

MODELO DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA DE QUILLCAY



Esta publicación forma parte de la Serie "Notas Técnicas sobre Cambio Climático", cuyo objetivo es hacer llegar a un público más amplio los resultados de los estudios, consultorías y sistematizaciones de la Dirección General de Cambio Climático, Desertificación y Recursos Hídricos del Ministerio del Ambiente.

Elaborado por:

Denny Rivas

Amanda Cuéllar

Daene C. McKinney

CENTER FOR RESEARCH IN WATER RESOURCES

Bureau of Engineering Research

Texas University at Austin

El documento original se encuentra disponible en línea en

<http://www.crwr.utexas.edu/online.shtml>

Huaraz, marzo de 2014

Impreso en Corporación Globalmark

Esta publicación es posible gracias a la cooperación de los proyectos:

Construyendo capacidades científicas, sociales e institucionales para el manejo y reducción del riesgo de avalanchas de lagos glaciares en la Cordillera Blanca, Perú (HIMAP / TMI)

Implementación de medidas de adaptación al cambio climático en la subcuenca del río Quillcay (MINAM / BID)

AVISO LEGAL

Las opiniones de el/los autor/es vertidas en esta publicación no reflejan necesariamente las opiniones de la Agencia de los Estados Unidos para el Desarrollo Internacional o del gobierno de los Estados Unidos.

MODELO DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA DE QUILLCAY

Introducción	2
Metodología: construcción de la estructura del modelo	3
Descripción general	3
Componentes de la demanda	5
Demanda de agua de riego	5
Demanda de agua potable	6
Componentes de abastecimiento de agua	7
Precipitación	7
Volúmenes de las lagunas	8
Deshielo de los glaciares	9
Flujo y almacenamiento de aguas subterráneas	9
Resultados y discusión	10
Simulación de la acumulación del agua de lagunas: un indicador de los resultados a escala de GRACE	10
Caudal y demanda	11
Demandas insatisfechas	12
Conclusiones	12
Referencias	13

INTRODUCCIÓN

En muchas áreas del mundo, las capas de nieve o la acumulación glacial durante la temporada de invierno sirven como reservorios de agua, proporcionando un flujo constante de este elemento a las comunidades situadas aguas abajo durante los meses secos. En las regiones altoandinas, durante la temporada lluviosa los glaciares almacenan agua en forma de hielo que se descongela en la temporada más cálida y seca. Sin embargo, desde el final de la Pequeña Edad de Hielo, los glaciares andinos han venido retrocediendo de manera sostenida (con unas pocas excepciones al expandirse por un año o dos algunos glaciares) (Rabatel et al., 2013). A pesar de que inicialmente el retroceso de los glaciares resulta en mayores caudales en la cuenca río abajo, el almacenamiento y el flujo del agua durante la temporada seca eventualmente disminuirán, volviéndose más variables o desapareciendo del todo. Además del

retroceso de los glaciares, una tendencia que existía inclusive antes del inicio del cambio climático, los cambios esperados en los patrones climatológicos como consecuencia del cambio climático global amenazan aún más los recursos hídricos relacionados a los glaciares.

Estos cambios continuos e inciertos en la disponibilidad del agua plantean desafíos en cuanto a la gestión adaptativa del agua. Las prácticas de gestión del agua y los procesos de toma de decisiones son más complejos cuando se intenta sostener el desarrollo social y económico en cuencas glaciares donde, en un futuro, el agua pueda escasear. Las políticas de una gestión eficaz del agua demandan que los tomadores de decisiones entiendan los impactos potenciales de acciones y regulaciones en un sistema de cuenca. Así, las brechas en

la información limitan la capacidad de responder y adaptarse al cambio climático y a su impacto en los recursos hídricos.

A pesar de un avance importante en la comprensión de los complejos procesos físicos que impulsan el retroceso de los glaciares y la interacción con otros componentes del ciclo hidrológico, existe una carencia de herramientas y de modelos analíticos para guiar el proceso de toma de decisiones. Estos modelos deben ser lo suficientemente simples para definir y evaluar múltiples escenarios de oferta y demanda, pero lo suficientemente robustos para representar las dinámicas hidrológicas subyacentes con un mínimo de datos disponibles. Este informe presenta la primera versión de un modelo de evaluación del agua aplicado al sistema hídrico de Quillcay, una cuenca glaciar ubicada en la Cordillera

Blanca en Perú. El modelo es desarrollado en la plataforma WEAP [Water Evaluation and Planning System (Sistema de Evaluación y Planeamiento del Agua)] (SEI, 2007) y ofrece una nueva forma de incorporar y validar datos derivados de satélites de acceso libre para analizar sistemas de cuencas glaciares.

El modelo representa una versión simplificada de la dinámica actual de oferta y demanda en la subcuenca de Quillcay durante el periodo 2003-2012, que incluye múltiples demandas de los usuarios del agua (urbanos y rurales) de toda la cuenca. Igualmente, el modelo constituye un entorno que puede trabajarse a escala para estimular más escenarios alternativos de asignación de agua, cambios físicos en toda la cuenca por el desarrollo de infraestructura, o respuestas potenciales del sistema hídrico a las variaciones climatológicas.

