al. 2008).

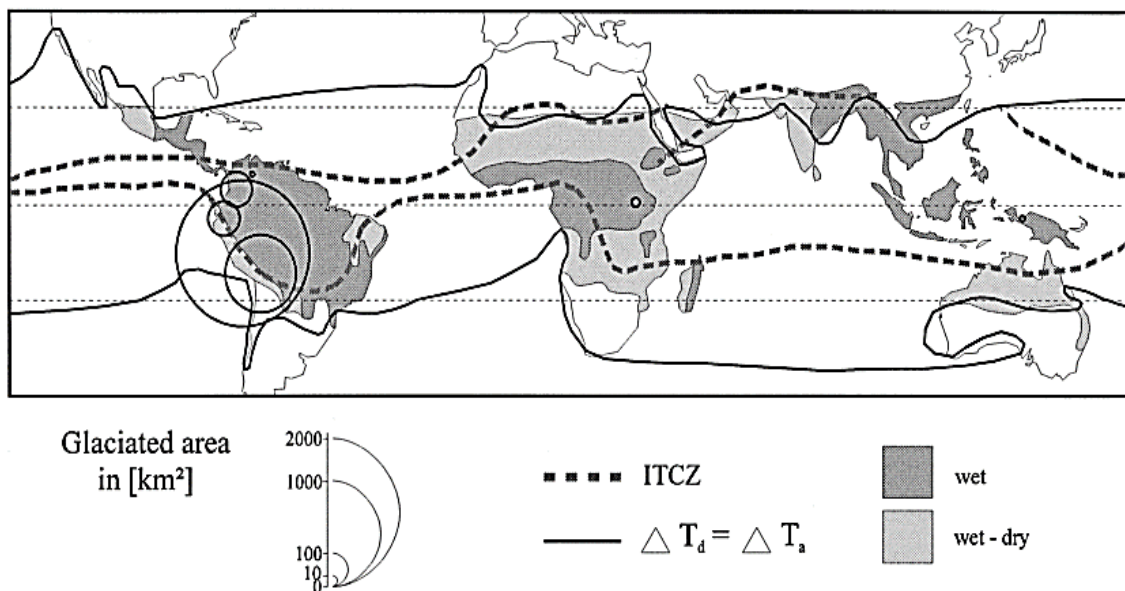


Figura 1. Delimitación de los trópicos desde un punto de vista glaciológico. Fuente: (Kaser 1999)

En los Andes en particular, estos glaciares juegan un rol importante en la disponibilidad de agua para todas las poblaciones ubicadas aguas abajo. Más del 80 % del agua fresca proviene de las montañas y gran parte es almacenada inicialmente en forma de hielo que se descarga gradualmente con el tiempo. Esto hace que los glaciares tropicales

² La zona de convergencia intertropical (ZCIT o ZCI) es la región del globo terrestre donde convergen los vientos alisios del hemisferio norte con los del hemisferio sur. A esta región también se la conoce como frente intertropical o zona de convergencia ecuatorial, en inglés se conoce por el acrónimo ITCZ (Intertropical Convergence Zone). Se caracteriza por ser un ancho cinturón de baja presión constituido por corrientes de aire ascendente, donde convergen grandes masas de aire cálido y húmedo provenientes del norte y del sur de la zona intertropical.

funcionen como un almacén de agua frente a la gran estacionalidad de la precipitación (Vuille et al. 2008).

2.3.1 Procesos de acumulación y ablación

Un glaciar es una masa de hielo que se alimenta de la precipitación sólida como nieve, granizo, escarcha, y la puede restituir en forma de vapor por sublimación/evaporación o en forma líquida por fusión. Dicha ganancia y pérdida se analizan como un balance (Francou et al. 2004).

En la Figura 2 se muestra el esquema del funcionamiento de una cuenca glaciar tropical cubierta parcialmente por hielo. Dentro del propio glaciar tropical, en la parte alta se ubica la zona de acumulación, donde la precipitación sólida se acumula antes de convertirse por la presión en firn y luego en hielo. En la parte baja está la zona de ablación donde predomina la fusión de hielo. Estas dos zonas se separan por la Línea de Equilibrio Altitudinal (ELA), por encima de ella el balance es positivo (zona de acumulación), y por debajo es negativo (zona de ablación). Así un balance neto negativo del glaciar constituye el retroceso del glaciar, y uno positivo representa un avance (Chevallier et al. 2011).

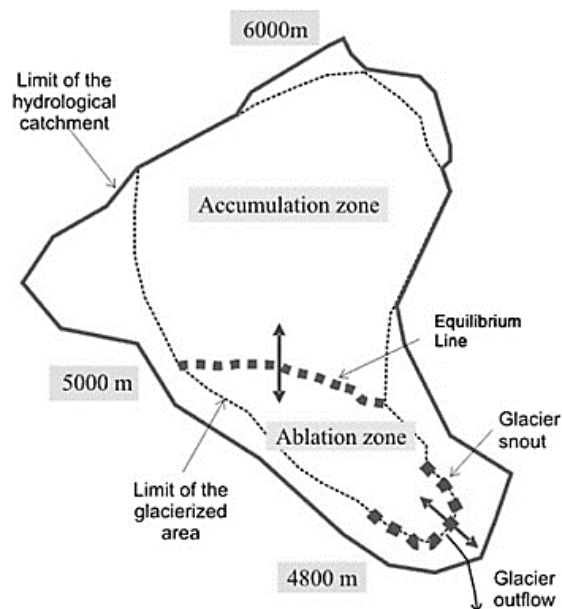


Figura 2. Esquema de una cuenca glaciar tropical. Fuente: (Chevallier et al. 2011)

Comparados con los glaciares de zonas templadas o polares, los glaciares tropicales poseen dos características distintivas que afectan el balance: 1) están expuestos a

niveles muy altos de energía por su ubicación tropical y su gran altitud y, 2) el periodo de máxima precipitación coincide con el verano austral, lo que provoca que en el tope del glaciar haya acumulación de nieve pero en las partes bajas una rápida fusión por la temperatura (Kaser y Osmaston 2002).

De esta forma la acumulación y la ablación que ocurren estacionalmente en los glaciares de zonas templadas o polares, ocurre simultáneamente a lo largo de todo el año en los glaciares tropicales (Rabatel et al. 2013).

La importancia de los balances de masa glaciar, entre otros, es que se pueden calcular los aportes de agua del glaciar, útil para los modelos hidrológicos. La forma tradicional de elaborar estos balances (ver Francou et al. 2004) es costosa y sólo se puede aplicar a un número limitado de glaciares que cumplan determinadas características. Por ello se han desarrollado modelos para estimar directamente los aportes de agua.

Estos modelos de fusión pueden clasificarse en dos: 1) modelos de balance de energía, que cuantifican la fusión como un residuo de la ecuación del balance de calor y, 2) modelos grado-día, que asumen una relación empírica entre la temperatura del aire y la tasa de fusión (Hock 2003). Los modelos de balance de energía son físicamente basados y requieren una gran cantidad de datos (radiación solar incidente, difusa, precipitación sólida, etc.) que sólo puede lograrse con estaciones meteorológicas completas instaladas en los glaciares. Por otro lado, los modelos grado día sólo requieren básicamente de la temperatura y precipitación pero no pueden explicar el proceso físico. Los modelos híbridos están basados en los modelos grado-día e incorporan mayor complejidad con los mismos datos de entrada siendo los más usados en la actualidad (Thomas Condom et al. 2009; Hock 2005; Rabatel et al. 2013).

Sea cual sea el método que se use para evaluar el balance glaciar y su aporte hidrológico, se necesita conocer cuál es el volumen glaciar. Una forma sencilla pero discutida es una relación empírica entre el área glaciar y el volumen que ocupa (Bahr, Meier, y Peckham 1997). Dicha relación fue calibrada a partir de estudios en glaciares de latitudes medias sin incluir ningún glaciar tropical en el estudio. Su discusión deriva de la alta autocorrelación existente entre el área y el volumen. A pesar de ello diversos estudios

en glaciares tropicales han usado la relación por su fácil aplicación y los pocos datos que se requieren para su cálculo (SENAMHI 2015; Suarez et al. 2015).

Otra metodología consiste en estimar el espesor glaciar a partir de modelos de elevación digital y que ha sido sistematizado para ser usado en ArcGIS bajo el nombre de GlabTop (Glacier bed Topography). El modelo está basado en la hipótesis que el espesor glaciar depende de la pendiente de la superficie glaciar (Paul y Linsbauer 2012; Linsbauer, Paul, y Haeberli 2012).

2.3.2 Glaciares tropicales y cambio climático

La respuesta de los glaciares frente a un cambio en el clima comienza con el ajuste de la ELA. A medida que las temperaturas se incrementan la ELA sube en altitud. Este cambio implica que la zona de acumulación se reduce, mientras que la zona de ablación se incrementa lo que conlleva a un retroceso del glaciar (IPCC, 2013).

Los glaciares tropicales tienen en general un tiempo de respuesta corto frente a los cambios del clima debido a las características atmosféricas a las que están expuestos y las condiciones topográficas accidentadas. Por ello el IPCC calificó a los glaciares tropicales como indicadores clave del cambio climático (Lemke et al. 2007).

En la actualidad se ha estimado que el aporte de los glaciares a la escorrentía total de las cuencas glaciares tropicales de Perú está entre el 30 y 55 % (T. Condom et al. 2011; Vuille et al. 2008). Esta situación conlleva a una preocupación generalizada pues los últimos inventarios muestran una reducción del área glaciar en Perú del 30 % entre 1960 y el 2000 (ANA 2010). Evaluaciones realizadas en el glaciar Zongo, Bolivia muestra que por cada incremento de 1 °C de temperatura la ELA sube en altitud 150 +/- 30 m. Así un incremento de 4 o 5 °C (según el escenario A2 para altitudes por encima de los 4000 m.s.n.m.) conlleva un incremento de la ELA entre 480 y 900 m (Rabatel et al. 2013). Con ello Rabatel estimó que la ELA se ubicaría entre 5630 y 6050 m.s.n.m. para finales del siglo 21. Las repercusiones esperadas de estos cambios en el régimen hidrológico son dos: 1) incremento de caudales en el periodo de lluvias y 2) reducción del mismo en el periodo sin lluvias. Ello ocurriría debido a que los glaciares tendrán una menor capacidad de amortiguamiento, de manera que la precipitación fluirá libremente y no se almacenará en los glaciares (Vuille et al. 2008).

2.4 CAMBIO CLIMÁTICO

Se define como “un cambio en el estado del clima identificable (por ejemplo, mediante análisis estadísticos) a raíz de un cambio en el valor medio y/o en la variabilidad de sus propiedades, y que persiste durante un período prolongado, generalmente cifrado en decenios o en períodos más largos” (IPCC 2007).

En particular, los Andes tropicales, y con ello las cuencas y poblaciones que dependen de ella, han sido catalogadas como regiones altamente vulnerables frente al cambio climático (Schauwecker et al. 2014; T. Condom et al. 2011; Carey et al. 2011; Buytaert et al. 2006). Para estudiar cómo un sistema determinado es afectado por el cambio climático es preciso el uso de modelos climáticos.

A pesar que los Modelos de Circulación Global (GCMs) son las fuentes tradicionales del clima futuro, su escala espacial es muy gruesa para aplicarse en estudios de escala local. A esto se suma que los resultados de todos los modelos incluyen una gran cantidad de errores intrínsecos que de no ser corregidos pueden conducir a evaluaciones incorrectas sobre el impacto del cambio climático (Ahmed et al. 2013).

Frente a ello se han llevado a cabo diversos proyectos que han generado Modelos Regionales del Clima (RCM) para diferentes partes del planeta. Estos modelos son la aplicación de procesos de downscaling dinámico, diferentes de los procesos de downscaling estadístico. En los últimos años se han desarrollado algunos RCM para Sudamérica tanto para escenarios de emisión como de cambio climático (Marengo et al. 2012).

El RCA4 (Rossby Centre regional Atmospheric model, versión 4) es uno de los pocos modelos regionales de libre acceso que posee un dominio de aplicación en todo Sudamérica. Está desarrollado por el SMHI (Instituto de Meteorología e Hidrología de Suecia). Posee dos versiones en función de dos GCM desarrollados por el Max Planck Institute (MPI) y el Irish Centre for High-End Computing (ICHEC). Posee una resolución de 0.44° y desarrolla datos para el periodo histórico y futuro en los forzamientos radiativos RCP2.6, RCP4.5 y RCP8.5 hasta finales del siglo 21.

Los datos del RCA4 son de libre acceso a través del proyecto CORDEX³, una iniciativa del WCRP⁴ que agrupa diferentes RCM con dominios a nivel mundial.

A pesar que los RCM poseen una escala espacial con mayor resolución, también poseen errores sistemáticos (sesgo) que deben ser corregidos. Una idea errada en este aspecto es querer que los datos observados se ajusten a los datos simulados por los RCM. Los RCM siguen siendo modelos que simplifican la realidad por lo que no debe esperarse que exista un ajuste exacto entre las series meteorológicas sino una similitud (Déqué 2007).

Muchas de las metodologías para la corrección del sesgo se aplican a escala de tiempo diaria con la hipótesis de que la representación mensual de los datos es correcta (ver Teutschbein & Seibert 2012). Otros estudios han aplicado la corrección del sesgo modificando la magnitud y validando los efectos de las series de precipitación y temperatura en modelos hidrológicos (Francés, Vélez, y Vélez 2007). En cualquier caso, la corrección del sesgo es un paso necesario en el uso de los modelos de cambio climático. Sin embargo el uso final de sus resultados y con ello las conclusiones que se puedan sacar deben ser evaluadas con cuidado (C. Teutschbein y Seibert 2013).

³ <http://www.cordex.org>

⁴ World Climate Research Programme es una organización fundada por la Organización Mundial de Meteorología (WMO) y el Consejo Internacional para la Ciencia (ICSU) y soportada por la UNESCO.

3 ZONA DE ESTUDIO E INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.1 EL SISTEMA HIDROLÓGICO QUILLCAYHUANCA

El sistema hidrológico Quillcayhuanca está ubicada en los Andes del norte de Perú. Abarca un área de 249.92 km² desde los 3017 hasta los 6208 m.s.n.m. (ver Figura 3). Según el último inventario de glaciares, al año 2010 tiene un área glaciar de 35.33 km² que representan el 14.1 % de la superficie total del sistema hidrológico (ANA 2010).

La cabecera de cuenca está conformada por la zona de glaciares y lagunas de origen glaciar. En total se identifican 40 lagunas, 25 de ellas menores a 1 ha. Las más grandes son Palcacocha y Tullparaju de 46.6 y 44.8 ha respectivamente (ANA 2010).

La red hidrográfica que nace en los glaciares está conformada por 3 quebradas y sus respectivos ríos: Cojup, Quillcayhuanca y Shallap. Estos dos últimos se unen para luego formar el río Aquí. El río Cojup cambia de denominación al juntarse con otros ríos más pequeños al nombre de Paria. La unión de los ríos Paria y Auqui forma el río Quillcay que finalmente se une al río Santa el cual desemboca en el océano Pacífico.

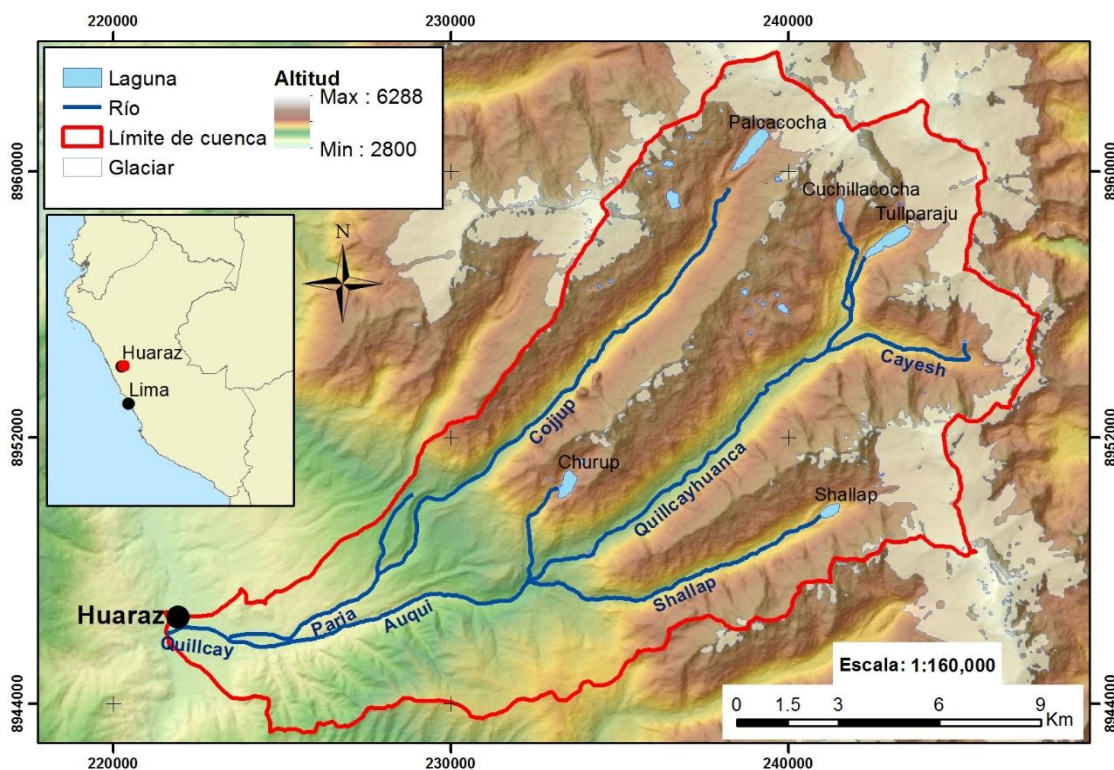


Figura 3. Mapa⁵ de ubicación del sistema hidrológico Quillcayhuanca

⁵ Fuentes de datos del mapa base: vectores de lagunas, ríos, límite glaciar y de cuenca: UGRH. Modelo de elevación digital: NASA

El sistema hidrológico Quillcayhuanca forma parte de un sistema más grande: la cuenca del río Santa. Gran parte de los afluentes de esta cuenca son de origen glaciar y nacen en lo que se denomina la Cordillera Blanca, conocida por ser el sistema montañoso tropical más alto del mundo y que abarca el 70 % de los glaciares de Perú.

3.2 INFORMACIÓN DISPONIBLE

3.2.1 Datos hidrometeorológicos

Los registros de precipitación, temperatura y descargas se obtuvieron de la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos. Esta entidad, adscrita al Ministerio de Agricultura de Perú, es la responsable en la actualidad del monitoreo y evaluación de las cuencas glaciares del país. La red hidrometeorológica comenzó a funcionar a principios de la década de 1950 y por diversos motivos dejó de funcionar en 1999.

En la cuenca del río Santa existen 39 estaciones pluviométricas, muchas de ellas con periodos de registro de entre 2 y 5 años. La mayoría de las estaciones eran pluviógrafos totalizadores con registros mensuales. De las 27 estaciones con periodos de registro suficientemente largos se han seleccionado 17 estaciones que se encuentran alrededor del sistema hidrológico Quillcayhuanca.

Las estaciones de registro de temperatura son mucho más escasas, identificándose sólo 13 estaciones en la cuenca del río Santa. De estas se seleccionaron dos estaciones: 1) Huaraz ubicada dentro del sistema hidrológico y, 2) Uruashraju por ser la estación más cercana a Quillcayhuanca y en ámbito glaciar.

La red de estaciones hidrométricas de la cuenca del río Santa cuenta con 16 estaciones de aforo, una de ellas instalada en el río Quillcay con registros desde 1953 hasta 1999. Aunque cuenta con registros diarios, estos no son accesibles, estando a disposición sólo los promedios mensuales.

Diversos estudios (SENAMHI 2009) han comprobado que el comportamiento de las variables atmosféricas es diferente entre el flanco oriental (dominado por montañas glaciares) y el flanco occidental (sin glaciares). Por ese motivo en el presente estudio sólo se han seleccionado estaciones de precipitación y temperatura ubicadas en el flanco oriental donde se ubica el sistema hidrológico Quillcayhuanca (ver Figura 4).

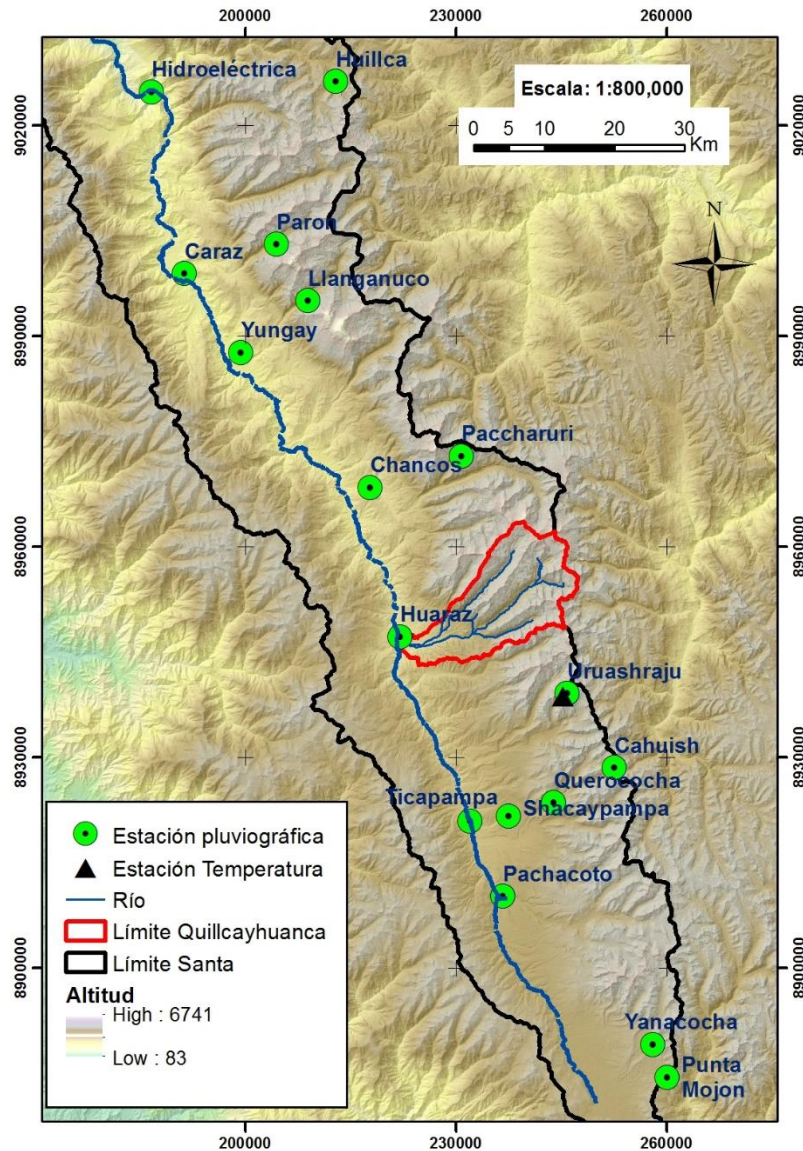


Figura 4. Mapa de ubicación de las estaciones meteorológicas

El año hidrológico está definido de setiembre a agosto, con un periodo húmedo entre setiembre y mayo, y un periodo seco entre junio y agosto. En la estación Huaraz (3042 m.s.n.m.) la precipitación total anual es de 642.6 mm, siendo los meses de mayor precipitación febrero y marzo con 118 y 121 mm cada uno. El mes de menor precipitación corresponde a julio con 0.9 mm. Las aportaciones en la estación Huaraz son un reflejo de las precipitaciones. La aportación anual es de 219.1 Hm³ siendo las máximas febrero y marzo con 27.82 y 30.53 Hm³ respectivamente. La aportación mínima corresponde al mes de julio con 8 Hm³.

En el Gráfico 1 además de las series anuales de precipitación y caudales de la estación Huaraz también se muestra la precipitación mensual de la estación Uruashraju (4692

m.s.n.m.). La precipitación total anual es casi el doble llegando a 1236 mm. La estacionalidad es la misma que la observada en Huaraz pero las precipitaciones máximas se registran en el mes de enero (221 mm) y la mínima en julio con 4.7 mm.

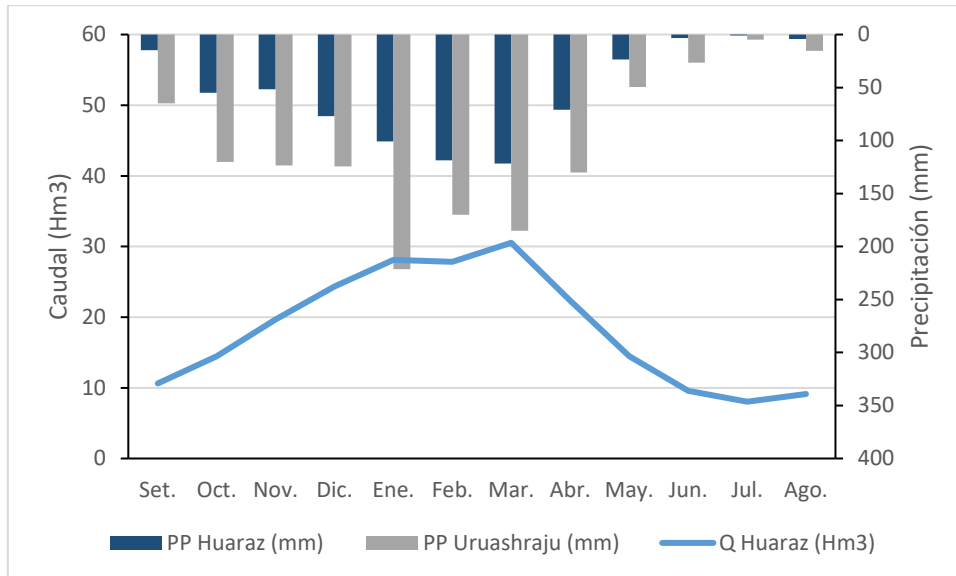


Gráfico 1. Precipitación y caudales promedio en la estación Huaraz

La temperatura en la estación Huaraz es la típica de las zonas tropicales de alta montaña. No se observa una estacionalidad estricta, siendo la temperatura promedio anual de 14.9 °C, la máxima de 15.4 °C en abril y la mínima de 13.5 °C en julio. En la estación de temperatura Uruashraju (4693 m.s.n.m.) las temperaturas son más bajas pero sigue un patrón similar al registrado en Huaraz, con una promedio anual de 2.8 °C, una máxima de 3.4 °C en mayo y una mínima de 2.1 °C en junio (ver Gráfico 2).

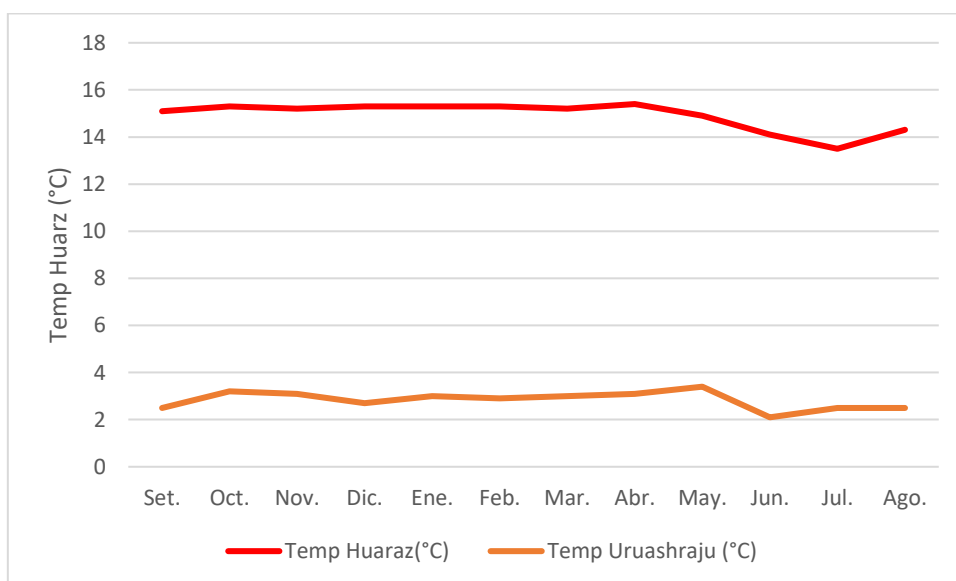


Gráfico 2. Temperatura mensual en la estación Huaraz y Uruashraju

3.2.2 Datos del territorio y uso del suelo

En la Figura 5 se muestra el mapa de cobertura del suelo del sistema hidrológico Quillcayhuanca y alrededores. El mapa es uno de los resultados del proyecto Evaluación Local Integrada en el río Santa – ELI Santa elaborado por el Ministerio del Ambiente de Perú. Fue elaborado a partir de imágenes satelitales aplicando procesos de clasificación supervisada con un tamaño de pixel de 30 m (MINAM 2009). En la figura también se muestra el límite del Parque Nacional Huascarán que ocupa un área de 189.7 km² (75.9 %) abarcando toda el área de glaciares y lagunas de la cuenca.

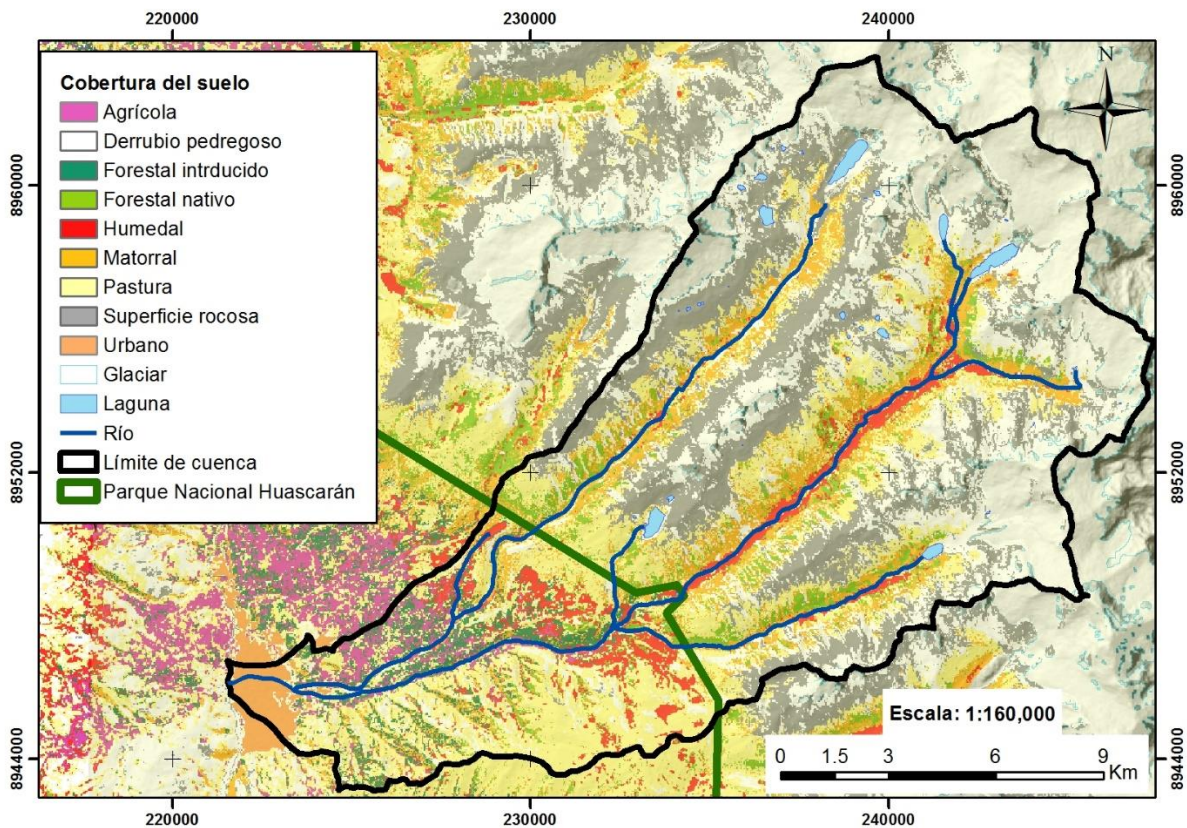


Figura 5. Mapa⁶ de la cobertura del suelo de Quillcayhuanca

De acuerdo a los resultados del ELI-Santa, las coberturas predominantes en Quillcayhuanca son los pedregosos y superficies rocosas (92.46 km²), las pasturas (55.29 km²), los glaciares (35.33 km²) y los matorrales (25.41 km²). La superficie agrícola es muy pequeña abarcando 4.36 km², mientras que los bosques abarcan un total de 19.16 km² (ver Gráfico 3).

⁶ Fuentes de datos del mapa base: vectores de lagunas, ríos, límite de cuenca: UGRH. Modelo de elevación digital: NASA. Cobertura del suelo: Proyecto ELI – Santa. Límite del Parque Nacional Huascarán: Jefatura del Parque Nacional Huascarán

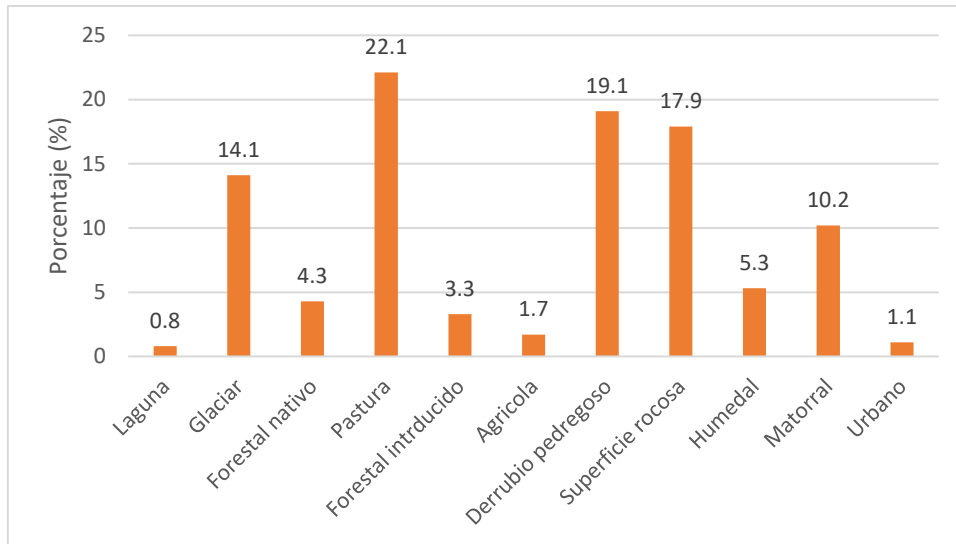


Gráfico 3. Porcentajes de cobertura del suelo en Quillcayhuanca

En función a la topografía se puede dividir el sistema hidrológico en 2 sectores, zona baja donde las pendientes son más suaves conformado por abanicos aluviales y zona alta donde predominan las pendientes altas y su ubican las montañas y glaciares (ver Figura 6). En general más del 43 % del sistema hidrológico tiene pendientes entre 25 y 50°, y menos del 10 % corresponde a pendientes suaves de hasta 7° configurando una cuenca accidentada (ver Gráfico 4).

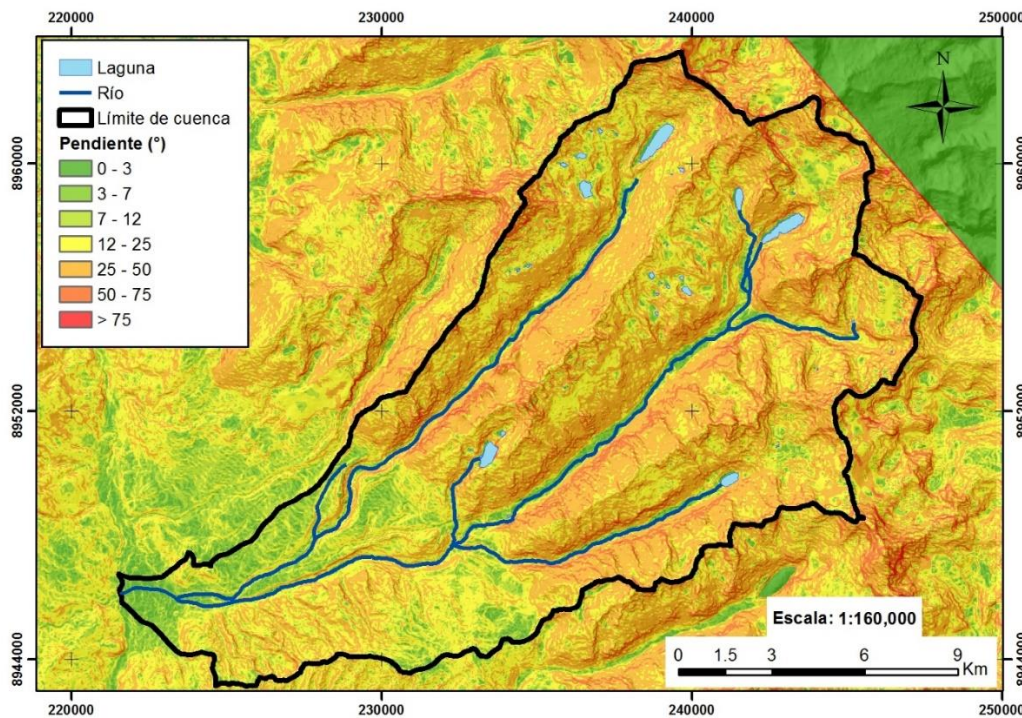


Figura 6. Mapa⁷ de pendientes de Quillcayhuanca

⁷ Fuentes de datos del mapa base: vectores de lagunas, ríos y límite: UGRH. Modelo de elevación digital: NASA

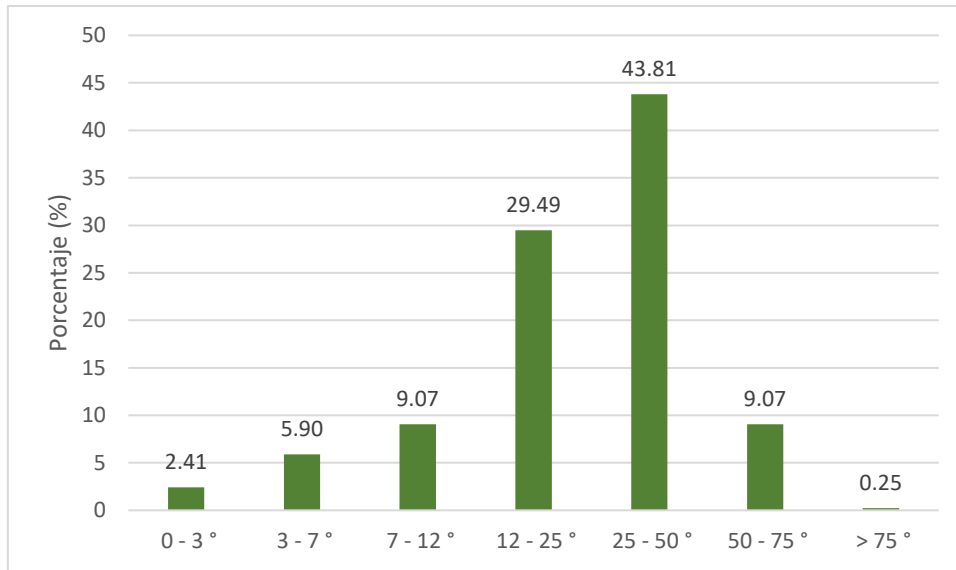


Gráfico 4. Porcentajes de pendientes de Quillcayhuanca

3.2.3 Demandas de agua

Se identifican 3 demandas de agua: agrícola, poblacional (urbano y rural), piscícola. No hay aprovechamientos energéticos (ver Figura 7).

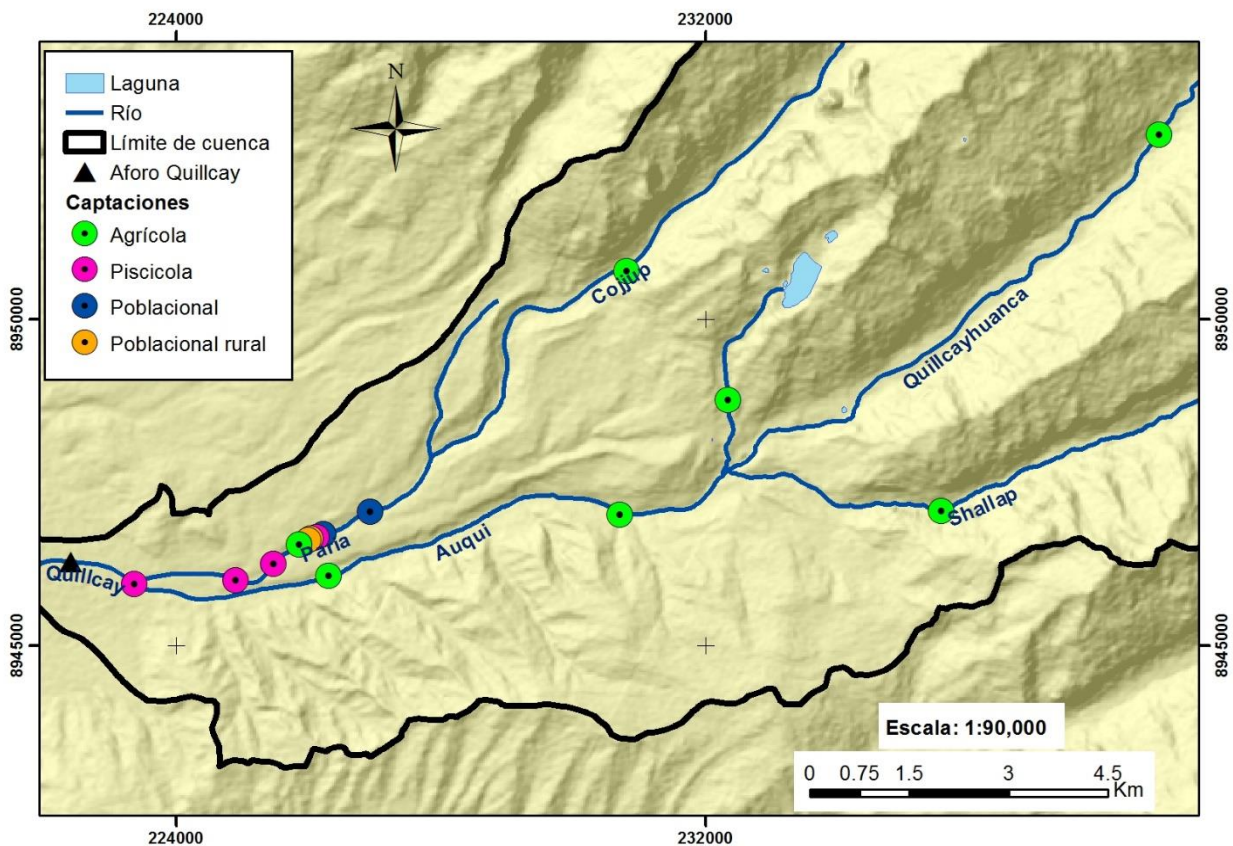


Figura 7. Mapa⁸ de captaciones de las demandas de agua en Quillcayhuanca

⁸ Fuentes de datos del mapa base: vectores de lagunas, ríos y límite de cuenca: UGRH. Modelo de elevación digital: NASA. Coordenadas de captaciones: (Quesquén 2008)

La demanda agrícola está representada por siete Comités de Usuarios que agrupan a todos los agricultores del sistema hidrológico según el punto de captación. El estudio más reciente sobre la demanda agrícola fue realizado por el Ministerio de Agricultura en el 2008. Todas las fuentes de agua son ríos del sistema hidrológico. El área en uso agrícola corresponde a 3987.05 ha⁹ con cultivos predominantes de tallo bajo, tubérculos, cereales y una escasa presencia de frutales. Los riegos se llevan a cabo a través de canales rústicos no revestidos empleando la técnica de inundación. Esta característica hace que la eficiencia de riego sea muy baja, y aunque no ha sido medida se asume un valor del 30 % (Quesquén 2008). En el Cuadro 1 se muestran las demandas agrícolas para cada comité de riego así como el área de riego respectivo. Estos valores son la cantidad de agua que se deriva en cada toma de río. La demanda neta corresponde al 30 % de los valores indicados.

Cuadro 1. Demandas agrícolas en Quillcayhuanca. Fuente: (Quesquén 2008)

| | Cojup | Nueva Florida | Churup | Pitec | Paquishca | Auqui | Shallap |
|------------------|---------------|----------------------|---------------|---------------|------------------|---------------|----------------|
| Área (ha) | 827.67 | 19.43 | 194.06 | 263.07 | 43.23 | 120.02 | 2519.57 |
| Set. | 41.5 | 1.0 | 9.6 | 13.0 | 1.8 | 5.2 | 108.9 |
| Oct. | 104.5 | 2.4 | 24.6 | 33.2 | 5.4 | 15.0 | 316.6 |
| Nov. | 456.2 | 10.6 | 106.8 | 144.6 | 22.0 | 61.2 | 1284.9 |
| Dic. | 1256.2 | 29.5 | 294.6 | 399.6 | 65.9 | 183.2 | 3847.3 |
| Ene. | 1157.1 | 27.1 | 271.1 | 367.5 | 55.7 | 154.5 | 3242.5 |
| Feb. | 1040.3 | 24.4 | 244.1 | 330.7 | 52.0 | 144.2 | 3029.1 |
| Mar. | 1036.5 | 24.4 | 242.9 | 329.4 | 50.9 | 141.4 | 2966.9 |
| Abr. | 899.4 | 21.0 | 211.0 | 285.9 | 53.7 | 149.3 | 3133.2 |
| May. | 648.2 | 15.3 | 152.1 | 206.2 | 35.9 | 99.4 | 2086.2 |
| Jun. | 23.3 | 0.5 | 5.7 | 7.8 | 2.1 | 5.7 | 117.9 |
| Jul. | 29.5 | 0.8 | 6.7 | 9.1 | 2.4 | 6.7 | 142.0 |
| Ago. | 26.8 | 0.5 | 6.4 | 8.8 | 2.4 | 6.7 | 140.6 |
| TOTAL | 6719.3 | 157.5 | 1575.7 | 2135.9 | 350.1 | 972.5 | 20415.9 |

* mmc: miles de metros cúbicos

La demanda piscícola corresponde a cuatro tomas de agua: 3 ubicada en el río Paria y una en el río Quillcay cuyos valores se observan en el Cuadro 2.

⁹ La diferencia entre el valor del estudio de Quesquén (2008) y el ELI-Santa (MINAM 2009) sobre el uso agrícola se debería a las técnicas usadas en cada estudio. Quesquén realizó una medición directa en campo, mientras que el MINAM realizó sólo una evaluación con imágenes satelitales. Es presumible que parte de las áreas identificadas como matorrales o pastos sean áreas agrícolas.

Cuadro 2. Demandas acuícolas. Fuente: (Tarazona 2008)

| Usuario | Asignación anual (mmc) | Fuente |
|--------------------------|-------------------------------|---------------|
| Usuario 1 | 6937.9 | Río Paria |
| Usuario 2 | 3156.3 | Río Paria |
| Usuario 3 | 1261.4 | Río Paria |
| Ministerio de Producción | 5424.2 | Río Quillcay |
| TOTAL | 16777.1 | - |

La demanda poblacional está compuesta por una demanda urbana y otra rural. La demanda rural tiene una asignación de agua tal y como la tiene la demanda agrícola (ver Cuadro 3). La tanto la infraestructura de conducción como de distribución se encuentran en mal estado por lo que se asumen también eficiencias bajas. Adicional a ello los retornos difusos son casi equivalentes a los retornos puntuales debido a que la red de saneamiento en los pueblos es limitada.

Cuadro 3. Demanda poblacional rural. Fuente: (Tarazona 2008)

| Usuario | Asignación anual (mmc) | Fuente |
|----------------|-------------------------------|---------------|
| Nueva Florida | 1513.7 | Río Paria |
| Los Olivos | 410 | Río Paria |
| TOTAL | 1923.7 | - |

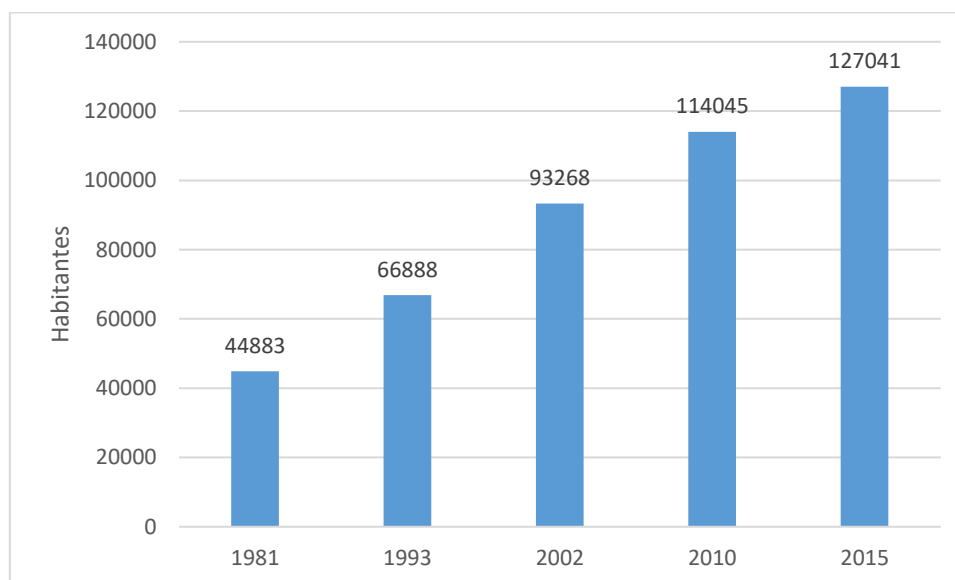


Gráfico 5. Censos poblacionales de la ciudad de Huaraz. Fuente: (INDECI 2002; INEI 2015)

La demanda poblacional urbana la compone la ciudad de Huaraz que tiene dos captaciones una en el río Auqui y otra en el río Paria. Desde el año 2005 la empresa encargada del tratamiento EPS Chavín ha dejado de usar las aguas del río Auqui debido a que estudios demostraron altas concentraciones de metales pesados de origen

natural. Antes de ello las captaciones de agua en los ríos llevaban una proporción de 25 y 75 de los ríos Paria y Auqui respectivamente.

La demanda poblacional urbana ha ido en aumento tal y como se evidencia en los censos poblacionales desde 1981 (ver Gráfico 5) y en la actualidad se captan 500 l/s sólo del río Auqui para atender a una población de 127 041 habitantes. De la cantidad captada sólo el 70 % llega a ser tratada debido a que existen fugas en la red de conducción.

4 METODOLOGÍA

La evaluación del impacto del cambio climático en el sistema hidrológico Quillcayhuanca se hizo con el uso de modelos hidrológicos semidistribuidos y conceptuales a través del software RS Minerve. Los datos a procesar y recabar fueron aquellos que los modelos requerían. En algunos casos estos datos fueron recopilados directamente y en otros fueron estimados a través de diferentes técnicas.

En un primer momento el modelo se construyó netamente para representar el proceso hidrológico histórico entre 1983 y 1998. Este periodo fue usado para calibrar y validar el modelo del sistema hidrológico, además de servir como línea base. En un segundo momento se usaron datos de cambio climático obtenidos de un RCM con dominio en Sudamérica para el periodo 2021 – 2050. Con estos datos se generaron nuevos resultados con la herramienta RS Minerve que fueron comparados con la línea base.

4.1 SOFTWARE RS MINERVE

Routing System Minerve (RS Minerve) es un software desarrollado en conjunto por el Centre de Recherche sur l'Environnement Alpin (CREALP) y la oficina de ingeniería HydroCosmos SA en colaboración de la Universidad Politécnica de Valencia y la Escuela Politécnica Federal de Lausana. Es de distribución gratuita y ha sido utilizado en diversos estudios tanto a nivel mundial como en Perú para la evaluación de los recursos hídricos (Astorayme et al. 2015; Lujano Laura et al. 2016; Chávez Torres 2016)

El software simula el proceso de lluvia-escorrentía permitiendo la modelación hidrológica e hidráulica de acuerdo a un esquema conceptual semidistribuido. Adicionalmente se puede simular dinámica glaciar, el flujo superficial y subterráneo, entre otros. Para ello el software dispone de diferentes modelos hidrológicos como HVB, GR4J, SOCONT, GSM. Además, cuenta con herramientas y modelos específicos para la propagación en cauces y elementos hidráulicos. Asimismo incluye una herramienta para la optimización de funciones objetivo a través de algoritmos como el SCE-UA (García Hernández et al. 2016). La combinación de diferentes modelos y herramientas permiten el desarrollo de complejos sistemas hidrológicos e hidráulicos.

Dado que Quillcayhuanca tiene un área glaciar permanente su representación requiere de modelos puramente glaciares y otros no glaciares. A continuación, se describen brevemente los modelos usados:

a) Modelo HBV

Es un modelo integrado desarrollado por el Instituto Meteorológico e Hidrológico de Suecia. Está compuesto por tres rutinas: de nieve, de humedad del suelo y de respuesta. Los datos de entrada son la altura de precipitación, la temperatura media y la evapotranspiración potencial. Está compuesto por 14 parámetros: 7 para la rutina de nieve (una modificación de la relación grado-día) y 7 para la rutina de suelo (que incluye la capacidad de almacenamiento de agua del suelo). En el Cuadro 4 se indican los parámetros y condiciones iniciales con sus respectivos valores característicos.

Cuadro 4. Parámetros y condiciones iniciales del modelo HBV.

| Nombre | Unidad | Descripción | Rango |
|----------|---------|---|-------------|
| CFMax | mm/°C/d | Factor de fusión de nieve | 0.5 a 20 |
| CFR | - | Factor de congelamiento | 0.05 |
| CWH | - | Contenido relativo crítico de agua en el paquete de nieve | 0.1 |
| TT | °C | Temperatura umbral lluvia/nieve | 0 a 3 |
| TTInt | °C | Intervalo de temperatura, mezcla lluvia/nieve | 0 a 3 |
| TTSM | °C | Temperatura crítica de fusión de nieve | 0 |
| FC | m | Capacidad de campo | 1 a 5 |
| Beta | - | Coefficiente de forma (infiltración) | 0.05 a 0.65 |
| PWP | - | Punto de marchitez de la vegetación | 0.03 a 1 |
| SUmax | m | Umbral de descarga directa (tanque superior) | 0 a 0.1 |
| Kr | 1/d | Coefficiente de descarga directa (tanque superior) | 0.05 a 0.5 |
| Ku | 1/d | Coefficiente de recesión (tanque superior) | 0.01 a 0.4 |
| Kperc | 1/d | Coefficiente de percolación | 0 a 0.15 |
| Kl | 1/d | Coefficiente de recesión (tanque inferior) | 0 a 0.8 |
| HsnowIni | m | Altura inicial de la nieve | - |
| WHIni | - | Contenido relativo de agua inicial en el paquete de nieve | - |
| HIni | m | Humedad inicial | - |
| SUIni | m | Nivel de agua inicial en depósito superior | - |
| SLIni | m | Nivel de agua inicial en depósito inferior | - |

El funcionamiento del modelo HBV se encuentra esquematizado en la Figura 8. Primero la precipitación es dividida en sólida y líquida como función de la temperatura pudiendo ser completamente sólida, completamente líquida o existir en ambos estados. La precipitación sólida es el dato de entrada a la rutina

de nieve cuyo contenido cambiará con el derretimiento o congelamiento, procesos que dependen también de la temperatura. La rutina de nieve incluye un almacén de agua que contiene la precipitación líquida y la nieve que se ha derretido, generando así una precipitación equivalente. Dicha precipitación es el dato de entrada a la rutina de humedad del suelo. Las salidas la conforman la evapotranspiración real (que depende la humedad del suelo existente, la capacidad de campo y el punto de marchitez) y la intensidad de recarga del suelo que va hacia el tanque superior del suelo. La escorrentía superficial es entonces calculada en función del nivel de agua del tanque superior, un umbral y un coeficiente de descarga. De este tanque se generan además dos flujos, un flujo subsuperficial y la percolación que va hacia el tanque inferior del suelo. De este último tanque se genera el flujo base. Así el flujo total es la suma del flujo superficial, subsuperficial y base (García Hernández et al. 2016).

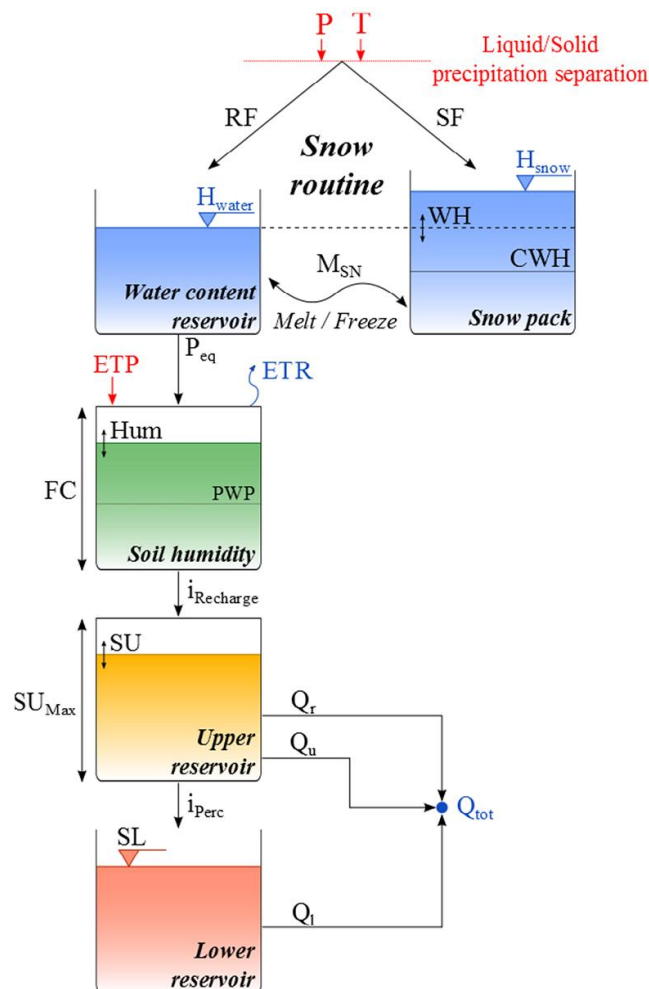


Figura 8. Esquema del modelo HBV. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016)

b) Modelo GR4J

Es un modelo desarrollado en Francia y aunque es empírico tiene una estructura similar a la de un modelo conceptual. Es un modelo bastante sencillo pero de gran potencial. Los datos de entrada son la precipitación y la evapotranspiración potencial. No hace simulación de nieve. Está compuesto por 4 parámetros y 2 tanques (producción y descarga). Además lleva asociados hidrogramas unitarios. Los parámetros se ven en el Cuadro 5

Cuadro 5. Parámetros y condiciones iniciales del modelo GR4J

| Nombre | Unidad | Descripción | Rango |
|--------|--------|--|----------------|
| X1 | m | Capacidad máxima del tanque de producción | 0.01 a 1.2 |
| X2 | m | Coefficiente de intercambio de aguas subterráneas | -0.005 a 0.003 |
| X3 | m | Capacidad máxima en el tanque de distribución | 0.01 a 0.5 |
| X4 | d | Tiempo base del hidrograma unitario | -0.5 a 1 |
| Slni | m | Contenido inicial de agua en el tanque de producción | - |
| Rini | m | Nivel inicial de agua en el tanque de distribución | - |

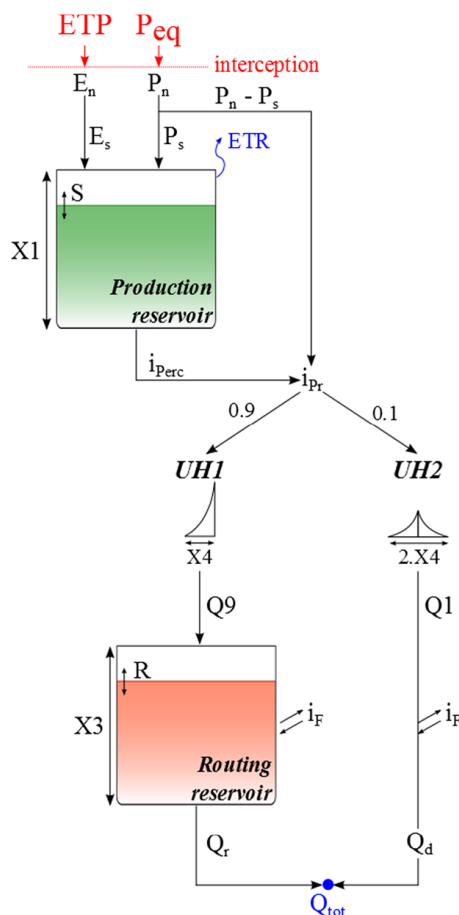


Figura 9. Esquema del modelo GR4J. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016)

En la Figura 9 se esquematiza el funcionamiento del modelo GR4J. En primer lugar, se determinan una precipitación y evapotranspiración netas, de manera que sólo una de ellas será diferente de cero. Luego se calcula la precipitación de entrada al tanque de producción o la evapotranspiración desde el tanque de producción (según cuál de los dos es diferente de cero) que dependen de la capacidad de almacenamiento en dicho tanque. Luego una cantidad escapa como percolación que alimentará los hidrogramas unitarios con los que se simula el desfase entre la lluvia y el caudal pico resultante. Una función de intercambio genera el agua subterránea desde el tanque de distribución más una fracción del segundo hidrograma unitario. Finalmente se genera un caudal de salida del tanque de distribución y un caudal complementario del segundo hidrograma unitario que forman la escorrentía total del modelo.

c) Modelo SOCONT

El modelo Soil Contribution (SOCONT) articula en serie a tres modelos de menor complejidad. El modelo Snow-GSM simula la evolución de la acumulación de nieve en función de la temperatura y precipitación (en una variante del modelo grado-día), la salida es llevada al modelo GR3 en el que se toma en cuenta a la evapotranspiración potencial y provee de la intensidad neta al modelo SWMM (García Hernández et al. 2016). En total se compone de 13 parámetros: 8 para la rutina de nieve y 5 para la rutina del suelo (ver Cuadro 6).

En la Figura 10 se esquematiza el funcionamiento del modelo SOCONT. En un primer paso la precipitación se divide en sólida y líquida dependiendo de las temperaturas críticas, pudiendo existir sólo una de ellas o ambas. La precipitación sólida es la entrada a la rutina de nieve cuyo contenido variará según los procesos de fusión o congelamiento. La nieve derretida y la precipitación líquida formarán una precipitación equivalente que alimenta el tanque de infiltración. En dicho tanque se genera entonces primero una intensidad de infiltración, segundo la evapotranspiración real, tercero la intensidad neta y cuarto un caudal base, todos dependientes del contenido de agua en el tanque. A partir de la intensidad neta se representa el flujo en una superficie impermeable tomando en cuenta las características de la superficie y

el coeficiente de Strickler. Así el caudal base y el caudal de escorrentía conforman el caudal total (García Hernández et al. 2016).

Cuadro 6. Parámetros y condiciones iniciales del modelo SOCONT

| Nombre | Unidades | Descripción | Rango |
|----------|---------------------|--|-------------|
| Asn | mm/ °C/d | Factor de referencia grado-día de fusión de nieve | 0.5 a 20 |
| AsnInt | mm/ °C/d | Intervalo de coeficiente grado-día de fusión de nieve | 0 a 4 |
| AsnPh | d | Cambio de fase de la función sinusoidal | 1 a 365 |
| ThetaCri | - | Contenido relativo de agua crítico en la rutina de nieve | 0.1 |
| Bp | d/mm | Coeficiente de fusión por precipitación líquida | 0.0125 |
| Tcp1 | °C | Mínima temperatura crítica para la precipitación líquida | 0 |
| Tcp2 | °C | Mínima temperatura crítica para la precipitación sólida | 4 |
| Tcf | °C | Temperatura crítica de fusión de nieve | 0 |
| HGR3Max | m | Altura máxima del tanque de infiltración | 0 a 2 |
| KGR3 | 1/s | Coeficiente de descarga del tanque de infiltración | 0.00025 a 1 |
| L | m | Longitud del plano | >0 |
| J0 | - | Pendiente de escorrentía | >0 |
| Kr | m ^{1/3} /s | Coeficiente de Strickler | 0.1 a 90 |
| HsnowIni | m | Altura inicial de nieve | - |
| HGR3Ini | m | Nivel inicial del tanque de infiltración | - |
| HrIni | m | Nivel de escorrentía inicial aguas debajo de la superficie | - |
| Thetalni | - | Contenido inicial de agua en la rutina de nieve | - |

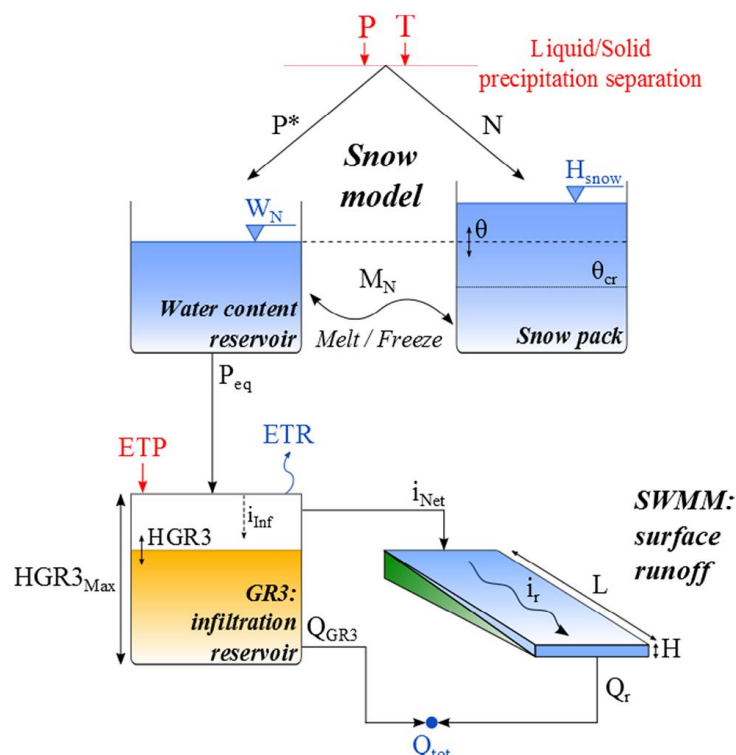


Figura 10. Esquema del modelo SOCONT. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016)

d) Modelo GSM

El modelo GSM es una agregación 5 tanques que simulan la dinámica glaciario sin incorporar ningún elemento del suelo. Los 2 primeros tanques corresponden al modelo Snow-GSM y tienen el mismo funcionamiento que el descrito anteriormente. Los otros 3 tanques corresponden al modelo glaciario, un símil del modelo de nieve (García Hernández et al. 2016). La salida del modelo es un caudal de escorrentía que no ingresa a ningún otro modelo. El modelo está compuesto por 14 parámetros, 8 para el modelo de nieve y 6 para el modelo glaciario (ver Cuadro 7).

Cuadro 7. Parámetros y condiciones iniciales del modelo GSM

| Nombre | Unidades | Descripción | Rango |
|-------------|-------------------|--|----------|
| Asn | mm/ °C/d | Coefficiente de referencia grado-día de fusión de nieve | 0.5 a 20 |
| AsnInt | mm/ °C/d | Intervalo de coeficiente grado-día de fusión de nieve | 0 a 4 |
| AsnPh | d | Cambio de fase de la función sinusoidal | 1 a 365 |
| ThetaCri | - | Contenido relativo de agua crítico en la rutina de nieve | 0.1 |
| Bp | d/mm | Coefficiente de fusión por precipitación líquida | 0.0125 |
| Tcp1 | °C | Mínima temperatura crítica para la precipitación líquida | 0 |
| Tcp2 | °C | Mínima temperatura crítica para la precipitación sólida | 4 |
| Tcf | °C | Temperatura crítica de fusión de nieve | 0 |
| Agl | mm/ °C/d | Coefficiente de referencia grado-día de fusión glaciario | 0.5 a 20 |
| AglInt | mm/ °C/d | Intervalo de coeficiente grado-día de fusión glaciario | 0 a 4 |
| Tcg | °C | Temperatura crítica de fusión glaciario | 0 |
| Kgl | 1/d | Coefficiente de descarga del tanque de fusión glaciario | 0.1 a 5 |
| Ksn | 1/d | Coefficiente de descarga del tanque de fusión de nieve | 0.1 a 5 |
| HsnowIni | m | Altura inicial de nieve | - |
| Thetalni | - | Contenido inicial de agua en la rutina de nieve | - |
| QsnowIni | m ³ /s | Salida inicial del tanque de nieve | - |
| QglacierIni | m ³ /s | Salida inicial del tanque glaciario | - |

En la Figura 11 se esquematiza el funcionamiento del modelo GSM. Los tanques de nieve funcionan exactamente igual al modelo Snow-GSM del modelo SOCONT. La precipitación equivalente generada se transfiere entonces a un tanque del que se generará una escorrentía producto de la fusión de la nieve y la precipitación líquida. El modelo glaciario sólo se activa cuando la altura de nieve en el modelo de nieve es cero o menor, en ese momento el glaciario comienza a fundir según la temperatura crítica enviando su flujo a un tanque de almacenamiento donde se genera la escorrentía del glaciario. Finalmente el caudal total está conformado por el caudal de nieve y el caudal de hielo (García

Hernández et al. 2016). El modelo no simula la conversión de nieve en hielo. Además, se asume que el glaciar es infinito de manera que puede fundir sin restricción.

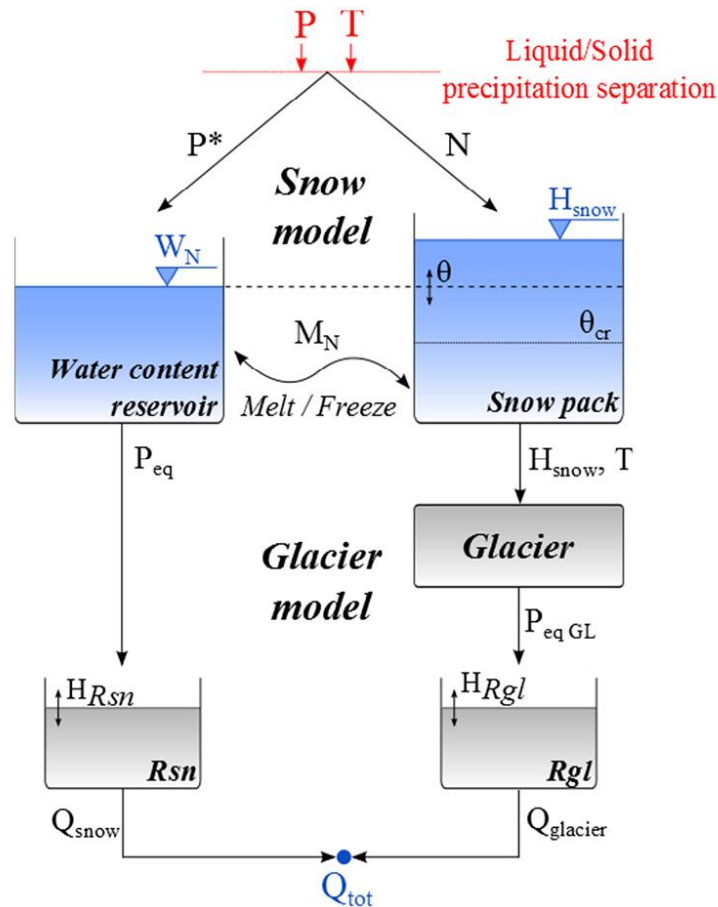


Figura 11. Esquema del modelo GSM. Fuente: Manual del RS Minerve (García Hernández et al. 2016)

4.2 DELIMITACIÓN DE SUBCUENCAS

La implementación de modelos semidistribuidos implica la identificación de zonas homogéneas en comportamiento hidrológico o comúnmente llamados subcuenca. Para el caso específico de Quillcayhuanca la delimitación de los subcuenca se ha realizado en 3 niveles: límite de microcuenca, rango altitudinal y cobertura del suelo.

Se ha dividido a Quillcayhuanca en 14 microcuencas: 6 glaciares y 8 no glaciares. La delimitación es hidrológica siguiendo las divisorias de agua. Con los rangos altitudinales se asume que las condiciones meteorológicas son similares a lo largo del territorio que cubre el rango altitudinal. En total se delimitaron 10 rangos: 4 de ellos con intervalos de 250 m que abarcan la zona baja de Quillcayhuanca con pendientes suaves y, 6 de ellas con intervalos de 200 m que abarcan la zona alta y glaciar con pendientes fuertes. De la

intersección de estos dos niveles se identificaron en total 72 subcuencas, cada uno de los cuales fue representado con un modelo hidrológico.

A diferencia del límite de cuenca y el rango altitudinal que fragmentaron Quillcayhuanca, la cobertura del suelo sirvió para agrupar los subcuencas. Así los subcuencas cuya cobertura del suelo fuese similar se agruparían para calibrarse en conjunto.

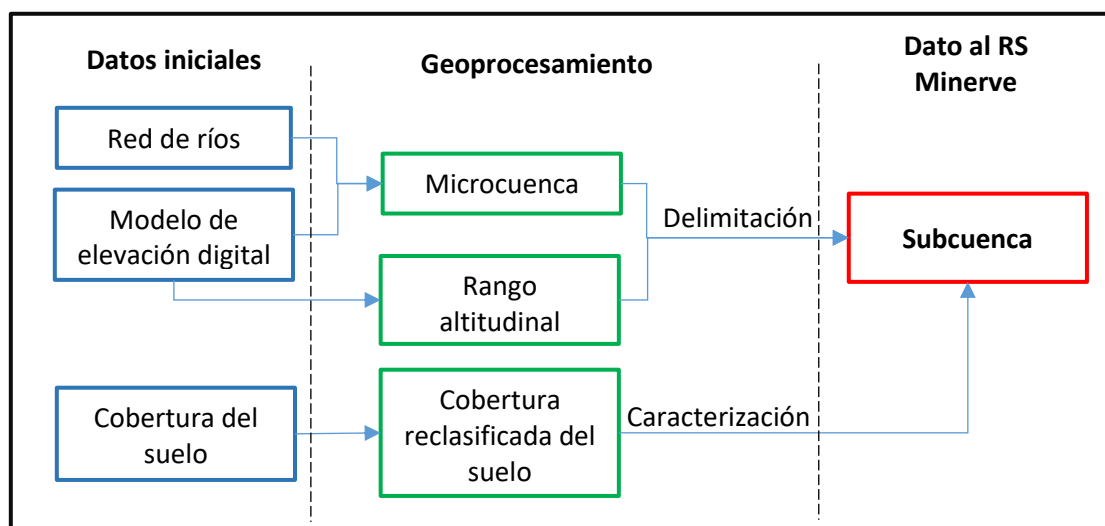


Figura 12. Esquema de la metodología para la delimitación de subcuencas

La herramienta principal en esta etapa fue el uso de sistemas de información geográfica (SIG) y geoprocesamiento. Los datos de partida fueron la red de ríos de Quillcayhuanca en formato vectorial provista por la UGRH, un modelo de elevación digital con tamaño de píxel de 30 m descargado de la web de la NASA¹⁰ y el mapa de cobertura del suelo con tamaño de píxel de 30 m obtenido del GRA (ver Figura 12).

La delimitación de las microcuencas se realizó de forma asistida con SIG cuyo resultado fue luego verificado y corregido por evaluación experta. Los rangos altitudinales se construyeron a partir de la clasificación por bandas a partir del modelo de elevación digital.

La cobertura del suelo siguió un procedimiento más complejo con SIG. El mapa original cuenta con 11 clases de cobertura, algunas de ellas con áreas pequeñas (ver sección 3.2.2). El uso de todas estas coberturas resultaría en una complejidad innecesaria del modelo porque habría que distinguir, por ejemplo, entre los parámetros de una

10

https://reverb.echo.nasa.gov/reverb/#utf8=%E2%9C%93&spatial_map=satellite&spatial_type=rectangle

cobertura forestal introducida y una nativa. Por ello se optó por reclasificar las coberturas existentes en otras más sencillas. Para ello las 11 coberturas iniciales se reclasificaron en 6 coberturas (ver Cuadro 8) según su semejanza. Luego se aplicaron 3 filtros para simplificar y reagrupar los píxeles: por vecindad (la cobertura diferente en un grupo de 9 se asimila a los predominantes), por tamaño (coberturas con tamaños menores a 2 ha se asimilan a los predominantes) y generalización (coberturas aisladas se asimilan a los predominantes).

Cuadro 8. Clases de cobertura del suelo

| Cobertura inicial | Cobertura reclasificada |
|----------------------|-------------------------|
| Glaciar | Glaciar |
| Forestal nativo | Forestal |
| Forestal introducido | |
| Pastura | Pastos |
| Matorral | |
| Agrícola | Agrícola |
| Laguna | Derrubio |
| Derrubio / pedregoso | |
| Superficie rocosa | |
| Urbano | Humedal |
| Humedal | |

Como resultado del proceso cada uno de los 72 subcuencas puede describirse según la microcuenca a la que aporta, las condiciones meteorológicas de su rango altitudinal y la cobertura del suelo que predomina. En la Figura 13 se muestra el mapa final de subcuencas, nótese que no se observa una clase predominante forestal debido a que esta cobertura se encuentra muy esparcida. Ello ha llevado a que esta cobertura sea incluida dentro de otras sólo desde el punto de vista de la agrupación.

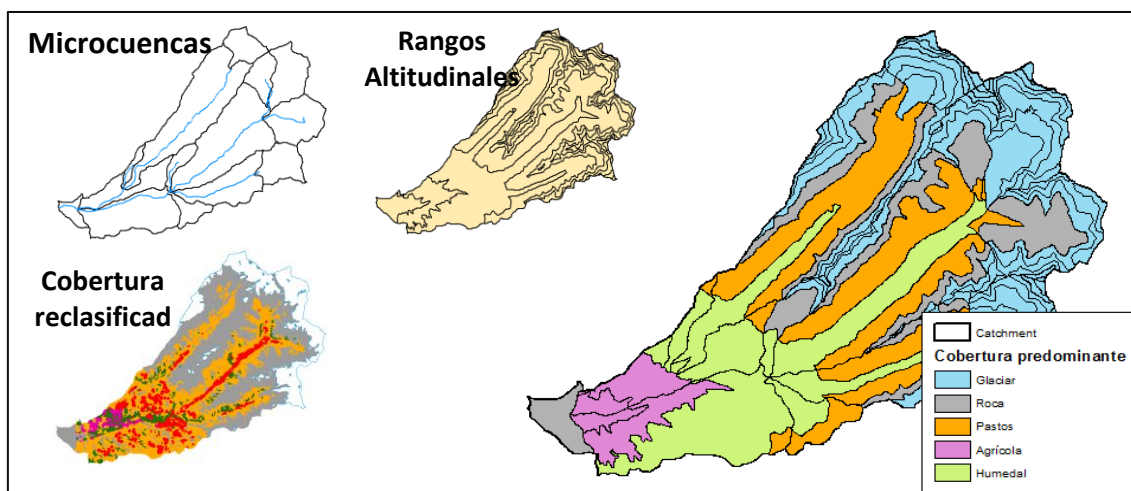


Figura 13. Esquema de subcuencas de Quillcayhuanca

4.3 EXTENSIÓN DE LA TEMPERATURA

Los registros de temperatura para Quillcayhuanca han sido tomados de 2 estaciones: Huaraz ubicada en la zona baja dentro del sistema hidrológico y, Uruashraju ubicada fuera del sistema hidrológico (a 15 km) pero en la zona alta (ver Cuadro 9). Uruashraju es una de las pocas estaciones ubicadas a más de 4000 m.s.n.m. Otras estaciones como Parón o Llanganuco ubicadas también a grandes altitudes se encuentran muy alejadas de Quillcayhuanca (a 60 y 50 km respectivamente) por lo que no han sido tomadas en cuenta (ver 3.2.1).

Cuadro 9. Estaciones de temperatura

| Estación | Altitud (m.s.n.m.) | Periodo de registro | Fuente |
|------------|--------------------|---------------------|--------|
| Huaraz | 3063 | 01/1979 – 12/1993 | URGH |
| Uruashraju | 4693 | 10/2003 – 09/2004 | UGRH |

Debido a que el periodo de estudio histórico es entre 1983 y 1998 se debe hacer una extensión de los registros de las dos estaciones. Para ello se usaron datos de Reanálisis NCEP-NCAR descargados de la web de la NOAA¹¹. Los datos fueron descargados para la ubicación -77.5, -10.0 longitud y latitud cuya celda de 2.5° x 2.5° cubre todo el sector sur y centro de la cuenca del Santa y con ello Quillcayhuanca.

Los datos de Reanálisis NCEP-NCAR se analizan para una determinada presión atmosférica, es decir se cuenta con datos de temperatura para distintas altitudes. Por ello tres diferentes niveles de presión atmosférica fueron evaluados: 500 hPa (5572 m.s.n.m. aproximadamente), 600 hPa (4207 m.s.n.m. aproximadamente) y 700 hPa (3010 m.s.n.m. aproximadamente). Con ello se contaba entonces con un registro de temperaturas mensuales desde 1948 hasta el 2010 en grados Kelvin.

Para extender los datos de temperatura con los datos de Reanálisis NCEP-NCAR se evaluaron tres metodologías: correlación lineal, factor de corrección (Rau, Condom, y Lavado 2013) y correlación entre estaciones.

¹¹ NCEP Reanalysis data provistos por la NOAA/OAR/ESRL PSD, Boulder, Colorado, USA, de su sitio web en <https://www.esrl.noaa.gov/psd/data/gridded/data.ncep.reanalysis.pressure.html>

1. Correlación lineal

Se evaluó la correlación lineal de cada estación con los datos de Reanálisis NCEP-NCAR a diferentes altitudes.

2. Factor de corrección

Se aplicó la metodología propuesta por Rau et al. (2013) que consiste en calcular un factor de corrección mensual para cada estación:

$$f_{c_i} = \frac{BS_i + \Gamma_i \cdot (h_{BS} - h_{NNR^k}) + \Gamma_i \cdot (h_x - h_{NNR^k})}{NNR_i^k}$$

Fci: factor de corrección del mes i

BSi: temperatura media de la estación base para el mes i

Γi: gradiente para el mes i

NNR k,i: promedio de datos del Reanálisis NCEP-NCAR para el mes i y presión k

hBS: altitud de la estación base en m.s.n.m.

hx: altitud en m.s.n.m. a la que se quiere corregir el Reanálisis NCEP-NCAR

hNNR k: altitud del Reanálisis NCEP-NCAR para la presión k

El factor de corrección requiere conocer previamente el gradiente de temperatura para cada mes. Dado que este es un dato desconocido a partir de los datos disponibles, se optó por usar los gradientes hallados por Rau et al. (2013) para los Andes peruanos (ver Cuadro 10).

Cuadro 10. Gradientes de temperatura de los Andes en Perú en °C/100m (Rau, Condom, y Lavado 2013)

| Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Oct. | Nov. | Dic. |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|------|-------|-------|-------|-------|
| -0.79 | -0.79 | -0.77 | -0.78 | -0.99 | -1.16 | -1.13 | -1.1 | -1.06 | -0.97 | -0.94 | -0.88 |

Una vez calculado el factor de corrección, este se aplica a los datos de Reanálisis NCEP-NCAR pero previamente corregidos con la altitud. Esta corrección se aplica porque la altitud del Reanálisis no coincide con la altitud de la estación de observación. Se trata de sumar al dato de Reanálisis un valor equivalente a la diferencia de alturas entre la estación de observación y Reanálisis, multiplicados por el gradiente de temperatura teórico -0.65 °C/100m (Rau, Condom, y Lavado 2013).

3. Correlación entre estaciones

Esta técnica requiere que el registro histórico de datos de una estación coincida en parte con los de otra estación para aplicar una correlación lineal. Sin embargo, esta metodología no puede ser aplicada de inmediato pues las series de las

estaciones Huaraz y Uruashraju no coinciden. Para subsanar esta situación primero se completaron las series de ambas estaciones por separado aplicando las dos primeras técnicas. Luego se evaluó la correlación lineal entre las estaciones considerando que una está completa y la otra no.

4.4 INTERPOLACIÓN DE LA PRECIPITACIÓN

Los datos de precipitación para el estudio de Quillcayhuanca provienen de la base de datos de la URGH. Dado que en Quillcayhuanca sólo hay una estación de precipitación ubicada en la zona baja, se optó por usar otras estaciones de la cuenca del río Santa. Con ello se pretendía capturar la distribución espacial de un sector más amplio y luego restringirlo al sistema hidrológico de estudio.

En total se han seleccionado 16 estaciones ubicadas en el flanco este de la cuenca del Santa (ver Figura 4). Los registros corresponden al periodo entre enero de 1983 y diciembre de 1998 a paso de tiempo mensual. Dada dicha extensión de datos el problema deviene en la interpolación de precipitación.

Para ello se han evaluado dos técnicas: Inverso de la Distancia Ponderada y Kriging Ordinario. Ambas técnicas se evaluaron con la ayuda de sistemas de información geográfica.

Con el propósito de facilitar la comparación, las técnicas se evaluaron para los promedios mensuales multianuales, de manera que sólo se evaluaron 12 series, una para cada mes del año. Con estas series se realizó primero un análisis exploratorio de los datos para evaluar su distribución a través de histogramas y análisis de tendencia espacial.

1. Inverso de la Distancia Ponderada (IDW)

Los datos de precipitación mensual de cada estación se usaron para crear una superficie de precipitación continua para cada mes. La aplicación del IDW con sistemas de información geográfica depende de 3 factores:

- **Potencia:** controla el peso que tendrán las estaciones alrededor de un punto a interpolar. El rango está entre 0.5 y 3, mientras más alto el valor menos peso tendrán las estaciones más lejanas.

- Número de puntos: la cantidad de estaciones que se tomarán en cuenta para realizar la interpolación.
- Máxima distancia: la máxima distancia de búsqueda de estaciones cercanas para realizar la interpolación.

2. Kriging ordinario (KO)

La clave principal para la aplicación del KO y cualquier técnica geoestadística es el ajuste de los parámetros del semivariograma. Esta complejidad del KO implicaría realizar el análisis individual para 180 meses, algo que no es práctico. Por ello se planteó la hipótesis que la distribución espacial de la precipitación de un mes determinado es la misma en toda la serie de datos. Con ello se podían evaluar y ajustar los semivariogramas y otros parámetros geoestadísticos sólo con los promedios mensuales multianuales. En términos prácticos esto significa que los parámetros y semivariograma hallados con el promedio multianual de enero son válidos y se aplican a todos los enero de la serie de datos. Bajo esta hipótesis sólo se debían ajustar 12 semivariogramas, una para cada mes.

Para ello se siguieron una serie de criterios generales dada la naturaleza aleatoria y dispersa de la precipitación:

- El modelo teórico del semivariograma debe ser exponencial o esférico
- Existencia de anisotropía en la precipitación
- El vecindario de búsqueda no debe ser excesivamente grande (la precipitación del extremo norte tiene muy poca relación con la precipitación del extremo sur)

Además de estos criterios, la elección de un modelo de semivariograma u otro tomó como referencia la validación cruzada. Esta técnica consiste en interpolar la precipitación con el semivariograma ajustado, pero quitando una estación. Así se puede medir el nivel de predicción del semivariograma para cada estación.

Los resultados de la validación cruzada sólo son referenciales y sólo se usan para elegir entre un modelo de semivariograma y otro. No se puede aplicar para comparar con otras técnicas de interpolación como el IDW

La decisión final de usar los resultados de una técnica u otra dependía que pueda representar adecuadamente la distribución de la precipitación. Era de especial interés interpolar la precipitación en las zonas altas de Quillcayhuanca, a partir de los 5000 m.s.n.m. donde se ubican los glaciares.

Una vez identificada la técnica más adecuada era necesario aplicarla a cada mes de cada año. Para simplificar esta tarea se diseñaron modelos de iteración con el sistema de información geográfica de manera que los parámetros hallados con el IDW o el KO sean aplicados a cada mes de cada año. De esta forma se generaron 180 superficies de precipitación con un tamaño de pixel de 30 m.

De cada superficie se extrajeron los registros de precipitación para puntos específicos dentro de Quillcayhuanca, las que se denominaron estaciones ficticias (EF). En total se crearon 17 EF ubicadas en puntos clave de Quillcayhuanca como divisorias de aguas y fondos de valle, con especial interés en la zona alta de glaciares (ver Figura 14).

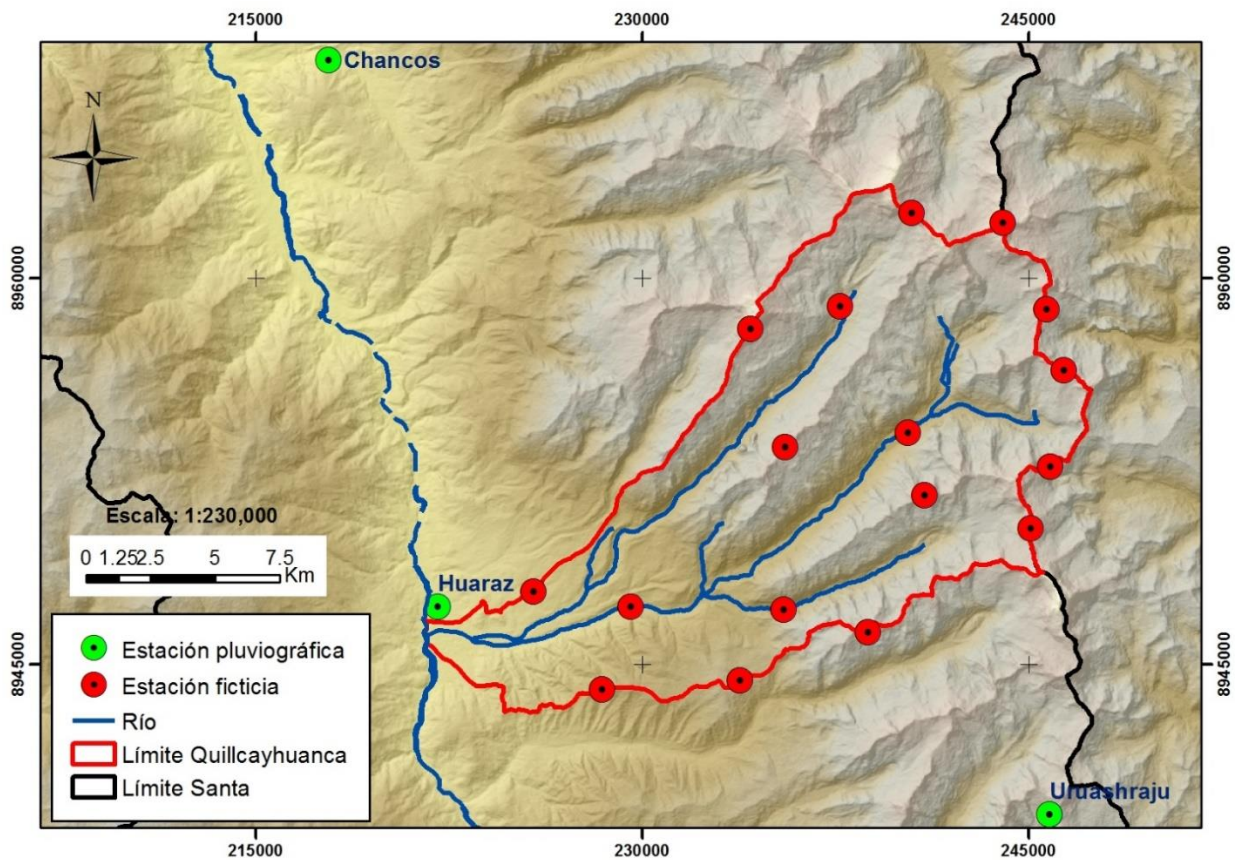


Figura 14. Mapa¹² de ubicación de estaciones ficticias

¹² Fuentes de datos del mapa base: vectores de ríos y límite de cuencas: UGRH. Modelo de elevación digital: NASA

4.5 ESTIMACIÓN DE LA ALTURA GLACIAR

Una parte importante del modelo GSM para la simulación glaciar son las condiciones iniciales de altura del glaciar en cada Subcuenca. En esta perspectiva el objetivo de la estimación glaciar no es evaluar su evolución y futuro desarrollo, sino estimar la altura promedio del glaciar en diferentes épocas en cada Subcuenca. Para ello se evaluaron dos metodologías: el método de Bahr (1997) y la herramienta GlabTop (Linsbauer, Paul, y Haeberli 2012). El paso previo para ambas metodologías es la delimitación del área glaciar.

4.5.1 Delimitación del área glaciar

Se llevó a cabo usando imágenes satelitales con la ayuda de sistemas de información geográfica. El método consiste en usar el índice normalizado de nieve NDSI (Hall y Riggs 2011) para delimitar qué áreas son glaciar y qué no son glaciar. Esta técnica ha sido usada por diversos autores para glaciares tropicales con resultados bastante buenos (SENAMHI 2015; Burns y Nolin 2014; Durán-Alarcón et al. 2015; Suarez et al. 2015).

Como dato de entrada se descargaron 6 imágenes satelitales de la web del USGS¹³. Cuatro imágenes corresponden al periodo 1986 – 1998 útiles para el periodo histórico de la modelación, una para evaluar las alturas glaciares (2009) y una imagen del año 2016 que se usará para el escenario de cambio climático. Las 6 imágenes corresponden a periodos entre mayo y setiembre, cuando las precipitaciones sólidas y líquidas son menores (ver Cuadro 11). Con ello se reduce la interferencia de nubes y la probabilidad de confundir nieve temporal con hielo permanente.

Cuadro 11. Imágenes satelitales usadas para la delimitación glaciar

| Imagen | Fecha | Satélite |
|---------------|--------------|-----------------|
| LT50080671986 | 05/1986 | Landsat 5 |
| LT50080671990 | 07/1990 | Landsat 5 |
| LT50080671995 | 08/1995 | Landsat 5 |
| LT50080671998 | 08/1998 | Landsat 5 |
| LT50080672009 | 06/2009 | Landsat 5 |
| LE70080672016 | 07/2016 | Landsat 7 |

¹³ <http://glovis.usgs.gov/>

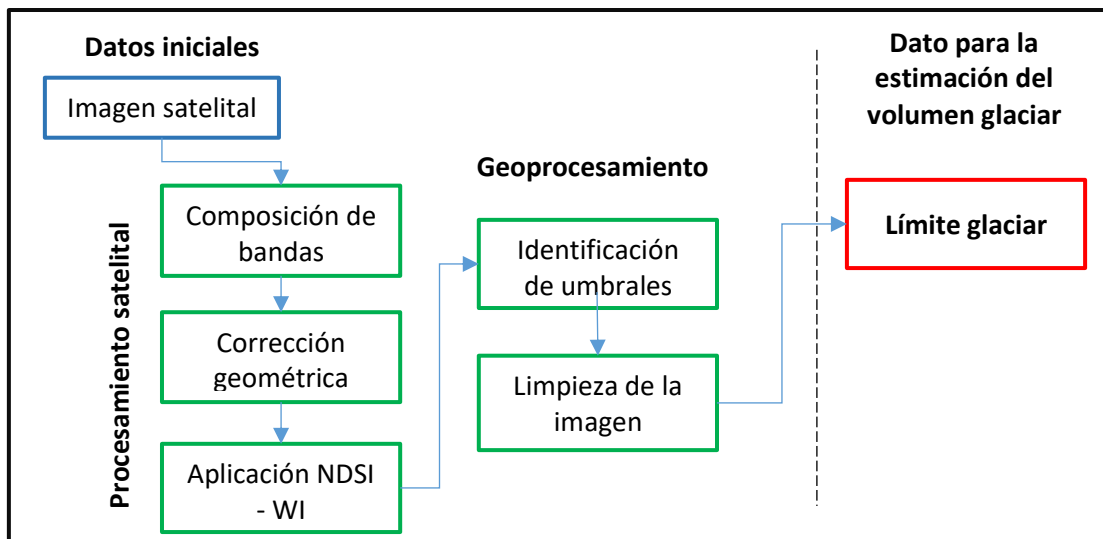


Figura 15. Esquema del procedimiento para la delimitación glaciar

Los pasos seguidos para la delimitación glaciar fueron 6 (ver Figura 15), los 4 primeros se realizaron con un software procesador de imágenes satelitales, y los otros 2 con un sistema de información geográfica:

1. Composición de bandas espectrales: para formar una imagen multibanda.
2. Corrección geométrica: para ajustar todas las imágenes y evitar desplazamientos geográficos. Se usó como referencia la capa vectorial de ríos y lagunas de la UGRH.
3. Aplicación del NDSI: $(VIS - MIR) / (VIS + MIR)$, siendo el VIS la banda 2 y el MIR la banda 5 de cada imagen.
4. Aplicación del WI: es un índice de agua. Se usó para ayudar a distinguir el glaciar y las lagunas supraglaciares: $(CB - NIR2) / (CB + NIR2)$, siendo el CB la banda 1 y el NIR2 la banda 4 de cada imagen.
5. Aplicación de un umbral al NDSI y al WI: los resultados de cada índice son las mismas imágenes de satélite cuyos píxeles han tomado un valor entre -1 y 1. Por ello es necesario filtrar la imagen estableciendo un umbral para determinar qué es glaciar y laguna y qué no lo es. Diversos autores definen un umbral de entre 0.4 y 0.6 para los glaciares (Burns y Nolin 2014; Hall y Riggs 2011; Suarez et al. 2015). El umbral se fijó por evaluación experta con ayuda de las propias imágenes satelitales cambiando su visualización según distintas combinaciones de bandas (3 – 5 – 2 para el glaciar y 6 – 4 – 2 para las lagunas).

6. Geoprocesamiento: establecidos los umbrales se hizo una delimitación preliminar del glaciar. Luego se realizó una limpieza de la imagen aplicando filtros de generalización (para eliminar píxeles aislados) y de tamaño (para asimilar zonas menores a 2 ha).

La delimitación glaciar usada es puramente satelital, no se incluyen otros aspectos como el glaciar muerto (sección del glaciar desprendida del cuerpo principal), glaciar sucio (glaciar cubierto por detritos), entre otros que sólo son identificables en campo. Aunque estos elementos no se incluyen, el resultado sigue siendo adecuado para la simulación hidrológica.

4.5.2 Herramienta GlabTop

Está basado en la hipótesis que la altura glaciar depende de la pendiente de la superficie: a mayor pendiente menor será la altura glaciar y viceversa. Los datos de entrada son la delimitación del área glaciar, un modelo de elevación digital y los ejes glaciares. La herramienta calcula la altura glaciar en puntos a lo largo de los ejes glaciares y luego los interpola dentro de los límites glaciares. GlabTop fue calibrada con información geométrica de paleoglaciares y validada con ecosondas de radio en glaciares contemporáneos (Linsbauer, Paul, y Haeberli 2012).

$$h = \frac{\tau}{f \cdot \rho \cdot g \cdot \text{seno}(\alpha)}$$

h: altura glaciar (m)

t: esfuerzo cortante basal (Pa) ($t = 0.005 + 1.598 \Delta H - 0.435 \Delta H^2$)

f: factor de forma (0.8)

p: densidad del hielo (900 kg/m³)

g: aceleración de la gravedad (9.81 m/s²)

α : pendiente de la superficie (grados)

ΔH : rango de elevación del glaciar (m)

Los parámetros de ajuste son el esfuerzo cortante basal (t) que la herramienta calcula para cada píxel en función del rango de elevación y, el factor de forma (f) cuyo valor se dejó constante en 0.8 pues usado en glaciares alpinos (Linsbauer, Paul, y Haeberli 2012).

La delimitación glaciar fue obtenida del paso anterior, el modelo de elevación digital descargado del USGS, y los ejes glaciares se trazaron por evaluación experta con ayuda de curvas de nivel obtenidas del modelo de elevación digital (ver Figura 16). El resultado

es la altura glaciaria para cada pixel, que con la aplicación de estadísticas zonales permitió obtener la altura promedio para cada Subcuenca.

Una limitante de la aplicación de esta herramienta es que para calcular los espesores en diferentes periodos de tiempo, requiere también de modelos de elevación digital en diferentes periodos de tiempo. Los actuales modelos disponibles en la web sólo son capturas de un único periodo (año 2009) por lo que el espesor calculado corresponde a esa fecha.

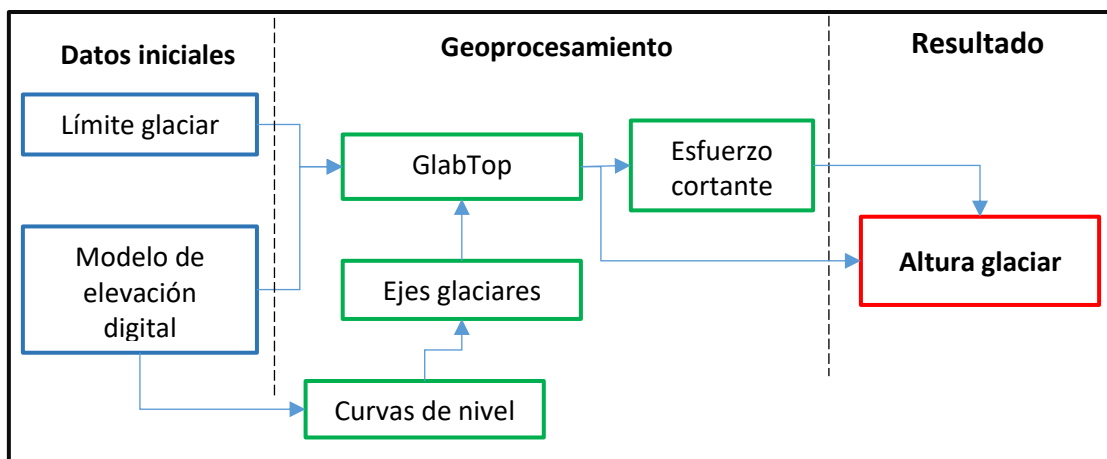


Figura 16. Esquema del uso de la herramienta GlaTop

4.5.3 Método de Bahr

Bahr et al. (1997) halló que la dependencia del volumen de un glaciar respecto de la superficie de la misma es una relación exponencial. Sus cálculos se basaron en la observación de 144 glaciares alrededor del mundo (ninguno tropical). En los siguientes años un factor adicional fue agregado en la formulación de Bahr para ajustar la relación a nuevas observaciones (Klein y Isacks 1998). La formulación quedó entonces:

$$V = 0.048 \cdot A^{1.36}$$

V: volumen glaciario

A: área glaciario

Bahr halló también que el exponente es un parámetro muy sensible a las condiciones del glaciar. Por ello, y dado que los glaciares tropicales tienen condiciones especiales, es preciso realizar una calibración de los parámetros de la formulación.

Para realizar esta calibración se asumió que los valores obtenidos con la herramienta GlaTop son correctos. Así se disponía de un conjunto de valores de volumen y áreas

glaciares para Quillcayhuanca. Con ello se volvieron a estimar el exponente y el factor de ajuste. La formulación de Bahr calibrada para Quillcayhuanca es usada entonces para calcular el volumen glaciar para diferentes periodos de tiempo en función del área glaciar.

4.6 CÁLCULO DE LAS DEMANDAS

1. Demanda Urbana

El cálculo de la demanda urbana de agua se hizo a través de la población, su evolución histórica y dotación.

Los datos de población para diferentes periodos se obtuvieron del estudio de INDECI (2002) e INEI (2015). A partir de ellos se haló una relación lineal y se estimó la población para los años comprendidos entre 1983 y 1998.

La dotación para la población se tomó del Reglamento Nacional de Edificaciones (Vivienda 2006) que establece un mínimo de 180 l/ha/d para conexiones domiciliarias en clima frío y de 220 l/ha/d en clima templado y cálido. Se optó por utilizar un promedio como dotación dado que no se tiene un valor exacto de demanda.

Una vez calculado el caudal total de demanda se consideró que la eficiencia en la conducción sólo era del 70 %. Con ello se calculó la demanda bruta que es captada en los ríos.

En el periodo 1983 – 1998 la empresa de agua potable aún captaba aguas de los ríos Paria (25 %) y Auqui (75 %), distribución que se aplicó.

2. Demanda agrícola

Los datos para la demanda agrícola fueron tomados de Quesquén (2008). Aunque estos estudios corresponden a un periodo relativamente reciente, se asumió que son constantes para el periodo 1983 – 1998.

Los datos de Quesquén incluyen la eficiencia de riego del 30 %, de manera que se consideró que el 70 % del agua retornaba al curso principal.

3. Otras demandas

Para la demanda acuícola se tomaron los datos del estudio de Tarazona (2008). A pesar de ser acuícola se consideró una eficiencia del 95 %, con un 5 % de pérdidas ocurridas en la producción pesquera que no retornan.

Para la demanda poblacional rural se tomaron los datos también de Tarazona (2008). Dado que el sistema de saneamiento es bastante limitado no se recogen todas las aguas residuales. En algunos casos la conexión se usa para riegos. Bajo estas condiciones muchos de los retornos son difusos. Por ello se decidió usar un retorno del 70 % de las aguas captadas en forma de agua residual.

Se asumió que estas demandas fueron constantes para todo el periodo de estudio.

4.7 IMPLEMENTACIÓN, CALIBRACIÓN Y VALIDACIÓN

Las características glaciares de Quillcayhuanca hacen que deba implementarse en parte con modelos glaciares y en parte con modelos no glaciares. Este fraccionamiento incluye evaluar los parámetros por separado e incluso podría llevarse a cabo una calibración independiente en cada zona si la disponibilidad de datos fuese adecuada.

4.7.1 Estructura de los subcuencas

Para la zona glaciaria, RS Minerve dispone del modelo GSM. Para la zona no glaciaria se disponen de los modelos HBV, GR4J y SOCONT. El modelo global de Quillcayhuanca es entonces un híbrido entre GSM y cualquiera de los otros modelos.

Con el fin de hallar la mejor representación de Quillcayhuanca se optó por evaluar tres versiones: 1) GSM + HBV, 2) GSM + GR4J y 3) GSM + SOCONT. La representación del sistema hidrológico se basó en la delimitación previa de las subcuencas a las que se agregó la entramada red de demandas.

Adicionalmente las subcuencas fueron clasificadas en dos tipos: simple y mixto. Una subcuenca simple se caracteriza porque se representa por un único modelo (glaciaria o no glaciaria) y tiene un área constante en el tiempo. Una subcuenca mixta es aquella representada por dos modelos a la vez: uno glaciaria y otro no glaciaria. Las áreas de cada modelo pueden cambiar con el tiempo, pero la suma total de la subcuenca permanece constante (ver Figura 17). Este artificio se usó para poder modelizar el retroceso glaciario.

RS Minerve no cuenta con un algoritmo para simular el retroceso glaciario. El modelo GSM se basa en la hipótesis de un glaciar infinito. Pero desde la perspectiva de este estudio, en el que se quiere evaluar el impacto del cambio climático sobre una cuenca glaciaria,

debe simularse de alguna manera la pérdida de los glaciares. Y ello se logró con los subcuencas mixtos.

Así, los subcuencas entre los 3000 y 4800 m.s.n.m. son simples, representados por modelos no glaciares. Los subcuencas entre 4800 y 5400 son mixtos, y los subcuencas entre los 5400 y 6160 son simples, representados por modelos glaciares. Por un lado, esta clasificación se debe a que en 1983 los glaciares nacían a 4800 m.s.n.m. Y por otro lado, a que estudios previos indican que los glaciares para finales del siglo XXI habrán retrocedido hasta los 5600 m.s.n.m. (Rabatel et al. 2013).