METODOLOGÍA: CONSTRUCCIÓN DE LA ESTRUCTURA DEL MODELO

Descripción general

La subcuenca de Quillcay alberga un complejo conjunto de interacciones hidrológicas, generadas de manera natural y artificial: acumulación y remoción de glaciares en la cabecera de cuenca, precipitación-escorrentía en toda la cuenca, evapotranspiración de vegetación natural y cultivada, almacenamiento de la humedad del suelo, flujo subterráneo y captaciones, y retornos de agua agrícolas y urbanos en las partes bajas de la cuenca. El modelo WEAP desarrollado en este informe simplifica el sistema hídrico Quillcay para presentar de manera razonable estas interacciones hidrológicas utilizando la cantidad mínima de datos que estén disponibles.

La Figura 1 muestra la estructura simplificada del modelo WEAP. Los ríos Paria y Auqui dominan el sistema de drenaje de la subcuenca del Quillcay. A pesar de que el río Quillcay representa el mayor caudal en la cuenca, su recorrido es corto y todas las captaciones mayores, con fines urbanos o de riego, se encuentran ubicadas aguas arriba en las microcuencas de Paria y Auqui.

En la cabecera de cuenca, los glaciares constituyen el principal almacenamiento y suministro de agua. En la estructura WEAP aquí implementada, los glaciares

están representados por las zonas altas de las cuencas, cuyas descargas de agua de deshielo (escorrentía) alimentan a todas las lagunas glaciares localizadas aguas abajo. Esta representación rige la interacción entre los glaciares y las lagunas en el modelo. Asimismo, las lagunas glaciares proporcionan los aportes de agua a los ríos o arroyos de primer orden.

La red hidrográfica en su totalidad se encuentra formada por cuatro ríos de bajo orden en la cuenca alta (Q. Cojup, Q. Cuchillacocha, Q. Cayesh y Q. Shallap) y tres ríos de orden superior en la cuenca baja (ríos Paria, Auqui y Quillcay). En la red fluvial, cada punto de desviación natural o artificial está asociado con un área individual de captación (puntos de la cuenca en la Figura 1). Las captaciones son las unidades utilizadas en el modelo para transformar la precipitación en escorrentía, aplicando el método simplificado del coeficiente de requerimientos de cultivo.

La demanda del modelo consiste en diez bocatomas de agua (puntos de extracción): dos bocatomas de agua potable (Yarush y Paria) y dos bocatomas de agua de riego (BC01 y BC02) en la microcuenca del río Paria; y, una bocatoma de agua potable y cinco bocatomas de agua de riego en la microcuenca del río Auqui.

Componentes de la demanda

Demanda de riego

En 2008, el PROFODUA (Programa Extraordinario de Formalización de Derechos de Uso de Agua del Instituto Nacional de Recursos Naturales), estimó las demandas de agua en la subcuenca de Quillcay (Quesquén, 2008) como parte de un esfuerzo a gran escala para cuantificar y regular prácticas sostenibles de consumo del agua en la zona alta de la cuenca del río Santa. La demanda agrícola en la subcuenca de Quillcay consiste en siete comités de riego, que están a cargo de

gestionar la asignación de agua a todos los usuarios del agua dentro de las áreas jurisdiccionales. Las áreas jurisdiccionales son llamadas bloques de riego y fueron definidas por el PROFODUA. Cada comité gestiona un bloque de riego, a excepción del comité de riego Cochapampa-Churup que gestiona dos bloques de riego. La distribución de los comités y los bloques se presenta en la Tabla 1.

Tabla 1. Comités de riego y bloques en la subcuenca de Quillcay (Quesquén, 2008, tabla 3.5.1, p. 24)

Comité de riego	Bloque de riego		Área agrícola			
	Código	Nombre	Área total		Área irrigada	
			ha	%	ha	%
Cojup	BC02	Cojup	844.85	20.32	827.67	20.69
Nueva Florida	BC02	Nueva Florida	19.43	0.47	19.43	0.48
Cochapampa-Churup	BC03	Churup	196.58	4.73	194.06	4.85
	BC04	Cochapampa Pitec	299.93	7.21	263.07	6.58
Paquishca-Querupampa	BC05	Paquishca	45.49	1.09	43.23	1.08
Auqui Tacllan	BC06	Auqui Tacllan	124.53	3.00	120.02	3.00
Shallap-Huapish-Toclla	BC07	Shallap-Huapish-Toclla	2,613.95	62.87	2,519.57	62.99
Shaurama	BC08	Shaurama	13.114	0.32	13.11	0.33
TOTAL			4,157.87	100	4,000.17	100

El PROFODUA determinó los bloques de riego usando criterios funcionales para juntar múltiples usuarios como, por ejemplo, fuentes comunes de agua e infraestructura hidráulica, áreas de bloques o cantidad de usuarios. El bloque más grande, en términos de área irrigada y demanda de agua, es el bloque BC07 (2613.95 ha) cuya fuente de agua es Q. Shallap (Figura 1), mientras que el bloque más pequeño es el BC08, el cual depende completamente de fuentes de agua subterráneas (manantiales) y no ha sido incluido en este modelo.