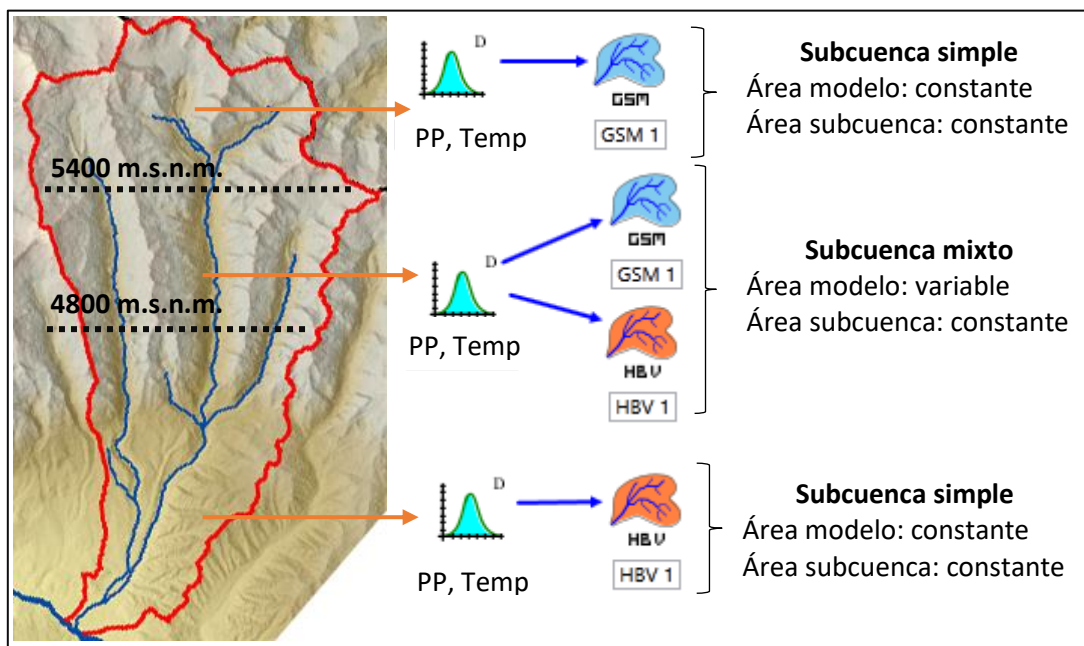


Figura 17. Clasificación de los subcuencas de Quillcayhuanca

En las subcuencas mixtas cuando la altura glaciar del modelo glaciar llega a cero, el área que ocupaba se convierte en cero y se suma al modelo no glaciar. Por ello al principio de la simulación existen subcuencas cuyos modelos glaciares abarcan toda el área de la subcuenca.

El inconveniente de dicho artificio es que el paso de tiempo de la simulación debería ser pequeño y con ello ir cambiando las áreas de los modelos. Para subsanar este hecho la altura real glaciar se cambió por una altura representativa. La altura real es la que corresponde a un área y volumen glaciar de un determinado momento. La altura representativa es la que corresponde a un cambio de volumen con área constante (ver Figura 18). Así se puede mantener la misma área durante lapsos de tiempo más largos considerando sólo el cambio en el volumen.

Un efecto colateral de este enfoque es que los picos de caudales serán menores de lo esperado. Esto debido a que el modelo glaciar almacena el agua antes de liberarlo, mientras que los modelos no glaciares pueden ser más reactivos. De allí que los resultados finales puedan sobreestimar la producción de agua.

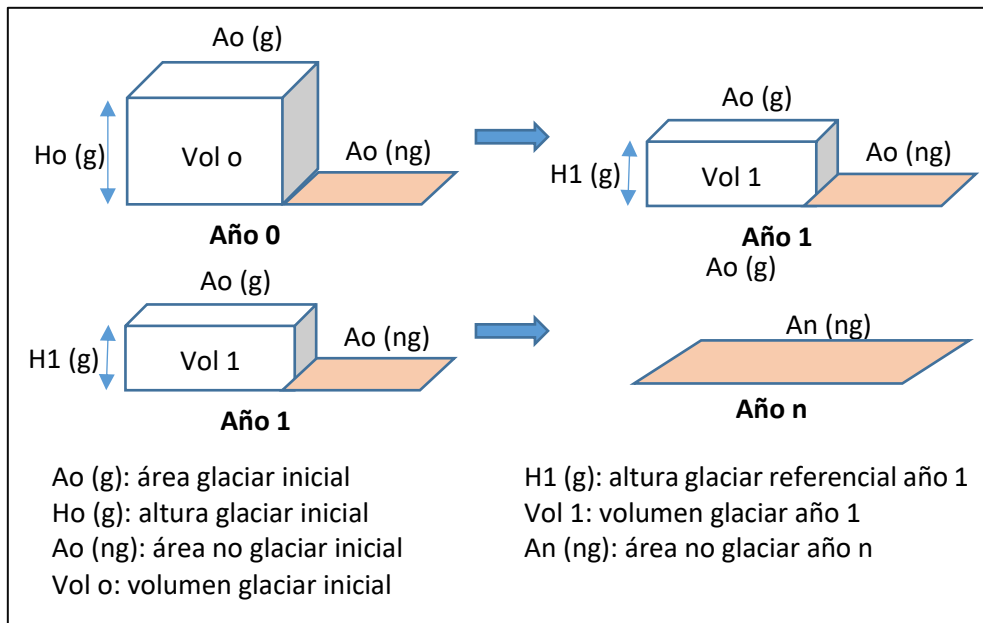


Figura 18. Funcionamiento de los subcuencas mixtas

4.7.2 Red de demandas

Las demandas identificadas en apartados previos captan aguas directamente de los ríos de Quillcayhuanca. La mayoría de los retornos ocurren hacia el mismo río del que fueron captados. En otros casos los retornos van a otros ríos de Quillcayhuanca. Y en otros casos ocurren en puntos después de la estación de aforo de Quillcay (ver Cuadro 12). Estos últimos retornos no fueron tomados en cuenta en el modelo global de Quillcayhuanca. No se identificó ningún retorno fuera del sistema hidrológico.

Cuadro 12. Destino de los retornos de las demandas de Quillcayhuanca

| Demanda | Tipo | Río Captación | Río Retorno |
|----------------|-------------|----------------------|--------------------|
| Cojup | Agrícola | Cojup | Cojup |
| Nueva Florida | Agrícola | Paria | Rio Paria |
| Churup | Agrícola | Churup | Paria |
| Pitec | Agrícola | Quillcayhuanca | Auqui |
| Paquishca | Agrícola | Auqui | Auqui |
| Auqui | Agrícola | Auqui | Auqui |
| Shallap | Agrícola | Shallap | Auqui |
| Usuario 1 | Acuícola | Paria | Paria |
| Usuario 2 | Acuícola | Paria | Paria |

| Demanda | Tipo | Río Captación | Río Retorno |
|--------------------------|--------------------|----------------------|--------------------|
| Usuario 3 | Acuícola | Paria | Paria |
| Ministerio de Producción | Acuícola | Quillcay | Quillcay |
| Nueva Florida | Poblacional rural | Paria | Paria |
| Los Olivos | Poblacional rural | Paria | Paria |
| Huaraz | Poblacional urbana | Auqui y Paria | Después del aforo |

En la Figura 19 se muestra el esquema general de Quillcayhuanca. Destaca la ubicación de las demandas, ríos, lagunas y conexiones entre ellas. Los ríos en el modelo de Quillcayhuanca fueron representados con el objeto Lag-time. Este objeto sólo cumple una función de visualización ya que el paso de tiempo de la simulación es mensual. Por este mismo motivo las lagunas no fueron representadas en el modelo. Estudios previos (Juen 2015) calcularon que las lagunas de la Cordillera Blanca provocan un desfase entre 10^{-1} y 10^0 horas.

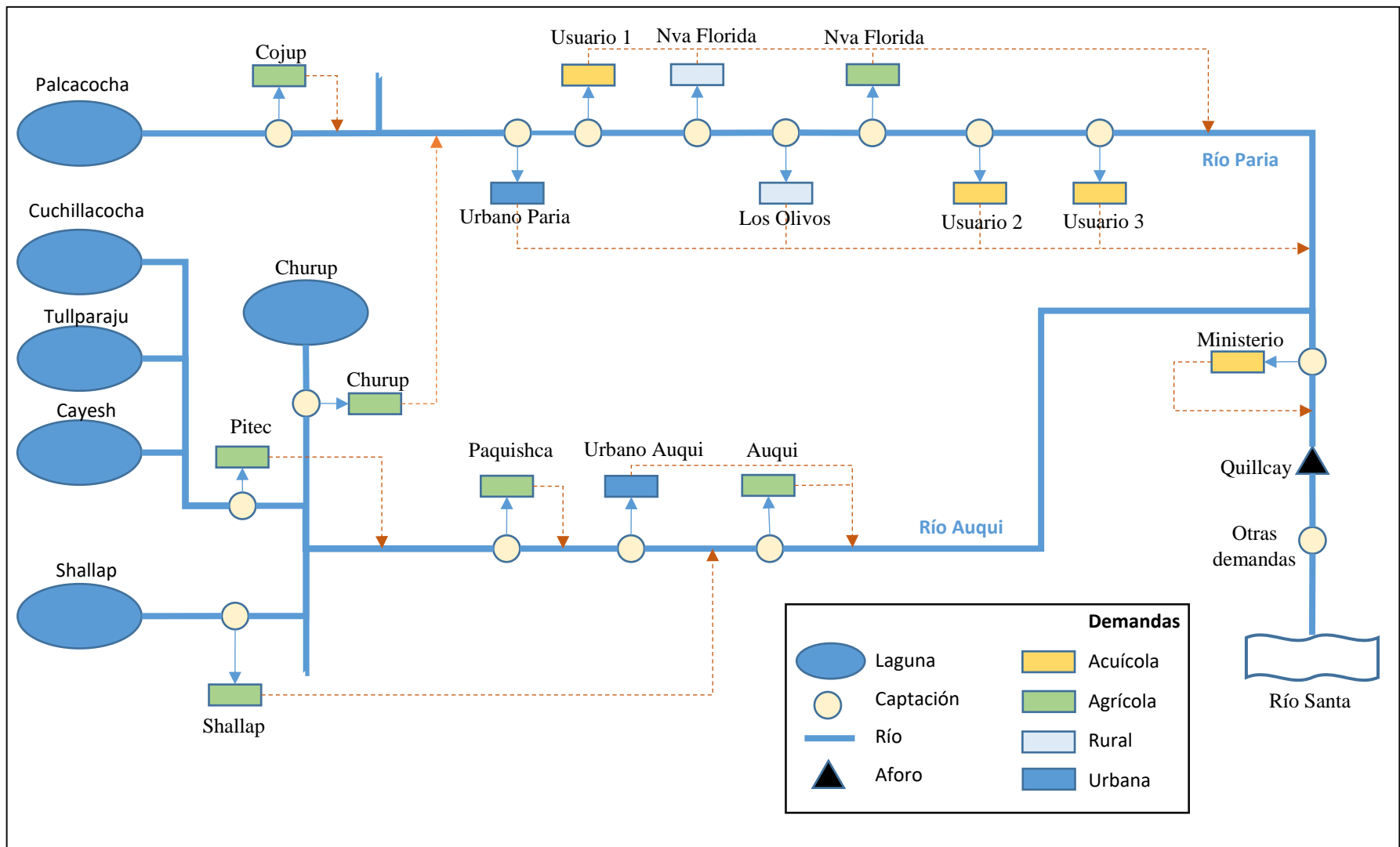


Figura 19. Esquema de la red de demandas del modelo de Quillcayhuanca

4.7.3 Calibración y validación

La calibración y validación se llevaron a cabo comparando los caudales en la única estación de aforo existente en la cuenca: Quillcay. Para ello se usaron cuatro indicadores comúnmente usados en el modelamiento hidrológico:

- Nash-Sutcliffe: Es usado para evaluar el poder predictivo de los modelos hidrológicos. Varía entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo.
- Nash-In (logarítmico): evalúa el desempeño del modelo hidrológico para caudales bajos. Varía entre $-\infty$ y 1, siendo 1 el valor óptimo.
- Coeficiente de correlación de Pearson: muestra la covariabilidad de los variables simuladas y observadas sin penalización por el sesgo. Varía entre -1 y 1, siendo 1 el valor óptimo.
- Medida del Sesgo: es una estimación simétrica del ajuste entre los promedios observados y los promedios simulados. Varía entre 0 y 1, siendo 1 el valor óptimo.

Antes de calibrar se realizó un análisis de sensibilidad para identificar los parámetros más importantes. En primera instancia estos serían calibrados manualmente, y en segunda instancia los parámetros menos sensibles serían calibrados automáticamente. En un tercer paso, los parámetros más sensibles se volvían a calibrar automáticamente.

Para la calibración automática se optó por el método SCE-UA debido a la facilidad de uso, eficiencia y menor tiempo requerido para la optimización.

Con el objetivo de mejorar el desempeño y evaluación del modelo, la calibración se llevó a cabo en dos niveles:

- A nivel global: calibrando los caudales en la estación Quillcay. Se estableció una función objetivo global con pesos iguales para el Nash, Nash-In, coeficiente de correlación de Pearson y Sesgo. Esta función objetivo sirvió para comparar entre las tres versiones de Quillcayhuanca e identificar la mejor combinación de modelos.
- Por zonas: los subcuenca, agrupados según el tipo de cobertura predominante, se calibraron para representar el funcionamiento interno del sistema

hidrológico. La función objetivo era distinta para cada zona según cómo se esperaba que funcione el sistema hidrológico.

El trabajo en los dos niveles requirió del diseño de un proceso iterativo para calibrar los parámetros de cada modelo. Se decidió comenzar la calibración con la zona glaciar y luego con la no glaciar evaluando en cada caso a nivel de zonas y sólo al final a nivel global. Los pasos de calibración se llevaron a cabo en el siguiente orden:

1. Calibración GSM:

La forma más adecuada de calibrar los modelos GSM sería contar con datos de caudales del aporte de agua de los glaciares. Desafortunadamente esta información está apenas comenzado a recolectarse sólo en algunos glaciares de la Cordillera Blanca. Por ello se optó por usar como referencia del buen funcionamiento del modelo glaciar la evolución de las alturas glaciares. Esta variable no es un elemento de calibración, pero para fines prácticos es un indicador de qué tan rápido está fundiendo el glaciar. Ello también permite usar el artificio de los subcuena mixtos. Un modelo glaciar que represente adecuadamente la pérdida de altura glaciar puede identificar cuando desaparecerá. La calibración siguió usando como referencia los caudales observados en Quillcayhuanca. De hecho, la función objetivo usada es la misma que a nivel global, pero además se observaba con mucha cautela la evolución del glaciar comparando el fin de cada simulación con la altura calculada previamente.

Dado que el modelo glaciar es el mismo para cualquier versión de Quillcayhuanca, una vez calibrado se aplicó el mismo para todas las versiones.

2. Calibración no glaciar subcuena mixto:

Son los modelos no glaciares que acompañan a los GSM. A nivel de zonas se espera que estos modelos sean muy reactivos debido a que la cobertura del suelo son rocas intrusivas y derrubios con un suelo incipiente o no existente. Se planteó una función objetivo orientado hacia los caudales pico:

$$F.O = 2.Nash + 1.Pearson + 1.Sesgo.$$

3. Calibración no glaciar, zona pastos:

Predomina la cobertura de pastos, con suelos medianamente profundos pero con mucha cobertura. En este caso se buscaba un equilibrio entre las descargas superficiales y las subterráneas, siendo estas últimas ligeramente mayores. La función objetivo fue:

$$F.O = 1.Nash + 1.Nash-In + 1.Pearson + 1.Sesgo.$$

4. Calibración no glaciar, zonas bajas:

En esta calibración se agruparon las coberturas predominantes humedal y agrícola. Aunque se esperaría que ambas coberturas tuviesen funcionamientos diferentes, la forma cómo son usados los campos agrícolas (riegos por inundación, labrado constante, cultivos de tallo corto) justifican su calibración conjunta. Con estas características estas zonas representan los almacenes de agua que facilitan la infiltración hacia el agua subterránea. Por ello se daba prioridad a los caudales base con la función objetivo:

$$F.O = 2.Nash-In + 1.Pearson + 1.Sesgo.$$

5. Evaluación y retroalimentación

Calibradas las zonas se evaluaba la función objetivo a nivel global. Con ello se volvía a calibrar la zona glaciar para buscar mejores parámetros. Si la nueva calibración glaciar no era adecuada (las alturas glaciares no eran las esperadas) se dejaba el modelo glaciar constante y se seguía al paso 2 hasta el paso 5. Este proceso se repitió hasta hallar la mejor función objetivo para cada versión de Quillcayhuanca.

Como se indicó en apartados anteriores, los modelos de RS Minerve son conceptuales. Es decir, muchos de los parámetros son valores para aproximar a la realidad y no necesariamente tienen un significado físico directo. En el Cuadro 13 se muestran los parámetros que sí podían relacionarse con variables observadas y que fueron introducidas en los modelos y no modificadas durante la calibración. El modelo GR4J no dispone de parámetros equivalentes a observaciones de campo, por lo que todos sus parámetros fueron calibrados. Respecto al modelo GSM, aunque estudios anteriores (Juen 2015; T. Condom et al. 2011; Suarez et al. 2008) han hallado valores para algunos

de sus parámetros, estos no fueron introducidos en el modelo y sólo se tomaron como referencias.

Cuadro 13. Parámetros tomados de observaciones en campo

| Modelo | Parámetro | Observación relacionada |
|---------------|------------------|---------------------------------|
| HBV | FC | Capacidad de campo |
| SOCONT | L | Longitud del eje del subcuenca |
| | JO | Pendiente del eje del subcuenca |
| | HGR3Max | Capacidad de campo |

La longitud y pendiente de cada subcuenca fueron calculados a través de geoprocesamiento en sistemas de información geográfica. La capacidad de campo requirió de un proceso algo más complejo.

Una vez que las coberturas del suelo habían sido reclasificadas (ver apartado 4.2), se procedió a asignar a cada cobertura una profundidad de suelo. Dicha profundidad fue asignada de manera arbitraria según el tamaño de raíz que se esperaba de cada cobertura: forestal 400 mm, pastos 150 mm, agrícola 200 mm, humedal 200 mm, roca 50 mm. Esta relación de profundidad del suelo y tamaño esperado de raíces se asume que es aproximadamente la profundidad de la capacidad de campo. Un subcuenca puede tener diversas coberturas del suelo, por ello su capacidad de campo estaría representada por el promedio de las profundidades de cada cobertura ponderado con el área que ocupa en el subcuenca.

Finalmente, durante la validación se modificaron las series de precipitación, temperatura, altura inicial del glaciar y área de los modelos glaciares y no glaciares de los subcuenca mixtos. La evaluación se realizó sobre la función objetivo a nivel global y observando el comportamiento de la altura glaciar y los caudales en cada zona no glaciar.

4.8 SERIES DE CAMBIO CLIMÁTICO

La generación de series de cambio climático siguió dos etapas: 1) ajuste del periodo histórico y 2) generación de series futuras para las variables de precipitación y temperatura. El esquema general se observa en la Figura 20.

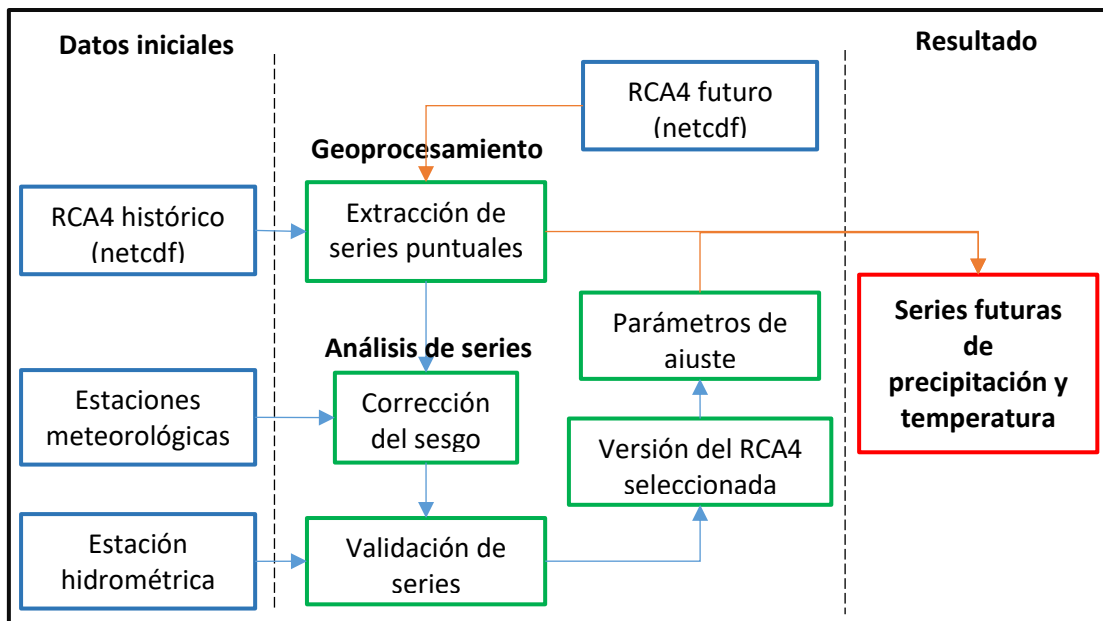


Figura 20. Esquema de la generación de series futuras de cambio climático

Se usaron datos del modelo de circulación regional RCA4 descargados de la web del proyecto CORDEX¹⁴. La web permite ir aplicando filtros consecutivos para seleccionar las variables, dominio y periodo requeridos. Los archivos fueron descargados en formato netcdf y procesados en sistemas de información geográfica para generar series de datos puntuales.

4.8.1 Ajuste del periodo histórico

En esta etapa se busca ajustar los datos observados con los datos históricos descargados del modelo RCA4 a través de la corrección del sesgo. Este periodo denominado control abarca desde 1983 a 1998. Las características de los datos descargados son:

- El RCA4 posee dos desencadenadores globales ICHEC y MPI: cada uno tiene sus propios datos históricos y sus propias series futuras.
- La zona de estudio es abarcada por 4 píxeles del RCA4: para generar las series de precipitación futuras sólo se seleccionaron las 17 estaciones ficticias y 8 estaciones reales cercanas. Para la series de temperatura se continuó usando las dos estaciones comentadas en apartados anteriores.

¹⁴ <https://climate4impact.eu/impactportal/data/esgfsearch.jsp>

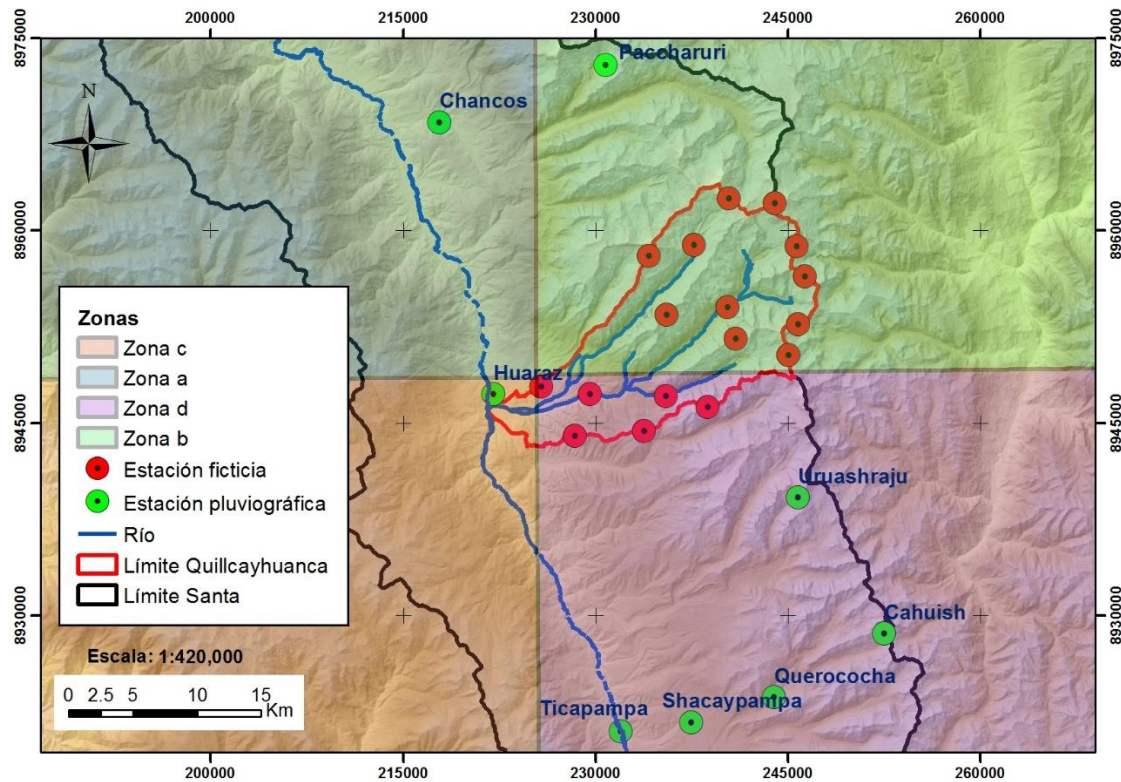


Figura 21. Mapa de estaciones usadas para generar las series de cambio climático

En la Figura 21 se muestran las estaciones usadas para generar las series de cambio climático. Estas son las estaciones más cercanas y las mismas que se introdujeron al software RS Minerve. Cada zona representa un píxel de RCA4.

La corrección del sesgo se llevó a cabo con la metodología aplicada por Francés et al. (2007). Esta consiste en corregir la magnitud de los datos observados con los del RCM. Con el propósito de mejorar el ajuste, la corrección se llevó a cabo de manera estacional.

Si se toma en cuenta que los RCM son un proceso de downscaling dinámico, entonces una comparación punto a punto de los datos no siempre será la mejor. Es decir, las estaciones que se ubiquen dentro de un determinado píxel no siempre tendrán el mejor ajuste con los valores de dicho píxel. Esto se debe a que el RCM representa las condiciones meteorológicas de la zona y no punto a punto. Por ello se decidió comparar los datos observados con los del píxel al que corresponden y también con el promedio de los 4 píxeles de la zona de estudio.

De esta manera los datos observados se pueden ajustar con 4 versiones del RCA4: dos modelos ICHEC y MPI, cada uno con dos enfoques punto a punto y promedio. En todos los casos la evaluación se hizo de manera estacional.

El propósito de la corrección del sesgo no es reproducir las series observadas, sino que las series del RCA4 generen caudales con un comportamiento similar al observado. Esto se traduce en una validación. Una vez que las series del RCA4 fueron corregidas estas se ingresaron al RS Minerve calibrado y validado para generar caudales. La comparación se llevó a cabo observando los cuantiles de caudales máximos y mínimos anuales estimados mediante una función de distribución de probabilidad acumulada de Gumbel tanto del RCA4 como los observados. La prioridad fue representar los cuantiles de caudales mínimos pues el interés es evaluar los recursos hídricos. Con ello se pudo seleccionar la versión del RCA4 que mejor genere los caudales observados.

4.8.2 Generación de series futuras

Una vez seleccionada la versión del RCA4 que mejor represente los caudales observados, se usaron sus parámetros correctores para aplicarlos a las series futuras del RCA4 para el periodo 2021 – 2050.

Los parámetros correctores corresponden a las ecuaciones lineales de ajuste de sesgo entre las estaciones observadas y el modelo histórico. Por ello cada estación meteorológica tiene sus propios parámetros correctores estacionales.

La evaluación del cambio climático se realizó para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. La elección de estos escenarios corresponde a evaluar los cambios hidrológicos de Quillcayhuanca en el escenario más optimista y el más desfavorable (IPCC 2013).

El modelo de cambio climático se evaluará asumiendo sólo cambios en la meteorología de Quillcayhuanca. Las demandas se asumirán constantes. En el caso agrícola, acuícola y poblacional urbano los datos serán los mismos del periodo histórico. En el caso de la demanda poblacional urbana se asumirá la demanda estimada del año 2016.

5 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

A lo largo del siguiente capítulo se discutirán los resultados del presente estudio. En el apartado 5.1 se evalúa la aplicación de los diversos métodos para la completar los datos necesarios de la modelación (temperatura, precipitación, altura glaciar, demanda urbana y cambio climático). En el apartado 5.2 se describen los resultados de la implementación, calibración y validación con RS Minerve usando los datos generados en el apartado anterior. En el apartado 5.3 se describen las condiciones actuales de Quillcayhuanca a partir del modelo y datos generados anteriormente. Los últimos apartados 5.4, 5.5 y 5.6 describen el sistema hidrológico Quillcayhuanca en condiciones de cambio climático al año 2050 en los escenarios RCP 2.6 y 8.5.

5.1 EVALUACIÓN DE LOS MÉTODOS DE ESTIMACIÓN

5.1.1 Evaluación de la extensión de la temperatura

1. Correlación lineal

En el Gráfico 6 y Gráfico 7 se muestran las correlaciones lineales directas entre los registros de temperatura observada en las estaciones Huaraz y Uruashraju frente a la temperatura de Reanálisis NCEP-NCAR a distintas altitudes (500, 600 y 700 hPa).

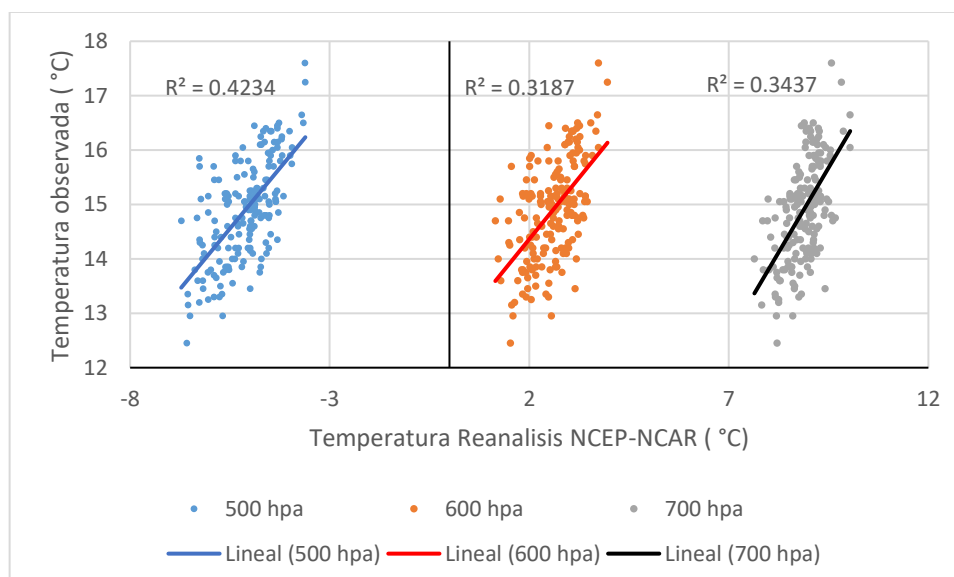


Gráfico 6. Correlación lineal de la temperatura de la estación Huaraz y datos de Reanálisis NCEP-NCAR

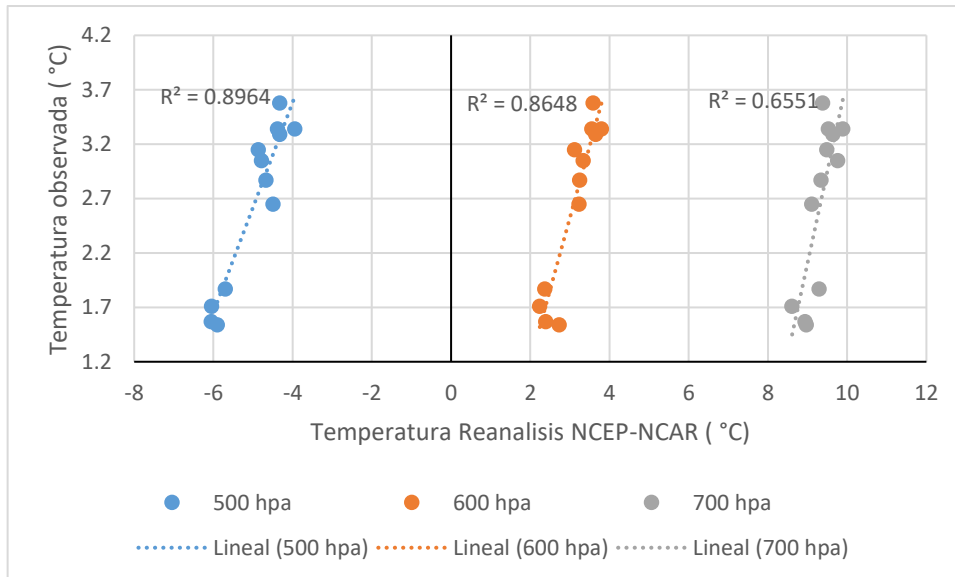


Gráfico 7. Correlación lineal de temperatura de la estación Uruashraju y datos de Reanálisis NCEP-NCAR

En el caso de la estación Huaraz la máxima correlación se obtiene a 500 hPa (5572 m.s.n.m. aproximadamente) con un R^2 de 0.42. Si se establece que una adecuada correlación debe tener valores de R^2 superiores al a 0.5, incluso la mejor a mejor correlación de Huaraz resulta insatisfactoria.

En el caso de la estación Uruashraju, la mejor correlación se alcanza también a 500 hPa con un R^2 de 0.89. Esta correlación es bastante alta y muy aceptable para extender el registro de Uruashraju.

La diferencia entre las correlaciones directas de Huaraz y Uruashraju podría deberse a dos factores: 1) Uruashraju posee un registro muy limitado de datos que podría estar enmascarando una mayor variabilidad y diferencia con los datos de Reanálisis NCEP-NCAR y 2) los datos de Reanálisis NCEP-NCAR tienen limitaciones al registrar la temperatura en zonas de topografía accidentada. Este último factor está relacionado con el tamaño de celda del Reanálisis NCEP-NCAR de $2.5^\circ \times 2.5^\circ$, de manera que su registro tiene alta influencia de las temperaturas predominantes, que para esta zona son de elevadas altitudes. Este hecho coincide con estudios previos en la Cordillera Blanca (Rabatel et al. 2013; Chevallier et al. 2011; Suarez et al. 2008; Juen 2015) que hallaron buenas correlaciones directas de temperatura pero a elevadas altitudes, por encima de los 3900 m.s.n.m..

2. Factor de corrección

En el Gráfico 8 y Gráfico 9 se muestran las correlaciones lineales de los datos observados en las estaciones Huaraz y Uruashraju frente a los datos de Reanálisis NCEP-NCAR ajustados por el factor de corrección.

Para cada estación se calcularon los factores de corrección mensual (ver Cuadro 14) usando el gradiente térmico altitudinal de Rau et al. (2013). Los datos de Reanálisis NCEP-NCAR usados corresponden a 500 hPa. Resultados a otras altitudes no se muestran por tener peores ajustes. De hecho, que los mejores resultados sean a 500 hPa es de esperarse dada la buena relación lineal antes observada.

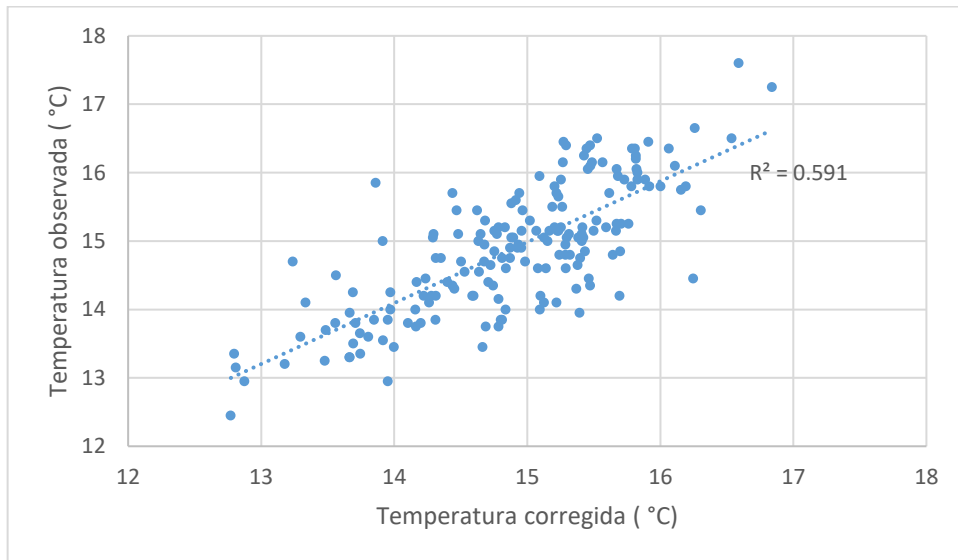


Gráfico 8. Temperatura observada y corregida de la estación Huaraz

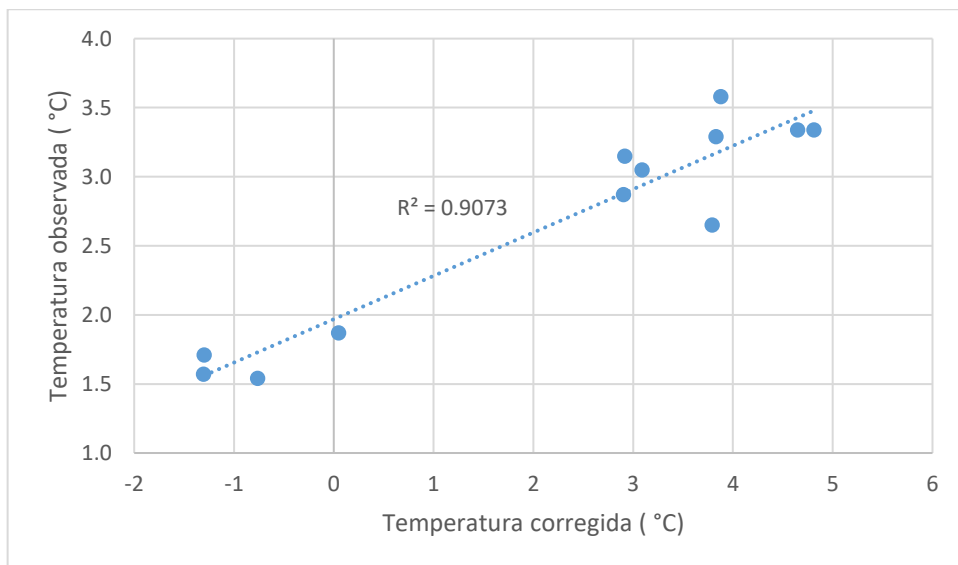


Gráfico 9. Temperatura observada y corregida de la estación Uruashraju

Cuadro 14. Factores de corrección de temperatura

| Mes | Gradiente (°C/100m) | FC Huaraz | FC Uruashraju |
|------|---------------------|-----------|---------------|
| Ene. | -0.79 | 1.33 | 2.78 |
| Feb. | -0.79 | 1.31 | 2.78 |
| Mar. | -0.77 | 1.29 | 2.71 |
| Abr. | -0.78 | 1.31 | 2.75 |
| May. | -0.99 | 1.28 | 3.49 |
| Jun. | -1.16 | 1.30 | 4.08 |
| Jul. | -1.13 | 1.31 | 3.98 |
| Ago. | -1.1 | 1.38 | 3.87 |
| Set. | -1.06 | 1.44 | 3.73 |
| Oct. | -0.97 | 1.39 | 3.42 |
| Nov. | -0.94 | 1.34 | 3.31 |
| Dic. | -0.88 | 1.33 | 3.1 |

Como era de esperarse, los datos de Reanálisis NCEP-NCAR ajustados por el factor de corrección son más parecidos a las series observadas. El mejor resultado se observa en la estación Huaraz donde el R^2 pasa de 0.42 en la 0.59 con el factor de corrección. En el caso de la estación Uruashraju la mejora no es tan significativa pasando de 0.89 a 0.91.

No hay duda que el método del factor de corrección es útil para ajustar datos de Reanálisis NCEP-NCAR independientemente de la altitud. Una desventaja, en el caso particular de estudio, es que se están asumiendo gradientes. De hecho al extender los registros de temperatura de las estaciones se podrían estimar los gradientes propios de la zona de estudio. Por ello, y dado el buen valor de R^2 , para la estación Uruashraju se tomó la decisión de extender la serie con datos de correlación lineal directa.

Con los datos extendido de Uruashraju se calcularon los gradientes térmicos de la zona de estudio usando el periodo común 1979 – 1993 (ver Cuadro 15). Con estos nuevos gradientes se recalcularon los factores de corrección de Huaraz (ver Cuadro 16). Así el nuevo valor de R^2 es de 0.60 que, aunque similar al resultado anterior, usa los gradientes propios de la zona (ver Gráfico 10).

Cuadro 15. Gradientes térmicos altitudinales (°C/100m) de la zona de estudio

| Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Oct. | Nov. | Dic. | Prom |
|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| -0.76 | -0.75 | -0.74 | -0.76 | -0.73 | -0.73 | -0.73 | -0.77 | -0.81 | -0.79 | -0.77 | -0.77 | -0.76 |

Cuadro 16. Factores de corrección finales de la estación Huaraz

| Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Set. | Oct. | Nov. | Dic. |
|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| 1.48 | 1.46 | 1.44 | 1.46 | 1.43 | 1.45 | 1.47 | 1.54 | 1.59 | 1.54 | 1.49 | 1.49 |

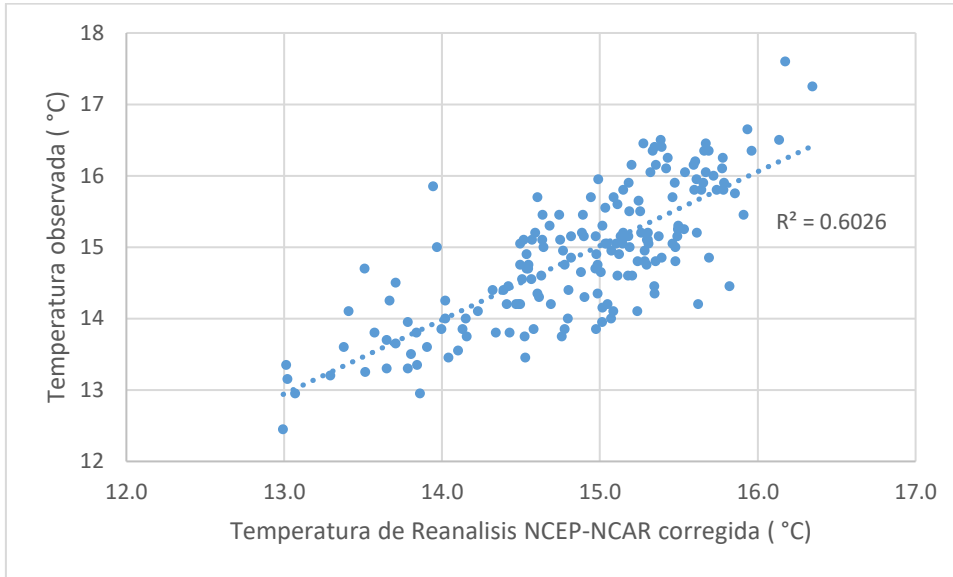


Gráfico 10. Temperatura final observada y corregida de la estación Huaraz

3. Correlación entre estaciones

Tomando la serie extendida de Uruashraju, se evaluó la correlación lineal entre esta y la estación Huaraz para el periodo 1979 – 1993 (ver Gráfico 11). El grado de correlación (R^2 0.42) es muy bajo, por lo que no resulta en una opción útil para extender la serie de Huaraz.

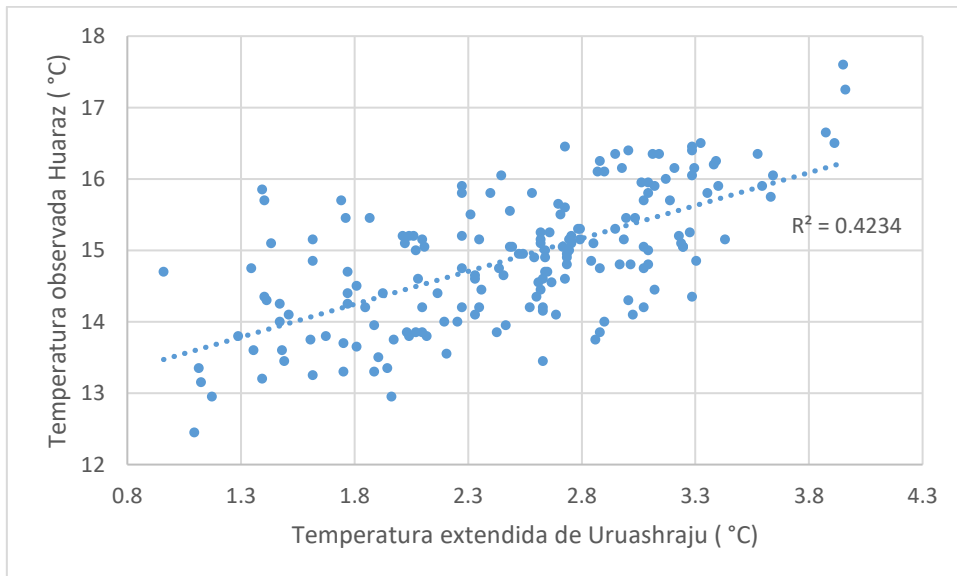


Gráfico 11. Temperatura de Huaraz y extendida de Uruashraju

Finalmente, para extender la serie de la estación Uruashraju se usó la correlación lineal directa con un R^2 de 0.89. Para la estación Huaraz, se usó el factor de corrección usando los gradientes térmicos altitudinales calculados para la zona, con un R^2 de 0.60.

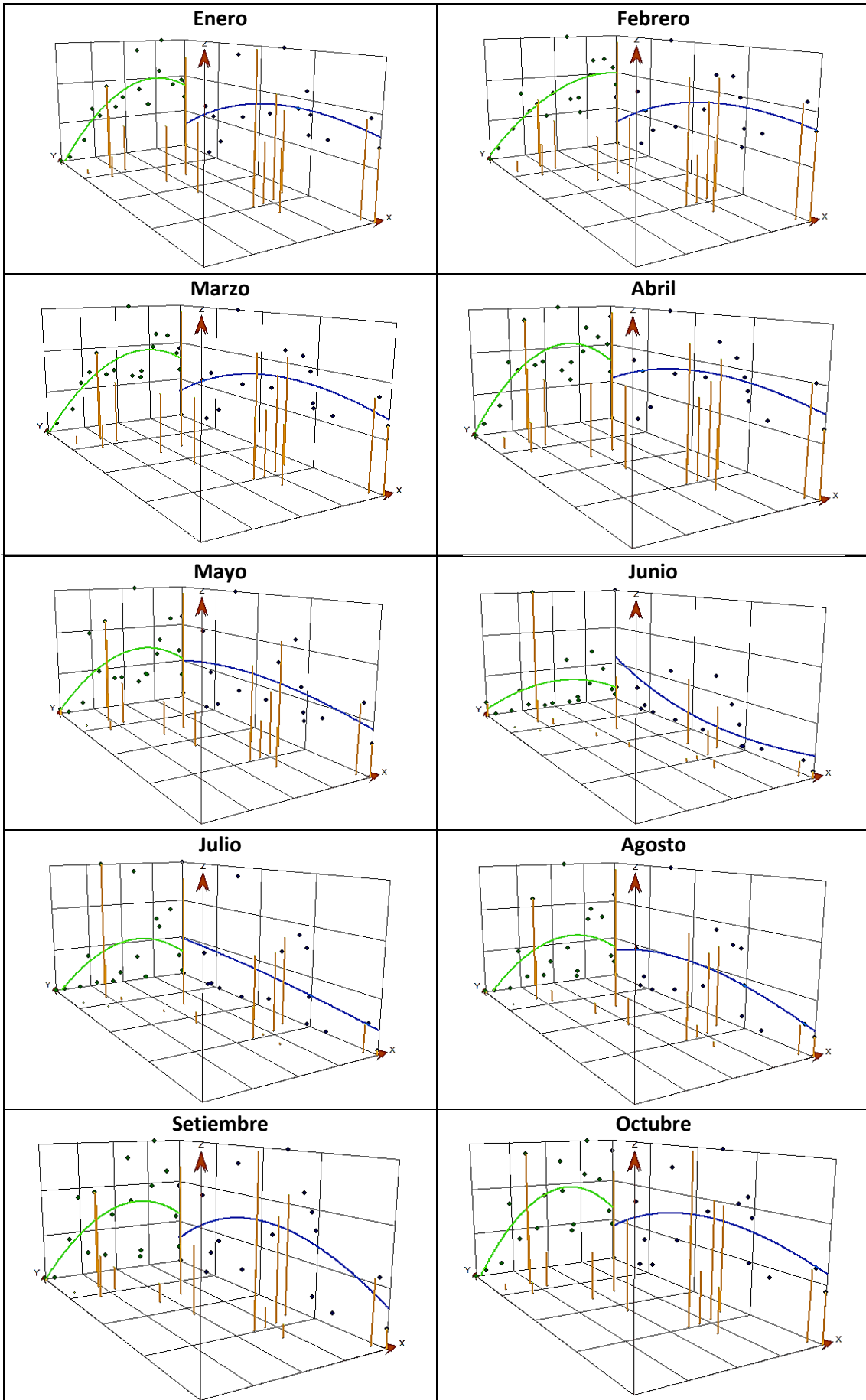
En base a los resultados se sugiere que estudios futuros evalúen primero el uso de la correlación simple para la extensión de datos. El uso del método del factor de corrección debe aplicarse sólo si correlación simple no es satisfactoria. Además debe tomarse en cuenta que el uso óptimo del factor de corrección sería si se conocen de antemano los gradientes térmicos locales, así se evita introducir mayores elementos de incertidumbre.

Un proceso de validación temporal sería recomendable siempre y cuando la información disponible lo permita.

Sea cual fuese el método de corrección, queda claro que los datos de Reanálisis NCEP – NCAR son bastante buenos para extender series de datos, al menos a paso de tiempo mensual. Análisis similares deben evaluarse para extender series de datos diarios así como de temperaturas máximas y mínimas.

5.1.2 Evaluación de la interpolación de la precipitación

Las tendencias espaciales de la precipitación mensual promedio multianual de enero a diciembre se muestran en la Figura 22. El eje Y está orientado hacia el norte y el eje X hacia el este formando una malla de coordenadas. Las líneas verticales naranja representan la altura de precipitación de cada una de las 16 estaciones evaluadas. En los planos XZ y YZ se han graficado las proyecciones de los valores de precipitación. Esto facilita evaluar las tendencias espaciales que cualquiera de las técnicas usadas (IDW o KO) debe reproducir. Así para el mes de enero por ejemplo en el plano YZ se observa una tendencia creciente de la precipitación en sentido oeste – este que llega a un máximo y luego decae representado por la línea continua verde. En el plano XZ se observa otra tendencia creciente en sentido norte – sur que también llega a un máximo para luego decaer representado por la línea continua azul.



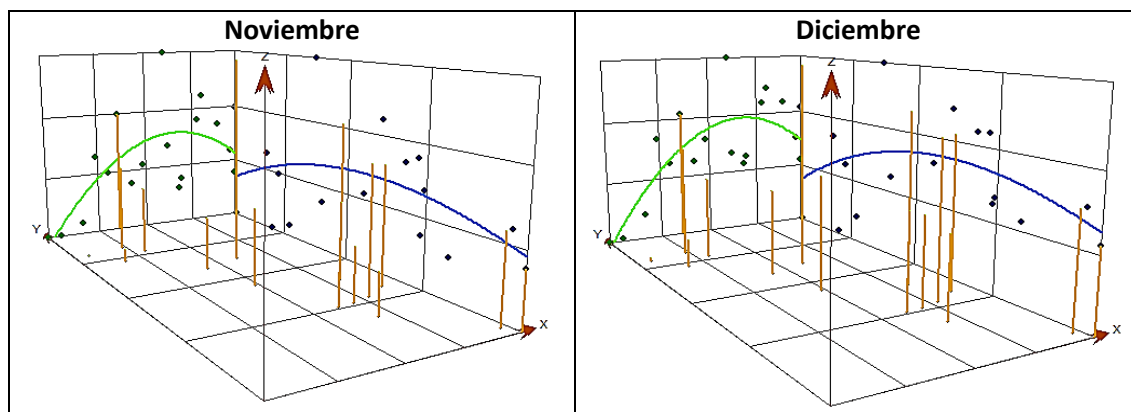


Figura 22. Tendencia espacial de la precipitación

La tendencia creciente norte – sur y oeste – este se mantiene a lo largo de todo el año especialmente en el sentido oeste – este aunque con fluctuaciones de magnitud. En el sentido norte – sur la tendencia también se repite a lo largo del año excepto para los meses de junio y julio. Estos periodos coinciden con la época de estío y casi invierten su tendencia. Las estaciones de mayor precipitación corresponden a Paccharuri, Uruashraju y Cahuish.

Aunque estos resultados siguen un patrón concordante con la altitud que también crece en sentido norte – sur y oeste – este, no debe confundirse con una evaluación de correlación entre altitud y precipitación. El gráfico mostrado sólo ayuda a identificar los patrones espaciales.

Hay un factor adicional que debe tomarse en cuenta en las tendencias evaluadas: las estaciones no cubren toda la amplitud topográfica. Como se ha visto en el Figura 22 la precipitación crece en sentido oeste – este hasta un máximo y luego decrece. El factor decreciente viene dado por estaciones que se ubican a altitudes mayores en el sentido norte – sur. En otras palabras, en el sentido oeste – este la precipitación debería seguir incrementando, pero al no contarse con más estaciones en este sentido, la tendencia se ve influida por estaciones de otras ubicaciones hacia el sur.

Por estos motivos, se ha establecido que la precipitación en Quillcayhuanca y sus proximidades debe incrementarse en el sentido oeste – este de manera rápida hasta los 4500 m.s.n.m. y luego de forma más lenta. De igual modo debe observarse una tendencia creciente en el sentido norte sur.

1. Interpolación con IDW

La aplicación del método del IDW no logra desarrollar adecuadamente las características antes descritas. Como muestra en la Figura 23 se observa la interpolación de la precipitación mensual promedio multianual de marzo (máxima precipitación) y junio (mínima precipitación). Las estaciones pluviométricas están representadas por puntos cuyo tamaño es proporcional a la precipitación observada. Acompaña la altitud de cada estación en m.s.n.m.

Las interpolaciones se realizaron con una potencia de 2 para incluir un término medio de estaciones lejanas y cercanas, un número de 5 estaciones para cada interpolación y una distancia máxima de 30 km (sólo sistemas contiguos se toman en cuenta). La tendencia espacial norte – sur se refleja bastante bien, pero la tendencia oeste – este no en la forma deseada.

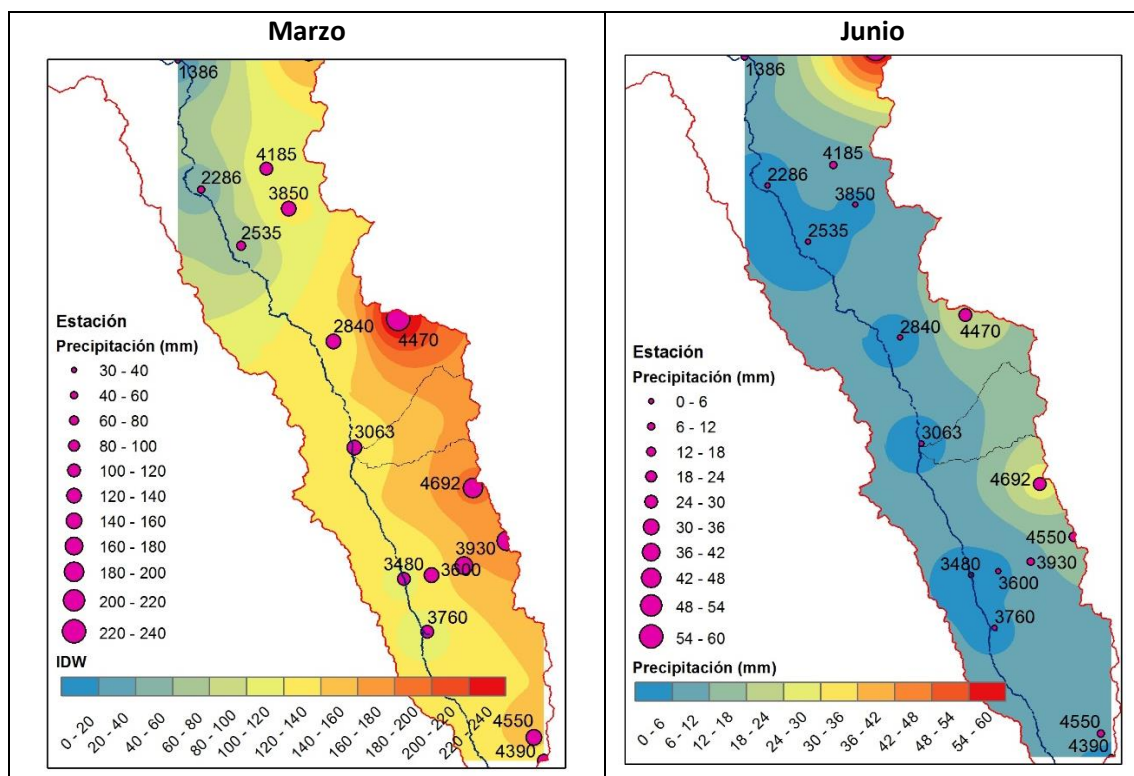


Figura 23. Interpolación de la precipitación de marzo (izquierda) y junio (derecha) con IDW

Obsérvese en marzo que aunque hay una tendencia creciente oeste – este no llega a valores máximos en las cotas más altas de Quillcayhuanca. La estación Paccharuri ubicada a 4470 m.s.n.m. muestra una precipitación en el rango de 200 – 220 mm, mientras que las cotas superiores a 4500 m.s.n.m. de Quillcayhuanca sólo presentan una precipitación en el rango 140 – 160 mm. En el mes de junio la tendencia norte –

sur se invierte como se esperaba pero el problema de la tendencia oeste – este se mantiene.

Dicha situación demuestra lo sensible que es método del IDW a la disponibilidad de datos y la distribución de estos en el espacio. Es probable que de contar con estaciones en zonas altas en Quillcayhuanca la interpolación de la precipitación sea más semejante a la tendencia esperada. Es decir, el método no está diseñado para capturar la distribución espacial de la información y sólo se limita a interpolar la existente. En casos particulares donde la información sea disponible de manera adecuada el uso del IDW resulta en una gran ayuda dada la sencillez de su aplicación.

2. Interpolación con Kriging ordinario (KO)

Por su parte la aplicación del KO requiere además de la evaluación previa (realizado con el análisis de tendencias e histograma) el ajuste de los semivariogramas¹⁵. A diferencia del IDW que interpola la información prácticamente desde los datos, el KO requiere ajustar semivariogramas mes a mes y año a año. Ello implica que en el presente caso de estudio habrían que realizarse 180 ajustes de semivariogramas, uno para cada mes entre 1983 y 1998. Esta situación no es práctica y resulta poco factible de replicar.

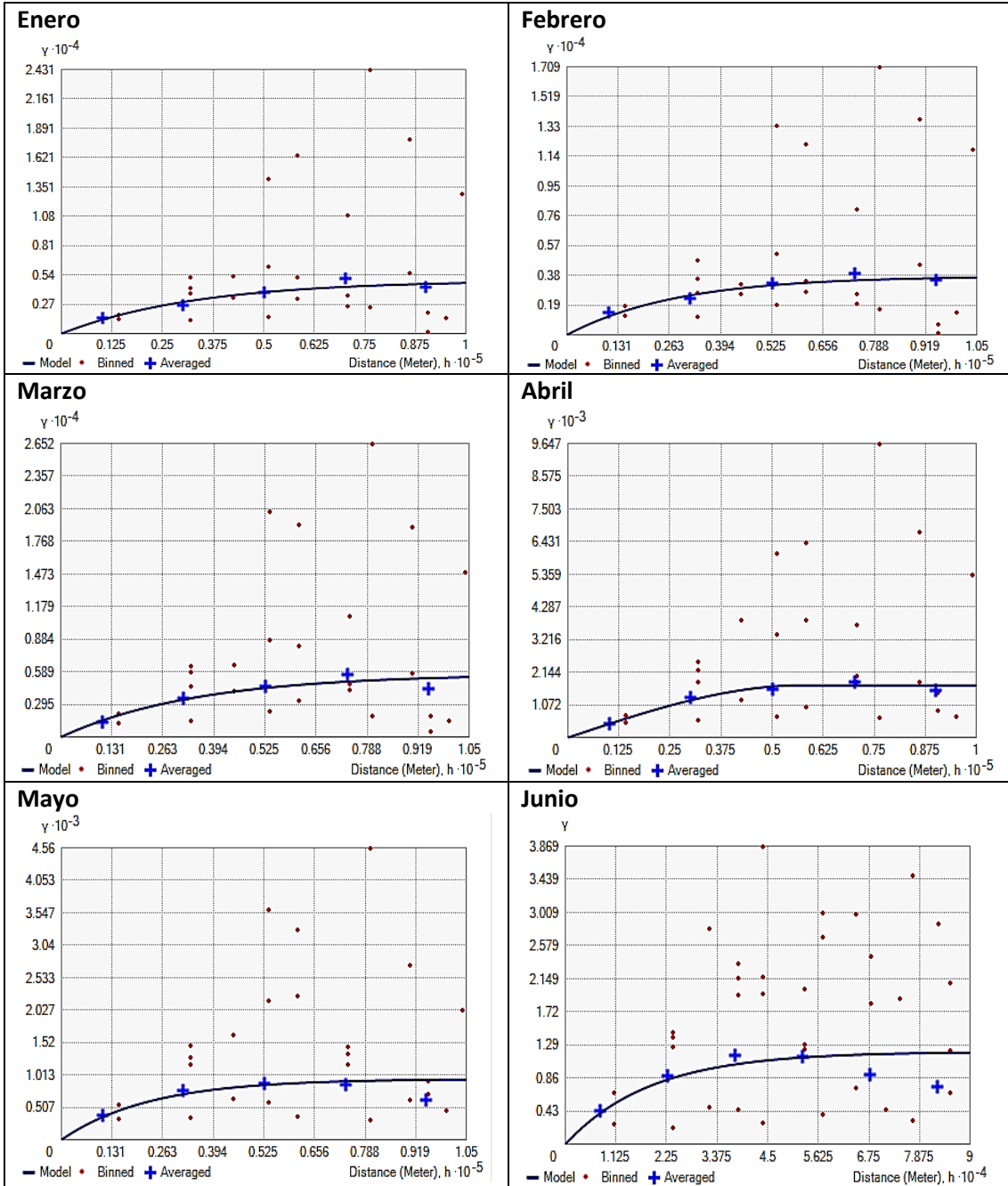
Bajo la hipótesis que el comportamiento del promedio multianual de un mes es representativo de todos los mismos meses del periodo de estudio, sólo se ajustaron 12 semivariogramas. En otras palabras el semivariograma del promedio multianual de enero es válido para todos los enero entre 1983 y 1998.

En el Gráfico 12 se muestran los semivariogramas omnidireccionales ajustados a la zona de estudio. Los semivariogramas experimentales están representados por una cruz azul y los teóricos por una línea azul continua. En el eje X se representa la distancia entre pares de puntos. En el eje Y se muestra el valor del variograma¹⁶. Así

¹⁵ Cuando dos estaciones son cercanas en término de distancia, se espera que los valores en cada estación sean similares y con ello la diferencia de sus valores sea pequeña. A medida que la distancia aumenta sus valores tienden a ser menos similares y sus diferencias mayores. Así cada punto en un semivariograma representa la diferencia entre los valores de dos estaciones (eje Y) en función a una distancia determinada (eje X). Más información en (Collado 1988).

¹⁶ El variograma es la diferencia entre dos estaciones separados una distancia. El semivariograma es el gráfico que representa en el eje Y al variograma y en el eje X la distancia.

la nube de puntos rojos representa las diferencias encontradas en cada par de valores de precipitación (eje Y) de un determinado mes en función de la distancia (eje X).



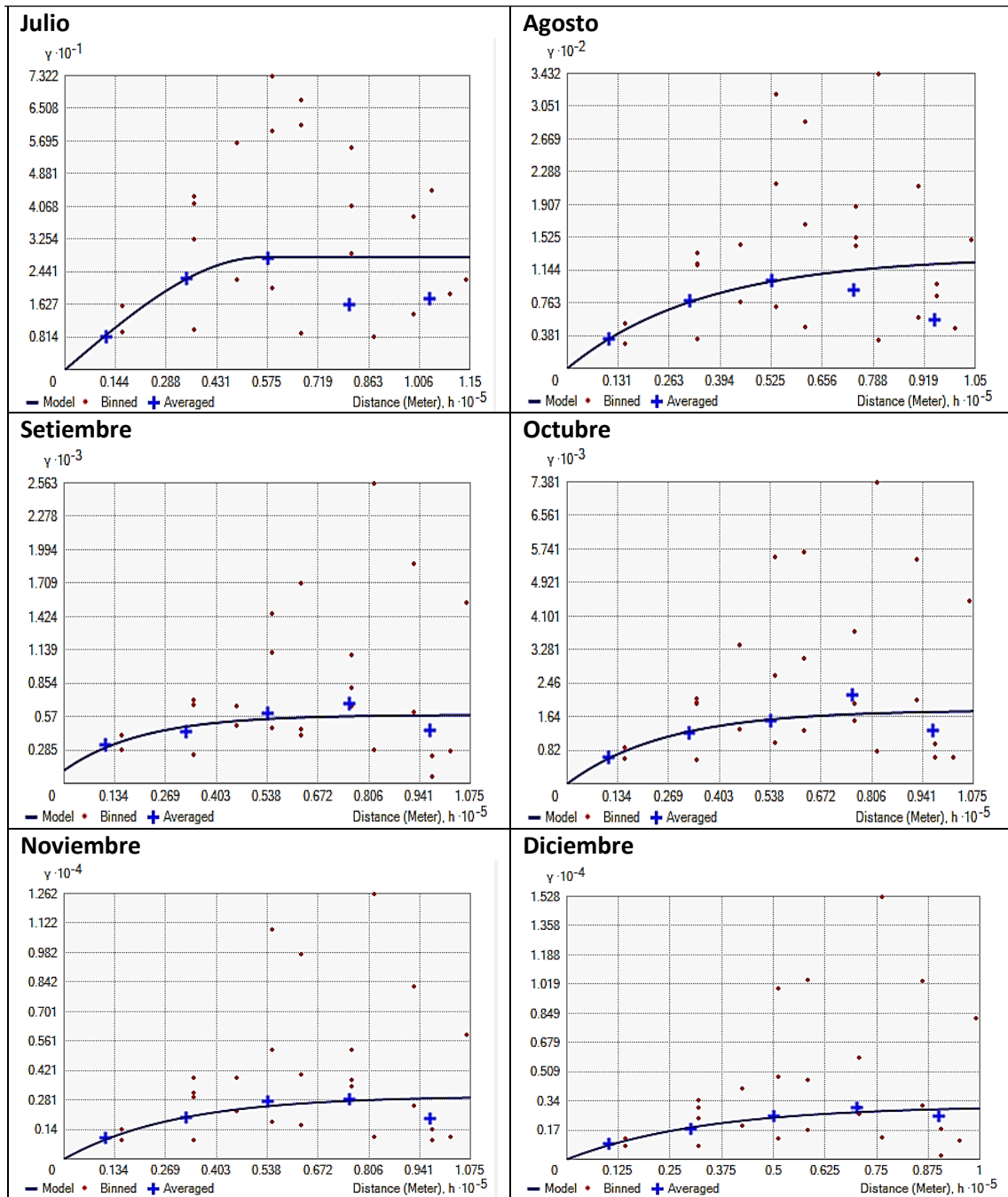


Gráfico 12. Semivariogramas experimentales y teóricos de precipitación

Los semivariogramas teóricos son exponenciales salvo en los meses de abril y julio en los que se usaron modelos esféricos. El tamaño inicial de las distancias del eje X (lag size usado) fue la distancia mínima entre estaciones (25 km) abarcando un rango no menor a 100 km. En todos los casos el interés principal fue ajustar el semivariograma a los primeros 45 km (en el eje X desde el origen) pues es la distancia media existente entre sistemas contiguos. Con ello se buscaba relacionar principalmente el comportamiento espacial de sistemas vecinos entre sí.

La existencia de la anisotropía en los registros de precipitación se confirmó evaluando los semivariogramas en múltiples direcciones. Como muestra, en la Figura 24 se observan los semivariogramas del mes de marzo en dirección 337.5° (en el línea con el eje mayor de la cuenca el Santa) y a 67.5° (perpendicular al eje de la cuenca del Santa). En la dirección 337.5° los datos de precipitación cambian con mayor lentitud (eje de la elipse más largo y semivariograma más suave), mientras que en la dirección 67.5° la variación es bastante rápida (eje de la elipse más corto y semivariograma más brusco). Estas características son concordantes con los resultados del análisis de tendencia espacial demuestra que han sido capturados en el los semivariogramas. Con ello el modelo se definía con dirección 157.5° de anisotropía.

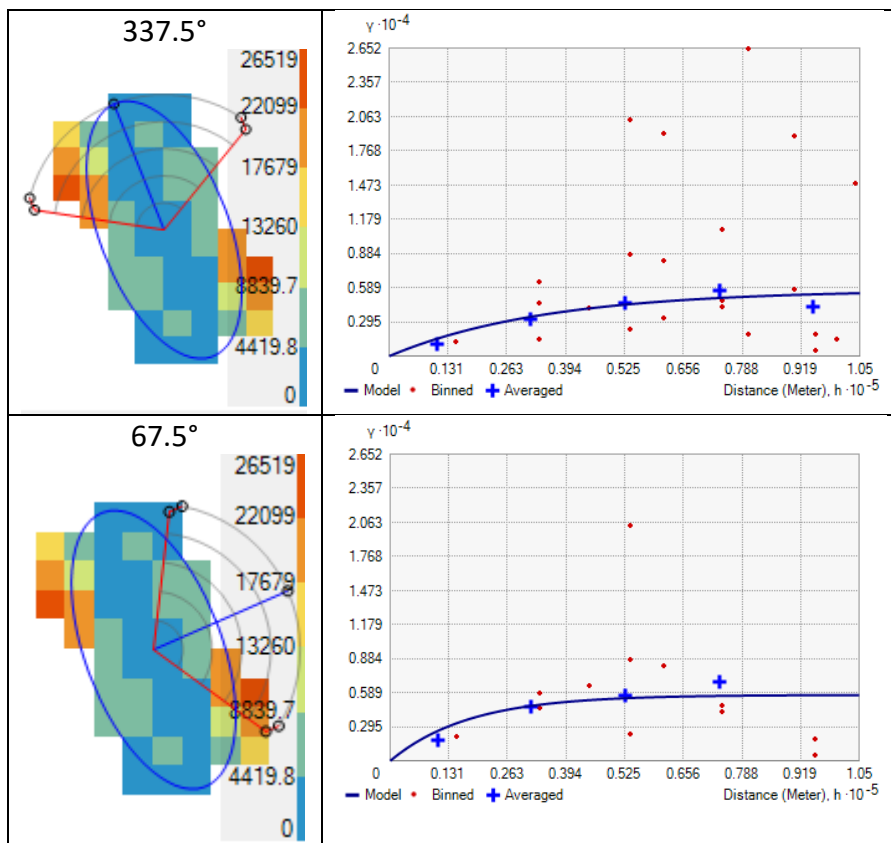


Figura 24. Semivariogramas del mes de marzo en distintas direcciones

Adicionalmente se establecieron las siguientes condiciones durante la interpolación: un máximo de 5 estaciones, un radio de búsqueda de 45 km en el eje mayor de la elipse y de 15 km en el eje menor. Con estas estas condiciones se busca nuevamente una mayor semejanza entre sistemas contiguos y dentro de una misma subcuenca.

Luego de ajustar los semivariogramas de cada mes se realizó una validación cruzada (ver Gráfico 13). Esta validación es un referente de cuán bien interpola el modelo los datos en las estaciones observadas. En general siempre habrá un buen resultado por ello no puede usarse como un indicador para comparar con otras técnicas de interpolación. Por este motivo en el presente estudio la validación cruzada se usó como ayuda para elegir el mejor modelo teórico de semivariograma.

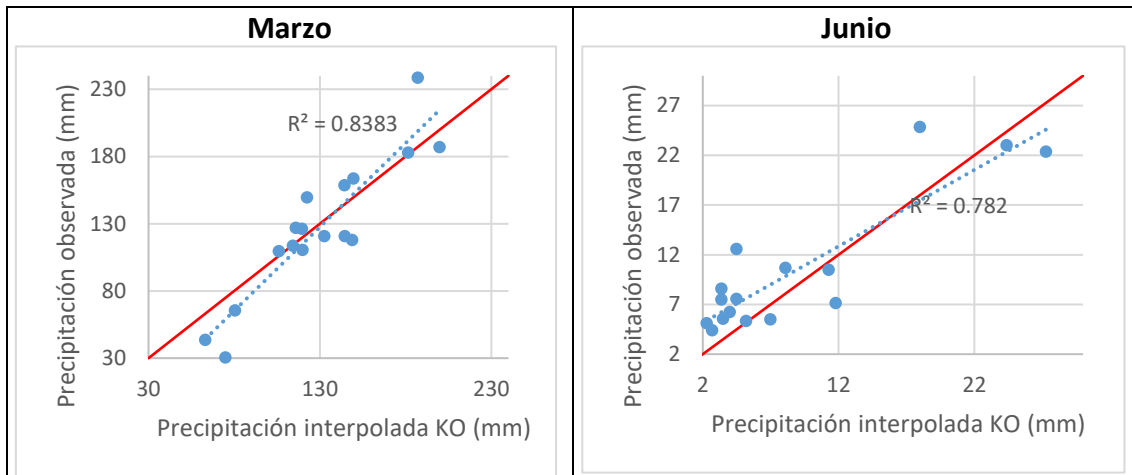


Gráfico 13. Validación cruzada del mes de marzo y junio con KO

Como muestra, en el Gráfico 13 se observan los resultados de la validación cruzada para los meses de marzo y junio. La línea roja representa lo que sería un ajuste perfecto. El gráfico muestra las correlaciones entre la precipitación observada y la interpolada con el semivariograma ajustado. Para ello se quita una estación a la vez y se interpola con el semivariograma. Esta operación es realizada de manera automática con la asistencia del software de sistemas de información geográfica. Como se observa la interpolación está representando adecuadamente los valores observados. Usando esta validación se podían descartar ajustes de semivariogramas inadecuados y ayudar a elegir el más óptimo.

Ajustados y validados los semivariogramas, se procedió con la interpolación. En la Figura 25 se observa la precipitación promedio multianual de marzo y junio estimados por KO. El comportamiento espacial se ajusta mejor a lo observado durante el análisis de tendencias. Tanto en marzo como en junio existe una tendencia creciente norte – sur y oeste – este. En resumen los mejores parámetros para el KO fueron elegidos según el modelo de semivariograma teórico, la existencia de anisotropía, rango de búsqueda cercano, validación cruzada y tendencia espacial.

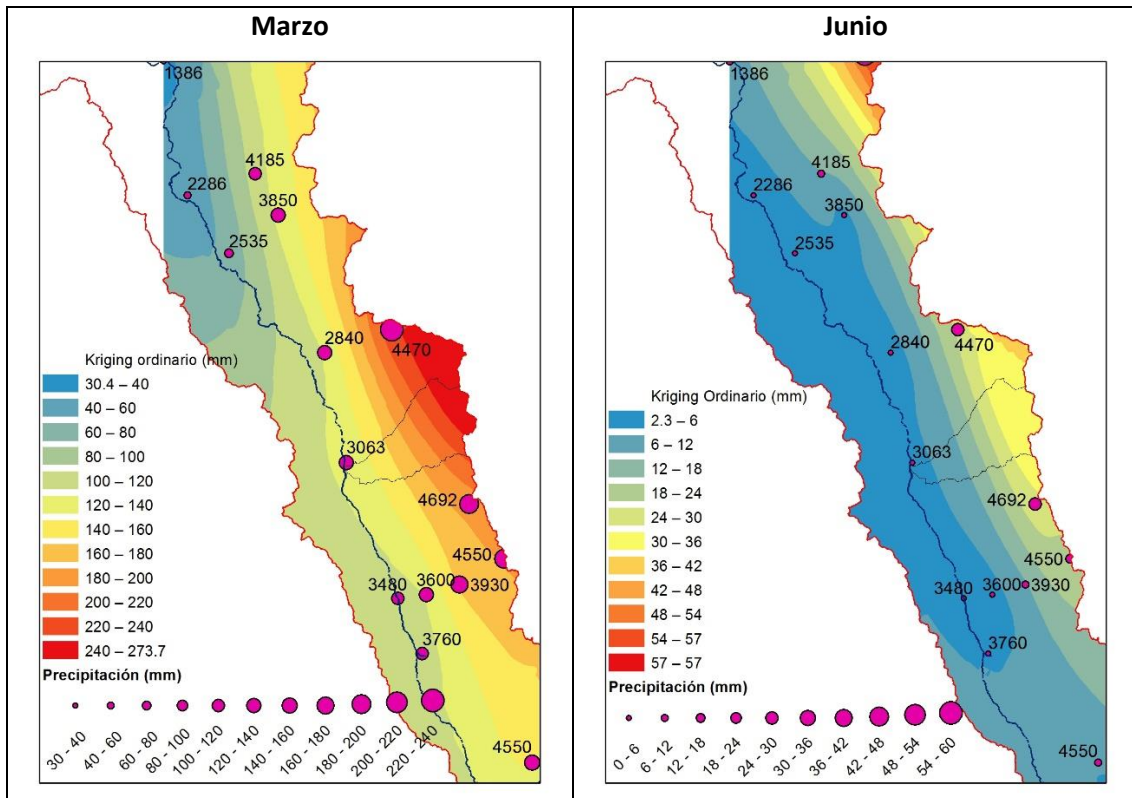


Figura 25. Interpolación de la precipitación de marzo (izquierda) y junio (derecha) con KO

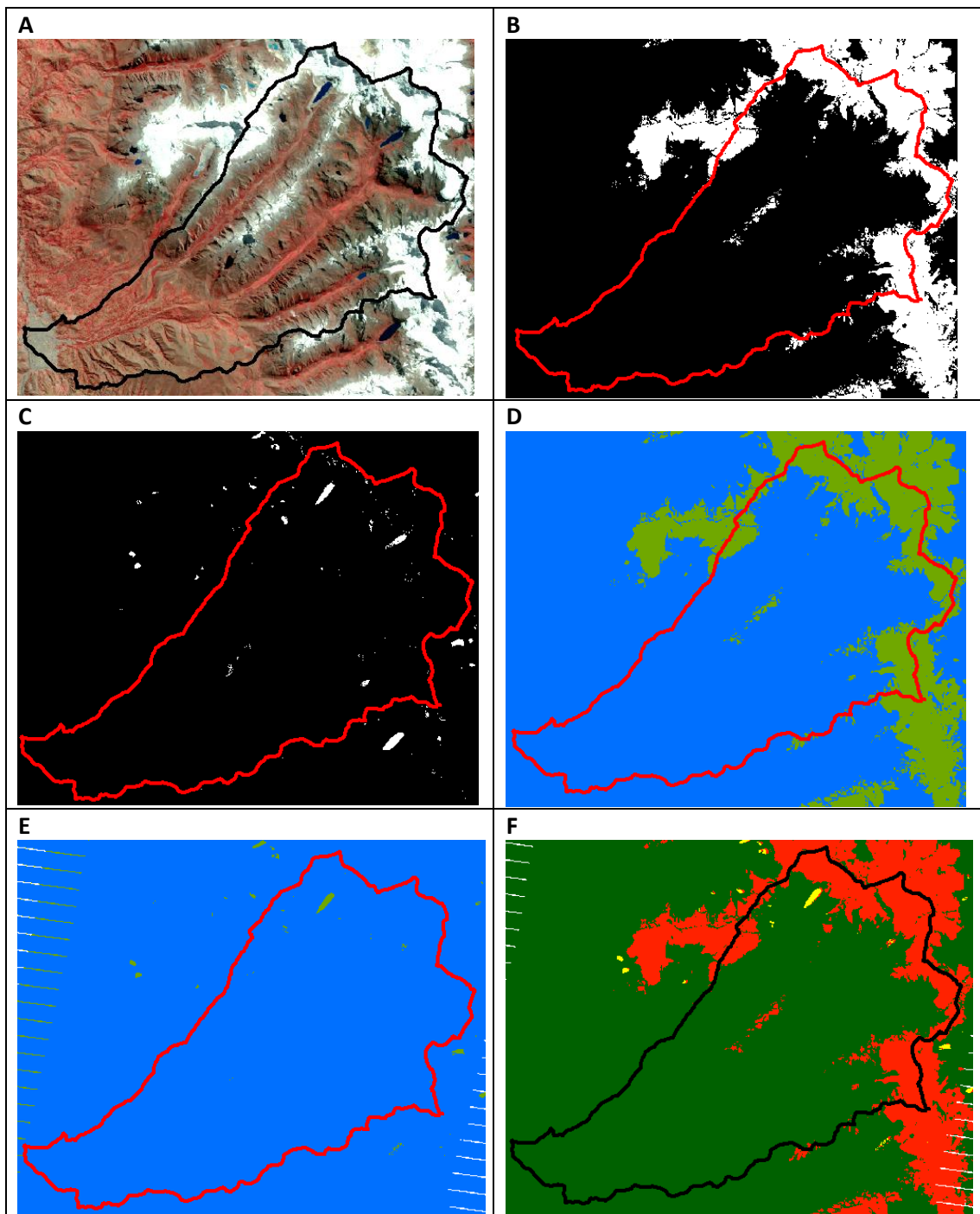
A la vista de los resultados obtenidos se optó por utilizar la interpolación con KO. A partir de ello la generación de las series de precipitación para cada mes de cada año en el periodo 1983 – 1998 se realizó con la construcción de un modelo de iteración. Este modelo construido en Model Builder de ArcGIS usa los parámetros y propiedades de los semivariogramas ajustados de cada mes y los aplica sobre la serie histórica. Con ello se realizaba una interpolación de la precipitación mensual en el periodo de estudio. Posteriormente se extrajeron los valores de precipitación para las 17 estaciones ficticias definidas previamente (ver Figura 14). Como resultado el software RS Minerve fue alimentado con 8 estaciones reales cercanas y 17 estaciones ficticias dentro de Quillcayhuanca.

5.1.3 Evaluación de la estimación de altura glaciar

La aplicación del NDSI resultó bastante adecuada para la delimitación de las áreas glaciares como se esperaba. Los umbrales del NDSI y el WI arrojaron valores de 0.5 y 0.65 respectivamente, encontrándose en los rangos hallados en investigaciones previas.

En la Figura 26 se observa el proceso de delimitación del área glaciar de la imagen del año 2009. En A se observa la imagen satelital con las bandas compuestas y corregida

geográficamente. En B y C se observan la aplicación de los índices NDSI y WI, los píxeles más oscuros en -1 y los más claros en 1. En D y E se muestra la aplicación de los umbrales 0.5 y 0.65 de los índices NDSI y WI respectivamente (verde por encima del umbral, azul por debajo). En F se muestra la delimitación preliminar de glaciares y lagunas (verde no glaciar, amarillo lagunas, rojo glaciar) y, en G se muestra la delimitación final una vez aplicada la limpieza de imagen. En H se muestra el límite glaciar en el sector norte de Quillcayhuanca sobre la imagen del año 2009 en falso color.



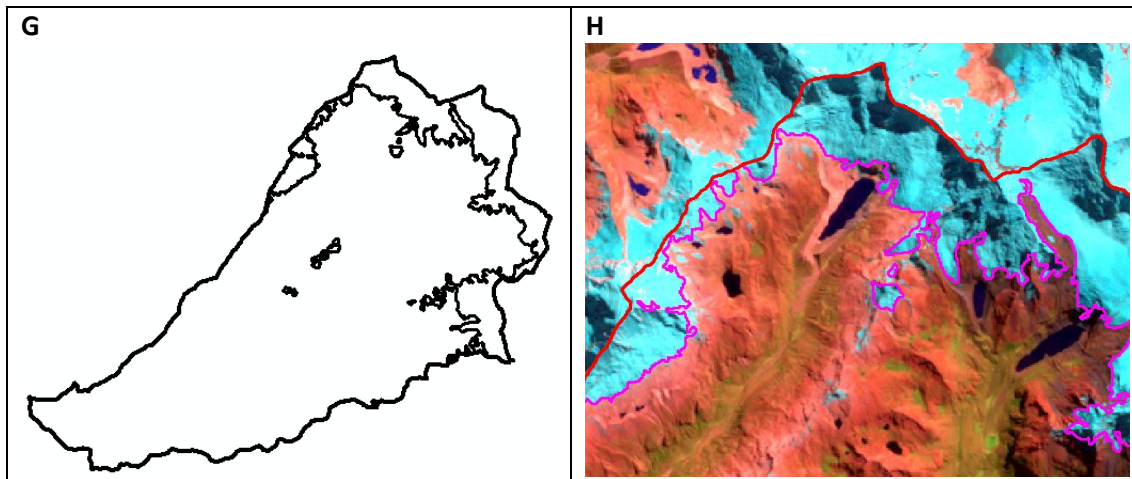


Figura 26. Resultados del proceso de delimitación del área glaciar

Obsérvese que en la Figura 26 E y F se muestran algunos sectores identificados como lagunas (verde y amarillo respectivamente) pero que en realidad no lo son. Los errores más resaltantes se ubican en el sector centro arriba. En perspectiva ello no quiere decir que los umbrales aplicados sean inadecuados, sino que el proceso requiere de una limpieza manual de los elementos filtrados. Es en este momento cuando el uso de combinaciones de banda y el conocimiento previo de la zona resulta trascendental. Sólo después se pueden aplicar los filtros de limpieza de imagen para eliminar píxeles aislados y generalizar.

Los umbrales 0.5 y 0.65 se usaron para todas las imágenes. En algunos casos estos podían variar en +/-0.02, pero dada la pequeña diferencia y para homogenizar criterios y análisis se usó un único valor.

Con la delimitación glaciar y el modelo de elevación digital disponibles sólo hacía falta trazar los ejes glaciares para aplicar la herramienta GlabTop. Estos ejes se trazaron por delimitación experta siguiendo las curvas de nivel. Se trataba de incluir todas las zonas posibles e importantes del área glaciar pues sobre estos ejes la herramienta calcula directamente los espesores. En la Figura 27 se muestra el trazo de los ejes glaciares sobre la delimitación del área glaciar del 2009 y curvas de nivel. Las curvas fueron generadas a partir del modelo de elevación digital del año 2009. Por ello los resultados de GlabTop sólo pueden aplicarse a dicho año, porque la topografía glaciar cambia con el tiempo pero el modelo de elevación digital disponible es sólo de un año.

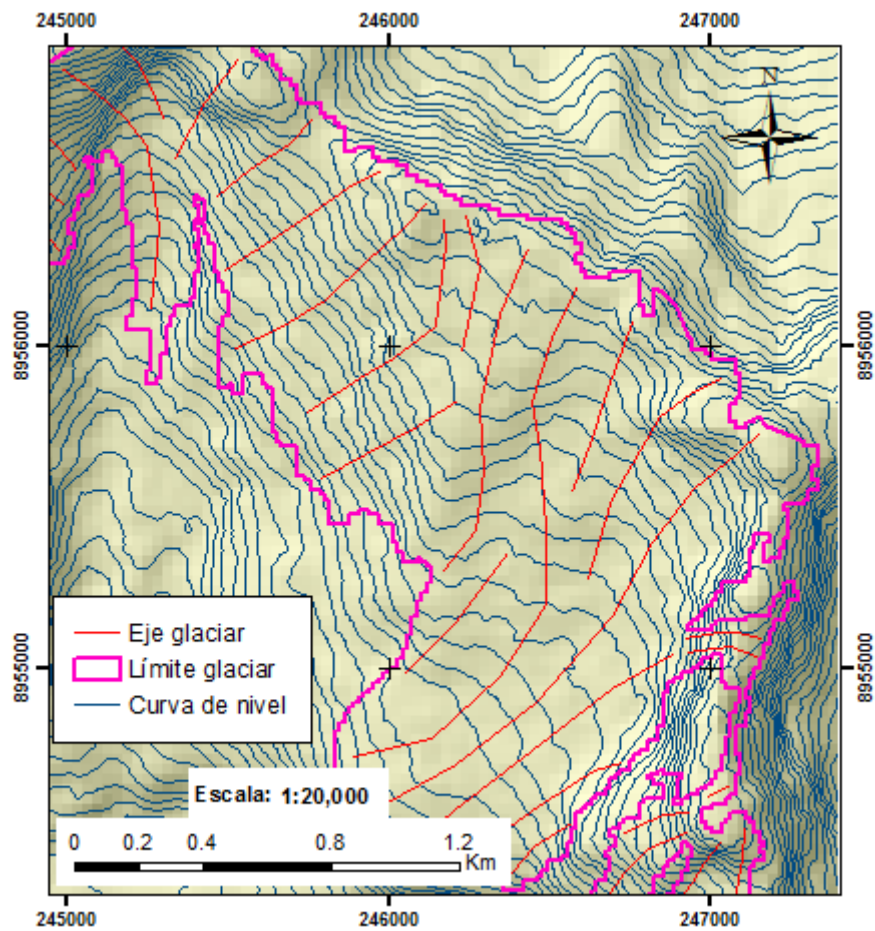


Figura 27. Mapa de ejes glaciares del 2009

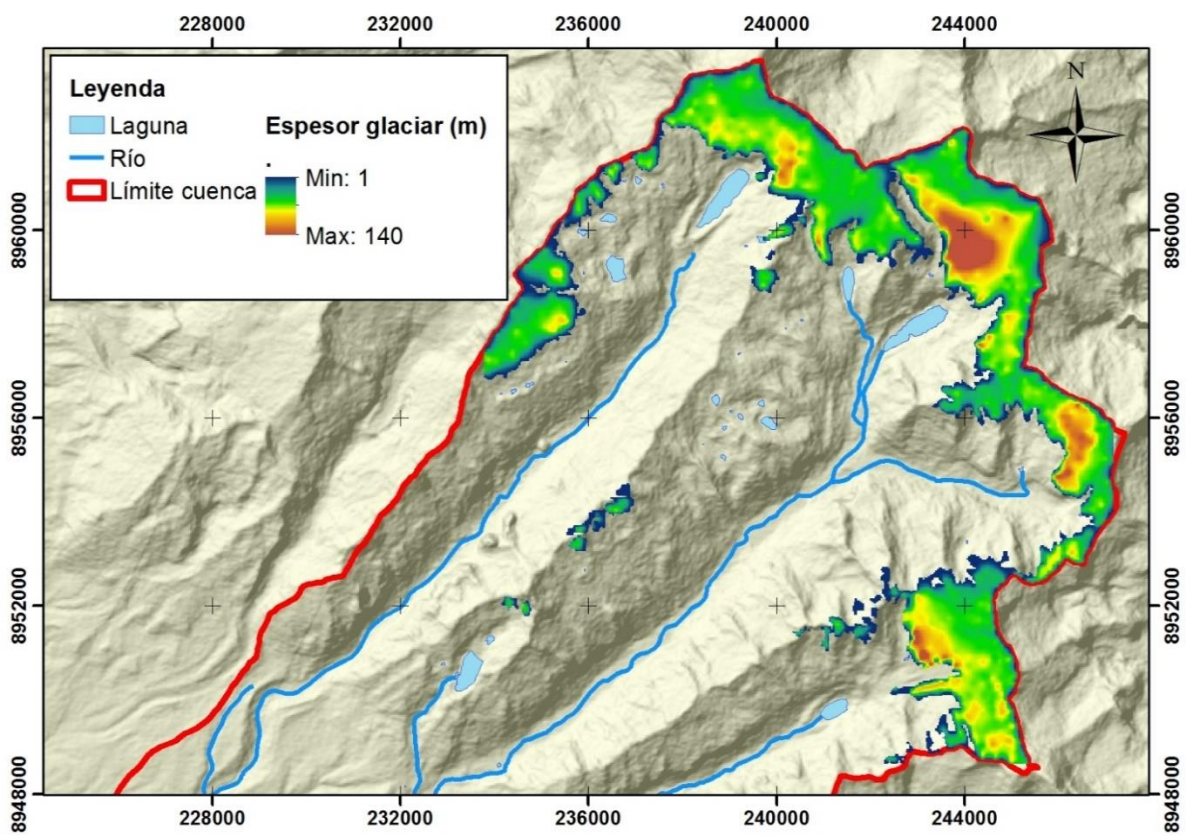


Figura 28. Mapa de espesor glaciar de Quillcayhuanca del año 2009 con GlabTop

En la Figura 28 se muestra el resultado de la aplicación de la herramienta GlabTop para el año 2009. Los espesores varían desde 1m hasta 140 m. En general el espesor glaciar es bastante homogéneo con un promedio de 35 m salvo en puntos determinados. Es preciso aclarar que no hay una forma directa de poder comprobar estos resultados. Lo más adecuado sería contar con mediciones de radar sobre el glaciar y enfrentarlos a los resultados del GlabTop. Este procedimiento facilitaría a una calibración de los parámetros de la herramienta. Al no contar con esta información sólo se puede asumir que los resultados son correctos.

El resultado de GlabTop simula haber realizado un estudio de radar en toda la superficie glaciar. Por ello si se asume que los resultados son equiparables a datos observados, entonces se pueden usar en la calibración de otras técnicas de estimación del espesor glaciar como la formulación de Bahr.

Para calibrar la formulación de Bahr se requiere de un conjunto de áreas y volúmenes. Para ello se usó la delimitación de los subcuencas que conformarían fracciones de la delimitación glaciar. El volumen es el resultado del producto de la altura promedio glaciar de cada subcuenca con su respectiva área.

En el Gráfico 14 se muestra la relación exponencial entre el área y volumen glaciar de Quillcayhuanca para el año 2009. La correlación entre las variables es bastante buena con un R^2 de 0.91. Tanto el factor (0.0468) como el exponente (1.4643) se encuentran en el rango de los valores hallados por Bahr (1997).

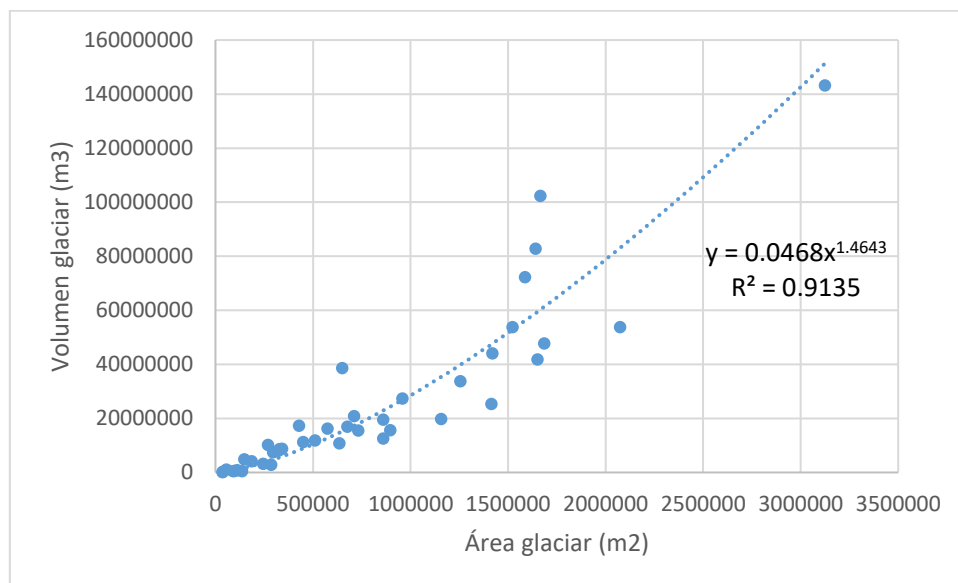


Gráfico 14. Relación altura y volumen glaciar de Quillcayhuanca

Algunos autores consideran que esta correlación es engañosa dado que el volumen lleva inmerso el dato del área (autocorrelación área – volumen). A pesar de ello es una herramienta útil para poder estimar el volumen glaciar sólo con un dato. Ya se ha visto que el área glaciar se puede calcular con relativa facilidad para diversos periodos de tiempo, con lo que la utilidad de esta herramienta toma mayor importancia.

En el Gráfico 15 se comparan los resultados entre el volumen estimado por GlabTop en función del volumen de Bahr (azul) y el volumen de Bahr calibrado (naranja). Se hace notar la importancia que tiene el ajustar la formulación de Bahr. La formulación sin calibrar tiende a subestimar el volumen. Considerando esta mejora se asumen que la formulación calibrada de Bahr es adecuada para estimar el volumen glaciar.

Así, a partir de las áreas glaciares delimitadas desde imágenes de satélite se pudo calcular el volumen glaciar en diferentes años y con ello la altura glaciar.

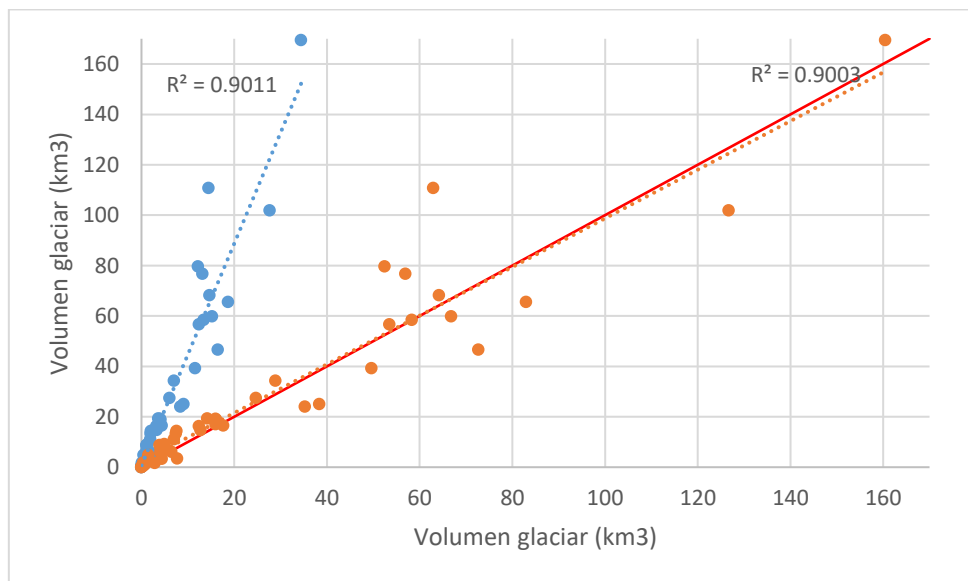


Gráfico 15. Relación volumen de Bahr y volumen calibrado vs volumen GlabTop

En estas condiciones se considera que una de las fuentes de mayor incertidumbre en el presente estudio es la estimación del volumen glaciar. A pesar que la herramienta GlabTop es bastante robusta, no contar con datos para su calibración es una gran limitante. A ello se suma el uso de una técnica discutida y calibrada con datos “desconocidos”. Sin embargo de no contar con información del volumen glaciar se estaría sobreestimando la producción en el sistema Quillcayhuanca a futuro pues no podría establecerse un límite de cuánto glaciar se dispone.

Resulta entonces fundamental desarrollar nuevas técnicas de estimación del volumen glaciar con datos limitados y con potencial de uso en series históricas. Del mismo modo será importante realizar mediciones, al menos puntuales del espesor glaciar con el objetivo de calibrar modelos como GlabTop cuyo potencial es bastante bueno.

5.1.4 Evaluación de la generación de clima futuro

El ajuste del sesgo entre las series observadas de precipitación y temperatura se hizo sobre 4 versiones del RCA4: dos modelos ICHEC y MPI, cada uno con dos enfoques punto a punto y promedio. En todos los casos la evaluación se hizo de manera estacional.

Como muestra, en el Gráfico 16 y Gráfico 17 se observan los datos de temperatura y precipitación mensuales respectivamente de la estación Huaraz. Los datos están ordenados de menor a mayor para cada estación del año en el periodo de control 1983 – 1998. En azul los datos del modelo RCA4 sin corregir y en naranja los datos del RCA4 corregidos todos correspondientes al desencadenador ICHEC con enfoque punto a punto. La línea diagonal roja muestra lo que sería un ajuste perfecto entre los datos observados y modelados.

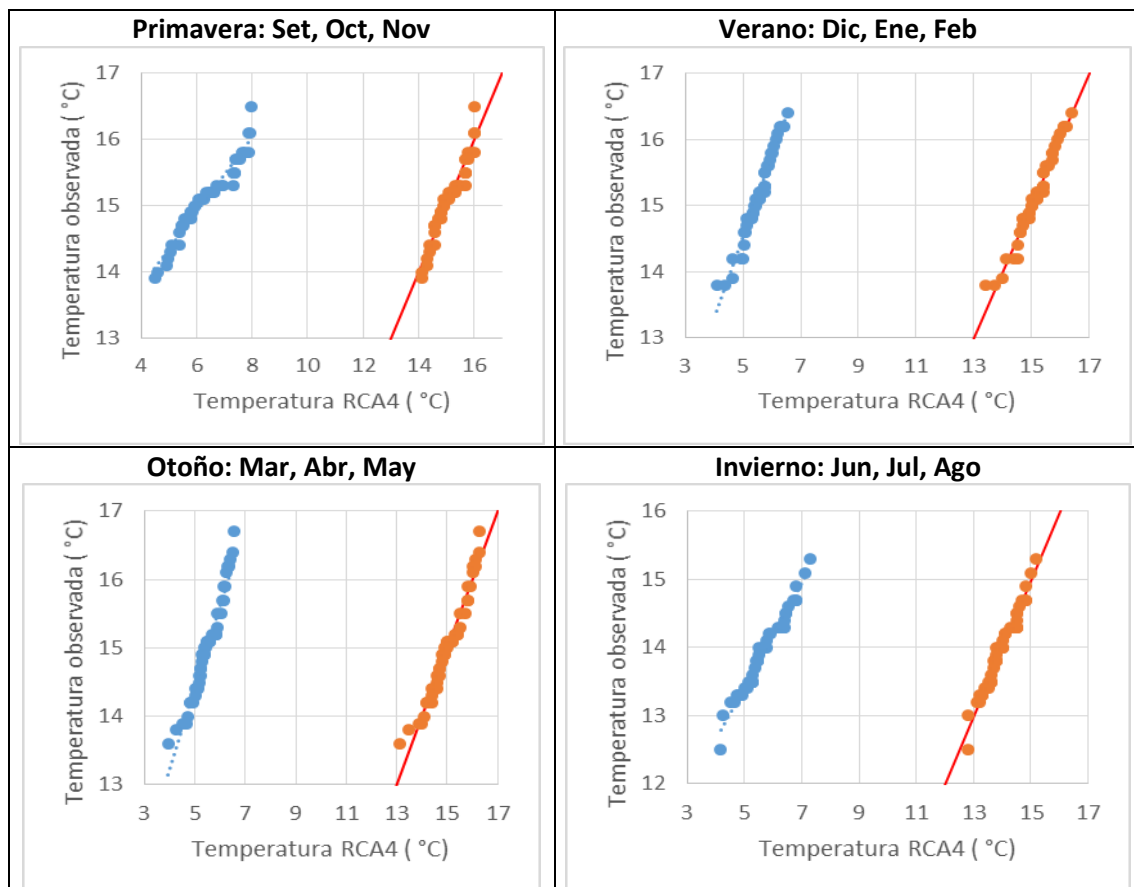


Gráfico 16. Temperatura mensual del RCA4 corregida y sin corregir para la estación Huaraz

Para la temperatura, los datos del RCA4 muestran registros menores a lo que debería ser en la estación Huaraz. La corrección ajusta muy bien los datos. Es un caso bastante típico, la linealidad que presenta la temperatura permite que su corrección en la mayoría de casos sea sencilla y con resultados óptimos.

En el caso de la precipitación los ajustes son variados. En términos generales el modelo sobreestima la precipitación observada en la estación Huaraz. La corrección reduce las cantidades. Los mejores ajustes se observan en verano y otoño. Primavera presenta un ajuste aceptable, aunque las precipitaciones más altas se alejan de lo óptimo. El caso de invierno es más crítico. Este corresponde a la época seca, en la mayoría del registro observado la precipitación es mínima o nula pero en ciertos años ocurren precipitaciones que generan un desajuste del promedio. Esto provoca precisamente que el modelo y su corrección no sean tan buenas como en otros periodos.

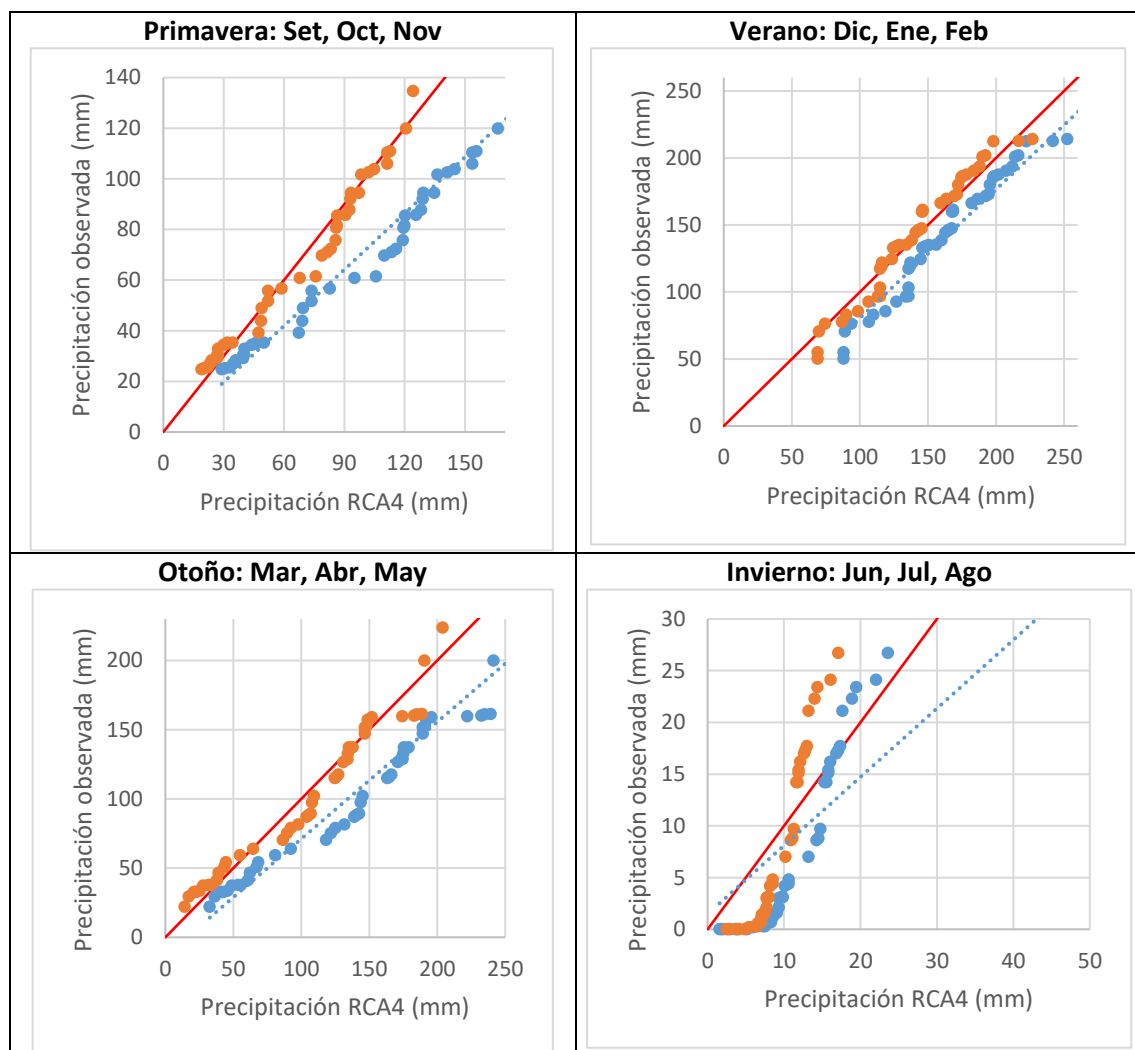


Gráfico 17. Precipitación mensual del RCA4 corregida y sin corregir para la estación Huaraz

En el Cuadro 17 se muestran los indicadores estadísticos de los RCA4 antes (RCA4s/c) y después de corregir (RCA4c) comparados con los estadísticos observados de precipitación de la estación Huaraz. La columna P (0) muestra la probabilidad de ocurrencia de precipitación cero en toda la serie ajustado a una distribución Gumbel. Obsérvese cómo todos los indicadores de la serie después de ser corregidos se asemejan a los indicadores observados. El Cuadro 18 muestra las probabilidades de precipitación cero también con una distribución Gumbel pero de manera estacional. En todos los periodos ocurre un ajuste satisfactorio de las series, sólo durante el invierno la corrección es menor que en los demás periodos. Esto conlleva a que habrá mayor precipitación que la esperada. Aun así la diferencia no se considera importante y por ende la corrección se supone satisfactoria.