El estudio sobre el uso de agua para la subcuenca de Quillcay del PROFODUA adoptó el procedimiento recomendado por la FAO (Allen et al., 1998) y el software CropWat para estimar la demanda agrícola de agua. El método estima la evapotranspiración potencial

(ET_o) basada en los datos meteorológicos y los coeficientes de los cultivos de temporada (K_c) para calcular los requerimientos hídricos netos de los cultivos. Las demandas de agua resultan de sustraer la precipitación efectiva de los requerimientos de agua y de compensar la eficiencia de riego (alrededor de 35% en este caso). La Tabla 2 presenta las demandas de agua estimadas por el PROFODUA (Quesquén, 2008). El modelo WEAP mantiene constantes estos índices promedio de la demanda durante todo el periodo de simulación (2003-2012) asignando la demanda correspondiente a cada nodo de riego en la estructura WEAP (nodos BC en la Figura 1).

Los patrones de asignación de agua propuestos por el PROFODUA sugieren que la demanda de agua para los bloques BC03 y BC07 no fue satisfecha en diciembre.

Tabla 2. Demandas de agua de riego en la subcuenca de Quillcay (Quesqué, 2008).

Mes	Demanda de agua de riego por bloque (miles m ³ /mes)							
	BC01	BC02	BC03	BC04	BC05	BC06	BC07	BC08
Enero	1,118.77	26.27	262.31	355.60	53.84	149.48	3,137.92	16.33
Febrero	1,114.99	26.18	261.43	354.39	55.69	154.60	3,245.54	16.89
Marzo	1,003.19	23.55	235.21	318.86	49.26	136.77	2,871.17	14.94
Abril	899.76	21.12	210.96	285.98	53.76	149.26	3,133.31	16.30
Mayo	627.73	14.74	147.18	199.52	34.64	96.17	2,018.98	10.51
Junio	24.48	0.57	5.74	7.78	2.02	5.61	117.83	0.61
Julio	28.11	0.66	6.59	8.94	2.36	6.55	137.47	0.72
Agosto	26.60	0.62	6.24	8.46	2.33	6.48	6.48	0.71
Setiembre	40.44	0.95	9.48	12.85	1.87	5.18	108.85	0.57
Octubre	101.45	2.38	23.79	32.25	5.26	14.59	306.32	1.59
Noviembre	455.29	10.69	106.75	144.71	22.04	61.20	1,284.83	6.69
Diciembre	1,216.44	28.56	285.21	386.64	63.88	177.35	3,723.03	19.37
TOTAL	6,657.25	156.29	1,560.89	2,115.98	346.95	963.24	20,091.73	105.23

Los resultados del PROFODUA implican que las demandas de agua en ambos bloques de riego no son sostenibles bajo las actuales condiciones de abastecimiento de agua. Este informe incorpora demandas completas de agua en lugar de índices de asignación de agua sugeridos por el PROFODUA y usa un caudal de retorno del 65% de las entradas basado en la eficiencia de riego promedio en las zonas altas de la cuenca del río Santa.

Demanda municipal de agua

Las principales fuentes abastecedoras de agua para la ciudad de Huaraz son los ríos Paria y Auqui. Según la EPS (Empresa Prestadora de Servicios de Saneamiento) Chavín, que es la empresa que brinda servicios de agua

potable y alcantarillado en Huaraz, el abastecimiento de agua para Huaraz es distribuido casi por igual entre tres sistemas de distribución de agua: Yarush y Paria en la microcuenca del río Paria, y Coyllur en la microcuenca del río Auqui (EPS Chavín, 2006).

Este estudio actualiza las demandas de agua municipal estimadas en el Plan Maestro de Abastecimiento de Agua y Saneamiento (EPS, 2006) usando proyecciones de población del Instituto Nacional de Estadística e Informática (2003–2015). La Tabla 4 muestra las demandas anuales actualizadas para el periodo simulado en WEAP (2003–2012). La demanda total es distribuida entre los tres subsistemas (Yarush, Paria y Coyllur), basada en los porcentajes de capacidad de la Tabla 3.

Tabla 3. Capacidades actuales de los subsistemas de abastecimiento de agua municipal en la ciudad de Huaraz

Subsistema	Fuente / Río	Capacidad (l/s)		Porcentaje de capacidad (%)
		Bocatoma	Tratamiento del agua	
Yarush	Río Paria	200	120	34
Paria	Río Paria	120	120	34
Coyllur	Río Auqui	300	170 (110*)	32

* Aunque la capacidad total de la planta de tratamiento de agua del subsistema Coyllur es de 170 l/s, solo 110 l/s eran tratados en el periodo de la presentación del Plan Maestro de Abastecimiento de Agua de Huaraz (EPS Chavín, 2006).

Tabla 4. Demanda de agua municipal en la ciudad de Huaraz

Año	Población	Demanda total	Demanda de los subsistemas		
			Yarush	Paria	Coyllur
			(miles m ³ /año)		
2003	92,902	7,042.53	2,394.46	2,394.46	2,253.61
2004	95,471	7,196.79	2,446.91	2,446.91	2,302.97
2005	98,087	7,350.91	2,499.31	2,499.31	2,352.29
2006	100,743	7,519.28	2,556.55	2,556.55	2,406.17
2007	103,442	7,672.51	2,608.65	2,608.65	2,455.20
2008	106,189	7,824.25	2,660.25	2,660.25	2,503.76
2009	108,990	8,127.50	2,763.35	2,763.35	2,600.80
2010	111,852	8,449.00	2,872.66	2,872.66	2,703.68

La eficiencia del sistema municipal es de aproximadamente el 76%, de acuerdo con las estimaciones de la EPS Chavín, lo que refleja la cantidad de agua consumida de manera efectiva por los usuarios. El restante 24% se pierde en el sistema de distribución. Ninguna fracción del agua potable regresa al sistema de la subcuenca de Quillcay en forma de aguas residuales. Los caudales de retorno descargan aguas abajo, en el río Santa, fuera del dominio tanto de este modelo como de la subcuenca de Quillcay.

Componentes del abastecimiento de agua

Un modelo simple de precipitación-escorrentía es usado en WEAP. Estamos asumiendo que toda la lluvia en la cuenca llegará al sistema fluvial (áreas de captación impermeables) y las pérdidas de evapotranspiración son generalmente descuidadas, a excepción del índice de evapotranspiración representado en la definición de las demandas de riego. Los aportes de suministro de agua para el modelo WEAP son (1) el influjo hacia lagunas glaciares debido al deshielo de los glaciares e (2) el influjo hacia los ríos debido a escorrentía directa de las precipitaciones. El aporte de base a los caudales se fundamenta en un método del índice del caudal base, constante en espacio y tiempo, el mismo que es calibrado de manera que los caudales promedio esperados en los ríos Paria y Auqui se cumplan.

Precipitación

Las principales fuentes de datos de precipitación usadas en el modelo WEAP son el dataset del Global Precipitation Climatology Centre – GPCC (Centro Mundial de la Climatología de las Precipitaciones, en español) [NCAR – National Center for Atmospheric Research (Centro Nacional para la Investigación Atmosférica)] y datos derivados del radar del Tropical and Rainfall Measuring Mission – TRMM (Misión de Medición de Lluvias Tropicales, en español) de la NASA. Ambas fuentes se comparan en la Figura 2 usando las estaciones de tierra en un periodo común (estaciones meteorológicas de Huaraz y Querococha).

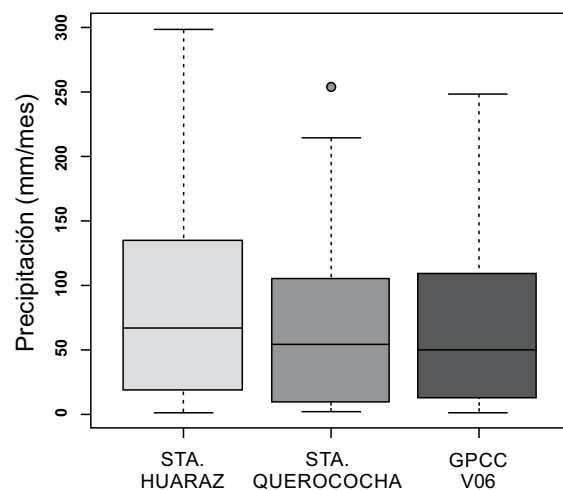


Figura 2. Diagrama de caja de series temporales de precipitaciones (1980-1999)

Volúmenes de las lagunas

No existen datos históricos de la evolución del volumen de las lagunas glaciares en la subcuenca de Quillcay, únicamente mediciones batimétricas aisladas realizadas por la Unidad de Glaciología y Recursos Hídricos en las lagunas Palcacocha (2009), Tullparaju (2011), Cuchillacocha (2005) y Shallap (2004). Las series temporales de volúmenes son usadas para calibrar los parámetros del modelo en la cabecera de cuenca donde ocurre la interacción entre el glaciar y la laguna. A manera de compensar la falta de datos, se emplean estimaciones indirectas derivadas de fuentes satelitales para construir series temporales de volúmenes parciales desde agosto 2000 a diciembre 2012 (25 estimaciones mensuales).

Los pasos del proceso seguido son: (1) creación de un modelo tridimensional de cada laguna a fin de estimar las curvas área-volumen para cada laguna o usar directamente las curvas de elevación-área-volumen proporcionadas por la Unidad de Glaciología, (2) delineación de los límites de las lagunas para cada periodo de tiempo cuando se encuentren disponibles imágenes satelitales; y, (3) cálculo de series temporales de zonas de lagunas y transformación de éstas en volumen usando las curvas área-volumen.