Cuadro 17. Estadísticos de la serie de precipitación observada y del modelo RCA4 en la estación Huaraz.

| | Prom | Max | Min | Desviación | P (0) |
|----------------|-------|--------|------|------------|-------|
| Huaraz | 62.41 | 253.90 | 0.00 | 55.82 | 0.105 |
| RCA4s/c | 95.68 | 280.71 | 0.65 | 65.58 | 0.032 |
| RCA4c | 62.49 | 236.50 | 0.00 | 55.33 | 0.102 |

Cuadro 18. Probabilidad de precipitación cero estacional de la estación Huaraz

| | Prim | Ver | Oto | Inv |
|----------------|------|------|------|------|
| Huaraz | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.33 |
| RCA4s/c | 0.00 | 0.00 | 0.02 | 0.23 |
| RCA4c | 0.02 | 0.00 | 0.03 | 0.28 |

Los comportamientos de los ajustes mostrados en la estación Huaraz se repiten a lo largo de todas las estaciones evaluadas. A pesar de las limitaciones en el ajuste durante el periodo de estío en la precipitación, la corrección del sesgo cumple su objetivo.

La validación de los datos corregidos se llevó a cabo usando el RS Minerve de Quillcayhuanca calibrado y validado (ver 5.2). Las series de precipitación y temperatura se ingresaron como datos observados. Cabe recordar que no se esperaba que una reproducción de los caudales sino de las propiedades estadísticas.

Así, en el Cuadro 19 se comparan los estadísticos de los caudales de las cuatro versiones evaluadas (ICHEC punto a punto, ICHEC promedio, MPI punto a punto y MPI promedio)

con los estadísticos de la estación Quillcay. Además se ha evaluado la probabilidad de ocurrencia del primer decil de la estación Quillcay en todas las series generadas. Como se observa, la versión del ICHECH punto a punto es el que posee estadísticos más similares a los observados en Quillcay.

Cuadro 19. Estadísticos de los caudales observados y generados del RCA4

| | Quillcay | ICHEC | | MPI | |
|-----------------|----------|-----------|-------|-----------|-------|
| | OBS | PTO A PTO | PROM | PTO A PTO | PROM |
| PROMEDIO | 6.88 | 6.70 | 6.68 | 6.66 | 6.64 |
| MAX | 18.15 | 21.63 | 21.71 | 23.37 | 24.74 |
| MIN | 1.42 | 1.58 | 1.54 | 1.63 | 1.51 |
| DE | 3.80 | 3.71 | 3.76 | 3.67 | 3.78 |
| P (10 %) | 0.108 | 0.115 | 0.121 | 0.114 | 0.126 |

El Gráfico 18 y Gráfico 19 muestran los cuantiles de caudales máximos y mínimos anuales respectivamente, estimados mediante una función de distribución de probabilidad acumulada de Gumbel para las cuatro versiones del ICHEC y de Quillcay. Como era de esperarse las series corregidas del RCA4 tienden a incrementar la cantidad de agua disponible que se refleja en caudales mayores. Esto se observa en los caudales máximos que tienen una semejanza limitada con los caudales de la estación Quillcay (Gráfico 18). Sin embargo en cuanto a los caudales mínimos, que son de mayor interés en el presente estudio, la semejanza es muy adecuada.

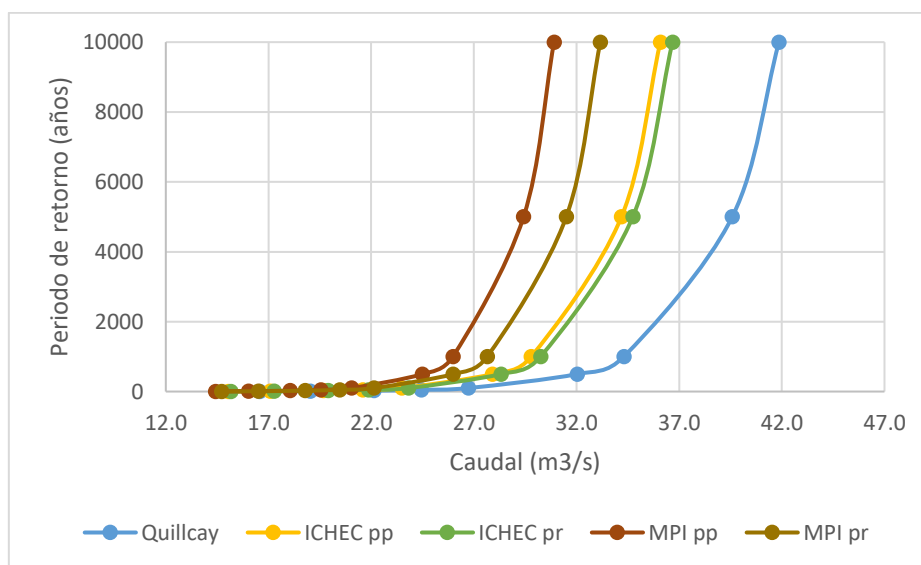


Gráfico 18. Función de distribución de los caudales máximos anuales

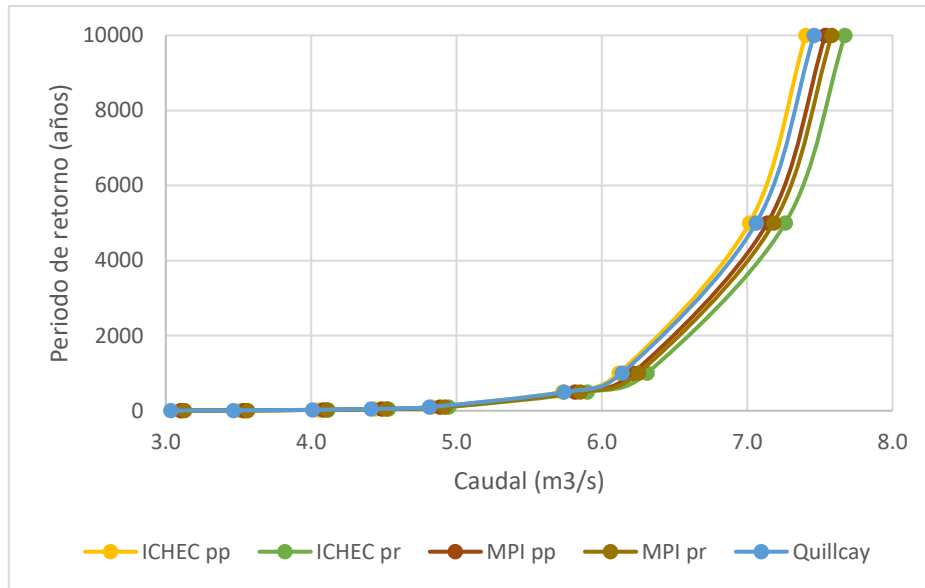


Gráfico 19. Función de distribución de los caudales mínimos anuales

Por lo tanto, tomando en consideración los resultados del Cuadro 19, Gráfico 18 y Gráfico 19 se eligió la versión ICHEC punto a punto del RCA4 para generar las series futuras de precipitación y temperatura. Los elementos de corrección de la precipitación de cada estación y para cada periodo (primavera, verano, otoño, invierno) se aplicaron al periodo 2021 – 2050 para generar las series futuras de precipitación y temperatura.

5.1.5 Evaluación de la demanda urbana

En el Gráfico 20 se muestra la correlación lineal de la población de Huaraz en el tiempo. Con un R^2 de 0.99 la relación es factible de aplicar para estimar la población en los diferentes años del periodo 1983 – 1998.

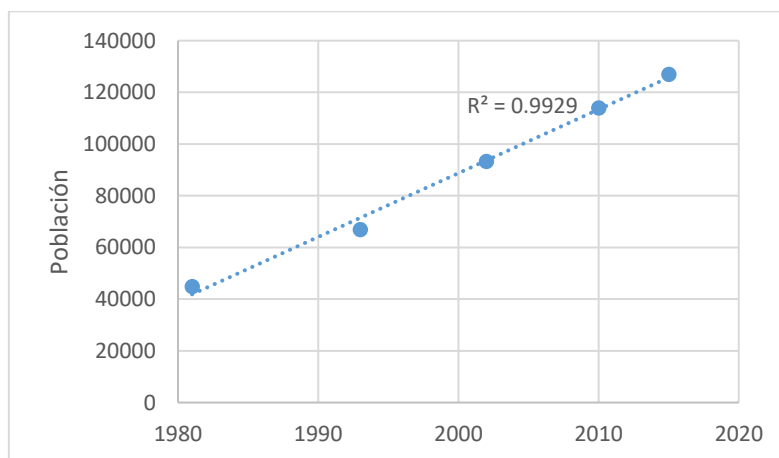


Gráfico 20. Variación de la población de Huaraz con el tiempo

Con la población estimada según la relación anterior y aplicando una dotación de 200 l/ha/d, se calculó la demanda neta urbana de Huaraz. La demanda bruta se calculó considerando que la eficiencia en la conducción es del 70 %. La cantidad de agua captada de cada río fue calculada según el ratio de distribución 25 y 75 para los ríos Paria y Auqui en el periodo 1983 – 1998 (ver Cuadro 20). Se considera que las demandas son constantes durante el año.

Cuadro 20. Demanda poblacional urbana calculada de Huaraz

| Año | Población | Demanda neta (l/s) | Demanda bruta (l/s) | Demanda Auqui (l/s) | Demanda Paria (l/s) |
|------------|------------------|---------------------------|----------------------------|----------------------------|----------------------------|
| 1983 | 46798 | 108.3 | 154.7 | 38.7 | 116.0 |
| 1984 | 49265 | 114 | 162.9 | 40.7 | 122.2 |
| 1985 | 51731 | 119.7 | 171.0 | 42.8 | 128.3 |
| 1986 | 54198 | 125.5 | 179.3 | 44.8 | 134.5 |
| 1987 | 56665 | 131.2 | 187.4 | 46.9 | 140.6 |
| 1988 | 59132 | 136.9 | 195.6 | 48.9 | 146.7 |
| 1989 | 61598 | 142.6 | 203.7 | 50.9 | 152.8 |
| 1990 | 64065 | 148.3 | 211.9 | 53.0 | 158.9 |
| 1991 | 66532 | 154 | 220.0 | 55.0 | 165.0 |
| 1992 | 68998 | 159.7 | 228.1 | 57.0 | 171.1 |
| 1993 | 71465 | 165.4 | 236.3 | 59.1 | 177.2 |
| 1994 | 73932 | 171.1 | 244.4 | 61.1 | 183.3 |
| 1995 | 76398 | 176.8 | 252.6 | 63.2 | 189.5 |
| 1996 | 78865 | 182.6 | 260.9 | 65.2 | 195.7 |
| 1997 | 81332 | 188.3 | 269.0 | 67.3 | 201.8 |
| 1998 | 83798 | 194 | 277.1 | 69.3 | 207.8 |
| 2016 | 128199 | 296.8 | 424.0 | 106.0 | 318.0 |

5.2 MODELO HIDROLÓGICO DE QUILLCAYHUANCA

En la Figura 29 se muestra el modelo de Quillcayhuanca con RS Minerve. Esta representación es la misma independientemente de la versión que se use (GSM + HBV, GSM + GR4J, GSM + SOCONT). Por cuestiones de orden los modelos fueron agrupados según su ubicación en 14 grupos. Obsérvese que los ríos han sido representados con los objetos Lag-time que se usan para simular la propagación. Estos objetos sólo tienen un propósito demostrativo en el presente modelo, pues la escala de tiempo mensual en el tamaño de Quillcayhuanca hace que sean innecesarios y no tienen efecto alguno en los resultados. El modelo es un reflejo del esquema de demandas (ver Figura 19) y de la delimitación de subcuencas (ver Figura 13) comentadas en apartados anteriores.

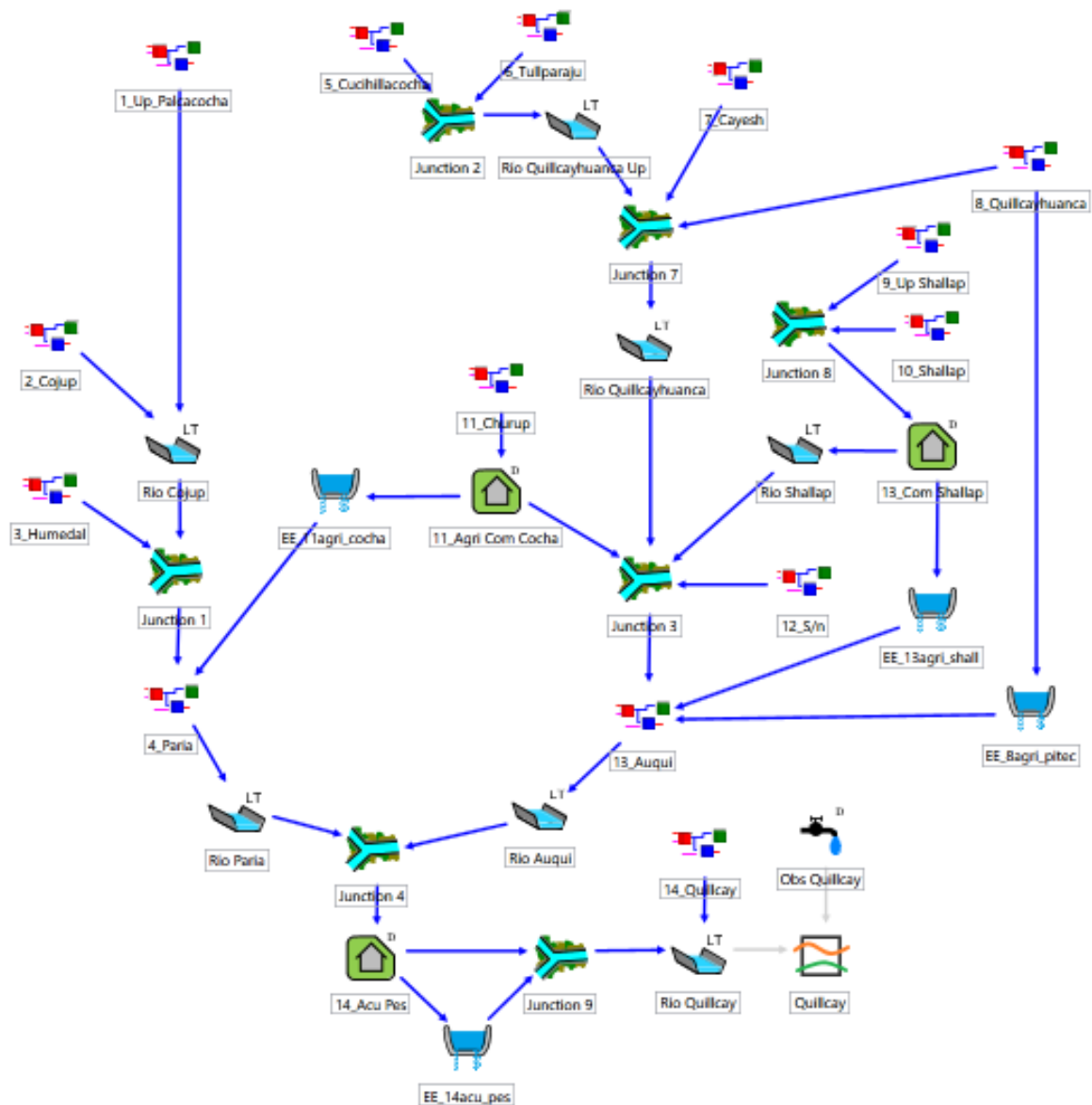


Figura 29. Esquema del modelo de Quillcayhuanca con RS Minerve

En la Figura 30 se muestra el esquema de funcionamiento de las subcuencas mixtas y simples (arriba) así como la forma en que una parte de la red de demandas ha sido implementada en RS Minerve con la versión GSM + HBV (abajo). Nótese que las subcuencas mixtas son alimentadas por una misma estación meteorológica pues se asume que ambos representan a la misma subcuenca pero con coberturas diferentes y complementarias.

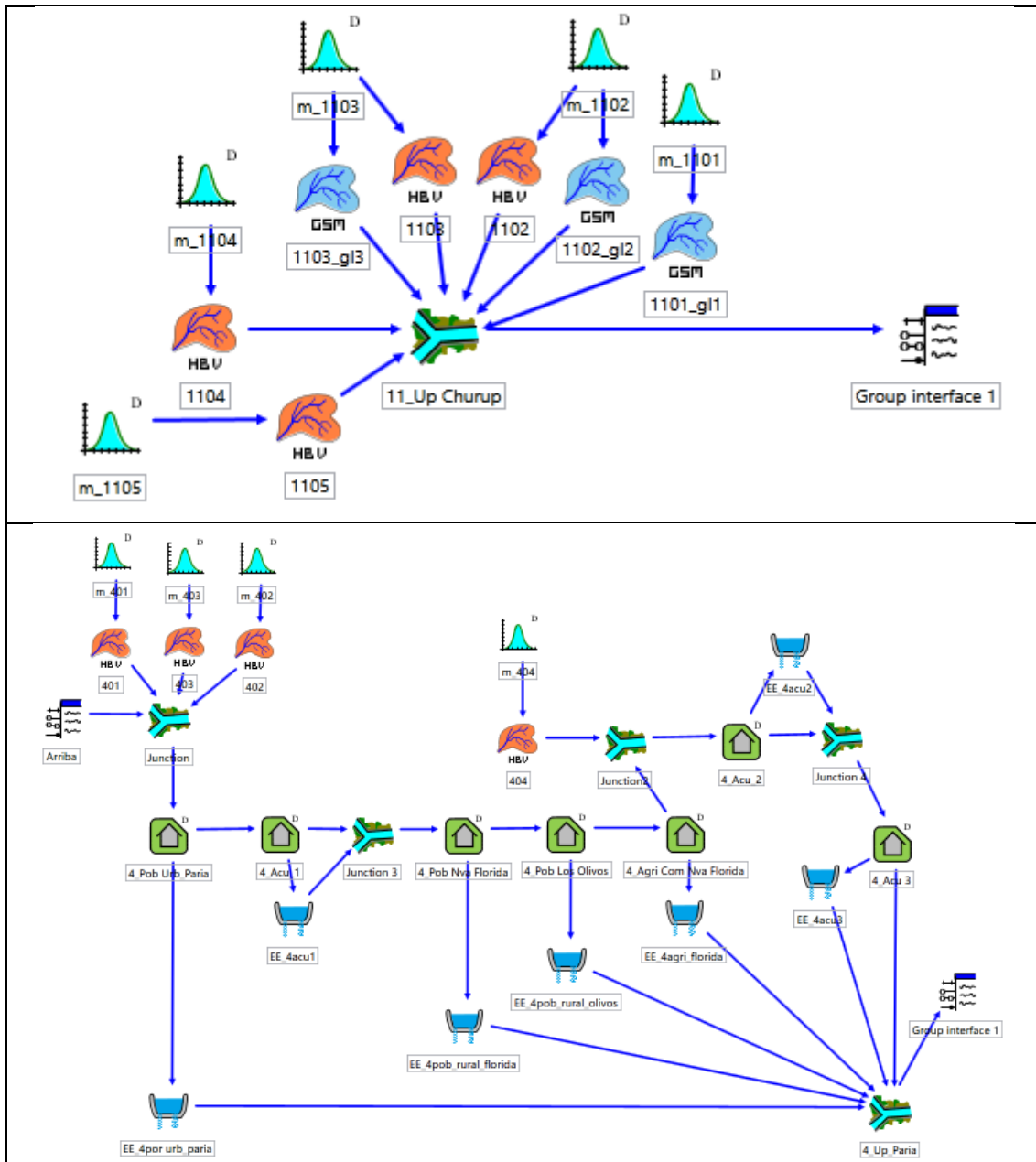


Figura 30. Esquema de las subcuencas mixtas, simples y red de demandas en RS Minerve

Como en cualquier modelo semidistribuido cada subcuenca requiere de sus propios datos meteorológicos. Estos son calculados por el propio RS Minerve usando IDW para la precipitación y el gradiente altitudinal para la temperatura. Por estos motivos es fundamental el uso de las estaciones ficticias de precipitación pues de sólo usar las estaciones observadas hubiese ocurrido una subestimación de la misma. Las estaciones ficticias interpoladas con KO aseguran que ello no ocurra. En el caso de la temperatura se ingresaron los gradientes altitudinales calculados en apartados anteriores.

Una vez definida la estructura de Quillcayhuanca, esta fue alimentada con información hidrometeorológica, glaciológica y de uso del suelo que se indican en el Cuadro 21.

Cuadro 21. Información ingresada al modelo de Quillcayhuanca

| Tipo | Información | Comentario |
|--------------------|---|---|
| Hidrometeorológica | 25 estaciones pluviométricas | 8 estaciones observadas y 17 ficticias interpoladas con KO |
| | 2 estaciones de temperatura | Con registros extendidos por correlación directa y factor de corrección |
| | 1 estación hidrométrica | - |
| Glaciológica | Área glaciar de los años 1986, 1990, 1995, 1998 | Delimitados con NDSI |
| | Altura glaciar de los años 1986, 1990, 1995, 1998 | Estimados por el método de Bahr calibrado. |
| Uso del suelo | Capacidad de campo | Estimado según el tipo de cobertura |
| | Área, pendiente, etc. | Por Geoprocesamiento |

En el Cuadro 22 se muestra el resultado del análisis de sensibilidad de cada modelo empleado en Quillcayhuanca. En cuanto a los modelos HBV y SOCONT los parámetros más sensibles son aquellos que controlan la descarga del agua en los tanques de cada modelo. Esto tiene sentido ya que al estar ejecutando el modelo a paso de tiempo mensual resulta importante el momento en que se libera el agua. En cuanto al modelo GR4J, resulta difícil explicar por qué el parámetro X1 es más sensible. Probablemente sea debido a que controla de forma indirecta la cantidad de agua disponible para la simulación. Respecto del modelo GSM y aunque pueda parecer que son muchos parámetros sensibles, este es un conglomerado de dos modelos: nieve y hielo. Los más sensibles son los parámetros que controlan los umbrales entre la ocurrencia de la precipitación sólida y líquida, la fusión de la nieve y el hielo y el momento de la descarga de los tanques. Estos parámetros no sólo condicionan la escorrentía sino también la forma en que los espesores glaciares se comportan. Si hay mucha nieve el glaciar no se derrite, si no hay nieve el glaciar fundirá muy rápido.

Cuadro 22. Parámetros de mayor sensibilidad de los modelos

| Modelo | Parámetro | Modelo | Parámetro |
|---------------|------------------|---------------|------------------|
| GSM | Tcp1 | HBV | Kr |
| | Tcp2 | | Ku |
| | Tcf | | Kl |
| | Tcg | | Kperc |
| | Asn | SOCONT | KGR3 |
| | Kgl | | Kr |
| | Ksn | | GR4J |

La elección de la versión a utilizar (GSM + HBV, GSM + GR4J, GSM + SOCONT) fue un proceso iterativo y paralelo con la calibración y validación del modelo completo de Quillcayhuanca. Para evitar que durante este proceso influyera algún factor subjetivo del modelador, todas las calibraciones se realizaron en igual número de veces y siguiendo siempre el mismo procedimiento.

En el Cuadro 23 se muestran los indicadores de bondad de ajuste finales de la calibración y validación de las 3 versiones de Quillcayhuanca a nivel global, tanto del periodo completo como del año medio. Las principales diferencias entre cada versión ocurren al comparar el periodo completo. El año medio en general es representado bastante bien por todas las versiones, por ello es tomado como una referencia antes que como un factor decisivo. En cualquier caso, y tomando en cuenta la función objetivo, las versiones con mejor desempeño corresponden a GSM + HBV y GSM + SOCONT. La versión GSM + GR4J aunque tiene una buena calibración falla en la validación.

Cuadro 23. Indicadores de bondad de ajuste de las versiones de Quillcayhuanca

| Indicador | | Periodo completo | | | Año medio | | |
|--------------------|-------------------------|------------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | | HBV | GR4J | SOCONT | HBV | GR4J | SOCONT |
| CALIBRACION | Nash | 0.74 | 0.67 | 0.71 | 0.94 | 0.84 | 0.94 |
| | Nash-In | 0.80 | 0.67 | 0.63 | 0.95 | 0.85 | 0.88 |
| | Coeficiente de Pearson | 0.87 | 0.85 | 0.87 | 0.96 | 0.90 | 0.97 |
| | Sesgo | 0.99 | 0.99 | 1.00 | 0.99 | 0.99 | 1.00 |
| | Función objetivo | 3.40 | 3.17 | 3.22 | 3.85 | 3.58 | 3.79 |
| VALIDACION | Nash | 0.51 | 0.36 | 0.51 | 0.94 | 0.88 | 0.93 |
| | Nash-In | 0.63 | 0.43 | 0.61 | 0.96 | 0.87 | 0.90 |
| | Coeficiente de Pearson | 0.74 | 0.70 | 0.76 | 0.96 | 0.93 | 0.96 |
| | Sesgo | 1.00 | 0.99 | 1.00 | 1.00 | 0.99 | 1.00 |
| | Función objetivo | 2.88 | 2.48 | 2.89 | 3.86 | 3.66 | 3.79 |

Se recuerda que durante todo el proceso de calibración siempre se buscó el mejor desempeño en cuanto al Nash-In y ello se ve reflejado en los resultados. Calibraciones con el mismo peso del Nash y Nash – In generaban mejores resultados promedio, pero sobreestimaban los valores reales. Tómese en cuenta que durante la simulación, el modelo ya incorporará una mayor precipitación debido al ajuste de los valores históricos del RCA4.

Se aclara también que los indicadores del Cuadro 23 toman en cuenta ya un buen comportamiento de los caudales en las diferentes zonas y de la dinámica glaciar. De hecho, el módulo glaciar y sus parámetros son los mismos en todas las versiones, de manera que la diferencia radica en las zonas no glaciares. En otras palabras, cada versión modela de la forma esperada el sistema hidrológico Quillcayhuanca con sus propias diferencias. Así, los indicadores son el resultado, precisamente, de la calibración del modelo. Por este motivo la decisión de elegir una versión se basa netamente en los números sin tener que evaluar qué versión tiene un mejor comportamiento.

En estas condiciones la versión seleccionada fue GSM + HBV. Esta versión además de tener las funciones objetivo más altas, tiene los mejores indicadores de Nash-In tanto en el periodo completo como en el año medio. Tómese en cuenta que Nash-In es un indicador clave en la simulación de modelos de recursos hídricos porque da mucha importancia a los caudales base.

Ello no quiere decir que la versión SOCONT sea desechada por completo. Los resultados indican que resulta bastante útil y puede ser muy adecuado para la modelación de cuencas glaciares. De hecho su calibración es más práctica y toma menos tiempo. En este mismo sentido el modelo HBV tiene una base física más amplia, y puede dar más luces sobre el funcionamiento de una cuenca. En contra su calibración es más compleja y toma más tiempo. En cuanto al modelo GR4J es probable que su aplicación principal sea sobre cuencas más homogéneas. Un número reducido de parámetros difícilmente puede proveer de una mayor diversidad de comportamientos en una cuenca. Ello se ve reflejado en una buena calibración, pero con el cambio de condiciones el mismo juego de parámetros resulta insuficiente.

A partir de este punto la versión definitiva GSM + HBV se denominará modelo de Quillcayhuanca. Es con este modelo calibrado con el que se realizó la evaluación de las series de cambio climático del periodo histórico. Las características propias del HBV permitirán evaluar no sólo la disponibilidad hídrica final en la estación Quillcay sino también cómo es la distribución entre los aportes superficial y subterráneo. Sumando el módulo glaciar se cuenta con un modelo que representa bastante bien las características de Quillcayhuanca para evaluar los impactos del cambio climático.

En el Cuadro 24 y Cuadro 25 se muestran los coeficientes de correlación de Pearson mensuales y para las épocas húmedas (setiembre - mayo) y secas (junio - agosto). Los coeficientes corresponden tanto a los periodos de calibración (1983 - 1991), validación (1991 - 1998) y periodo completo (1983 – 1998). En general el modelo de Quillcayhuanca representa los caudales de manera satisfactoria. Incluso los meses del periodo seco cuando domina el aporte glaciar tienen coeficientes bastantes altos. A partir de ello puede afirmarse que la dinámica glaciar está siendo bien representada.

Cuadro 24. Coeficiente de Pearson mensual

| R ² | Set. | Oct. | Nov. | Dic. | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. |
|--------------------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|------|
| Calibración | 0.82 | 0.96 | 0.87 | 0.93 | 0.84 | 0.88 | 0.91 | 0.69 | 0.73 | 0.89 | 0.96 | 0.88 |
| Validación | 0.73 | 0.70 | 0.68 | 0.90 | 0.79 | 0.86 | 0.94 | 0.85 | 0.89 | 0.95 | 0.88 | 0.99 |
| Completo | 0.69 | 0.54 | 0.57 | 0.91 | 0.80 | 0.81 | 0.90 | 0.79 | 0.82 | 0.90 | 0.82 | 0.85 |

Cuadro 25. Coeficiente de Pearson de época húmeda y seca

| R ² | Húmeda | Seca |
|--------------------|--------|------|
| Calibración | 0.88 | 0.94 |
| Validación | 0.86 | 0.89 |
| Completo | 0.91 | 0.92 |

En el Gráfico 21 se comparan los caudales simulados y observados en la estación Quillcay en el periodo completo. Por un lado, los caudales base son bastante bien representados y coinciden durante gran parte del periodo de estudio. Por otro lado los caudales pico simulados tienen mayores limitaciones en la representación de sus pares observados. Un motivo probable es el uso del artificio del retroceso glaciar y los subcuencia mixtos (ver 4.7.1) por el que ya se había previsto una subestimación de la producción de agua. Esta situación se hace más visible en el periodo de validación pues la demanda urbana crece durante dicho periodo restando mayor cantidad de agua. Aun así y considerando que el cambio climático será evaluado con demandas constantes, se asume que este efecto no es trascendental. Además del factor glaciar, otros factores responsables serían el uso de demandas agrícolas constantes. Durante periodos de mayores precipitaciones las demandas agrícolas desde los ríos son menores, pero en el modelo estas demandas permanecen iguales. La inclusión de mayor información histórica al respecto sería importante para ajustar estas diferencias.

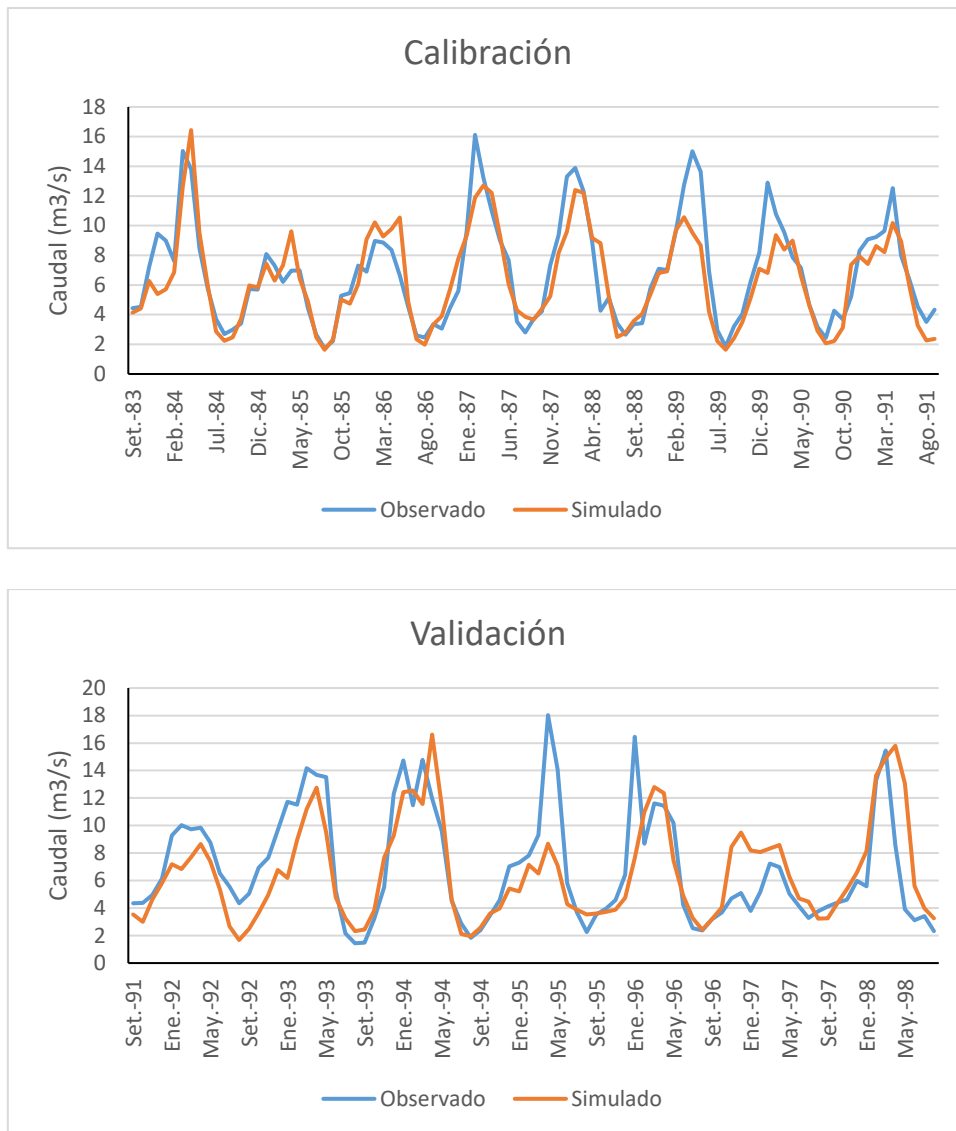


Gráfico 21. Caudales observados y simulados en la estación Quillcay

En el Gráfico 22 se muestra la diferencia entre los caudales simulados y los observados de todo el periodo de estudio. Las líneas discontinuas representan la desviación estándar de los caudales observados $\pm 3.69 \text{ m}^3/\text{s}$. Las diferencias varían entre $-9.34 \text{ m}^3/\text{s}$ y $+9.15 \text{ m}^3/\text{s}$ incluyendo las diferencias extremas. En general el 90.6 % de las diferencias (163 de 180 registros) se encuentran en el rango comprendido de la desviación estándar y sólo tres de los registros (1988, 1995, 1998) exceden sobremanera el rango de la desviación estándar.

Los errores en la validación y calibración, podrían deberse a dos factores combinados: 1) los periodos de error máximo coinciden con la ocurrencia de Fenómenos el Niño que se caracterizan por eventos diarios extremos que influyen en los registros de caudales y

que difícilmente pueden ser representados a escala mensual, 2) el drenaje parcial de la laguna de Palcacocha por motivos de seguridad, ya que la altura de su espejo de agua representaba un potencial peligro. Desafortunadamente no se disponen de datos que indiquen los caudales salientes de la laguna.

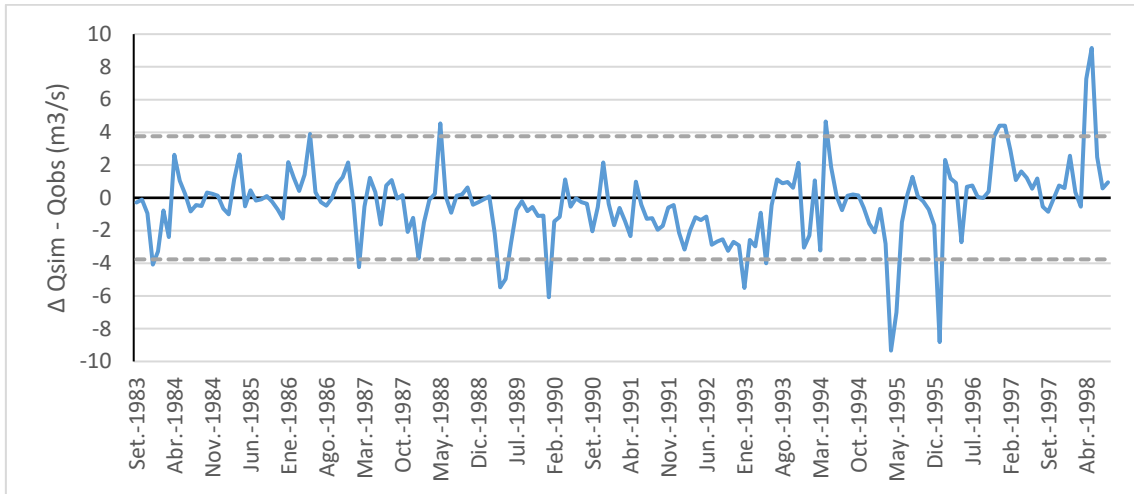


Gráfico 22. Diferencia entre el caudal simulado y el observado en la estación Quillcay

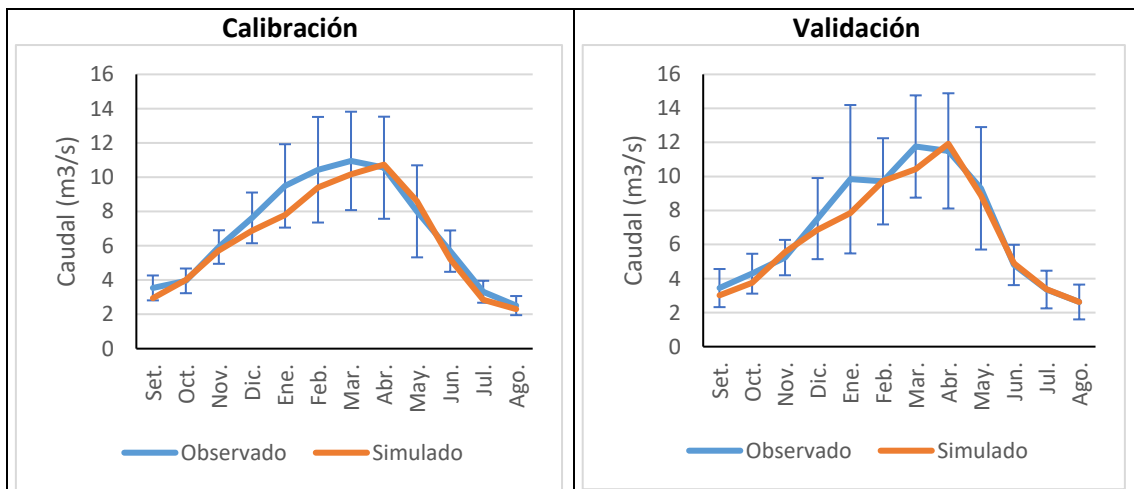


Gráfico 23. Caudales observados y simulados del año medio

En el Gráfico 23 se comparan los caudales simulados y observados del año medio en la estación Quillcay para el periodo de calibración y validación. Las barras verticales muestran la desviación estándar de los datos observados. Se identifica con facilidad que los meses entre noviembre y febrero corresponden al periodo de subestimación de producción de agua del modelo. Son precisamente los meses en los que la desviación estándar es mayor cuando el modelo reduce su eficiencia. Ello se debería que la gran variabilidad de datos debería ser estimada por único conjunto de parámetros, hecho

que es difícil. Aun así, los resultados del modelo siempre se encuentran dentro del rango de la desviación estándar y en la mayoría de los casos con ajustes aceptables.

El Cuadro 26 muestra los parámetros calibrados del modelo GSM para Quillcayhuanca. Los resultados son comparables a valores hallados en otros estudios en la Cordillera Blanca (T. Condom et al. 2011; B. Schaepli et al. 2005; Suarez et al. 2008). Tal es el caso del Asn y Agl (factores grado día para el hielo y la nieve) cuyos valores para glaciares del norte del Santa habían sido estimados en 12 y 20 mm/ °C/d respectivamente. Lo mismo ocurre con Tcp1 y Tcp2 (umbrales de temperatura para separar precipitación líquida y sólida) que habían sido estimados en 0 y 2 °C respectivamente también para glaciares del norte del Santa.

Cuadro 26. Parámetros calibrados del modelo GSM para Quillcayhuanca

| Parámetro | Unidad | Valor | Valor típico |
|------------------|---------------|--------------|---------------------|
| Asn | mm/ °C/d | 12.5124098 | 0.5 a 20 |
| AsnInt | mm/ °C/d | 3.4090045 | 0 a 4 |
| AsnPh | d | 264 | 1 a 365 |
| ThetaCri | - | 0.1 | 0.1 |
| Bp | d/mm | 0.0125 | 0.0125 |
| Tcp1 | °C | 0.4716515 | 0 |
| Tcp2 | °C | 2.0906882 | 4 |
| Tcf | °C | 0.1815172 | 0 |
| Agl | mm/ °C/d | 20 | 0.5 a 20 |
| AglInt | mm/ °C/d | 5 | 0 a 4 |
| Tcg | °C | 0 | 0 |
| Kgl | 1/d | 5 | 0.1 a 5 |
| Ksn | 1/d | 5 | 0.1 a 5 |

Con los parámetros glaciares anteriores la ELA quedó definida a una altura promedio de 5100 m.s.n.m. en el periodo histórico. Este valor es concordante con estudios previos que calcularon la ELA entre 4995 y 5544 m.s.n.m. para Quillcayhuanca (ANA 2010). Esta variable es de suma importancia porque define qué subcuencas glaciares aportan agua al sistema. Así sólo los subcuencas que estén por debajo de este valor funden. De los 72 subcuencas de Quillcayhuanca, 42 son glaciares entre simples y mixtos. De estos, 23 se encuentran por debajo de la ELA en el periodo histórico representando un área total de 26.55 km² en 1986.

En la Figura 31 se observa una muestra de la altura glaciaria simulada de 4 subcuencas que se encuentran por debajo de la ELA. Estos son comparados con datos puntuales de altura glaciaria estimados por el método de Bahr calibrado al que se denomina “observado”. En RS Minerve la altura glaciaria no es una variable de calibración, por lo que esta comparación es orientativa y permite tener una idea de lo adecuado que está funcionando el módulo glaciario. En términos generales el módulo se desempeña de manera aceptable. La mayoría de las subcuencas glaciares funden a una tasa comparable con los datos observados. Aun así, se han identificado 3 subcuencas cuyas áreas glaciares desaparecen antes de tiempo (la altura glaciaria se hace cero mucho antes de lo esperado). Los otros 20 subcuencas tienen una altura glaciaria comparable con los datos observados para el final del periodo histórico.

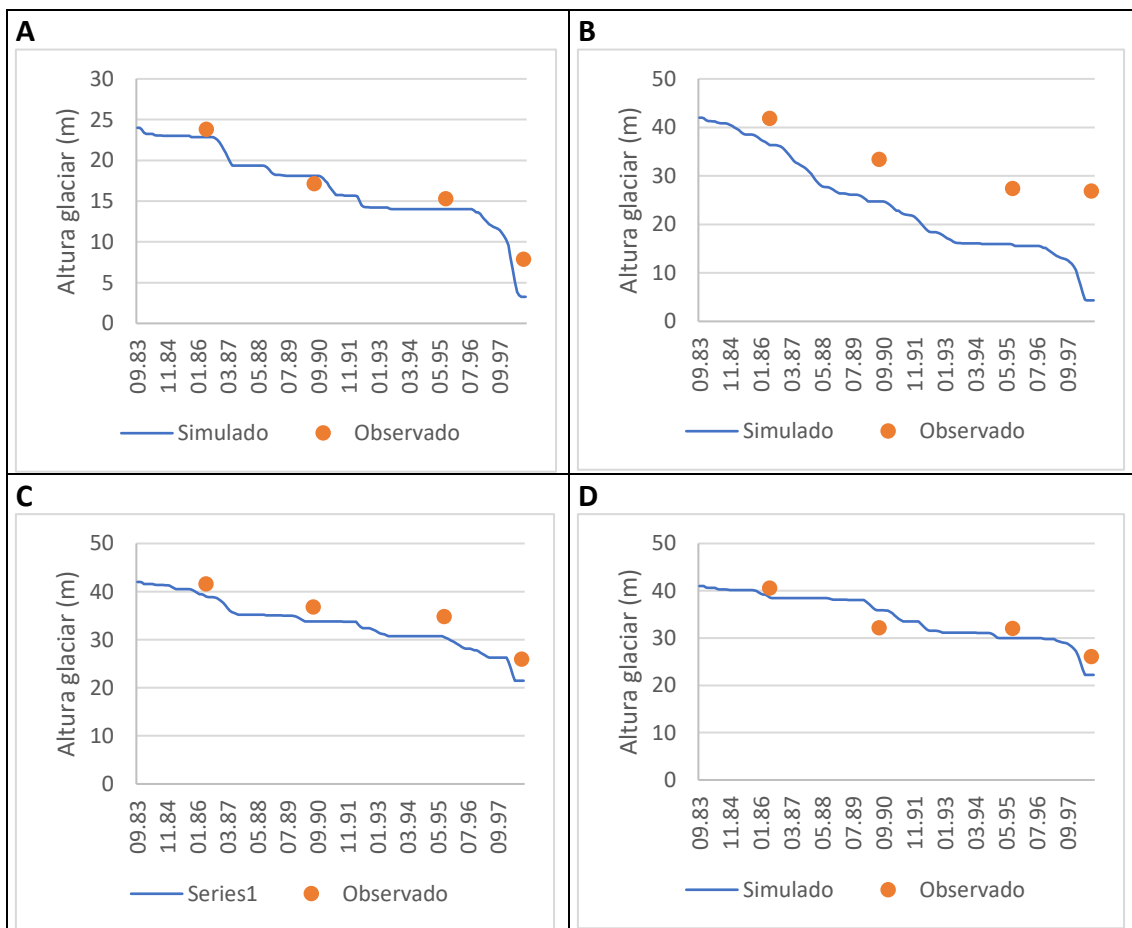


Figura 31. Altura glaciaria simulada y observada

En el aspecto no glaciario la calibración buscaba replicar el comportamiento de cada subcuenca según su cobertura del suelo. Ello se logró agrupando las subcuencas en cuatro zonas según la cobertura predominante B: roca, C: pastos, D: agrícola, E: humedal (ver 4.2 y 4.7.3).

Los parámetros finales de cada zona se observan en el Cuadro 27. Nótese que el parámetro de capacidad de campo (FC) no se muestra ya que éste se estimó para cada subcuenca según el tipo de cobertura del suelo y no fue calibrado. Los subcuencas de la zona B son los únicos que se encuentran a grandes altitudes donde la precipitación puede caer en forma de nieve. Por ello se calibraron también los parámetros de nieve. En las zonas C, D y E la ocurrencia de nieve es improbable, de manera que sus parámetros no se calibraron. Verificaciones posteriores comprobaron que la temperatura de estas subcuencas siempre está por encima del umbral de nieve (TT 1 °C). Los coeficientes de descarga (Kr, Ku, Kl, Kperc) que se identificaron como los más sensibles se calibraron manualmente hasta lograr la respuesta deseada en cada zona.

Cuadro 27. Parámetros calibrados del modelo HBV de las distintas zonas de Quillcayhuanca

| | Unidad | Zona B | Zona C | Zona D | Zona E |
|--------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| CFMax | mm/ °C/d | 11.3538111 | 10 | 10 | 10 |
| CFR | - | 0.1680173 | 0.05 | 0.05 | 0.05 |
| CWH | - | 0.0927392 | 0.1 | 0.1 | 0.1 |
| TT | °C | 2.1057481 | 1 | 1 | 1 |
| TTInt | °C | 1.0079062 | 1 | 1 | 1 |
| TTSM | °C | 0.0001767 | 0 | 0 | 0 |
| Beta | - | 2.7576852 | 1.137637 | 1.137637 | 1.137637 |
| PWP | - | 0.0344863 | 0.41508 | 0.41508 | 0.41508 |
| SUMax | m | 0.0523142 | 0.005 | 0.005 | 0.005 |
| Kr | 1/d | 0.0500539 | 0.4 | 0.5 | 0.4 |
| Ku | 1/d | 0.0256692 | 0.2 | 0.2 | 0.2 |
| Kl | 1/d | 0 | 0.001 | 0.005 | 0.001 |
| Kperc | 1/d | 0 | 0.2 | 0.2 | 0.39 |

Como muestra, en el Gráfico 24 se observan los caudales de 4 subcuencas no glaciares, uno de cada zona. Las áreas representan la proporción aportada al caudal total: en naranja por escorrentía superficial (Qr), en gris por escorrentía subsuperficial (Qu) y en amarillo el caudal base (Ql).

En la zona B de roca el caudal base no existe dado que la cubierta del suelo son derrubios y rocas, por ello todo el caudal circula como superficial (en los afloramientos líticos) y una parte como subsuperficial (en los derrubios). En promedio la escorrentía superficial y subsuperficial representan el 56.7 % y 43.3 % del caudal total respectivamente.

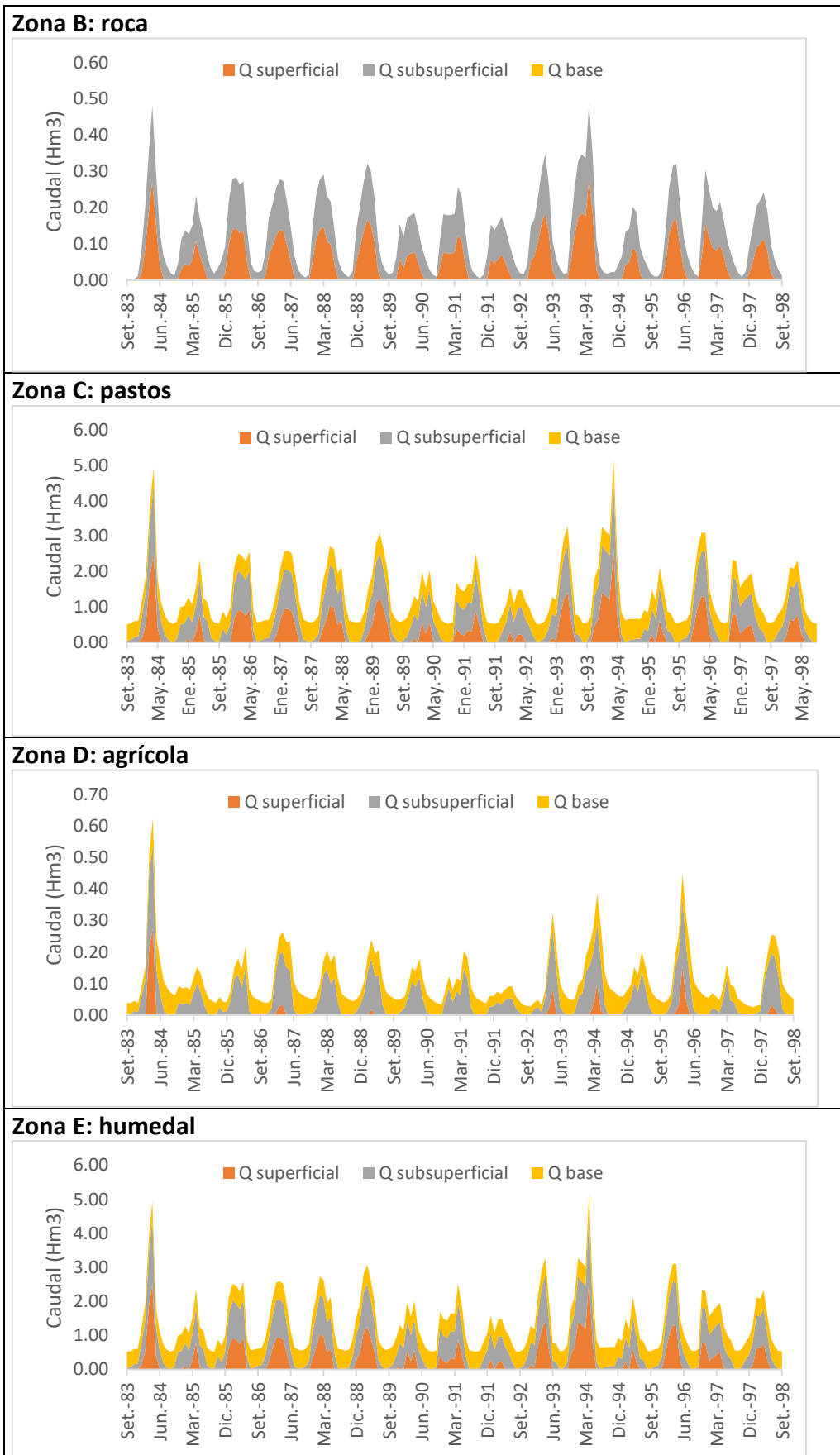


Gráfico 24. Caudales de las subcuencas en zonas no glaciares

En las zonas C, D y E la distribución de los aportes es variada. En la zona C de pastos con suelos medianamente superficiales pero mucha cobertura el caudal base y el caudal subsuperficial representan juntos en promedio el 76 % del caudal total (38.6 % subsuperficial y 37.4 % caudal base). En la zona D agrícola la labranza constante del suelo facilita la infiltración durante todo el año. Así el 92.1 % del agua va en forma subsuperficial (56.3 %) y como caudal base (35.8 %). En la zona E de humedal, el 85.9 % del agua fluye en forma subsuperficial (33.6 %) y como caudal base (52.4 %), representando la fuente de caudal base no glaciar más importante. La presencia de abundante materia orgánica facilita la retención del agua durante más tiempo en comparación con los suelos de la zona de pastos, por lo que la escorrentía superficial se supone debe ser menor que en dicha zona.

Debe tomarse en cuenta que los caudales del Gráfico 24 son referenciales y no comparables entre sí, ya que el caudal depende del área de cada subcuenca. Sin embargo la proporción de aportes sí es representativa de cada zona.

A partir de los resultados de calibración y validación, se puede afirmar que el modelo de Quillcayhuanca es aceptable. Además está en condiciones de simular el comportamiento hidrológico y pérdida de volumen glaciar frente a escenarios meteorológicos actuales y futuros.

5.3 SIMULACIÓN DEL PERIODO HISTÓRICO

A lo largo de los capítulos anteriores se ha dado cuenta de las grandes limitaciones en información que existen para el modelamiento de Quillcayhuanca. Esta situación no es única del sistema hidrológico de estudio, sino que se repite a lo largo de muchos territorios en Perú. A pesar de ello es de gran interés implementar modelos hidrológicos dado su utilidad como herramientas en la ayuda de la toma de decisiones. Sistemas como Quillcayhuanca, que forman parte de cuencas mayores como el Santa son importantes en la economía del país pues abastecen de agua a grandes proyectos hidroeléctricos, agroindustriales y centros urbanos.

La limitada disponibilidad de información fuerza a asumir hipótesis y plantea incertidumbres en los resultados de los modelos. En Quillcayhuanca estas limitaciones se han superado evaluando la aplicación de algunas metodologías. Aun así se debieron

plantear y asumir hipótesis como demandas constantes, comportamientos esperados en los caudales, evolución aproximada de los glaciares, entre otros que son grandes fuentes de incertidumbre.

Los resultados que se presentarán a continuación (simulación del periodo histórico y condiciones futuras) deben tomarse como tendencias generales. Además debe tenerse siempre en cuenta que son resultados de la aplicación de diversas metodologías. Y aunque durante todo el proceso se ha tratado de reducir los errores, estos siempre estarán presentes y además acompañados de incertidumbres.

Por este motivo se considera que uno de los grandes aportes del presente estudio es la evaluación de técnicas para completar la información faltante y dejar al descubierto (un secreto a voces) las deficiencias existentes en cuanto a la gestión de información.

En el presente apartado se discuten los resultados de la simulación del periodo histórico 1983 – 1998 con la información extendida, interpolada y estimada de apartados previos así como con la aplicación del modelo de Quillcayhuanca. La información meteorológica corresponde a la obtenida del modelo RCA4 ajustada a los datos observados.

5.3.1 Condiciones meteorológicas

En el Gráfico 25 se muestra la temperatura media en las estaciones Huaraz y Uruashraju a 3042 y 4693 m.s.n.m. respectivamente. Aplicando el test de regresión lineal se halló una tendencia positiva pero no significativa de 0.02 y 0.01 °C/año en Huaraz y Uruashraju respectivamente. Las temperaturas medias son de 14.8 y 2.5 °C, con máximas de 15.7 y 3.2 °C en los meses de abril, y mínimas de 13.6 y 1.5 °C en los meses de julio en cada estación. Durante la temporada de lluvias setiembre – mayo la temperatura promedio en Huaraz es de 14.9 °C y en Uruashraju de 2.7 °C. Durante la temporada de estío junio – agosto, las temperaturas medias son 14.6 °C en Huaraz y 2.4 °C en Uruashraju.

La Figura 32 muestra la interpolación de la temperatura media del periodo histórico. Esta se construyó utilizando el gradiente térmico promedio de -0.76 °C/100m y el modelo de elevación digital. La temperatura de -9 °C no se registra en Quillcayhuanca, sino que corresponde a la máxima altitud de glaciares vecinos.

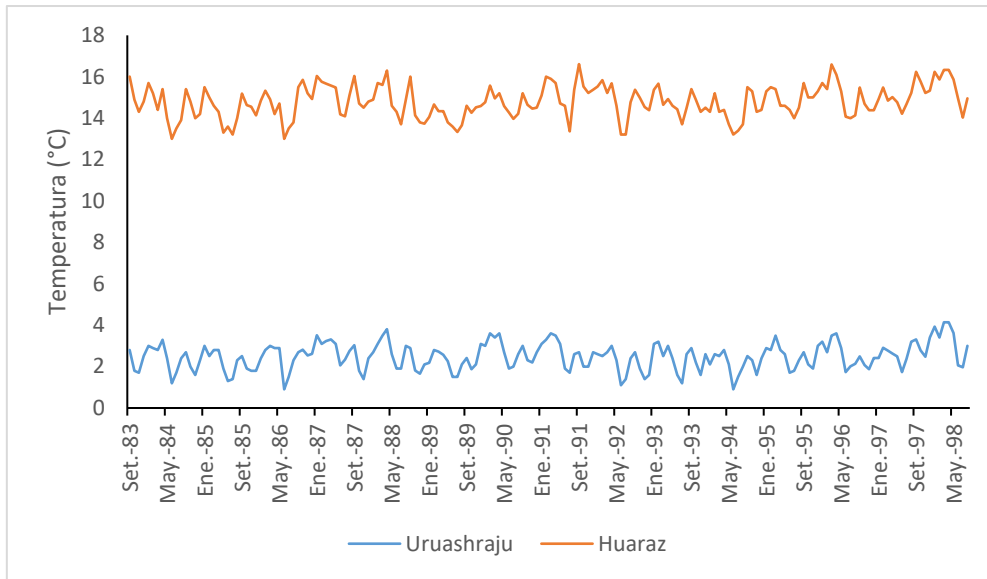


Gráfico 25. Temperatura mensual y tendencia en el periodo histórico

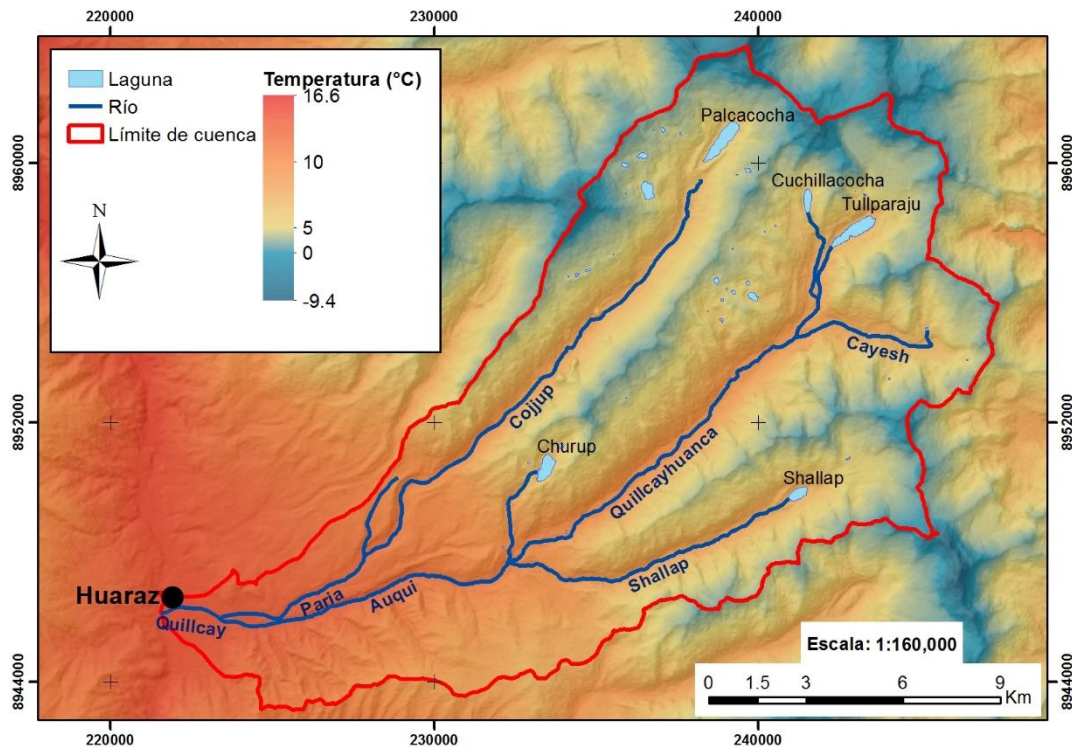


Figura 32. Mapa de temperatura promedio anual del periodo histórico

En el Gráfico 26 se muestra la precipitación mensual en las estaciones Huaraz y Uruashraju. Con el test de regresión lineal se halló una tendencia positiva pero no significativa en la estación Huaraz de 6.9 mm/año, y una tendencia negativa también no significativa de 10.7 mm/año en la estación Uruashraju. La precipitación acumulada promedio anual es de 649.9 y 1245 mm, con máximas de 127 y 216 mm durante el mes de febrero, y mínimas de 0.6 y 3.3 mm en el mes de julio. Estacionalmente, la precipitación total en la época húmeda setiembre - mayo es de 639.1 mm en Huaraz y

1192 mm en Uruashraju. Durante la época de estío junio – agosto la precipitación total es de 10.8 mm en Huaraz y de 52.6 mm en Uruashraju.

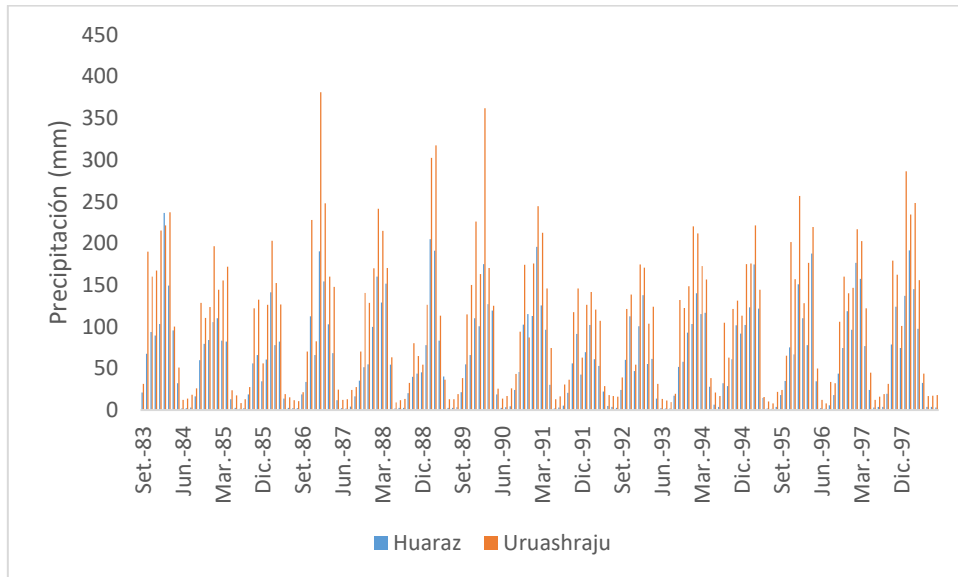


Gráfico 26. Precipitación mensual y tendencia en el periodo histórico

La Figura 33 muestra la interpolación de la precipitación total anual promedio en el periodo histórico. Esta se construyó con los datos de las 8 estaciones observadas alrededor de Quillcayhuanca y las 17 estaciones ficticias dentro de ella usando IDW. La máxima precipitación de 1410 mm corresponde a la zona de la estación Paccharuri al norte de Quillcayhuanca.

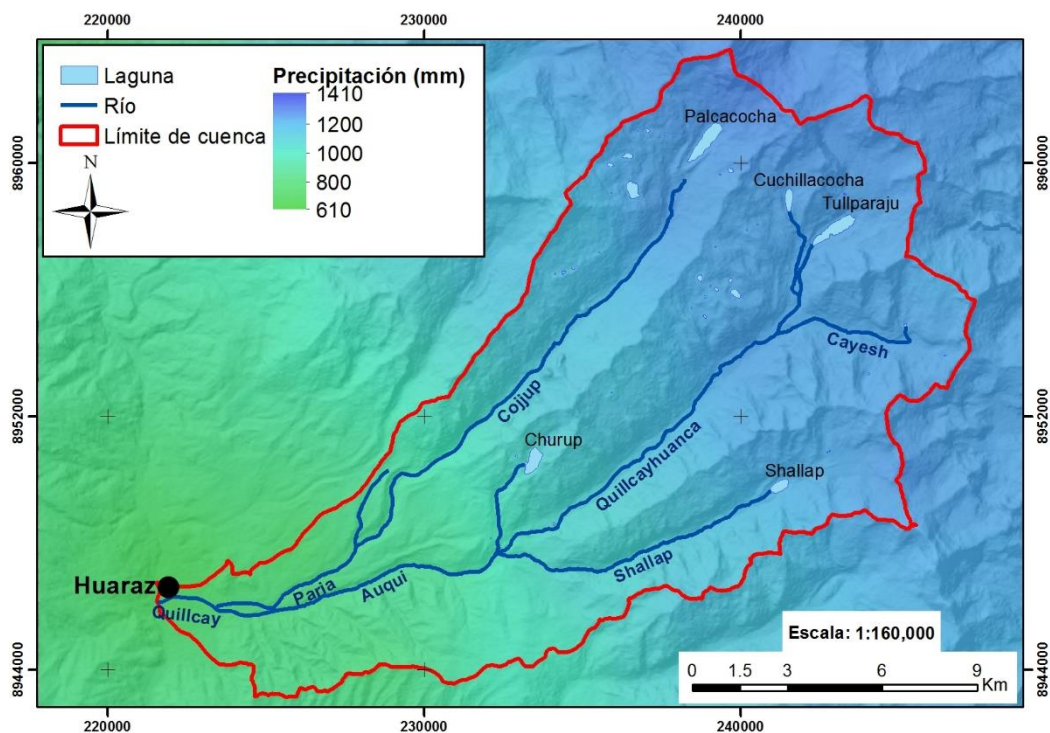


Figura 33. Mapa de precipitación total promedio del periodo histórico

5.3.2 Dinámica glaciar

Entre 1986 y 1998 el área glaciar de Quillcayhuanca se redujo de 47.2 km² a 37.4 km² que representa una pérdida del 20.9 % del área glaciar en 1986. En términos de volumen la pérdida fue de 1.71 km³ en 1986 hasta 1.34 km³ en 1998 que representa una pérdida del 21.6 % del volumen inicial. En el Gráfico 27 se muestran las áreas glaciares calculadas a partir de las imágenes satelitales entre 1986 y 2016. Los volúmenes corresponden a la suma de los volúmenes glaciares de cada subcuenca del modelo de Quillcayhuanca, los mismos que fueron calculados según su área glaciar con la formulación de Bahr calibrado. La tasa calculada de pérdida de área glaciar en el periodo histórico es del 1.9 % anual. En términos de volumen esta tasa es del 2% anual.

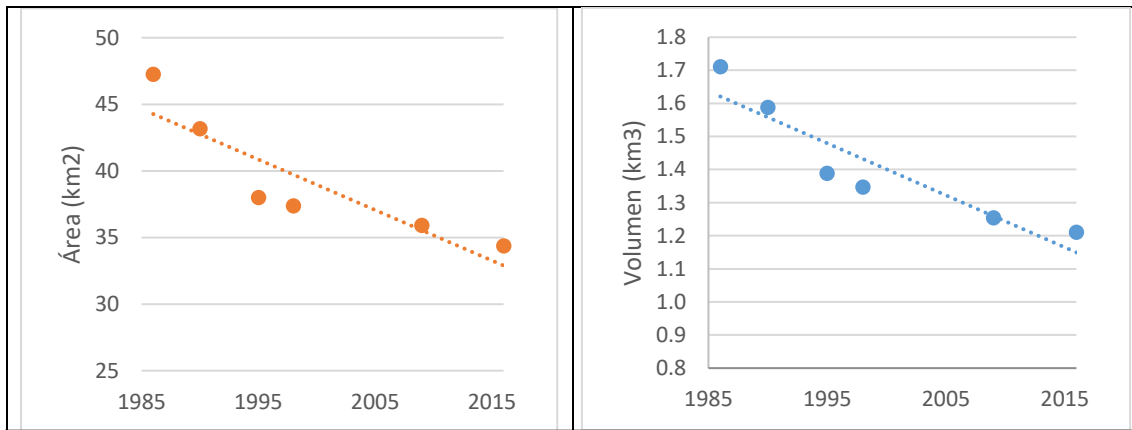


Gráfico 27. Áreas y volumen glaciar observado en el periodo 1986 – 2016

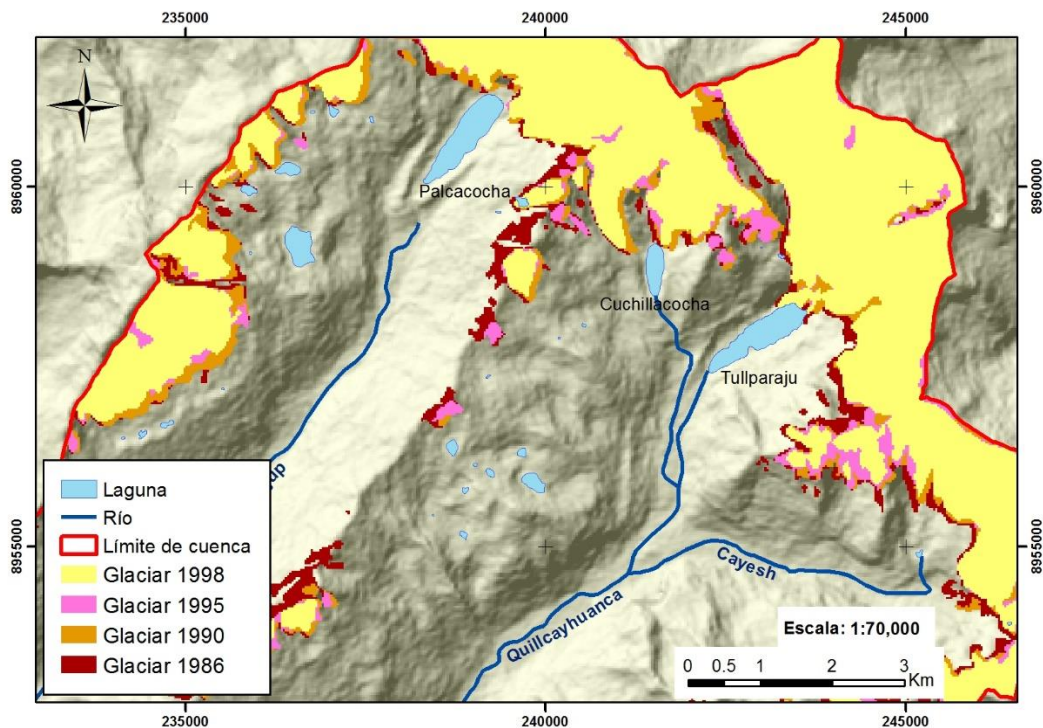


Figura 34. Mapa del retroceso glaciar en el periodo histórico

En la Figura 34 se muestra la evolución del área glaciar de Quillcayhuanca. Cada área de color representa el área glaciar en un determinado año obtenido a partir de imágenes satelitales. La máxima extensión corresponde al año 1986. Las zonas de mayor pérdida glaciar pertenecen a las cotas más bajas y a los casquetes glaciares más pequeños. Efectivamente estos pequeños casquetes poseen zonas de acumulación también pequeña de manera que los balances son siempre negativos y en gran magnitud. La fragmentación de los glaciares es otro problema que influye en el retroceso observado, pues secciona la conexión entre glaciares. Por ello los casquetes más grandes permanecen durante más tiempo.

Al año 2016 el área glaciar abarca 34.4 km², que representan una pérdida del 27.3 % del área glaciar en 1986. Una tendencia observada a lo largo de la Cordillera Blanca.

La evolución del volumen glaciar simulado con RS Minerve entre 1983 y 1998 se muestra en el Gráfico 28. A cada paso de tiempo se calculó el volumen glaciar usando la altura y área glaciar de cada subcuenca. Así el volumen simulado es la suma de volúmenes de cada subcuenca glaciar a cada paso de tiempo. Los volúmenes observados corresponden a los mostrados en el Gráfico 27. En esta comparación no se incluye el volumen observado de 1986 ya que este se usó como condición inicial del modelo. El volumen simulado varía desde 1.71 km³ en 1983 hasta 1.38 km³ en 1998, que representa una pérdida del 29.2 % del volumen respecto de 1983.

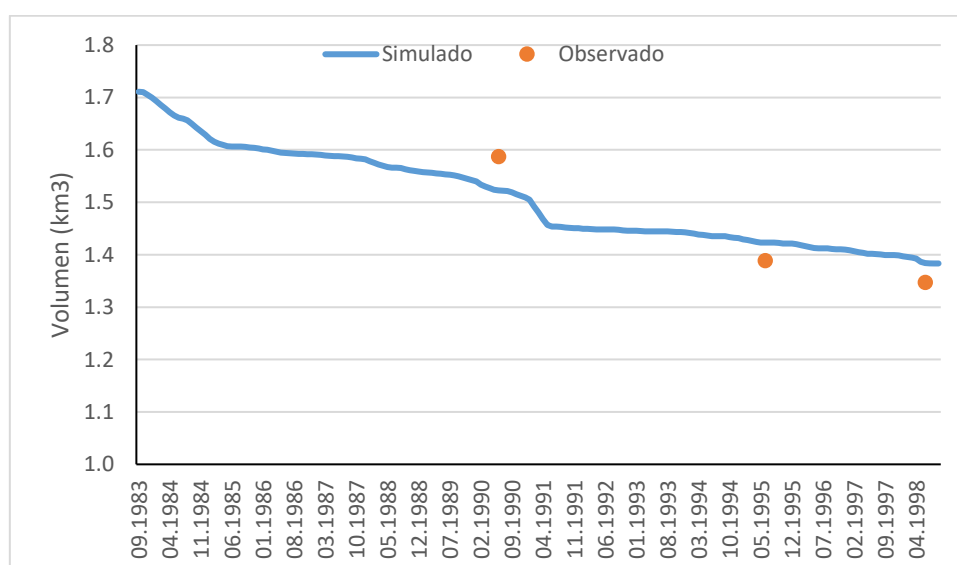


Gráfico 28. Evolución del volumen glaciar

Un aspecto observado durante la simulación glaciar es la ocurrencia de pequeños saltos en el volumen glaciar en determinados periodos. Esto se debe a que en dichos periodos se ha implementado el cambio de área en las subcuencas mixtas. Lo que se esperaría en dichos saltos son cambios más homogéneos. Una alternativa de solución sería incrementar en número de subcuencas mixtas haciendo que su rango altitudinal sea menor. Actualmente el modelo tiene un rango de 200 m, es decir si el cambio en la temperatura no sobrepasa ese rango, no habrá fusión en la subcuenca aguas arriba. Reducir el rango glaciar a 100 m implicaría duplicar el número de subcuenca mixtas. Debido a lo poco práctico de esta solución y a que los saltos son puntuales y no parecen interferir en el resultado a largo plazo, se decidió continuar usando el rango de 200 m.

En este aspecto, el modelo semidistribuido cumple la función para la que está diseñado: estimar el aporte glaciar. Con algunos artificios, como el uso de las subcuencas mixtas, se pueden obtener algunos detalles más aunque con limitaciones. Si se requieren detalles más específicos de los glaciares es necesario el uso de modelos diseñados para ello. En esos casos los aportes calculados con los modelos glaciares se podrían incluir directamente en RS Minerve como una fuente.

5.3.3 Caudales

El Gráfico 29 muestra los caudales del año medio del periodo histórico en Quillcayhuanca. Representa la oferta hídrica total en el punto de aforo Quillcay. Cada área de color muestra el caudal aportado por los glaciares (Q_{glaciar}), escorrentía directa no glaciar ($Q_{\text{superficial}}$), escorrentía subsuperficial ($Q_{\text{subsuperficial}}$) y caudal base (Q_{base}). Se observa claramente el patrón esperado: máximas descargas durante el periodo de lluvias. Aunque los glaciares aportan durante todo el año (debido a la ablación constante), su aporte máximo ocurre durante el periodo de máximas precipitaciones. La escorrentía superficial depende netamente de ocurrencia de lluvias junto con la subsuperficial (aunque esta última se alarga durante todo el año en diferente magnitud). El caudal base tiene un comportamiento bastante constante a lo largo del año. La aportación total anual es de 220.5 Hm^3 .

Este comportamiento es resultado de la forma cómo se implementó la calibración y del uso de valores estimados (no calibrados) en los parámetros de capacidad de campo. El componente subsuperficial es bastante importante ya que las coberturas

predominantes en Quillcayhuanca son los pastos, a los que se suman matorrales y humedales. Debe recordarse que los modelos empleados no están diseñados específicamente para evaluar la influencia de la cobertura del suelo. Sin embargo con esta aproximación se puede tener una idea de su importancia. Estudios futuros podrían realizar observaciones en terreno y con ello mejorar los parámetros de descarga del HBV y con ello evaluar los impactos del cambio de cobertura en el régimen hidrológico.

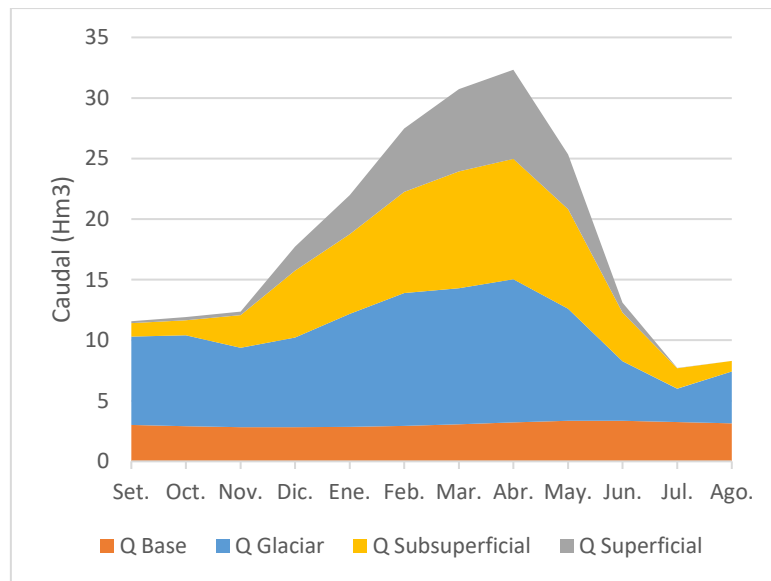


Gráfico 29. Caudales del año medio en el periodo histórico en Quillcayhuanca

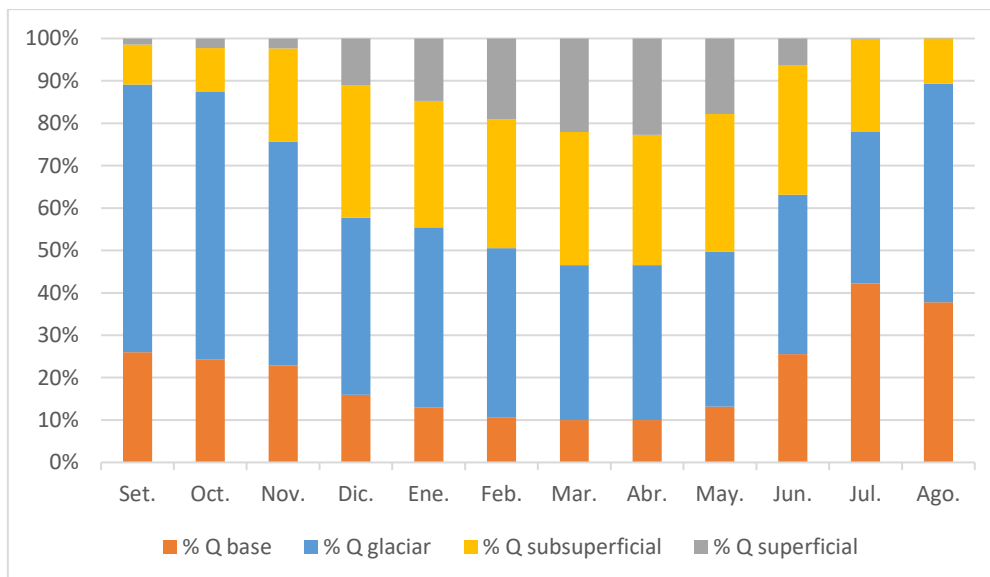


Gráfico 30. Porcentajes de aportación en el año medio del periodo histórico

En el Gráfico 30 se muestra en términos porcentuales los diferentes aportes al caudal total durante el año medio en el periodo histórico. En promedio el caudal glaciar

representa el 44.8 % del caudal total (93.3 Hm³), mientras que el caudal base representa en promedio el 21 % (36.72 Hm³). La escorrentía superficial y subsuperficial son el 10 % (30.64 Hm³) y 24.1 % (59.85 Hm³) respectivamente. Estos resultados coinciden con otros de estudios previos (T. Condom et al. 2011) en los que se demuestra la gran importancia que tiene el aporte glaciar en la cantidad de agua disponible.

El periodo entre agosto y noviembre, justo antes la ocurrencia del inicio de las precipitaciones, es en el que el aporte glaciar representa más de la mitad del agua disponible. Durante los meses de julio y agosto (periodo sin precipitaciones) el caudal base constituye alrededor del 40 % del agua disponible, mientras que el aporte glaciar en promedio representa el 43 %.

El Gráfico 31 muestra la distribución porcentual de las aportaciones durante los periodos seco (junio - agosto) y húmedo (setiembre - mayo). Obsérvese que el aporte glaciar durante la época seca representa más del 41.1 % del agua disponible, superior al caudal base de 33.5%.

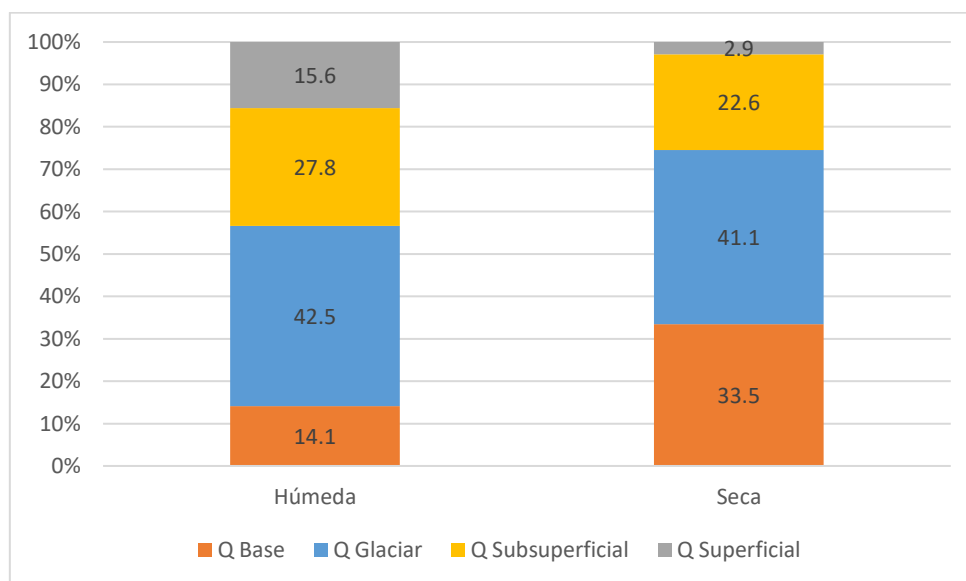


Gráfico 31. Porcentajes de aportaciones de caudales estacionales en el año medio

En el Gráfico 32 se muestran las diferentes aportaciones en términos de caudal anual. Exceptuando el caudal base que tiene un comportamiento muy homogéneo a lo largo de todo el periodo de estudio, los otros elementos se ven influidos por la variación de las condiciones meteorológicas. Las proporciones y su variación entre las diferentes aportaciones a lo largo del periodo histórico se observa en el Gráfico 33. En promedio

entre 1983 y 1998 el caudal base ha representado el 17.2 % del agua disponible. Las aportaciones provenientes de los glaciares, escorrentía superficial y subsuperficial constituyeron el 40.7, 14.1 y 27.9 % del agua disponible. No se halló tendencia significativa en los caudales.

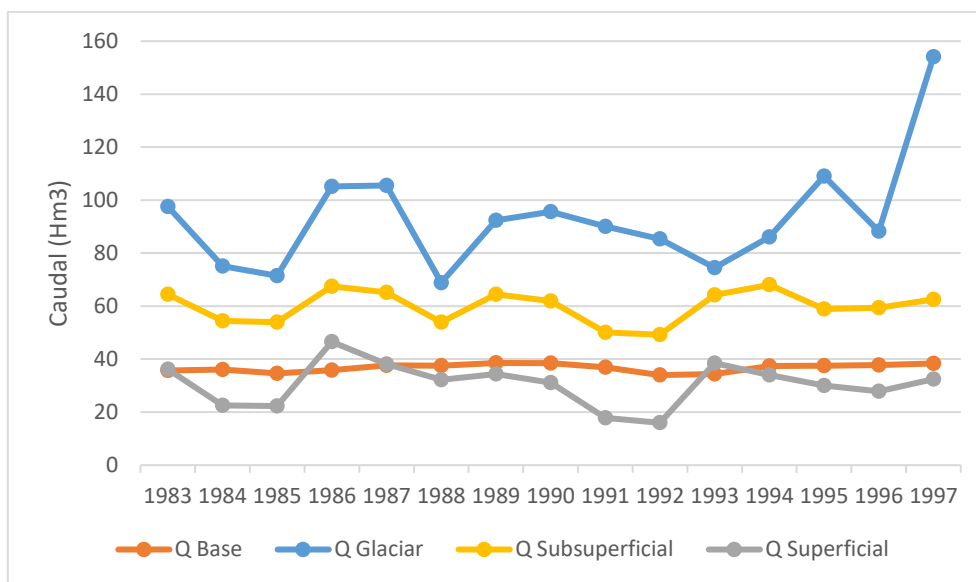


Gráfico 32. Aportaciones anuales de Quillcayhuanca durante el periodo histórico

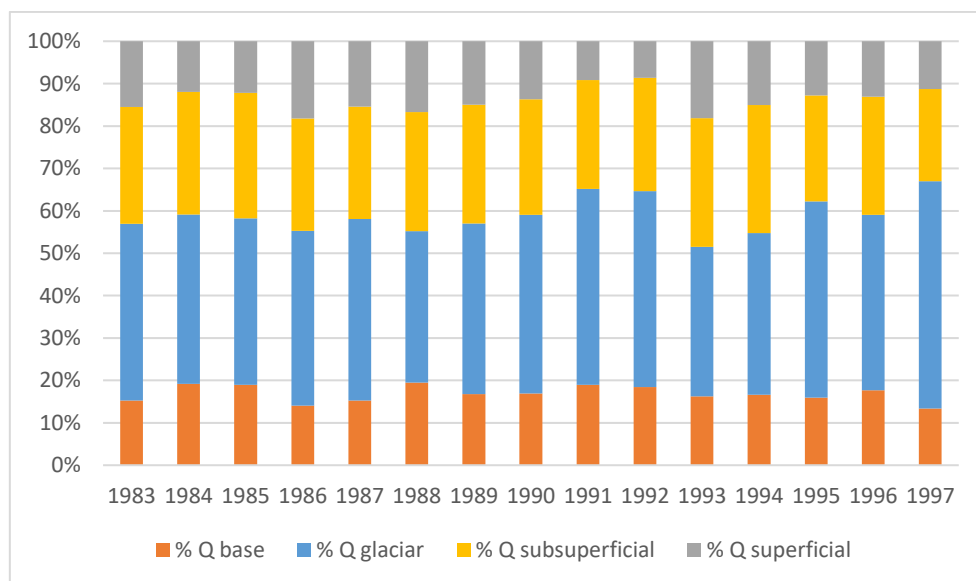


Gráfico 33. Porcentajes de aportación anual de Quillcayhuanca en el periodo histórico

Una relación importante se confirma del gráfico anterior: en los años de menor precipitación, el aporte glaciar incrementa su importancia en la cantidad total de agua disponible. Obsérvese los años 1991 y 1992 (cuyos registros de precipitación anual son los mínimos en el periodo de histórico), el aporte glaciar representa el 46 % del caudal

disponible. Esta relación no es inversa, es decir a mayor precipitación no hay menor aporte glaciar, ya que éste depende además de las condiciones de temperatura. Es más el incremento de la precipitación favorece la fusión glaciar¹⁷.

En el Gráfico 34 se muestran los caudales mensuales circulantes en los ríos Paria, Auqui y Quillcay considerando las demandas. El caudal total del río Paria es de 39.7 Hm³, en el río Auqui de 164.5 Hm³ y en el río Quillcay de 204.62 Hm³ al año. En términos porcentuales el aporte del río Paria representan el 19.4 %, mientras que el río Auqui el 80.6 % del caudal en el río Quillcay.

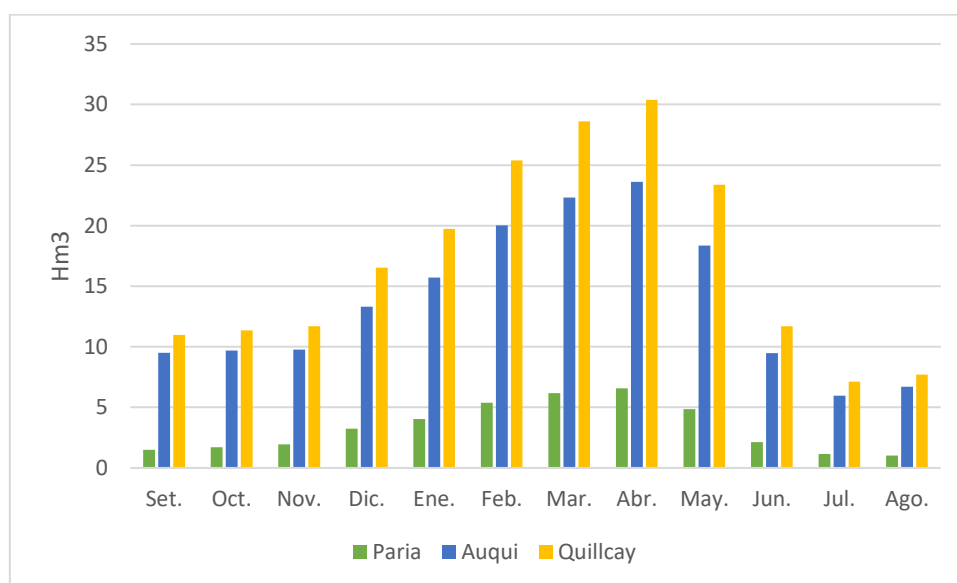


Gráfico 34. Caudales mensuales de los ríos Paria, Auqui y Quillcay en el periodo histórico

A partir de los resultados obtenidos se confirma que Quillcayhuanca es un sistema de régimen glaciar, muy a pesar de su relativamente pequeña cobertura glaciar (en comparación con otros sistemas vecinos en los que el área glaciar puede llegar al 40% del territorio). Este factor califica a Quillcayhuanca como un sistema con alta vulnerabilidad frente a los cambios de su régimen glaciar. Una afirmación más generalizada es que los glaciares representan en sí un arma de doble filo: por un lado son almacenes de agua que han brindado abundancia a sus pobladores, pero por otro, y una vez terminado este almacén de agua, el sistema pierde un importante aporte. Es imprescindible la implementación de acciones y políticas para reducir esta vulnerabilidad.

¹⁷ Este factor se representa en el modelo GSM a través del parámetro Bp (ver 4.1)

5.3.4 Garantías de las demandas

En los siguientes párrafos se comentan los resultados de la evaluación de garantías en el periodo histórico. Se recuerda que no se trata de una evaluación sobre la gestión realizada, sino de tener una referencia del comportamiento durante el periodo histórico.

Según la legislación peruana los criterios de garantía deben establecerse en el marco de los planes de gestión de cuenca. El sistema Quillcayhuanca es parte de la cuenca del río Santa, pero ésta aún no posee un plan. En estos casos la legislación ha establecido unos criterios generales:

- Las demandas poblacionales se consideraran satisfechas si: el máximo déficit en un año está entre el 5 – 10 % de la demanda, si la máxima demanda de dos años consecutivos está entre el 10 – 15 % de la demanda y, si la máxima demanda de 10 años consecutivos está entre el 15 y 30 % de la demanda.
- Las demandas agrícolas se considerarán satisfechas si: el máximo déficit de un año está entre el 20 -40 % de la demanda, si el máximo déficit de dos años consecutivos está entre el 30 – 60 % de la demanda y, si el máximo déficit de 10 años consecutivos está entre el 40 – 80 % de la demanda.

Cuadro 28. Garantías y déficit característico de las demandas en el periodo histórico

| Demanda | Ga % | Gm % | Def. 1 año | Def. 2 años | Def. 10 años |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Cojup | 93.3 | 98.9 | 0 | 0 | 0 |
| Nueva Florida | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Churup | 33.3 | 88.4 | 10 | 14 | 21 |
| Pitec | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Paquishca | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Auqui | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Shallap | 40 | 88.4 | 3 | 7 | 18 |
| Usuario 1 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Usuario 2 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Usuario 3 | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Ministerio Producción | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Nueva Florida | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Los Olivos | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Urbana Paria | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Urbana Auqui | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |

Ga: garantía anual. Gm: garantía mensual. Def 1 año, 2 años, 10 años: déficit máximo en 1, 2 y 10 años. Ref: rango de referencia de la legislación peruana

En el Cuadro 28 se muestran las garantías y déficit máximo calculados en el periodo histórico de todas las demandas. Como se observa, los criterios de garantía se cumplen en todos los casos. En el caso de la demanda acuícola, la legislación peruana no establece un criterio de garantías, pero se observa que las demandas se abastecen sin problemas.

Se recuerda que ésta es una evaluación con el propósito de contar con un valor referencial frente a las estimaciones del cambio climático. Estos resultados se han obtenido asumiendo que las demandas asignadas en el 2008 por Quesquén son válidas para el periodo histórico. Asimismo, que las demandas urbanas son una función directa de la población. Estos resultados pueden diferir de los reales y de las perspectivas de los usuarios. Por lo tanto no tiene el objetivo de juzgar la gestión realizada.

5.4 CONDICIONES METEOROLÓGICAS 2021 – 2050

Los dos escenarios evaluados RCP 2.6 y 8.5 traen consigo cambios en las condiciones meteorológicas. En general la temperatura incrementará en toda la zona de estudio y en ambos escenarios diferenciándose sólo en la intensidad. En cuanto a la precipitación, su comportamiento esperado es variado tanto entre escenarios, intensidad e incluso distribución espacial.

5.4.1 Cambios en la temperatura mensual

Como era de esperarse en el escenario RCP 8.5 se observa un incremento constante de la temperatura, con una tendencia significativa. Algo que no se esperaba era el incremento de la temperatura en el escenario RCP 2.6, también con tendencia significativa. En este último escenario el incremento es menor pero sigue siendo constante.

En el Gráfico 35 se muestra la serie de temperatura para la estación Huaraz (3042 m.s.n.m.) tanto en el escenario RCP 2.6 como en el RCP 8.5. De igual forma se han graficado las tendencias para cada escenario. En el Gráfico 36 se muestran las anomalías de ambos escenarios tomando como referencia el promedio mensual multianual del periodo histórico.

Los resultados muestran que para el final del periodo de estudio 2050 la temperatura en la estación Huaraz habrá incrementado en 1 °C con el escenario RCP 2.6 y 1.5 °C con

el escenario RCP 8.5. En términos porcentuales la temperatura habrá incrementando un 6.8 % (RCP 2.6) y 10.4 % (RCP 8.5) respecto de la temperatura media entre 1983 y 1998.

Se espera que la temperatura media de Huaraz se incremente de 14.9 °C en el periodo histórico a 15.9 °C en el RCP 2.6 y a 16.4 °C en el RCP 8.5. Las temperaturas máximas pasarán de 15.7 °C en el histórico a 16.5 °C en el RCP 2.6 y a 17.1 °C en el RCP 8.5. Las mínimas también presentarán un incremento de 14.1 °C en el histórico a 14.3 °C en el RCP 2.6 y a 14.6 °C en el RCP 8.5. Estos incrementos no vienen acompañados de un cambio en la estacionalidad, las máximas y mínimas temperaturas se seguirán registrando en los meses de abril y junio respectivamente.

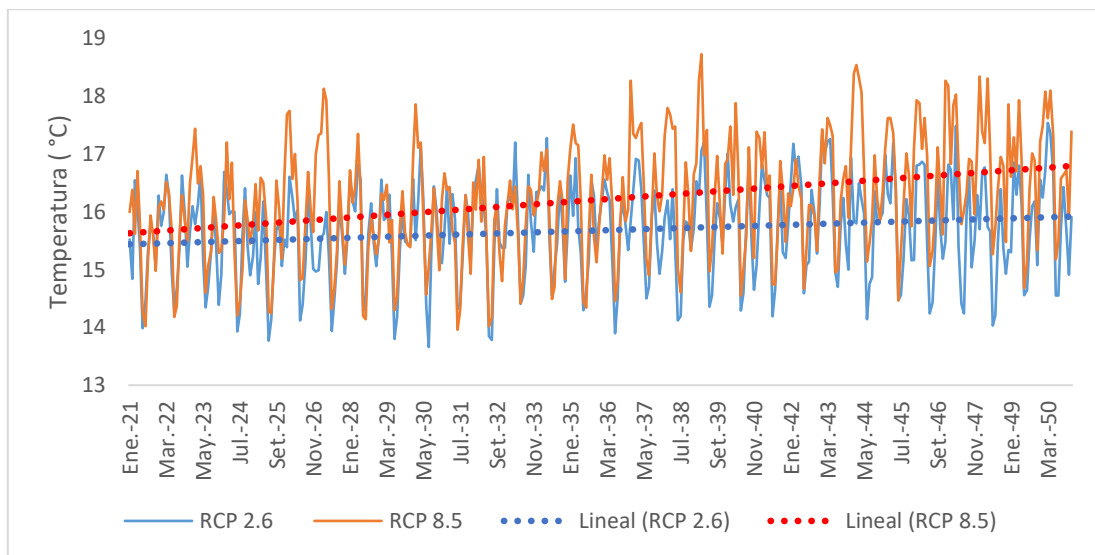


Gráfico 35. Serie de temperatura media de la estación Huaraz en el periodo 2021 – 2050

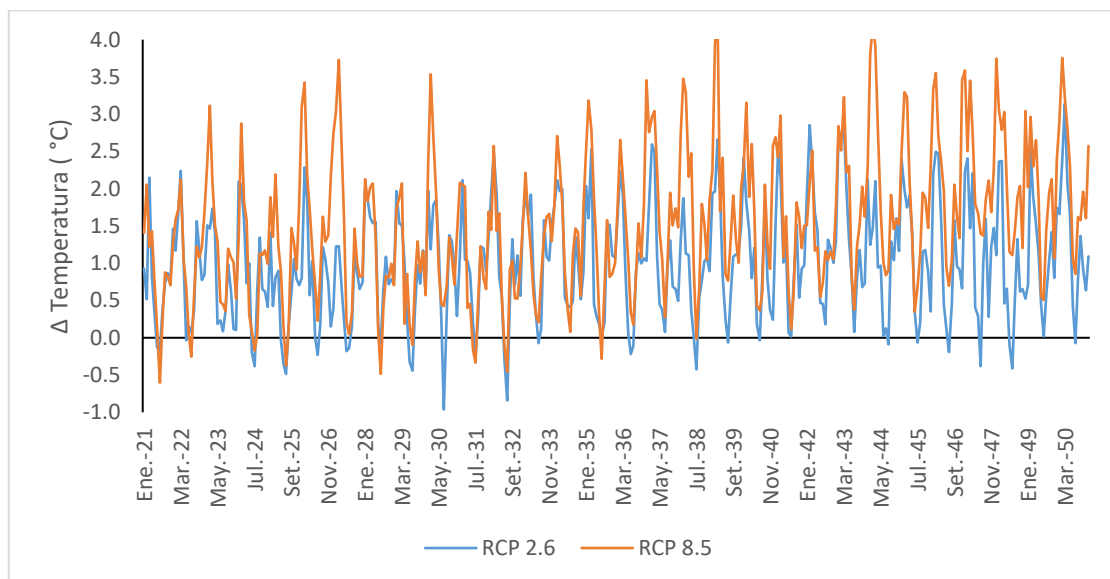


Gráfico 36. Anomalía de la temperatura media en la estación Huaraz

En la estación Uruashraju ubicado a 4693 m.s.n.m., la tendencia del comportamiento de la temperatura es semejante a Huaraz. En el Gráfico 37 se muestran las series de temperatura media bajo los dos escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5. Las tendencias siguen siendo de incremento significativos estadísticamente. El Gráfico 38 muestra las anomalías bajo los dos escenarios de estudio respecto de la temperatura media multianual del periodo histórico.

Para finales del periodo de estudio 2050, la temperatura en Uruashraju se habrá incrementado en 0.7 °C y 1.1 °C en los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente. Aunque menores a lo observado en Huaraz, los cambios de temperatura en Uruashraju representan un incremento 28.8 % (RCP 2.6) y 44.6 % (RCP 8.5) respecto de la temperatura observada en el periodo histórico.

La temperatura media habrá pasado de 2.5 °C en el periodo histórico a 3.2 °C en el RCP 2.6 y a 3.6 °C en el RCP 8.5. Las temperaturas máximas pasarán de 3.2 °C en el histórico a 3.9 °C en el RCP 2.6 y a 4.3 °C en el RCP 8.5. El incremento de la temperatura mínima pasará de 1.5 °C en el histórico a 2.2 °C en el RCP 2.6 y a 2.5 °C en el RCP 8.5. Al igual que en la estación Huaraz, no se observa un cambio en la estacionalidad, las máximas seguirán ocurriendo el abril y las mínimas en junio.

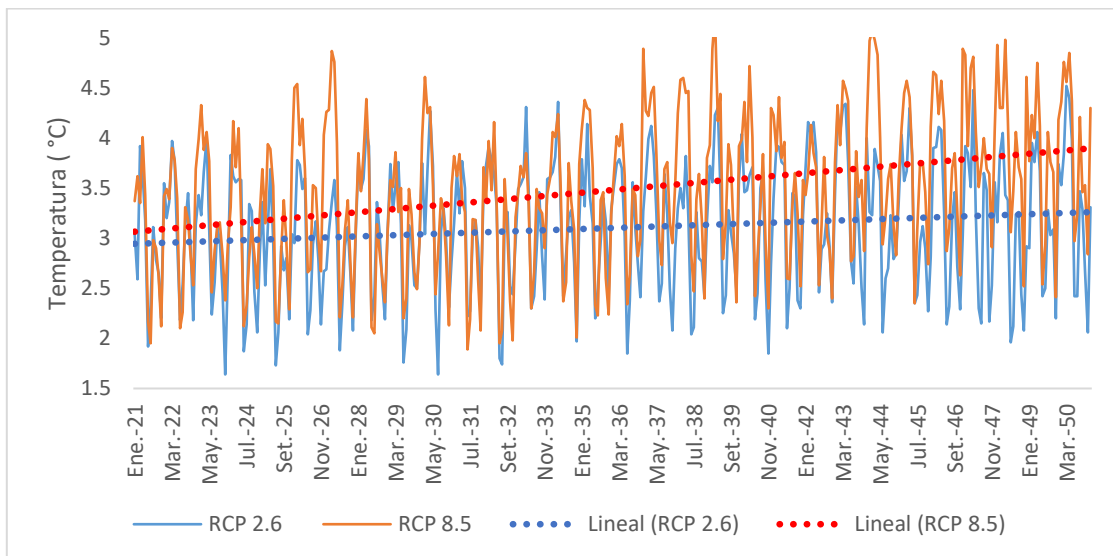


Gráfico 37. Temperatura media de la estación Uruashraju en el periodo 2021 – 2050

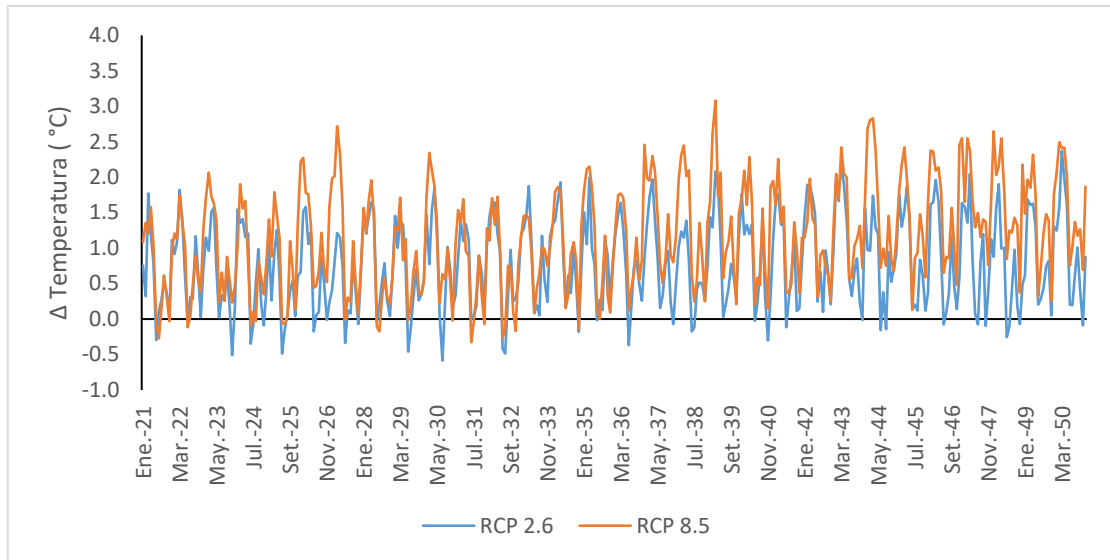


Gráfico 38. Anomalía de la temperatura media en la estación Uruashraju

En el Gráfico 39 se muestran las anomalías de temperatura para Huaraz y Uruashraju según los escenarios de cambio climático para el año medio. El trimestre de mayor incremento de temperatura es durante el verano austral (diciembre – febrero). En este periodo bajo el escenario RCP 2.6 la temperatura incrementará en promedio 1.5 °C y 1.1 °C en las estaciones Huaraz y Uruashraju respectivamente. En el escenario RCP 8.5 los incrementos promedio serán mayores, 2.3 °C para Huaraz y 1.6 °C para Uruashraju. El periodo de menor cambio corresponde al periodo de invierno entre mayo y agosto. En Huaraz los incrementos serán 0.2 °C y 0.5 °C en cada escenario. Mientras tanto en Uruashraju los incrementos previstos serán de 0.1 °C y 0.4 °C para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente.