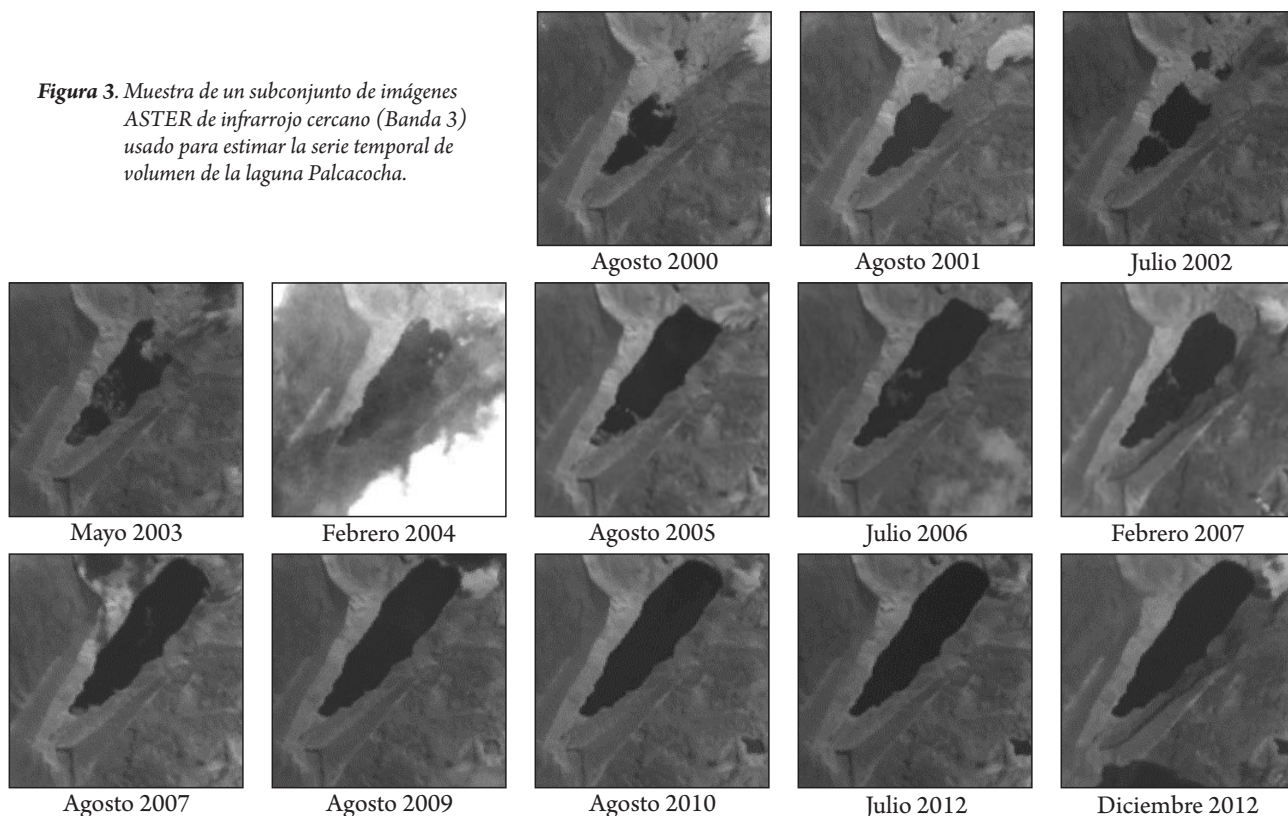
Los datos del Advanced Spaceborne Thermal Emission and Reflection Radiometer - ASTER (Radiómetro Avanzado de Emisión y Reflexión Térmica Transportado por el Espacio, en español) proporcionan resolución especial intermedia (15 m), alta frecuencia (varios meses por año) e imágenes de alta resolución radiométrica

(METI - Ministerio de Economía, Comercio e Industria de Japón, 2009). La idoneidad de los datos del ASTER para realizar análisis de teledetección depende de la nubosidad que esté afectando cada escena. Seleccionamos 25 escenas con nubosidad baja o nula sobre las cuatro lagunas glaciares comprendidas en el modelo WEAP de Quillcay (para un ejemplo de la laguna Palcacocha, ver la Figura 3).

El agua tiene valores de reflectancia bastante bajos para las longitudes de onda en el espectro infrarrojo cercano (0.760 - 0.860 μm). Así, se prevé que la mayor parte de la radiación solar entrante sea absorbida por cuerpos de agua y por lo tanto, la radiación reflejada observada (medida por satélite) será muy baja (oscuro o negro representado en una escala de grises), como se muestra en la Figura 3 donde presentamos un subconjunto de imágenes ASTER de infrarrojo cercano (Banda 3) para el periodo de modelación.

El error de estimación del área, inherente a la resolución de las imágenes (15 m), depende de la desviación entre el perímetro digitalizado y el límite real de la laguna (± 7.5 m o medio pixel). Las estimaciones son también susceptibles a errores humanos cometidos por el usuario responsable de digitalizar los límites de la laguna. Nosotros cuantificamos exclusivamente el error de resolución, el mismo que varía dependiendo del área de la laguna y de la pendiente de la curva área-volumen. El error total oscila entre 0.2 y 1.2 millones de m^3 , para estimaciones de volúmenes bajos y altos en el caso de la laguna Palcacocha. Se aplicó el mismo procedimiento para las lagunas Tullparaju, Cuchillacocha y Shallap.