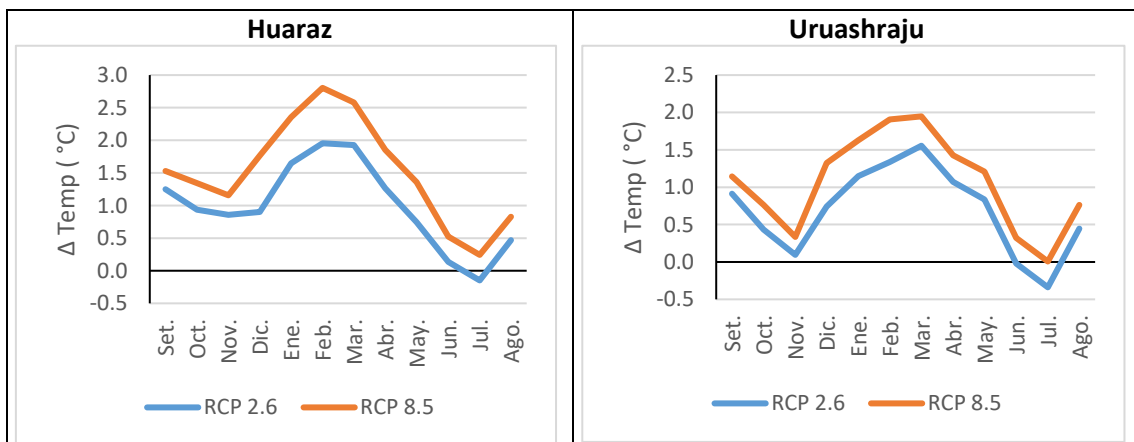


Gráfico 39. Anomalía de la temperatura mensual

Cuadro 29. Gradientes altitudinales (°C/100m)

| | Set. | Oct. | Nov. | Dic. | Ene. | Feb. | Mar. | Abr. | May. | Jun. | Jul. | Ago. | Prom |
|----------------|-------|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|
| RPC 2.6 | -0.8 | -0.8 | -0.79 | -0.77 | -0.78 | -0.78 | -0.77 | -0.78 | -0.76 | -0.74 | -0.74 | -0.75 | -0.77 |
| RCP 8.5 | -0.81 | -0.8 | -0.79 | -0.79 | -0.79 | -0.8 | -0.79 | -0.79 | -0.77 | -0.74 | -0.75 | -0.75 | -0.78 |

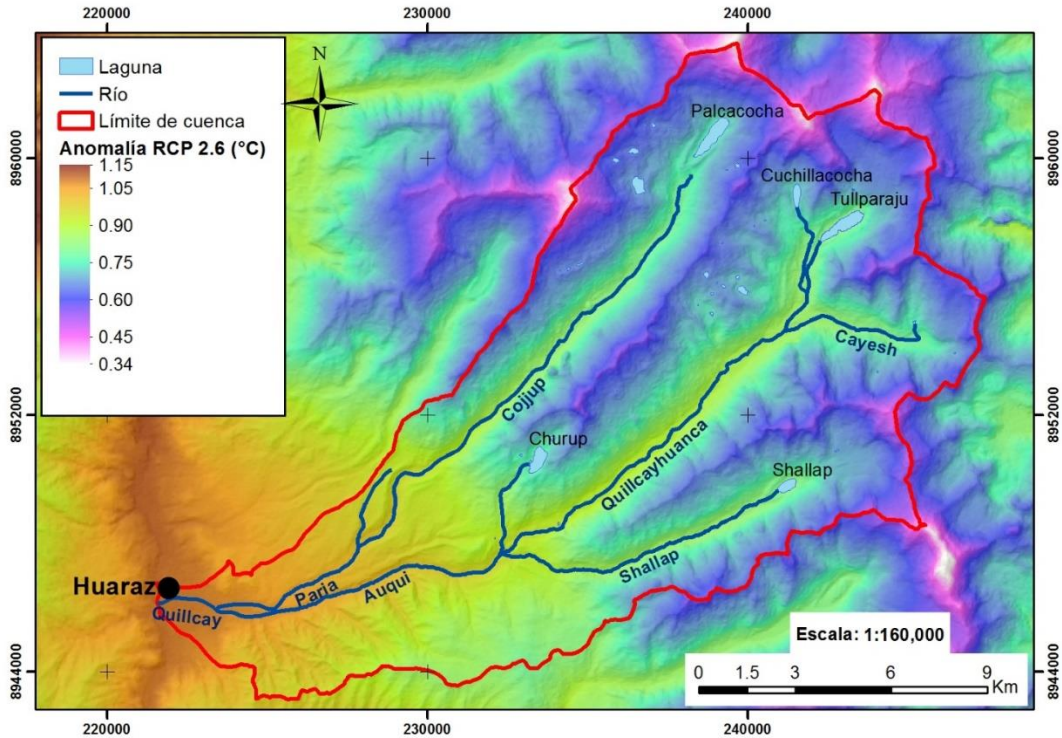


Figura 35. Mapa de la anomalía de la temperatura promedio anual en el escenario RCP 2.6

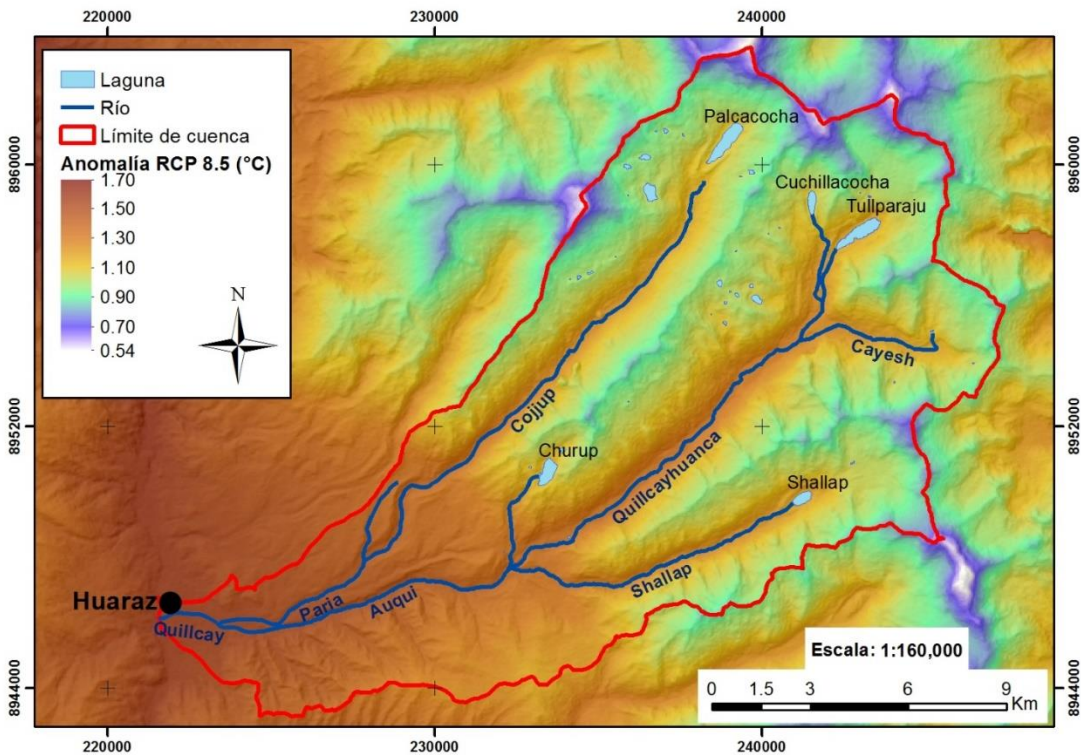


Figura 36. Mapa de la anomalía de la temperatura promedio anual en el escenario RCP 8.5

La Figura 35 y Figura 36 muestran los mapas de anomalías en la temperatura media promedio multianual para los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente. Para ello se calcularon los gradientes altitudinales de temperatura en cada escenario. Durante el periodo histórico el gradiente calculado era $-0.76\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{m}$. En el escenario RCP 2.6 el gradiente cambia a $-0.77\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$, mientras que para el escenario RCP 8.5 el gradiente cambia a $-0.78\text{ }^{\circ}\text{C}/100\text{ m}$. Los gradientes mensuales calculados para los escenarios se muestran en el Cuadro 29.

5.4.2 Cambios en la precipitación

A diferencia de la temperatura, la precipitación no muestra patrones homogéneos de cambio. Los motivos principales serían la influencia de las condiciones orográficas, la propia aleatoriedad de la precipitación, y al complejo sistema climático del que depende.

En el Gráfico 40 se muestra la serie de precipitación mensual en la estación Huaraz. Con el análisis de tendencias por el método de regresión lineal se halló una tendencia significativa creciente en el escenario RCP 2.6. De esta forma la precipitación acumulada promedio multianual anual pasará de 649 mm en el periodo histórico a 665 mm entre el 2021 y el 2050. Este cambio implica un incremento del 2.3 % respecto del periodo histórico. En el escenario 8.5 no se halló ninguna tendencia significativa, sin embargo los resultados muestran que la precipitación acumulada promedio multianual pasará de 649 mm a 728 mm. Las anomalías precipitación mensual se muestran en el Gráfico 41.

Respecto del año medio, se espera un incremento de la precipitación máxima de 127 mm en el periodo histórico a 132 mm en el RCP 2.6 y 152.4 mm en el RCP 8.5. Las precipitaciones mínimas cambiarán de 0.6 mm en el histórico a 2.6 mm en el RCP 2.6 y 2.8 mm en el RCP 8.5. Estacionalmente, el periodo húmedo cambiará de 639 mm a 656 mm (+2.7 %) en el RCP 2.6 y a 718 mm (+12%) en el RCP 8.5. En la época de estío se espera un cambio de 10.8 mm en el histórico a 9.2 mm (-14.8 %) en el RCP 2.6 y a 9.3 mm (13.8 %) en el RCP 8.5. No se observan cambios en la estacionalidad.

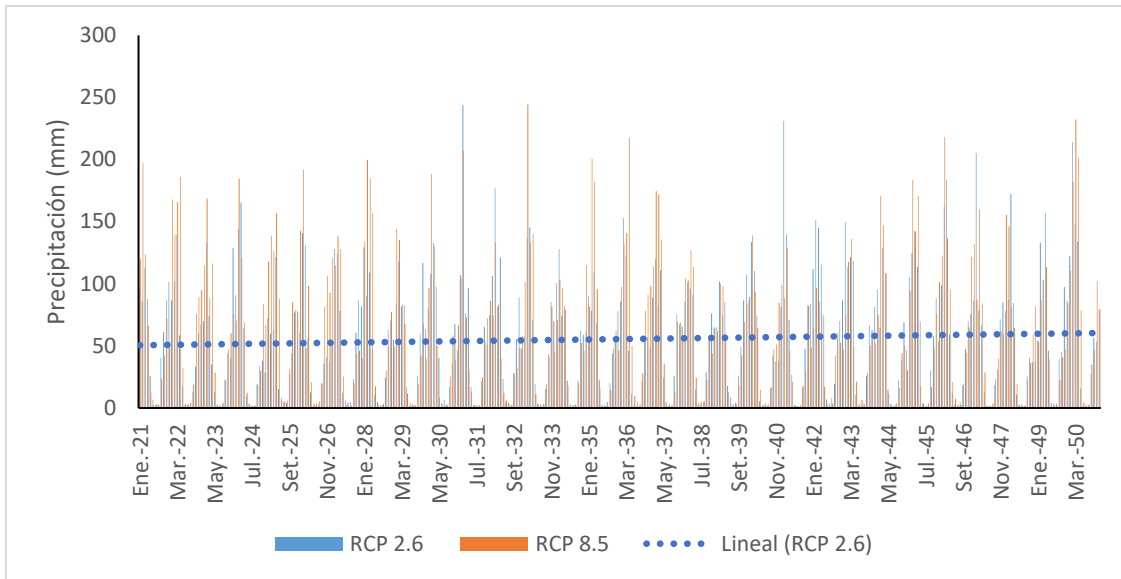


Gráfico 40. Precipitación de la estación Huaraz en el periodo 2021 – 2050

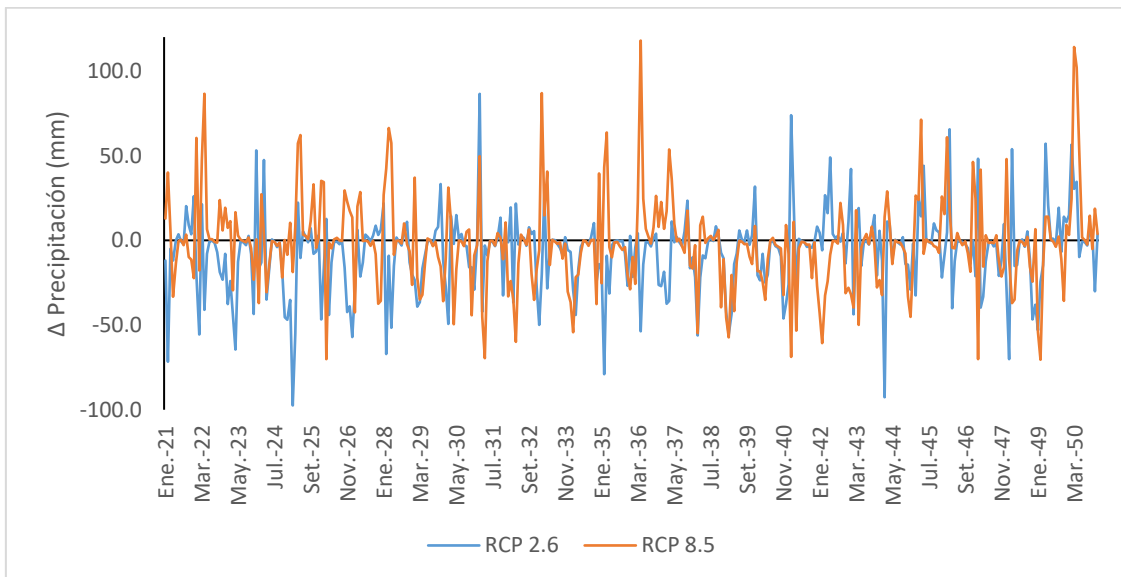


Gráfico 41. Anomalía de la precipitación mensual en la estación Huaraz

En el Gráfico 42 se muestra la serie de precipitación mensual de la estación Uruashraju en los dos escenarios RCP 2.6 y 8.5. En análisis de tendencias no muestra tendencias significativas en ningún caso. Las anomalías se observan en el Gráfico 43. Aun así se espera un cambio en la precipitación acumulada anual que pasará de 1245 mm en el periodo histórico a 1163 mm (-6.6 %) en el RCP 2.6 y a 1252 mm (+0.65) en el RCP 8.5.

Las precipitaciones máximas cambiarán de 216 mm en el periodo histórico a 194 mm (-10.2 %) en el RCP 2.6 y a 222.8 mm (+3.2 %) en el RCP 8.5. Las precipitaciones mínimas cambiarán de 10.8 mm en el histórico a 13.4 mm (+24 %) en el RCP 2.6 y a 13.9 mm (+28.7 %) en el RCP 8.5. Tampoco se observan cambios en la estacionalidad.

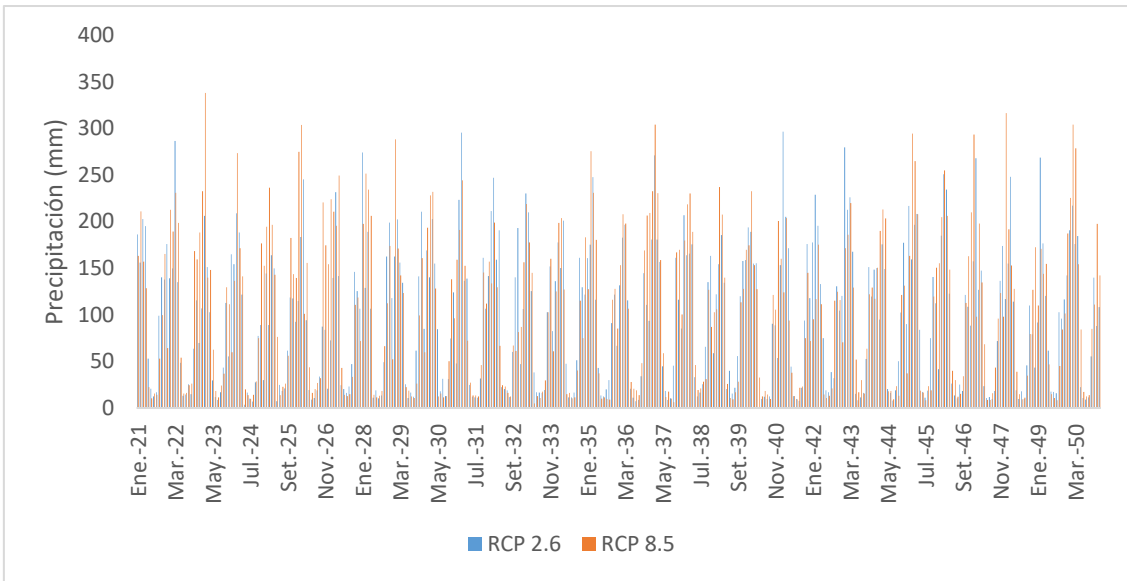


Gráfico 42. Precipitación de la estación Uruashraju en el periodo 2021 – 2050

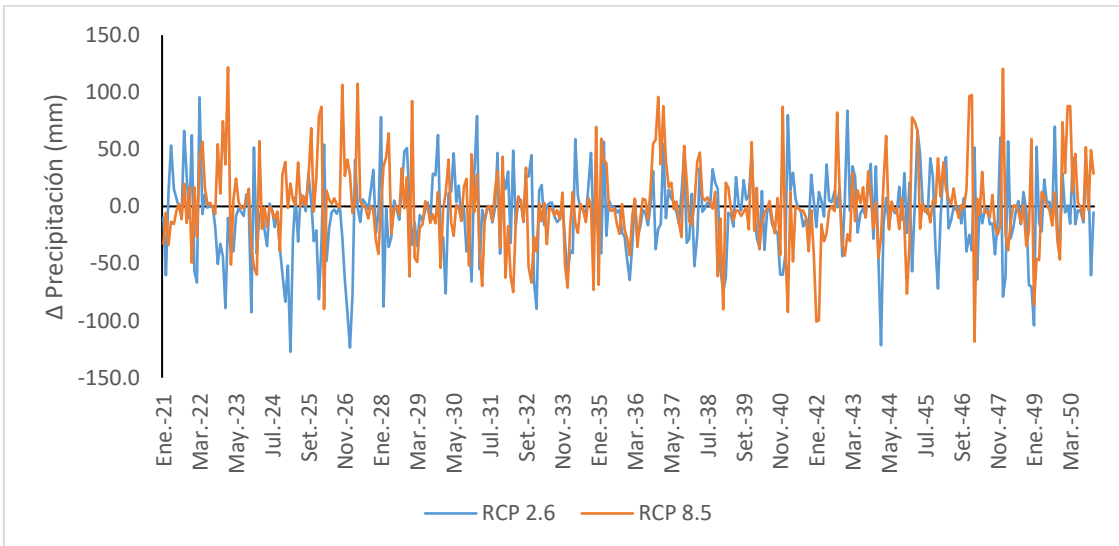


Gráfico 43. Anomalía de la precipitación mensual en la estación Uruashraju

Tal y como se indicó en párrafos anteriores, estadísticamente no se han encontrado tendencias (excepto en el escenario RCP 2.6 de la estación Huaraz). Aun así se han observado cambios en los valores típicos. Ello implicaría que la transición entre las condiciones históricas de precipitación (1983 – 1998) y el periodo futuro está ocurriendo en el periodo no evaluado 1998 - 2020. En base a ello se recomienda que futuros estudios se realicen usando series de tiempo continuas, a fin de eliminar esta incertidumbre.

En cuanto al comportamiento del año medio, sus anomalías se observan en el Gráfico 44. Obsérvese que el comportamiento es bastante dispar. En Huaraz se espera un incremento de la precipitación en el mes de abril con el escenario RCP 8.5. En contra, el

escenario RCP 2.6 muestra una reducción durante la época de lluvias. En la estación Uruashraju el comportamiento es similar. A pesar de ello no se observa cambios en la estacionalidad.

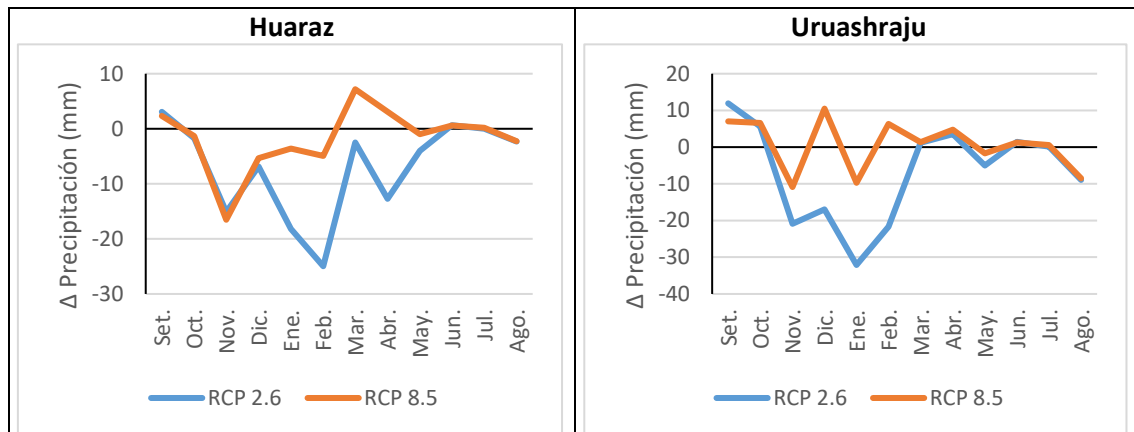


Gráfico 44. Anomalías de la precipitación media mensual

5.5 CAMBIOS EN LOS GLACIARES EN EL PERIODO 2021 – 2050

En el Gráfico 45 se muestra la evolución del volumen glaciar bajo los escenarios RCP 8.5 y RCP 2.6. Durante este último escenario, la reducción del volumen glaciar es más rápida que en el escenario RCP 2.6. Las estimaciones indican que para finales del 2050 el volumen glaciar será de 0.84 km³ y 0.52 km³ en los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 respectivamente. Estas variaciones representan una pérdida del 30.5 % y 56.8 % del volumen glaciar del año 2016. La tasa de pérdida glaciar cambia de 2 % anual en el periodo histórico a 1.3 % anual en el escenario RCP 2.6 y a 2.9 % en el escenario RCP 8.5.

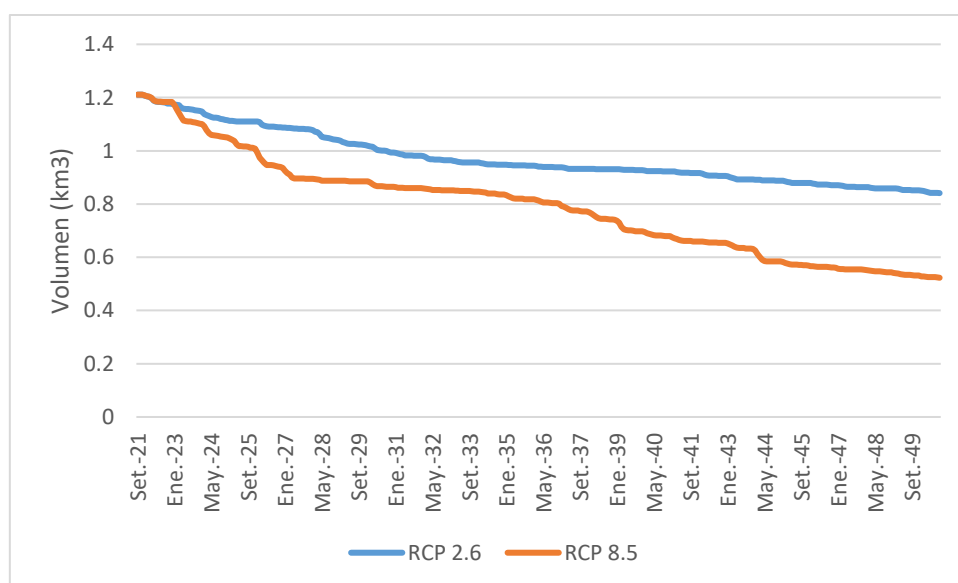


Gráfico 45. Evolución del volumen glaciar en el periodo 2021 – 2050

La ELA se pudo estimar tomando en cuenta los subcuencas glaciares que aportan al caudal. Así para fines del 2050 en el escenario RCP 2.6 la ELA se ubica a 5300 m.s.n.m., 200 m por encima de la ELA del periodo histórico. En el escenario RCP 8.5, la ELA se ubicaría aún más arriba a 5490 m.s.n.m. Rabatel et al. (2013) había calculado que para el escenario extremo A2 la ELA se ubicaría alrededor de los 6000 m.s.n.m. para fines del siglo XXI. Si bien es cierto que se trata de escenarios diferentes, los resultados hallados aquí están en camino de los resultados de estudios previos.

En cualquier caso queda claro que no importa qué escenario de cambio climático se evalúe, el retroceso glacial continuará como parte del proceso natural. La diferencia radicará en la forma cómo lo haga, en el escenario RCP 8.5 una pérdida acelerada y en el escenario RCP 2.6 una pérdida más lenta.

5.6 CAMBIOS EN LAS APORTACIONES EN EL PERIODO 2021 - 2050

5.6.1 Escenario RCP 2.6

En el Gráfico 46 se muestran los caudales del año medio. Las áreas representan las diferentes fuentes de aportación (glaciar, subsuperficial, superficial y base). En términos generales la aportación total anual se reduce de 220.5 Hm³ a 169.9 Hm³, que representan una reducción del 22.3 % de la oferta total de agua.

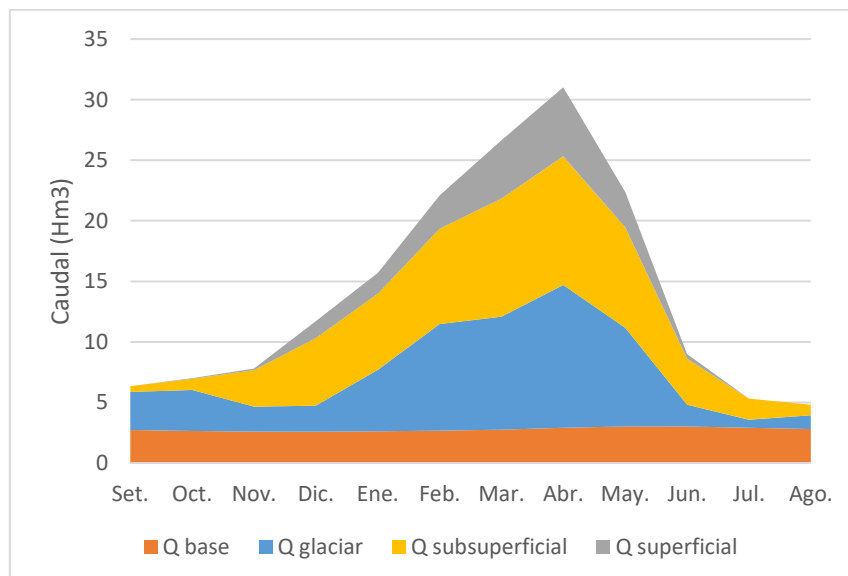


Gráfico 46. Caudales del año medio el periodo 2021 -2050 en el escenario RCP 2.6

El aporte glaciar total anual pasa de 93.3 Hm³ a 57.49 Hm³ (-38 %), el aporte total anual del flujo base pasa de 36.72 Hm³ a 33.28 Hm³ (-9.4 %), el aporte total anual del flujo superficial pasa de 30.64 Hm³ a 19.92 Hm³ (-34.9 %) y, el aporte del flujo subsuperficial pasa de 59.85 Hm³ a 59.20 Hm³ (-1.1 %).

Este cambio en el régimen se debería a dos factores: 1) por un lado, el aporte glaciar en promedio es menor, 2) por otra parte, la precipitación acumulada anual en zonas de mayor altitud se ha reducido. Ello explica por qué la escorrentía superficial se reduce, mientras que la subsuperficial se mantiene dado que gran parte del agua disponible se infiltra. De esta forma, subcuencas cuya función es retener el agua subsuperficial (con cobertura de pastos, humedal, etc.) pasan a jugar un rol más importante.

En el Gráfico 47 se muestra los porcentajes de las diferentes fuentes de aportación al caudal de Quillcayhuanca. Aunque el aporte glaciar sigue fluyendo a lo largo de todo el año, éste se reduce significativamente durante los meses de julio y agosto. Lo mismo ocurre con la escorrentía superficial que se reduce. Así la importancia de la escorrentía subsuperficial y del caudal base pasan a ser fundamentales en la hidrología de Quillcayhuanca.

El aporte glaciar pasa del 44.8 % al 31.7 % del caudal total anual. El caudal base pasa del 21 % al 28.7 %, y la escorrentía subsuperficial y superficial pasan del 24.1 % y 10 % al 31.9 % y 7.7 % del caudal total anual.

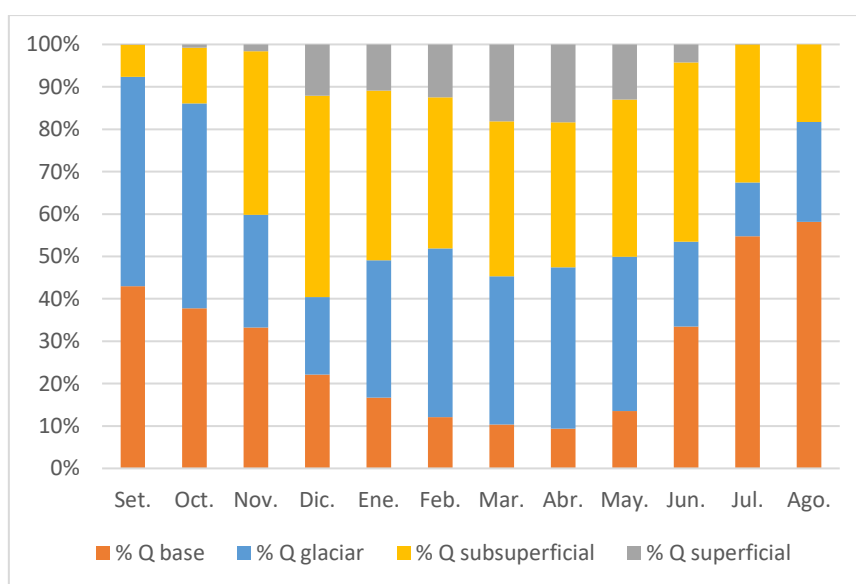


Gráfico 47. Porcentajes de aportación en el año medio del periodo 2021 – 2050 en el escenario RCP 2.6

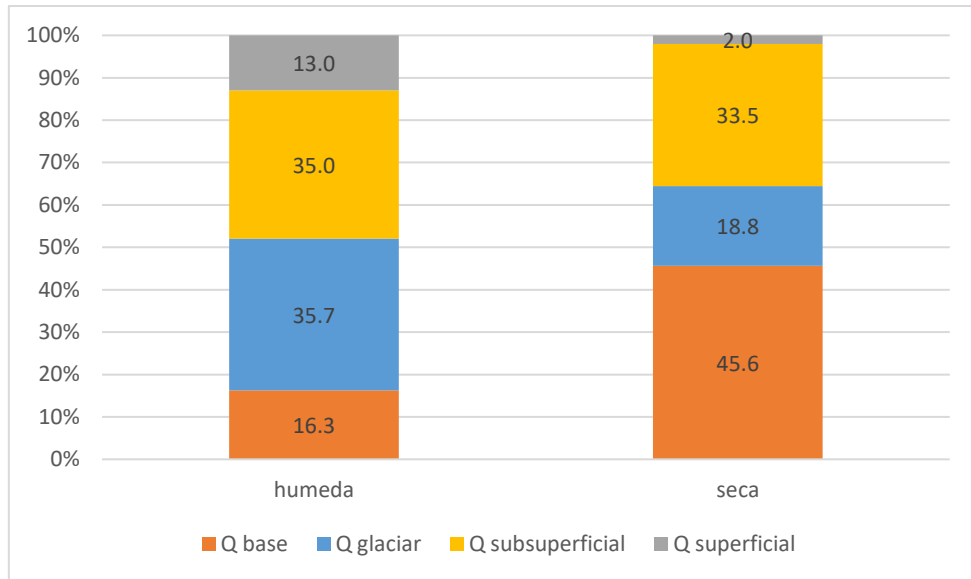


Gráfico 48. Porcentajes de aportaciones de caudales estacionales en el año medio en el escenario RCP 2.6

En cuanto a los aportes durante las épocas húmeda y seca (ver Gráfico 48), el cambio en el régimen hidrológico es notable. La aportación total en la época húmeda pasa de 191.4 Hm³ a 150.7 Hm³ (-21.3 %). Durante la época seca se pasa de 29.11 Hm³ a 19.14 Hm³ (-34.3 %). Todas las fuentes de aportación se reducen. En el caso del aporte glaciar en la temporada húmeda pasa del 81.4 Hm³ a 53.88 Hm³ (-33.8 %). En la época seca se pasa de 11.95 Hm³ a 3.61 Hm³ (-69.8 %).

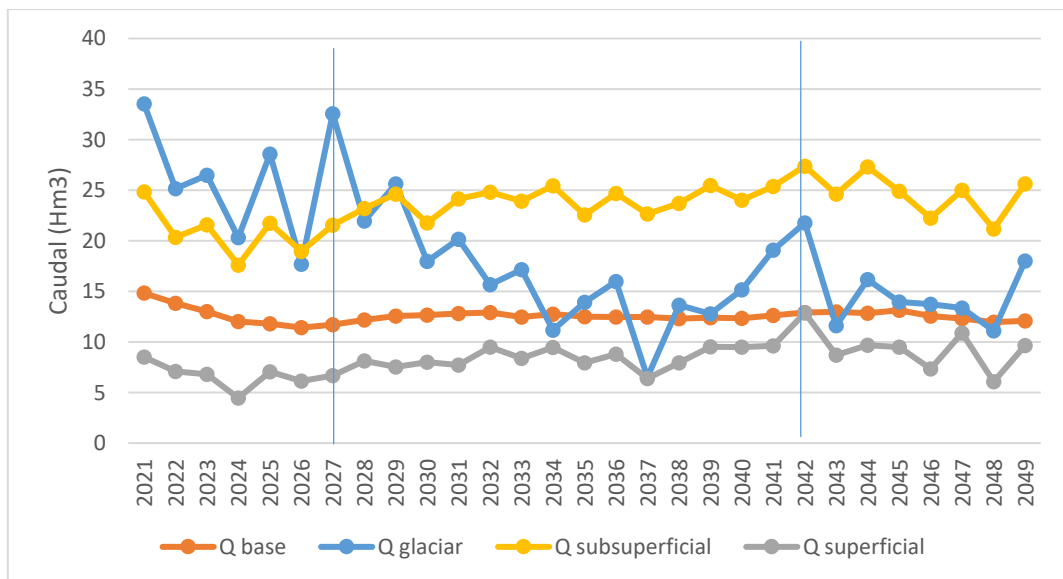


Gráfico 49. Aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 2.6

En el Gráfico 49 se muestra la evolución de las aportaciones anuales. La aportación glaciar muestra una reducción continua en el periodo de estudio. A pesar de ello en los años 2027 y 2042 se observan incrementos de las aportaciones glaciares después de los cuales continua el periodo de reducción. Estos periodos podrían identificarse como los picos máximos de descarga glaciar.

Comúnmente se suele tener la idea de la existencia de un único periodo de máxima descarga glaciar. Sin embargo si tomamos en cuenta que las estas dependen de la ubicación de la ELA (por la separación de la zona de acumulación y ablación), podrían ocurrir varios máximos. A medida que la temperatura se incrementa la fusión glaciar también lo hace, pero la zona de ablación se reduce porque hay menos glaciar y con ello menores descargas (flujo descendente). Sin embargo el mismo incremento de temperatura también propicia el ascenso de la ELA, de manera que el área de la zona de ablación aumenta y con ello puede incrementar la descarga (flujo ascendente). Entonces, si la tasa de retroceso glaciar (diferente a las tasas calculadas hasta ahora) es mayor que la tasa con la que la ELA alcanza nuevas áreas glaciares, habrá una aportación glaciar menor. Un factor adicional es que en las zonas de acumulación existe cubierta de nieve, de manera que cuando la ELA alcanza estas nuevas zonas ocurrirá primero la fusión de la nieve. Esta fusión ocurre a una tasa mayor que el hielo (se necesita más energía para la fundir el hielo que la nieve) de manera que un flujo de agua está disponible. Así los picos serían el momento cuando las zonas de acumulación están disponibles para la fusión.

Desafortunadamente el modelo de Quillcayhuanca no está diseñado para calcular las tasas de retroceso glaciar ni de cambios en la ELA. Las tasas calculadas corresponden a la pérdida de volumen glaciar y una estimación puntual de cambios en la ELA. Sin embargo, si se toma el modelo como representativo y válido para Quillcayhuanca, los años 2027 y 2042 corresponderían a los picos glaciares.

En el Gráfico 50 se muestra la evolución de los aportes en términos porcentuales a lo largo de todo el periodo de estudio. Se observa claramente cómo la importancia del caudal glaciar va reduciendo con los años, mientras que la escorrentía subsuperficial y superficial van en aumento de importancia. En general el aporte glaciar pasa de representar el 41 % del caudal total en el 2021 al 27.5 % en el 2050. El aporte del flujo

base pasa de 18.4 % en el 2021 a 18.5 % en el 2050. La escorrentía superficial pasa del 10 % en el 2021 al 14 % en el 2050. Y finalmente la escorrentía subsuperficial pasa del 30 % en el 2021 al 39 % en el 2050.

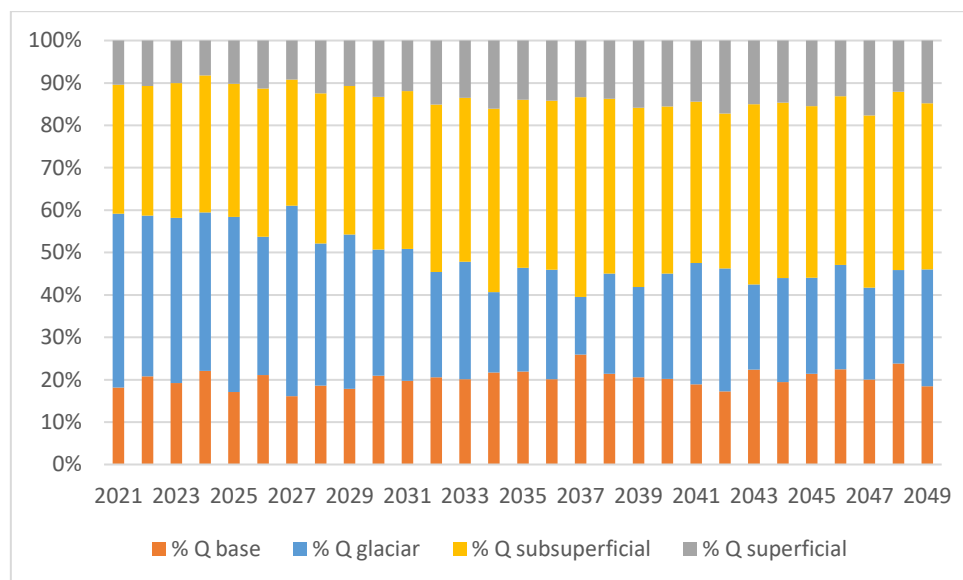


Gráfico 50. Porcentajes de aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 2.6

En el Cuadro 30 se muestran las garantías y déficit máximos de las demandas de Quillcayhuanca frente al escenario RCP 2.6. A diferencia del periodo histórico, donde los criterios de garantía se cumplían con margen de sobra, en este escenario se presentan déficits importantes. También se observa notablemente la limitada gestión del sistema evidenciada por desbalances entre la satisfacción de demandas.

En las demanda agrícolas, lo comités que depende de las aguas de la quebrada Auqui son los que mejor atienden sus demandas. Esto debido al mayor área de aportación que tiene en comparación con la quebrada Paria. Un hecho interesante es que las demandas ubicadas aguas arriba y próximas a las lagunas (comités Churup y Shallap) son las que menos capacidad tienen para satisfacer las demandas. El motivo es que durante el periodo de estío el déficit de agua es máximo debido a que los aportes glaciares han disminuido. Demandas ubicadas aguas abajo tienen mayor área de aportación y pueden abastecerse de los flujos subsuperficiales.

Los criterios de garantía se cumplen para el periodo de un año (20 – 40 %), pero para los periodos de 2 y 10 años (30 – 60 % y 40 – 80 %) sólo se cumplen en el comité Cojup,

Pitec, Paquishca y Auqui. En otras palabras, 3 de los comités agrícolas que abarcan el 68 % del área bajo riego no dispondrá de agua suficiente.

Cuadro 30. Garantías y déficit característicos de las demandas bajo el escenario RCP 2.6

| Demanda | Ga % | Gm % | Def. 1 año | Def. 2 años | Def. 10 años |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Cojup | 20.7 | 81.7 | 8 | 35 | 79 |
| Nueva Florida | 6.9 | 79.1 | 17 | 67 | 156 |
| Churup | 0 | 60.7 | 16 | 116 | 402 |
| Pitec | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Paquishca | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Auqui | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Shallap | 0 | 61.9 | 16 | 100 | 405 |
| Usuario 1 | 0 | 53.6 | 8 | 72 | 279 |
| Usuario 2 | 0 | 56.2 | 8 | 71 | 266 |
| Usuario 3 | 0 | 61.9 | 7 | 59 | 212 |
| Ministerio Producción | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Nueva Florida | 6.9 | 79.4 | 7.4 | 21.9 | 72.2 |
| Los Olivos | 6.9 | 88.8 | 4 | 81 | 266.7 |
| Urbana Paria | 44.8 | 63.3 | 6.7 | 24.8 | 85.4 |

Ga: garantía anual. Gm: garantía mensual. Def 1 año, 2 años, 10 años: déficit máximo en 1, 2 y 10 años. Ref: rango de referencia de la legislación peruana

Respecto de las demandas piscícolas se observa limitaciones en el abastecimiento que sobrevienen durante la época de estío cuando las aportaciones disminuyen.

En cuanto a la demanda poblacional rural, estas dejan de cumplir los criterios de garantía. Los criterios para déficits de un año se cumplen (5 – 10 %), pero los de 2 y 10 años no (10 – 15 % y 15 – 30 %). La demanda Los Olivos es el que menos puede satisfacer sus demandas debido a que se encuentra aguas debajo de la captación de Nueva Florida.

En cuanto a la demanda poblacional urbana, desde el año 2005 toda la demanda se abastece del río Paria. Al incrementarse la demanda y reducir la oferta es lógico que los criterios de garantía dejen de cumplirse.

5.6.2 Escenario RCP 8.5

La aportación total anual cambia de 220.5 Hm³ en el periodo histórico a 162.2 Hm³, que representa una reducción del 26.4 % del agua disponible. Los aportes glaciares cesan casi por completo en los meses de julio y agosto. La dinámica hidrológica cambia de ser glaciar a depender en mayor parte de las escorrentías superficiales y subsuperficiales (ver Gráfico 51).

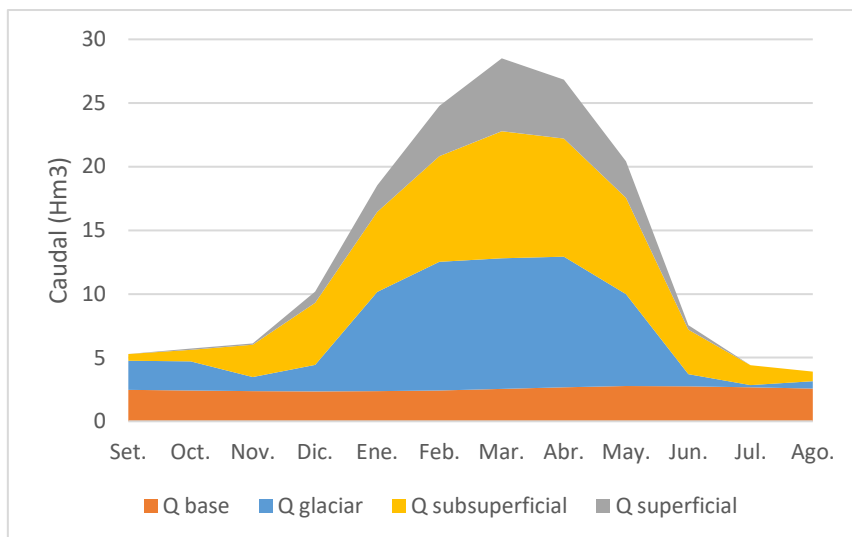


Gráfico 51. Caudales del año medio el periodo 2021 -2050 en el escenario RCP 8.5

El aporte glaciar total anual pasa de 93.3 Hm³ a 55.13 Hm³ (-40.9 %), el aporte total anual del flujo base pasa de 36.72 Hm³ a 30.37 Hm³ (-17.29 %), el aporte total anual del flujo superficial pasa de 30.64 Hm³ a 20.66 Hm³ (-32.6 %) y, el aporte del flujo subsuperficial pasa de 59.85 Hm³ a 56.04 Hm³ (-6.4 %). Nuevamente, la razón de estas reducciones sería la propia reducción de la aportación glaciar y del cambio en precipitaciones.

En el Gráfico 52 se muestra la distribución porcentual de las aportaciones según su fuente. Obsérvese cómo los aportes glaciares en los meses de julio y agosto pasan a representar tan solo el 3 y 15 % respectivamente. El aporte glaciar pasa de ser el 44.8 % de la aportación total en el periodo histórico al 28.8 % en el escenario futuro. La aportación del flujo base pasa del 21 % al 30.7 %, y la escorrentía subsuperficial y superficial pasan del 24.1 % y 10 % al 32.5% y 8 % del caudal total anual.

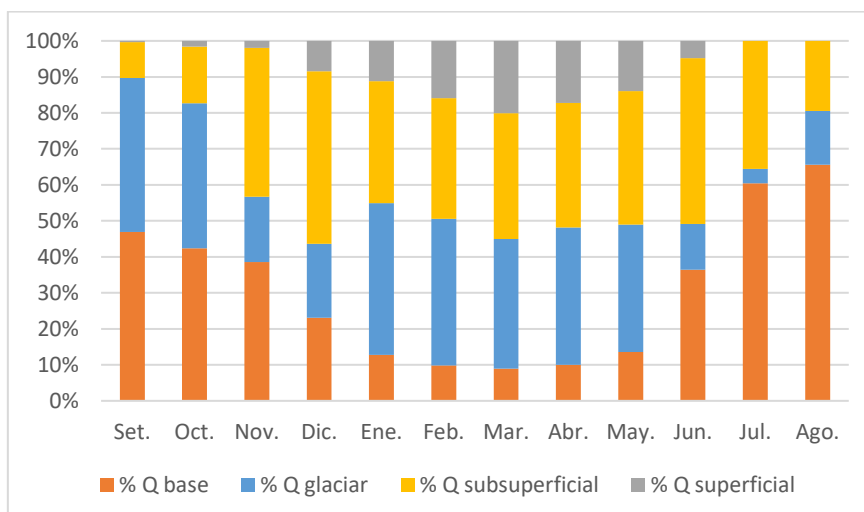


Gráfico 52. Porcentajes de aportación en el año medio del periodo 2021 – 2050 en el escenario RCP 8.5

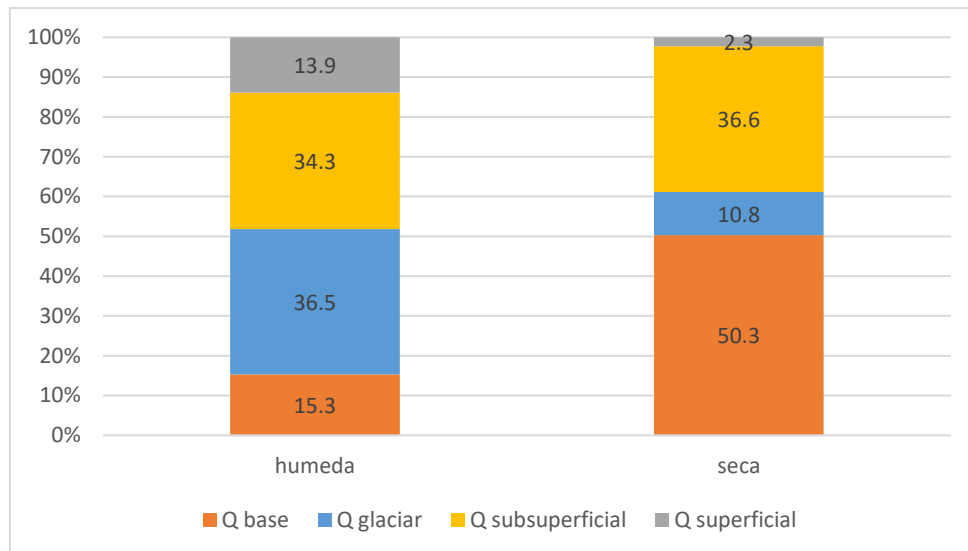


Gráfico 53. Porcentajes de aportaciones de caudales estacionales en el año medio en el escenario RCP 8.5

En el Gráfico 53 se muestran los aportes en las épocas seca y húmeda en términos porcentuales. Se observa cómo este escenario de cambio climático representa un cambio total respecto de la dinámica hidrológica. La aportación total en la época húmeda pasa de 191.4 Hm³ a 146.4 Hm³ (-23.5 %). Durante la época seca se pasa de 29.11 Hm³ a 15.86 Hm³ (-45.5 %). Todas las fuentes de aportación se reducen. En el caso del aporte glaciar en la temporada húmeda pasa del 81.4 Hm³ a 53.41 Hm³ (-34.4 %). En la época seca se pasa de 11.95 Hm³ a 1.72 Hm³ (-85.6 %).

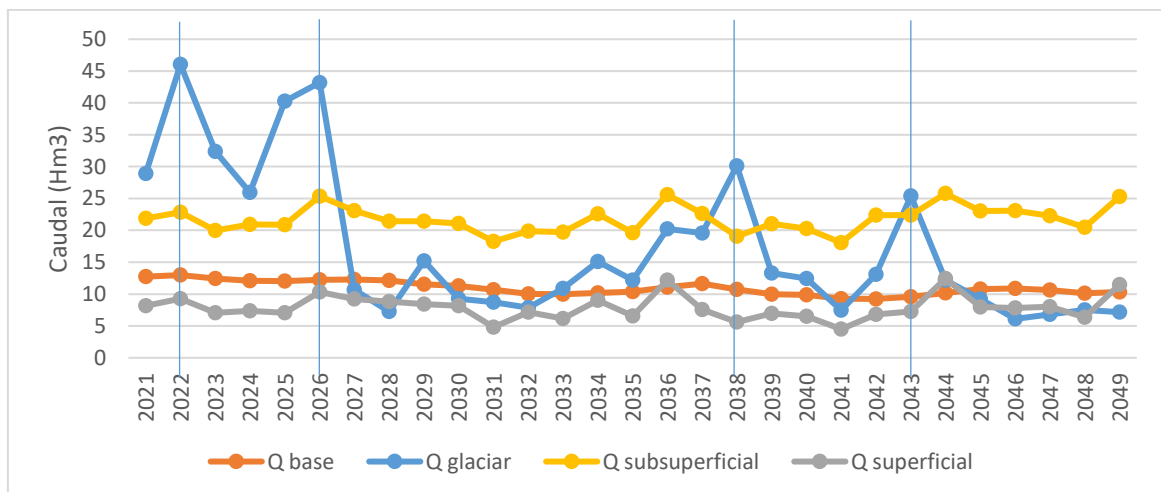


Gráfico 54. Aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 8.5

En el Gráfico 54 se muestran las aportaciones totales anuales de Quillcayhuanca. El comportamiento general es similar al observado en el escenario RCP 2.6. La diferencia radica en la intensidad de los cambios. El primer pico de máximo glaciar se observa pronto (2022) ya que con mayores temperaturas la fusión también es mayor. Los siguientes picos se observan en el 2026, 2038 y 2043. Este número mayor de picos se

debería a que las áreas glaciares retroceden con mayor velocidad pero al mismo tiempo la ELA alcanza nuevas zonas de ablación más pronto.

En el Gráfico 55 se muestra la evolución de los caudales anuales en términos porcentuales. Claramente se nota cómo los glaciares dejan de ser importantes en el caudal total y cómo el caudal subsuperficial va ocupando su lugar. En general el aporte glaciar pasa de representar el 41 % del caudal total en el 2021 al 13.2 % en el 2050. El aporte del flujo base pasa de 18.4 % en el 2021 a 19.1 % en el 2050. La escorrentía superficial pasa del 10 % en el 2021 al 21.2 % en el 2050. Y finalmente la escorrentía subsuperficial pasa del 30 % en el 2021 al 46.6 % en el 2050.

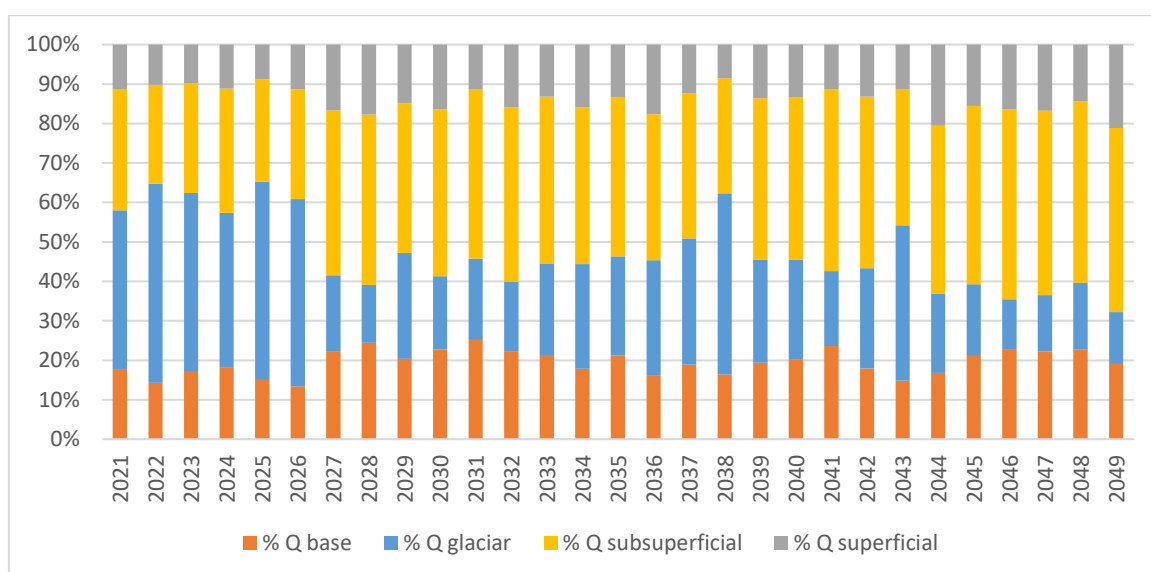


Gráfico 55. Porcentajes de aportaciones anuales de Quillcayhuanca en el escenario RCP 8.5

En el Cuadro 31 se muestran las garantías y déficit máximos de las demanda de Quillcayhuanca frente al escenario RCP 8.5. Como es de esperarse, los déficit son más agudos que en el escenario RCP 2.6.