Figura 3. Muestra de un subconjunto de imágenes ASTER de infrarrojo cercano (Banda 3) usado para estimar la serie temporal de volumen de la laguna Palcacocha.



Deshielo de los glaciares

El modelo WEAP ha sido configurado para estimar la velocidad de deshielo de los glaciares en la subcuenca de Quillcay usando el dataset de GRACE de NASA como su principal insumo. Los dataset de GRACE brindan, mensualmente desde el 2003 al 2012, a escala mundial, estimaciones de cambios (ganancias o pérdidas) en la masa de agua por unidad de superficie. Estos cambios en la masa son expresados como cambios equivalentes en la profundidad del agua. A pesar de que el dataset de GRACE ha demostrado que cuantifica de manera precisa las variaciones en el almacenamiento de agua en cuencas grandes, la resolución gruesa ($1^\circ \times 1^\circ$) limita el uso directo de datos de GRACE para los análisis en cuencas pequeñas. Asimismo, GRACE captura la señal (cambios en el campo de gravedad) debido a cambios en el agua en todo el conjunto de procesos hidrológicos que ocurren en una cuenca (por ejemplo, escorrentía, flujo de aguas subterráneas, retención de humedad del suelo y deshielo de glaciares). La separación de estos componentes es un desafío a superar a fin de analizar una parte específica del proceso como el deshielo de los glaciares.

Los trabajos para reducir los datos GRACE a escalas más pequeñas se han centrado en aplicaciones para almacenamiento de agua subterránea usando medidas de aguas subterráneas y técnicas estadísticas para separar el efecto particular de los cambios en aguas subterráneas sobre la señal promedio de GRACE. Aquí adoptamos un enfoque similar. Aprovechando el vínculo inherente entre glaciares y lagunas glaciares, estimamos un factor de reducción para los datos GRACE calibrando un modelo simple de balance de masa dinámico de los glaciares en la subcuenca de Quillcay. El balance de masa simplificado es el siguiente:

$$\Delta S = A_c - A_t$$

donde ΔS es el cambio en la masa glaciar, A_c es la acumulación del glaciar y A_t es la ablación total del glaciar. Asumiendo que: (1) ΔS es igual a la profundi-

dad de agua equivalente de GRACE, (2) la única fuente de acumulación es la precipitación (del dataset de GPCC) y toda precipitación de agua contribuye a la acumulación de glaciares, y (3) el aporte de la sublimación a la ablación del glaciar es escasa, así es que la ablación es igual al deshielo, entonces la ecuación del balance de masa del glaciar es:

$$G = M - P$$

donde G es el cambio equivalente de profundidad del agua de GRACE (mm/mes), P es la precipitación (mm/mes) y M es el deshielo del glaciar (mm/mes). Se ha incluido un factor de reducción para modificar el término GRACE, como sigue:

$$M = P - f_d \cdot G$$

donde f_d es un factor constante para reducir GRACE, basado en condiciones locales hidrológicas observadas. Para resolver la ecuación, nosotros usamos la herramienta de estimación de parámetro (PEST) incluida en WEAP, un algoritmo de optimización que minimiza las diferencias entre una variable calculada y una observable cambiando los parámetros del modelo (factores de reducción de GRACE en este caso). Aquí, las variables observadas son los volúmenes de las lagunas glaciares derivadas de datos de batimetría y ASTER, explicados en la sección anterior.

Flujo y almacenamiento de aguas subterráneas

La versión actual del modelo WEAP de la subcuenca de Quillcay no incluye un modelo subterráneo (por ejemplo, “modelo de las 2 cubetas” o método MABIA). Las contribuciones subterráneas a los caudales son incluidas a través de un índice de caudales base, constantes en espacio y tiempo. El índice de caudales base es calibrado para cumplir con los caudales promedio previstos en los ríos Paria ($3.5 \text{ m}^3/\text{s}$) y Auqui ($7.5 \text{ m}^3/\text{s}$).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Simulación de almacenamiento de agua de las lagunas: un indicador de los resultados reducidos de GRACE

Las comparaciones entre volúmenes de almacenamiento observados y simulados en la subcuenca fueron usadas para evaluar el desempeño del modelo WEAP Quillcay en la reproducción de hidrología glaciar. Al usar los insumos hidrológicos calibrados (incluyendo un factor de reducción para profundidades de agua equivalentes, basadas en GRACE), el modelo deberá ser capaz de reproducir los volúmenes almacenados observados. La Figura 10 muestra gráficos comparativos entre los volúmenes simulados y observados para las 4 lagunas incluidas en el modelo (lagunas Palcacocha, Tullparaju, Cuchillacocha y Shallap).

Los resultados sugieren que un factor de reducción GRACE de 1.4 se traduce en una buena respuesta para incrementos monótonos (sin descensos) en los volúmenes de la laguna. Sin embargo, los resultados también sugieren que el modelo presenta serias limitaciones para adaptarse a los descensos en los volúmenes durante los meses de temporada seca. El uso de una mayor muestra de observaciones del volumen podría eliminar la limitación monótona, particularmente para el análisis de los patrones de comportamiento de la temporada seca.

Los datos de calibración (volumen de la laguna observado) son derivados de una muestra limitada de imágenes ASTER. Debido a que la mayoría de imágenes claras (sin nubes) corresponde a los meses de la temporada seca, la muestra de observación está inherentemente sesgada. El mejoramiento de la configuración de los escenarios de la estimación de parámetros PEST para distribuir de forma pareja las observaciones de los meses secos y húmedos puede eliminar la condición de sesgo en el modelo.

La tendencia general en la evolución del almacenamiento de agua de la laguna indica un comportamiento de crecimiento dinámico para la laguna Palcacocha, cuya capacidad de almacenamiento muestra incrementos significativos durante todo el periodo de simulación (2003-2012) debido al retroceso del glaciar. El estrecho contacto entre la lengua del glaciar y la superficie de la laguna favorece esa clase de comportamiento dinámico. A medida que el glaciar se retira, la laguna toma el lugar donde una vez estuvo el glaciar sólido. En contraste, las lagunas Cuchillacocha y Tullparaju muestran que éstas han alcanzado una condición de almacenamiento constante antes del inicio del periodo de simulación. No existe evidencia de cambios significativos en el almacenamiento de ambas lagunas en las imágenes o en los resultados del modelo WEAP.

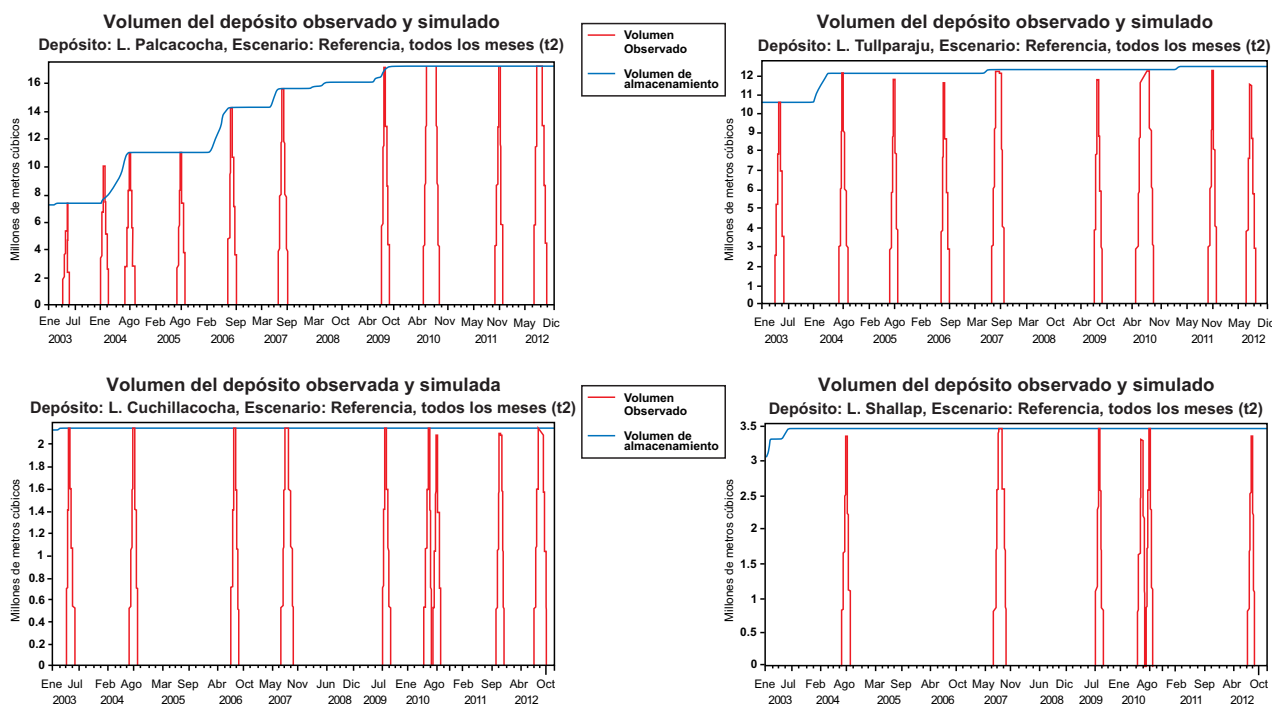


Figura 4. Volúmenes de almacenamiento simulados y observados de las lagunas en la subcuenca de Quillcay.

¹ Los valores de caudal promedio están indicados en el Plan Maestro para el Sistema de Abastecimiento de Agua y Saneamiento de Huaraz como el caudal promedio disponible en las secciones de los ríos donde se ubican las bocatomas de agua de Yarush y Coyllur.