En cuanto a las demandas agrícolas, se continua observando el desequilibrio en el abastecimiento. Sólo los comités Pitec, Paquishca y Auqui pueden cubrir sus necesidades, mientras que los déficits en los demás comités son más pronunciados. El comité Cojup que en el escenario RCP 2.6 aún cumplía los criterios de garantía ahora ya no lo hace. El área total bajo riego que puede quedar desabastecida es ahora del 89 %.

Cuadro 31. Garantías y déficit característicos de las demandas bajo el escenario RCP 8.5

| Demanda | Ga % | Gm % | Def. 1 año | Def. 2 años | Def. 10 años |
|-----------------------|-------------|-------------|-------------------|--------------------|---------------------|
| Cojup | 24.1 | 79.9 | 8 | 45 | 106 |
| Nueva Florida | 3.4 | 71.9 | 18 | 119 | 276 |
| Churup | 0 | 62.2 | 16 | 125 | 437 |
| Pitec | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Paquishca | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Auqui | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Shallap | 0 | 51.9 | 16 | 134 | 464 |
| Usuario 1 | 0 | 53.6 | 8 | 72 | 279 |
| Usuario 2 | 0 | 56.2 | 8 | 71 | 266 |
| Usuario 3 | 0 | 61.9 | 7 | 59 | 212 |
| Ministerio Producción | 100 | 100 | 0 | 0 | 0 |
| Nueva Florida | 3.4 | 73.1 | 8.3 | 43.7 | 132.4 |
| Los Olivos | 3.4 | 83.1 | 8.3 | 161.3 | 488.8 |
| Urbana Paria | 44.8 | 63.3 | 12.5 | 54.5 | 171.6 |

Ga: garantía anual. Gm: garantía mensual. Def 1 año, 2 años, 10 años: déficit máximo en 1, 2 y 10 años. Ref: rango de referencia de la legislación peruana

Respecto de las demandas piscícolas se observan mayores limitaciones en la disponibilidad hídrica que las ocurridas en el escenario RCP 2.6. Dado que este tipo de demanda requiere de caudales constantes a lo largo del año, es previsible el impacto económico que sufrirán.

En cuanto a las demandas poblacionales, los criterios de garantía siguen sin cumplirse. Son más pronunciados que en el escenario RCP 2.6, casi el doble que en el escenario anterior.

5.7 COMPARATIVA DE ESCENARIOS

En los apartados anteriores se han descrito los impactos de cada escenario de cambio climático en el sistema Quillcayhuanca. En los siguientes párrafos se presenta entonces una comparativa de los escenarios a modo de resumen.

En el Gráfico 56 muestran las aportaciones del año medio en el punto de aforo Quillcay. Representa la oferta total de agua del sistema Quillcayhuanca. Se comparan las aportaciones del periodo histórico 1983 – 1998, con las obtenidas de los escenarios RCP 2.6 y RCP 8.5 del periodo 2021 – 2050. La mayor oferta de agua se genera en el periodo histórico. Cualquiera de los otros escenarios representa un descenso, siendo el escenario RCP 8.5 el más desfavorable. En general se pasa de 220 Hm³ al año a 169.9 Hm³ (-22.3 %) en el escenario RCP 2.6, ya 162.4 Hm³ (-26.4 %) en el escenario RCP 8.5. En otras palabras, incluso en el escenario menos desfavorable se espera una reducción

de la oferta total de agua en Quillcayhuanca del 20%. Otra tendencia observable es que independientemente del escenario en evaluación, durante los meses de estío la oferta de agua será mucho menor.

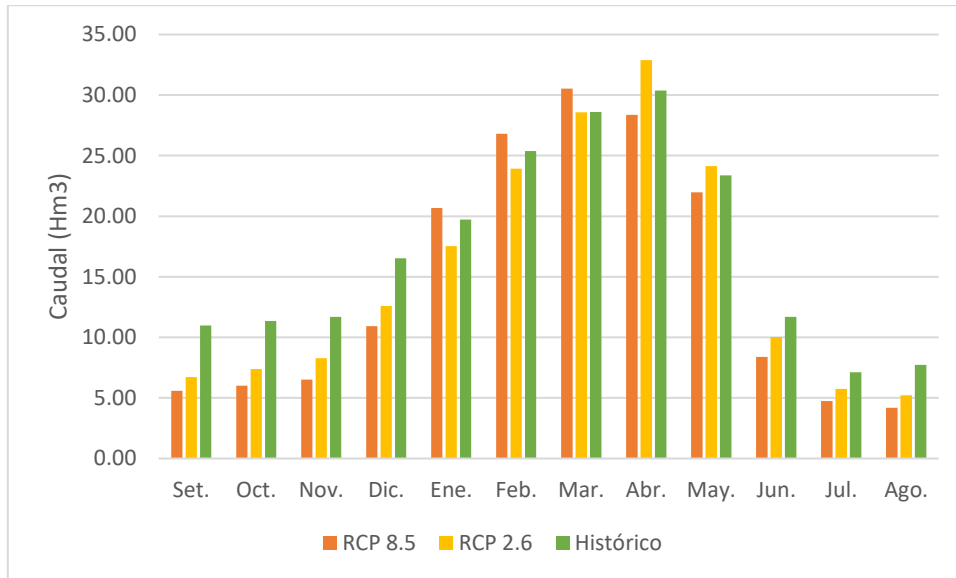


Gráfico 56. Aportaciones del año medio en el punto de aforo Quillcay

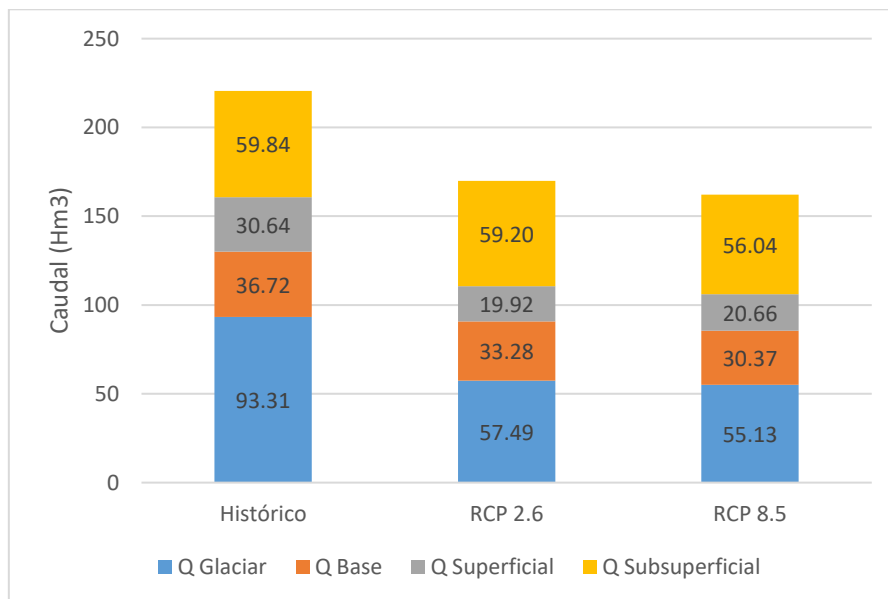


Gráfico 57. Fuentes de aportación a la oferta total anual en el punto de aforo Quillcay para el año medio

En el Gráfico 57 se muestra las fuentes de aportación al total anual en cada escenario de evaluación comparados con el periodo histórico. La reducción de la aportación de las distintas fuentes es destacable. Dos motivos principales influyen la reducción de las aportaciones antes comentadas: 1) descenso del volumen glaciar y 2) disminución de las precipitaciones. El descenso en el volumen glaciar en el periodo 2021 – 2050 (ver 5.3.2)

influye directamente en la reducción de la aportación glaciar. Mientras que la disminución de la precipitación afecta de manera los flujos subsuperficiales y superficiales. Con esto, se observa un cambio en el régimen de Quillcayhuanca que pasaría de ser netamente glaciar a depender en mayor medida de las precipitaciones estacionales y de las cubiertas del suelo con capacidad de almacenamiento de agua.

En el Gráfico 58 y Gráfico 59 se muestran las fuentes de aportación a la oferta total de agua durante la época húmeda (setiembre - mayo) y seca (junio - agosto). En el Gráfico 57 las aportaciones de distinta fuente parecen semejantes en los diferentes escenarios. Sin embargo, el análisis estacional muestra que la mayor parte de las aportaciones ocurren en la época húmeda y es en la época seca cuando se distinguen. La aportación en la temporada húmeda pasa de 191.4 Hm³ en el periodo histórico a 150.7 Hm³ (-21.3%) y a 146.4 Hm³ (-23.5%) en los escenarios RCP 2.6 y 8.5 respectivamente. En la época seca los cambios son más importantes. La aportación total pasa de 29.11 Hm³ a 19.14 Hm³ (-34.3 %) y a 15.86 Hm³ (-45.5 %) en los en los escenarios RCP 2.6 y 8.5 respectivamente. Una de las mayores causas en esta reducción es la disminución del aporte glaciar que en la época seca pasa de 11.95 Hm³ a 3.61 Hm³ (-69.8 %) y a 11.72 Hm³ (-85.6 %) en los escenarios RCP 2.6 y 8.5 respectivamente. En estas condiciones, el cambio de régimen del sistema Quillcayhuanca es notable.

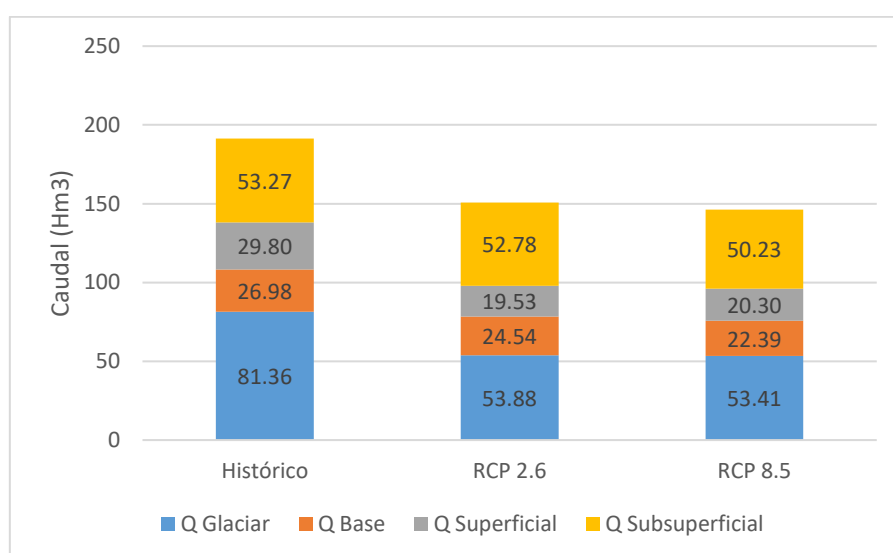


Gráfico 58. Aportaciones en la época húmeda en el punto de aforo Quillcay

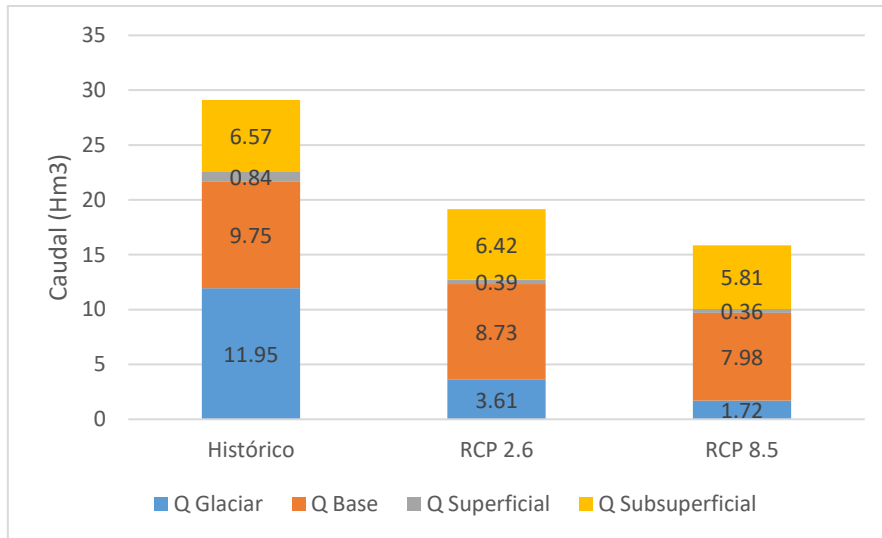


Gráfico 59. Aportaciones en la época seca en el punto de aforo Quillcay

En el Gráfico 60 se muestran las series de aportación anual de cada fuente en el sistema Quillcayhuanca. En todos los casos las aportaciones del escenario RCP 8.5 son menores.

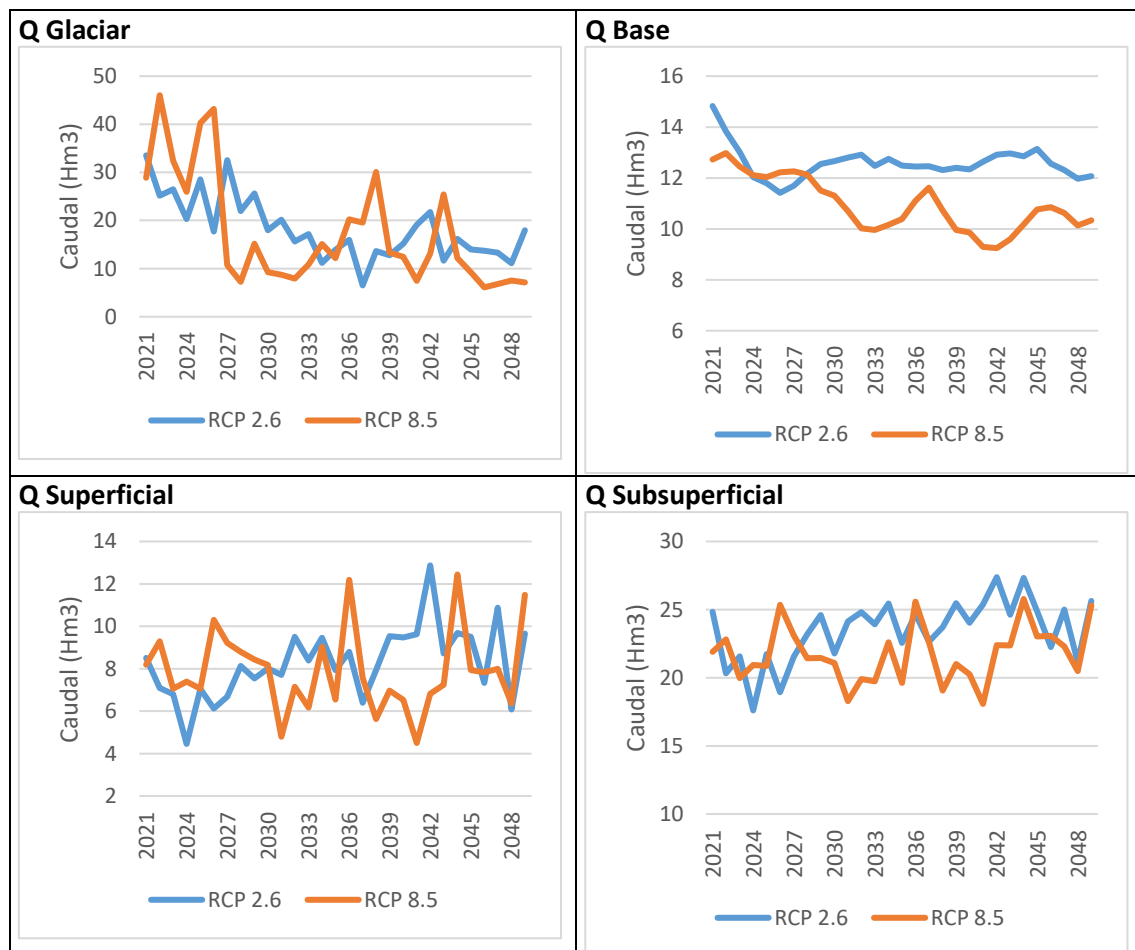


Gráfico 60. Serie de aportes anuales según fuente en el periodo 2021 – 2050

En el Gráfico 61 y Gráfico 62 se muestran los cuantiles de caudales máximos y mínimos anuales respectivamente, estimados mediante una función de distribución de probabilidad acumulada de Gumbel. Así, en cada gráfico se comparan los caudales extremos entre los obtenidos del periodo histórico y de los escenarios RCP 2.6 y 8.5.

En cuanto a los caudales mínimos, era de esperarse una reducción de estos debido al cambio de régimen de Quillcayhuanca. De manera que los caudales mínimos serán más frecuentes. Algo destacable es que los caudales mínimos serán más probables en el RCP 2.6 que en el RCP 8.5. Una explicación sería la compensación que existe de parte del aporte glaciar al fundir con mayor rapidez. Claro está que no es sostenible en tiempo. Una vez que el glaciar retroceda por completo la compensación desaparecerá y ello ocurriría en el periodo más allá del año 2050 evaluado en el presente estudio.

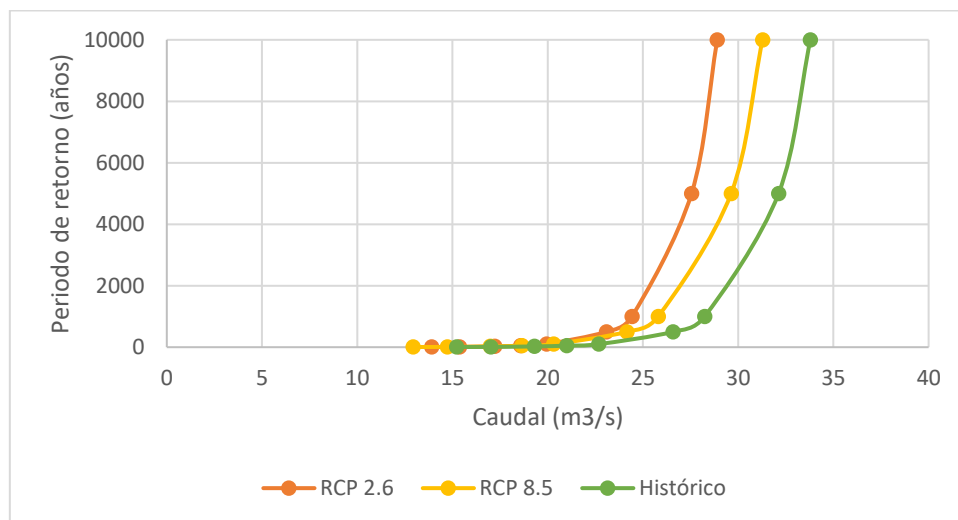


Gráfico 61. Función de distribución de los caudales máximos en el punto de aforo Quillcay

Un hecho importante resulta de observar la probabilidad de ocurrencia de los caudales máximos. En general se esperaba que estos se incrementaran durante los escenarios de cambio climático, debido a que durante las épocas de lluvia también hay mayor fusión glaciar. Sin embargo, y al igual que sucede con los caudales mínimos, la probabilidad de ocurrencia se reduce.

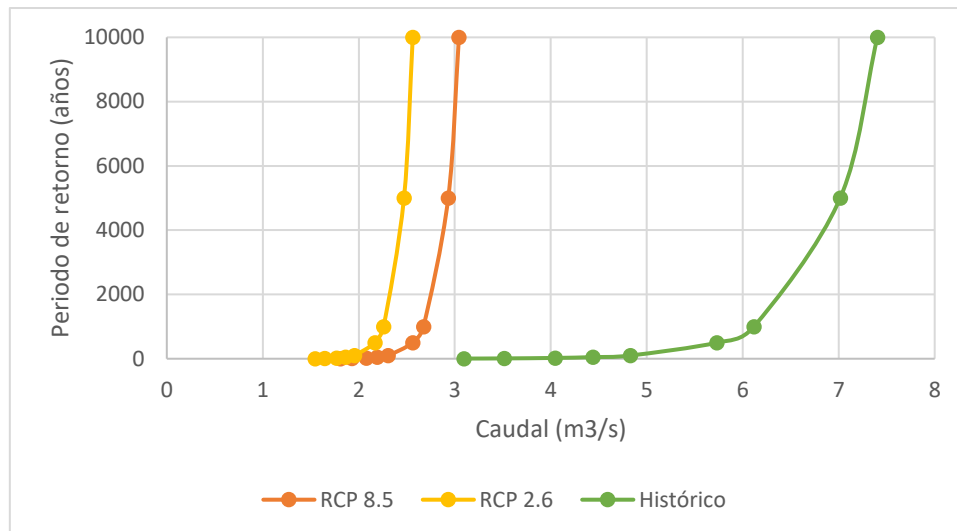


Gráfico 62. Función de distribución de los caudales mínimos en el punto de aforo Quillcay

De los resultados de caudales extremos antes comentados debe tomarse en cuenta que son mensuales. A esta escala de tiempo es difícil reproducir eventos extremos diarios producto de fenómenos como El Niño o la Niña. Un análisis y simulación al menos a paso de tiempo diario sería un mejor indicador de los cambios en los caudales extremos. Otro hecho importante a tomar en cuenta es que las series de cambio climático no predicen la ocurrencia de eventos extremos, causales de caudales extremos.

En el Gráfico 63 se muestran las aportaciones totales de cada río principal del sistema Quillcayhuanca, que representan la oferta total disponible. En términos generales se observa una reducción de las aportaciones de ambos ríos. En el río Paria la aportación total anual cambiará de 39.7 Hm³ en el periodo histórico a 41.66 Hm³ (+4.9 %) en el escenario RCP 2.6 y a 39.35 Hm³ (-0.9 %) en el escenario RCP 8.5. En el caso del río Auqui, el cambio será de 164.46 Hm³ en el periodo histórico a 141.37 Hm³ (-14 %) en el escenario RCP 2.6 y a 135.36 Hm³ (-17.7 %) en el escenario RCP 8.5. Se recuerda que estos valores corresponden a los totales anuales. Una evaluación estacional muestra que las aportaciones aumentan en el periodo de lluvias y reducen durante el periodo de estío. Un hecho destacable es que las aportaciones del río Auqui se reducen en mayor porcentaje que en el río Paria. Una explicación sería la dependencia de la cobertura glaciar que tiene el río Auqui. La mayor presencia de área glaciar provoca que si esta reduce, los cambios en las aportaciones sean más importantes. En el río Paria la cobertura glaciar es menor en proporción a la no glaciar, de manera que los cambios en las aportaciones glaciares impactan menos en la oferta de agua.

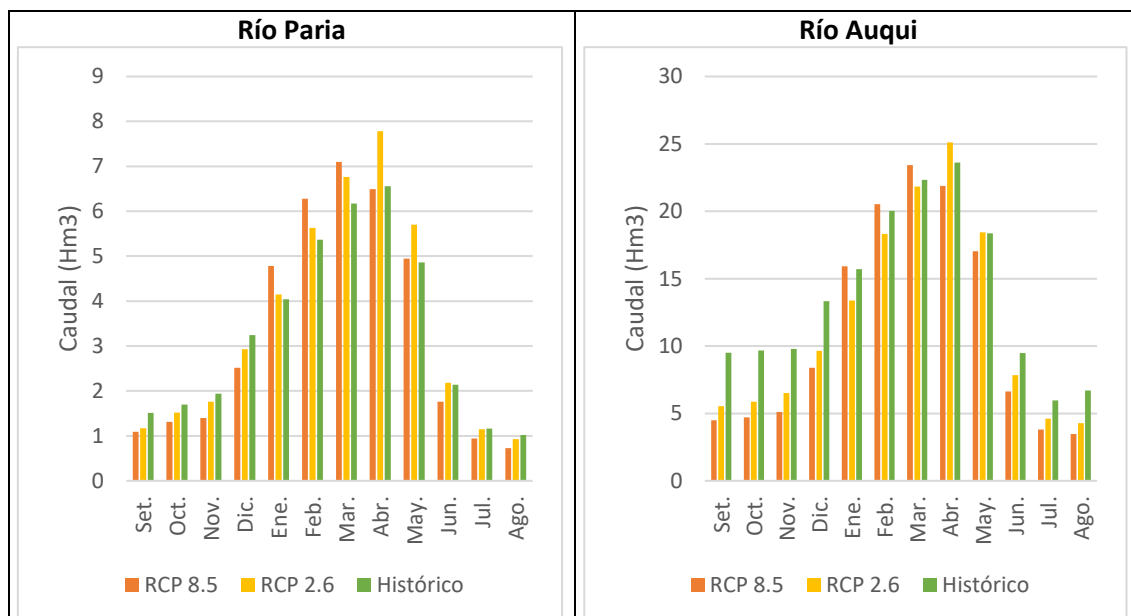


Gráfico 63. Aportaciones en los ríos Paria y Auqui

Cuadro 32. Comparación de garantías de las demandas en los diferentes escenarios de evaluación

| Demanda | HISTORICO | | RCP 2.6 | | RCP 8.5 | |
|-----------------------|-----------|------|---------|------|---------|------|
| | Ga % | Gm % | Ga % | Gm % | Ga % | Gm % |
| Cojup | 93.3 | 98.9 | 20.7 | 81.7 | 24.1 | 79.9 |
| Nueva Florida | 100 | 100 | 6.9 | 79.1 | 3.4 | 71.9 |
| Churup | 33.3 | 88.4 | 0 | 60.7 | 0 | 62.2 |
| Pitec | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Paquishca | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Auqui | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Shallap | 40 | 88.4 | 0 | 61.9 | 0 | 51.9 |
| Usuario 1 | 100 | 100 | 0 | 53.6 | 0 | 47 |
| Usuario 2 | 100 | 100 | 0 | 56.2 | 0 | 50.1 |
| Usuario 3 | 100 | 100 | 0 | 61.9 | 0 | 53.9 |
| Ministerio Producción | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 | 100 |
| Nueva Florida | 100 | 100 | 6.9 | 79.4 | 3.4 | 73.1 |
| Los Olivos | 100 | 100 | 6.9 | 88.8 | 3.4 | 83.1 |
| Urbana Paria | 100 | 100 | 44.8 | 63.3 | 44.8 | 63.3 |
| Urbana Auqui | 100 | 100 | | | | |

En el Cuadro 32 se comparan las garantías calculadas para cada uno de los escenarios evaluados. Dos hechos saltan a la vista: 1) en el escenario 8.5 la satisfacción de demandas es menor y 2) existen un claro desbalance en los abastecimientos. El primero está muy relacionado con los resultados anteriormente descritos de reducción de aportaciones. El segundo tiene mucho que ver con el estado de gestión del sistema. Por un lado se encuentran las demandas que cubren al 100 % sus requerimientos, y por otro

están las demandas que no pueden hacerlo incluso al 100 %. Aunque parte de estos resultados se deben a que las demandas que cubren sus necesidades son más pequeñas, también se debe a limitada disponibilidad de elementos estructurales y no estructurales de gestión. Queda claro que en condiciones de menor oferta de agua y mayor estacionalización de la misma, el sistema requiere con urgencia el diseño e implementación de medidas para contrarrestar los cambios.

Futuros estudios podrían enfocarse en modelos hidroeconómicos, con el propósito de evaluar las consecuencias económicas de los cambios en la disponibilidad hídrica. Los resultados podrían usarse como elementos de apoyo en el diseño y evaluación de medidas de gestión de los recursos hídricos y adaptación al cambio climático.

Los resultados mostrados indican que en los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5 el sistema Quillcayhuanca presentará una disminución en las aportaciones anuales. El escenario RCP 8.5 se muestra como el más desfavorable, ya que la disminución de la aportación en el periodo de estío será mucho mayor.

6 CONCLUSIONES

A lo largo del presente estudio se ha evaluado el impacto del cambio climático en los recursos hídricos del sistema hidrológico Quillcayhuanca. Para ello se implementó un modelo hidrológico semidistribuido a paso de tiempo mensual utilizando el software RS Minerve. Dadas las características glaciares de Quillcayhuanca fue necesario el uso de modelos glaciares y no glaciares. Así, Quillcayhuanca quedó dividida en 72 pequeñas subcuencas, que podían ser simples (glaciar o no glaciar) o mixtas (glaciar y no glaciar a la vez). Las subcuencas mixtas permitieron superar la limitación que tienen los modelos en la simulación de la pérdida del volumen glaciar. Adicionalmente éstas fueron caracterizadas en términos de su cobertura del suelo a partir de los cuales se estimaron algunos parámetros de calibración. Otra limitación a superar fue la reducida disponibilidad de datos hidrometeorológicos. Ello se superó evaluando diferentes técnicas de extensión, interpolación y estimación de la temperatura, precipitación y altura glaciar respectivamente. A partir de ello se identificaron las técnicas más adecuadas en cada caso. El modelo final de Quillcayhuanca resultó de evaluar 3 versiones que combinan diferentes modelos glaciares y no glaciares. Dado el enfoque de evaluación de los recursos hídricos, durante el proceso de calibración y validación se dio un gran peso a la representación de los caudales base. Para evaluar los escenarios de cambio climático se usaron series de precipitación y temperatura mensual obtenidos del modelo de circulación regional RCA4, uno de los pocos con dominio en Sudamérica. Las series fueron corregidas estacionalmente durante el periodo histórico 1983 – 1998. Los escenarios evaluados fueron el RCP 2.6 y el RCP 8.5 (el más y menos optimista) en el periodo 2021 – 2050. Los resultados muestran un incremento de la temperatura y reducción de la precipitación en ambos escenarios, siendo el RCP 8.5 en el que los cambios ocurren en mayor magnitud. Dichos cambios en las condiciones meteorológicas provocan una reducción en las aportaciones anuales de Quillcayhuanca, siendo más desfavorable en el escenario RCP 8.5. Estas reducciones son resultado de los cambios en la precipitación y de la reducción del volumen glaciar. Como consecuencia, en las épocas secas se dispondrá de menores aportaciones.

De los métodos utilizados

- En la extensión de la temperatura los datos de Reanálisis NCEP – NCAR siguen probando ser la mejor opción para superar esta limitación.
- De los métodos usados en la extensión de la temperatura, el método del factor corrector prueba ser adecuado. Sin embargo debe tomarse en cuenta que se debe conocer de antemano los gradientes térmicos locales. De no ser así se pueden usar los estimados para los Andes, pero podrían generarse errores. La recomendación es evaluar primero una correlación simple entre los datos observados y de no alcanzar los resultados deseados usar el método del factor corrector.
- En la interpolación de la precipitación, el método del IDW resulta útil cuando se disponen de estaciones alrededor de la zona de interpolación. De no ser así lo más probable es que se subestime o sobreestime la precipitación total. El método del KO resulta más útil cuando la distribución de estaciones no es la más adecuada. Sin embargo tiene una mayor demanda computacional y requiere del planteamiento de hipótesis.
- En el presente estudio la hipótesis usada fue asumir que el comportamiento mensual promedio multianual de la precipitación se repite a lo largo de la serie de tiempo. Los resultados con esta hipótesis fueron bastante adecuados.
- En la estimación de la altura glaciaria se evaluaron el método de Bahr y la herramienta GlabTop, que estiman el volumen glaciario. Sin duda GlabTop es la mejor alternativa, pero su utilidad se ve limitada a la disponibilidad en el tiempo de modelos de elevación digital. Por ello el método de Bahr, aunque muy discutido, resulta en una alternativa viable pues sólo depende del área. Los mejores resultados se obtienen al calibrar el método de Bahr con resultados de GlabTop.
- En la construcción del modelo de Quillcayhuanca la versión GSM (glaciario) + HBV (no glaciario) generó los mejores resultados de calibración y validación. La versión GSM + SOCONT también resulta útil sobre todo para estimaciones rápidas. La versión GSM + GR4J no resulta adecuada para cuencas de alta variabilidad hidrológica.

- El uso de valores estimados de capacidad de campo en función de la cobertura del suelo ha resultado útil para que el modelo funcione de una forma más realista.
- La implementación de subcuencas mixtas ha resultado en una herramienta útil para simular la variación del volumen glaciar. Aun así debe tomarse en cuenta las limitaciones que tiene.

Del impacto del cambio climático en el sistema Quillcayhuanca

- El escenario RCP 8.5 se muestra como más desfavorable. Los cambios en este escenario son los máximos hallados en el presente estudio. Los resultados mínimos de cambio se presentan en el escenario RCP 2.6 por lo que se consideran referentes.
- Los escenarios de cambio climático RCP 2.6 y RCP 8.5 muestran que la temperatura incrementará en no menos de 1 °C en la estación Huaraz (3042 m.s.n.m.) y de 0.7 °C en la estación Uruashraju (4693 m.s.n.m.). El incremento es constante en todo Quillcayhuanca y alrededores con una tendencia significativa.
- Los cambios en la precipitación son más dispares pero la tendencia es de una reducción en todo Quillcayhuanca no menor al 2% de la precipitación total anual. Mientras en el escenario RCP 2.6 esta reducción es general para la zona de estudio y alrededores, en el escenario RCP 8.5 los cambios pueden ser de incrementos o reducciones sin patrón definido.
- Con estos cambios en las condiciones meteorológicas se espera una pérdida no menor al 30 % del volumen glaciar para finales del 2050. La reducción del volumen dependerá mucho de la tasa de pérdida volumen glaciar que en el escenario RCP 2.6 se reduce y en el RCP 8.5 se acelera, en referencia al periodo histórico.
- Se espera que la ELA ascienda al menos 200 m desde su ubicación en el periodo histórico hacia el periodo 2021 – 2050, quedando establecida a 5300 m.s.n.m.
- Con estos resultados, la aportación anual de Quillcayhuanca se reducirá en no menos del 22 % de la aportación total anual del periodo histórico. Por una parte esta reducción es resultado de la disminución de las precipitaciones, y por otra parte, de la reducción del volumen glaciar.

- La aportación glaciar anual se reducirá al menos un 38 %, el flujo base reducirá en 9 %, el aporte subsuperficial en 1 % y el superficial en 34 %.
- Estacionalmente, la aportación total anual durante la época húmeda se reducirá en no menos del 21 %, mientras que en la época seca se reducirá no menos de un 34 %, en referencia al periodo histórico.
- Las aportaciones glaciares se reducirán en la época húmeda al menos en 33 % y en la época seca al menos en 69%, en referencia al periodo histórico.
- Todos los cambios en las aportaciones y sus fuentes permiten concluir que Quillcayhuanca pasará de ser un sistema de alta dependencia glaciar a uno dependiente en gran medida de las precipitaciones. Cobrará mayor importancia entonces las coberturas del suelo con propiedades de almacenamiento de agua.
- La evaluación de las garantías mostró que durante el periodo histórico estas se cumplen con facilidad, aunque en la realidad las incertidumbres podrían mostrar otros resultados menos favorables. Durante la evaluación de los escenarios las garantías dejan de cumplirse, existiendo mayores déficits en el escenario RCP 8.5.
- Incluso en las condiciones más adversas hay demandas que pueden cubrir sus necesidades al 100 %, mientras que otras no. Esto demuestra la limitada disponibilidad de elementos de gestión existentes en el sistema Quillcayhuanca y que serán necesario de diseñar e implementar de cara al futuro.

Recomendaciones para futuras líneas de investigación

- La evaluación de técnicas para la interpolación y extensión de la precipitación en condiciones de montaña.
- El estudio de nuevas técnicas en la estimación de la altura y volumen glaciar.
- La evaluación de los cambios en las demandas agrícolas y poblacionales actuales y futuras de Quillcayhuanca y la cuenca del río Santa.
- La influencia de la cobertura del suelo como elemento de almacenamiento de agua en reemplazo de los glaciares.
- La caracterización e identificación de masas de agua subterránea
- El diseño y evaluación de medidas de gestión estructurales y no estructurales
- La optimización de las demandas.

7 BIBLIOGRAFÍA

- Ahmed, Kazi Farzan, Guiling Wang, John Silander, Adam M. Wilson, Jenica M. Allen, Radley Horton, y Richard Anyah. 2013. "Statistical downscaling and bias correction of climate model outputs for climate change impact assessment in the U.S. northeast". *Global and Planetary Change* 100. Elsevier B.V.: 320–32. doi:10.1016/j.gloplacha.2012.11.003.
- Alonso, F., y J.A. Palazón. 2008. "Modelos y modelización". Contenidos docentes abiertos, Universidad de Murcia. <http://ocw.um.es/ciencias/modelizacion-de-sistemas-ambientales/material-de-clase-1/msa-cap-04.pdf>.
- ANA. 2010. "Inventario de glaciares de la Cordillera Blanca". Huaraz.
- Astorayme, Miguel, Javier García, Wilson Suarez, Oscar Felipe, Christian Huggel, y Walter Molina. 2015. "Modelización hidrológica con un enfoque semidistribuido en la cuenca del río Chillón, Perú". *Revista Peruana Geo Atmosférica RGPA* 4: 109–24. http://www.senamhi.gob.pe/rpga/pdf/2015_vol04/paper8.pdf.
- Bahr, David B., Mark F. Meier, y Scott D. Peckham. 1997. "The physical basis of glacier volume-area scaling". *Journal of Geophysical Research: Solid Earth* 102 (B9): 20355–62. doi:10.1029/97JB01696.
- Burns, Patrick, y Anne Nolin. 2014. "Using atmospherically-corrected Landsat imagery to measure glacier area change in the Cordillera Blanca, Peru from 1987 to 2010". *Remote Sensing of Environment* 140: 165–78. doi:10.1016/j.rse.2013.08.026.
- Buytaert, Wouter, Rolando Celleri, Patrick Willems, Bert De Bièvre, y Guido Wyseure. 2006. "Spatial and temporal rainfall variability in mountainous areas: A case study from the south Ecuadorian Andes". *Journal of Hydrology* 329 (3): 413–21. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.02.031.
- Carey, Mark, Christian Huggel, Jeffrey Bury, César Portocarrero, y Wilfried Haerberli. 2011. "An integrated socio-environmental framework for glacier hazard management and climate change adaptation: lessons from Lake 513, Cordillera Blanca, Peru". *Climatic Change* 112 (3–4): 733–67. doi:10.1007/s10584-011-0249-8.
- Chávez Torres, Angela del Rocío. 2016. "Modelos hidrológicos para la generación de caudales diarios en las cuencas de los ríos Pisco y San Juan - Ica". *Universidad Nacional Agraria La Molina*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Chevallier, Pierre, Bernard Pouyaud, Wilson Suarez, y Thomas Condom. 2011. "Climate change threats to environment in the tropical Andes: glaciers and water resources". *Regional Environmental Change* 11 (S1). Springer-Verlag: 179–87. doi:10.1007/s10113-010-0177-6.
- Collado, Jaime. 1988. "Estimación óptima de la precipitación media con el método Kriging". *Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, SARH* num. 3: 34–45. http://repositorio.imta.mx:8080/cenca-repositorio/bitstream/123456789/1222/1/RIH_023.pdf.

- Condom, T., M. Escobar, D. Purkey, J. C. Pouget, W. Suarez, C. Ramos, J. Apaestegui, M. Zapata, J. Gomez, y W. Vergara. 2011. "Modelling the hydrologic role of glaciers within a Water Evaluation and Planning System (WEAP): a case study in the Rio Santa watershed (Peru)". *Hydrology and Earth System Sciences Discussions* 8 (1). Copernicus GmbH: 869–916. doi:10.5194/hessd-8-869-2011.
- Condom, Thomas, Wilson Suarez, J Pouget, y P Le Goulven. 2009. "Technical report on glacier and high elevation wetlands model selection and parameterization". <https://www.mpl.ird.fr/divha/aguandes/peru/doc/technical-report-5-1-IRD-BM-en-v4.pdf>.
- Déqué, Michel. 2007. "Frequency of precipitation and temperature extremes over France in an anthropogenic scenario: Model results and statistical correction according to observed values". *Global and Planetary Change* 57 (1): 16–26. doi:10.1016/j.gloplacha.2006.11.030.
- Durán-Alarcón, Claudio, Caroline M. Gevaert, Cristian Mattar, Juan C. Jiménez-Muñoz, José J. Pasapera-Gonzales, José A. Sobrino, Yamina Silvia-Vidal, Octavio Fashé-Raymundo, Tulio W. Chavez-Espiritu, y Nelson Santillan-Portilla. 2015. "Recent trends on glacier area retreat over the group of Nevados Caullaraju-Pastoruri (Cordillera Blanca, Peru) using Landsat imagery". *Journal of South American Earth Sciences* 59 (abril): 19–26. doi:10.1016/j.jsames.2015.01.006.
- Francés, Félix, Jaime Ignacio Vélez, y Jorge Julián Vélez. 2007. "Split-parameter structure for the automatic calibration of distributed hydrological models". *Journal of Hydrology* 332 (1–2): 226–40. doi:10.1016/j.jhydrol.2006.06.032.
- Francou, Bernard, Bernard Pouyaud, Luis Maiscincho, y Alvaro Soruco. 2004. "Métodos de observación de glaciares en los Andes tropicales. Mediciones de terreno y procesamiento de datos." https://www.researchgate.net/profile/Bernard_Pouyaud/publication/282171220_Metodos_de_observacion_de_glaciares_en_los_Andes_tropicales_mediciones_de_terreno_y_procesamiento_de_datos_version-1_2004/links/561ba9b808ae78721fa0f8ad.pdf.
- García Hernández, Javier, Javier Paredes Arquilloa, A. Foehn, y B. Roquier. 2016. "Rs Minerve - Technical Manual v2.7". Switzerland: RS MINERVE Group.
- Hall, Dorothy K., y George A. Riggs. 2011. "Normalized-Difference Snow Index (NDSI)". En *Encyclopedia of snow, ice and glaciers*, 779–80. Springer Netherlands. doi:10.1007/978-90-481-2642-2_376.
- Hock, Regine. 2003. "Temperature index melt modelling in mountain areas". *Journal of Hydrology* 282 (1–4): 104–15. doi:10.1016/S0022-1694(03)00257-9.
- . 2005. "Glacier melt: a review of processes and their modelling". *Progress in Physical Geography* 29 (3). Sage Publications/Sage CA: Thousand Oaks, CA: 362–91. doi:10.1191/0309133305pp453ra.
- INDECI. 2002. "Plan de prevención ante desastres: usos del suelo y medidas de mitigación ciudad de Huaraz". Huaraz. http://www.munihuaraz.gob.pe/publica/Plan_preven_i.pdf.

- INEI. 2015. "Estado de la población peruana 2015". https://www.inei.gob.pe/media/MenuRecursivo/publicaciones_digitales/Est/Lib1251/Libro.pdf.
- IPCC. 2013. *Cambio Climático 2013 Bases Físicas Resumen para responsables de políticas, resumen técnico y preguntas frecuentes*. Editado por Thomas F. Stocker, Dahe Qin, Gian-Kasper Plattner, Melinda Tignor, y Alexander Nauels. OMM PNUMA. http://www.ipcc.ch/pdf/assessment-report/ar5/wg1/WG1AR5_SummaryVolume_FINAL_SPANISH.pdf.
- Izquierdo, T, y Alvaro Márquez. 2006. "Comparación de métodos de interpolación para la realización de mapas de precipitación para el acuífero de Icod-Cañadas (Tenerife, Islas Canarias)". *Geogaceta*, ISSN 0213-683X, Nº. 40, 2006, págs. 307-310, núm. 40. Sociedad Geológica de España: 307–10.
- Juen, Irmgard. 2015. "Glacier mass balance and runoff in the tropical Cordillera Blanca, Perú." University of Innsbruck. doi:10.13140/RG.2.1.4885.5520.
- Kalnay, E., M. Kanamitsu, R. Kistler, W. Collins, D. Deaven, L. Gandin, M. Iredell, et al. 1996. "The NCEP/NCAR 40-Year Reanalysis Project". *Bulletin of the American Meteorological Society* 77 (3): 437–71. doi:10.1175/1520-0477(1996)077<0437:TNYRP>2.0.CO;2.
- Kaser, Georg. 1999. "A review of the modern fluctuations of tropical glaciers". *Global and Planetary Change* 22 (1): 93–103. doi:10.1016/S0921-8181(99)00028-4.
- Kaser, Georg, y Henry Osmaston. 2002. *Tropical Glaciers. International Hydrology Series*. First. Cambridge: Cambridge University Press. doi:10.1029/2002EO000287.
- Klein, A. G., y B. L. Isacks. 1998. "Alpine glacial geomorphological studies in the central Andes using Landsat Thematic Mapper images". *Glacial Geology and Geomorphology*.
- Klemeš, V. 1986. "Operational testing of hydrological simulation models". *Hydrological Sciences Journal* 31 (1). Taylor & Francis Group: 13–24. doi:10.1080/02626668609491024.
- Legates, David R., y Gregory J. McCabe. 1999. "Evaluating the use of 'goodness-of-fit' Measures in hydrologic and hydroclimatic model validation". *Water Resources Research* 35 (1): 233–41. doi:10.1029/1998WR900018.
- Lemke, P, J Ren, R. B Alley, I Allison, J Carrasco, G Flato, y T Zhang. 2007. "Observations: changes in snow, ice and frozen ground". En *Climate Change 2007: The Physical Science Basis*, editado por S. Solomon, D Qin, M Manning, Z Chen, y M. Marquis. Cambridge, United Kingdom and New York, NY, USA: Cambridge Univ. Press.
- Linsbauer, A., F. Paul, y W. Haeberli. 2012. "Modeling glacier thickness distribution and bed topography over entire mountain ranges with glabtop: Application of a fast and robust approach". *Journal of Geophysical Research: Earth Surface* 117 (3): 1–17. doi:10.1029/2011JF002313.
- Lujano Laura, Efrain, Jesus David Sosa Sarmiento, Apolinario Lujano Laura, y Rene Lujano Laura. 2016. "Modelación hidrológica semidistribuida en la región hidrográfica del

- Titicaca: caso de estudio cuenca del río Ramis, Perú". *Revista Investigaciones Altoandinas*, ISSN 2306-8582, Vol. 18, N°. 4, 2016 (Ejemplar dedicado a: La Revista de Investigaciones Altoandinas - Journal of High Andean Research - Octubre a Diciembre), págs. 431-438 18 (4). Universidad Nacional del Altiplano Puno: 431–38.
- Marengo, Jose A., Sin Chan Chou, Gillian Kay, Lincoln M. Alves, José F. Pesquero, Wagner R. Soares, Daniel C. Santos, et al. 2012. "Development of regional future climate change scenarios in South America using the Eta CPTec/HadCM3 climate change projections: climatology and regional analyses for the Amazon, São Francisco and the Paraná River basins". *Climate Dynamics* 38 (9–10). Springer-Verlag: 1829–48. doi:10.1007/s00382-011-1155-5.
- MINAM. 2009. *Evaluación local integrada y estrategia de adaptación al cambio climático en el río Santa*. Lima, Perú: MINAM.
- Moriasi, D.N., J.G. Arnold, M.W. Van Liew, R.L. Binger, R.D. Harmel, y T.L. Veith. 2007. "Model evaluation guidelines for systematic quantification of accuracy in watershed simulations". *Transactions of the ASABE* 50 (3): 885–900. doi:10.13031/2013.23153.
- Morton, Adam, y Mauricio Suárez. 2001. "Kinds of models". En *Model validation: perspectives in hydrological science*, editado por Malcom Anderson y Paul Bates, 11–21.
- Ochoa, A., L. Pineda, P. Crespo, y P. Willems. 2014. "Evaluation of TRMM 3B42 precipitation estimates and WRF retrospective precipitation simulation over the Pacific–Andean region of Ecuador and Peru". *Hydrology and Earth System Sciences* 18 (8): 3179–93. doi:10.5194/hess-18-3179-2014.
- Olave, Patricio Eduardo. 2015. "Series Observadas Rellenadas". Universidad de Chile. <https://www.google.es/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=1&ved=0ahUKewjm2cKtyoPRAhWM8RQKHTR7BkQQFggaMAA&url=http%3A%2F%2Fdeposito.riochile.cl%2Fbitstream%2Fhandle%2F2250%2F132638%2FGeneracion-de-montos-diarios-de-precipitacion-a-partir-de-series....p>.
- Palacios, V. OL. 1986. "El uso de modelos en irrigación y áreas afines". *Terra* 4: 41–49.
- Paul, Frank, y Andreas Linsbauer. 2012. "Modeling of glacier bed topography from glacier outlines, central branch lines, and a DEM". *International Journal of Geographical Information Science*, 1–18. doi:10.1080/13658816.2011.627859.
- Ponce, Victor Miguel. 1989. *Engineering Hydrology*. New Jersey.
- Quesquén, A. 2008. "Propuesta de asignaciones de agua en bloque. Volúmenes anuales y mensuales, para la formalización de los derechos de uso de agua Cuenca Alto Santa en la comisión de regantes Quillcay". Lima.
- Rabatel, A., B. Francou, A. Soruco, J. Gomez, B. Cáceres, J. L. Ceballos, R. Basantes, et al. 2013. "Current State of Glaciers in the Tropical Andes: A Multi-Century Perspective on Glacier Evolution and Climate Change". *The Cryosphere* 7 (1). Copernicus GmbH: 81–102. doi:10.5194/tc-7-81-2013.
- Rau, Pedro, Thomas Condom, y Waldo Lavado. 2013. "Spatio-Temporal Analysis of

- monthly Temperature in the Mountainous Regions of Peru. An approach for NCEP NCAR Reanalysis data correction.” doi:10.13140/2.1.4591.9522.
- Schaefli, B., B. Hingray, M. Niggli, y A. Musy. 2005. “A conceptual glacio-hydrological model for high mountainous catchments”. *Hydrology and Earth System Sciences* 9 (1/2). Copernicus GmbH: 95–109. doi:10.5194/hess-9-95-2005.
- Schaefli, Bettina. 2005. “Quantification of modelling uncertainties in climate change impact studies on water resources”. EPFL. doi:10.5075/EPFL-THESIS-3225.
- Schauwecker, S., M. Rohrer, D. Acuña, A. Cochachin, L. Dávila, H. Frey, C. Giráldez, et al. 2014. “Climate trends and glacier retreat in the Cordillera Blanca, Peru, revisited”. *Global and Planetary Change* 119 (agosto): 85–97. doi:10.1016/j.gloplacha.2014.05.005.
- Schwarb, M., D. Acuña, Th. Konzelmann, M. Rohrer, N. Salzmann, B. Serpa Lopez, y E. Silvestre. 2011. “A data portal for regional climatic trend analysis in a Peruvian High Andes region”. *Advances in Science and Research* 6 (1). Copernicus GmbH: 219–26. doi:10.5194/asr-6-219-2011.
- SENAMHI. 2009. *Escenarios climáticos en la cuenca del río Santa para el año 2030 - Resumen Ejecutivo*. Lima, Perú: Ministerio del Ambiente Perú.
- — —. 2015. “Evolución de la cobertura glaciar de las cuencas Chillón, Rímac, Lurin y parte alta del Mantaro”. Lima. http://www.senamhi.gob.pe/pdf/estudios/hidro_2015_Evo_cob_gla_cue_Chi_Rim_Lur_par_alt_Man.pdf.
- Suarez, Wilson, Pierre Chevallier, Bernard Pouyaud, y Paulina Lopez. 2008. “Modelling the water balance in the glacierized Parón Lake basin (White Cordillera, Peru)”. *Hydrological Sciences–Journal–des Sciences Hydrologiques* 53 (1).
- Suarez, Wilson, Nicolás Macedo, Nilton Montoya, Santos Arias, Simone Schauwecker, Christian Huggel, Mario Rohrer, y Thomas Condom. 2015. “Balance energético neto (2012-2014) y evolución temporal del nevado Quisoquipina en la región de Cusco (1990-2010)”. *Revista Peruana Geo-Atmosferica* 4 (enero). Servicio Nacional de Meteorología e Hidrología del Perú (SENAMHI): 80–92. http://www.zora.uzh.ch/118200/1/2015_suarez_estacion_quisoquipina_eb_rpga_15.pdf.
- Tarazona, E. 2008. “Estudio de conformación de bloques de riego para la formalización de derechos de uso de agua en el valle alto Santa sector de riego Huaraz”. Huaraz.
- Teutschbein, C., y J. Seibert. 2013. “Is bias correction of regional climate model (RCM) simulations possible for non-stationary conditions”. *Hydrology and Earth System Sciences* 17 (12): 5061–77. doi:10.5194/hess-17-5061-2013.
- Teutschbein, Claudia, y Jan Seibert. 2012. “Bias correction of regional climate model simulations for hydrological climate-change impact studies: Review and evaluation of different methods”. *Journal of Hydrology* 456–457. Elsevier B.V.: 12–29. doi:10.1016/j.jhydrol.2012.05.052.
- Vivienda. 2006. *Reglamento Nacional de Edificaciones*. Lima, Perú: Ministerio de

Vivienda - Perú. <http://www.urbanistasperu.org/rne/pdf/Reglamento Nacional de Edificaciones.pdf>.

Vuille, Mathias, Bernard Francou, Patrick Wagnon, Irmgard Juen, Georg Kaser, Bryan G. Mark, y Raymond S. Bradley. 2008. "Climate change and tropical Andean glaciers: Past, present and future". *Earth-Science Reviews* 89 (3–4): 79–96. doi:10.1016/j.earscirev.2008.04.002.

Watts, G. 1997. "Hydrological modelling in practice". En *Contemporary Hydrology*, editado por R. L. Wilby, 151–93.