Caudal y demanda

Existen datos limitados en los caudales de los ríos Paria y Auqui. Los récords históricos de la estación hidrológica de Huaraz van de 1970 a 1974, año en que la estación dejó de trabajar. La compañía de abastecimiento de agua y saneamiento informa que el flujo promedio es de 7.5 m³/s en el río Auqui y de 3.5 m³/s en el río Paria (EPS, 2006). Sin embargo, la distribución anual de los caudales es desconocida, así como el periodo de récords desde los cuales se estimaron los valores.

La Figura 5 presenta los caudales promedio mensuales de la simulación WEAP (2003-2012) para los ríos Paria y Auqui. Los caudales promedio generales difieren de aquellos informados por la EPS (2006). Los resultados representan los flujos calculados en las secciones de los ríos donde se encuentran ubicadas las bocatomas de Yarush (río Paria) y Coyllur (río Auqui). Los caudales modelados son 6% mayores en el río Auqui y 12% menores en el río Paria en comparación con los flujos observados.

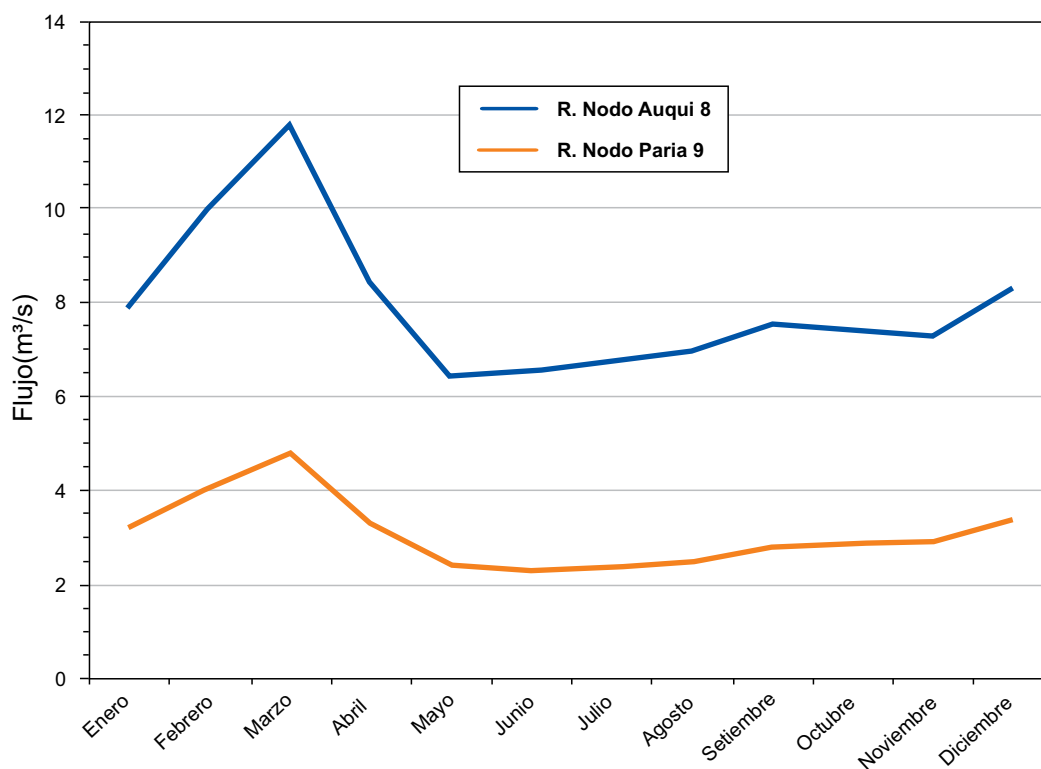


Figura 5. Caudales promedio mensuales en los ríos Auqui y Paria.

El modelo WEAP aplica un índice de flujo de base constante de 35x10⁻⁵ m³/s/ha para representar los aportes de los flujos de base a los caudales. El índice es ajustado para reducir las diferencias entre caudales de aquellos mostrados en la Tabla 5.

La mejora de la representación del flujo de base en el modelo podría aumentar la confianza en los resultados simulados. De igual manera, récords mayores de medidas de caudales mejorarán el desempeño del modelo para que represente de manera más precisa los caudales de los ríos en la subcuenca de Quillcay.

Tabla 5. Caudal aguas arriba simulado y observado de las bocatomas Yarush (río Paria) y Coyllur (río Auqui) en la subcuenca de Quillcay

Caudal	Caudal simulado (m ³ /s)			Caudal promedio observado (m ³ /s)
	Máximo	Mínimo	Promedio	
R. Auqui (Bocatoma Coyllur)	8.31	7.85	7.96	7.50
R. Paria (Bocatoma Yarush)	3.39	3.19	3.08	3.50

Demandas insatisfechas

El estudio del PROFODUA (Quesquén, 2008) sobre la asignación de los derechos del agua en la subcuenca de Quillcay indica que, en diciembre, los usuarios de la microcuenca de Auqui se encuentran expuestos a

condiciones de demandas insatisfechas (bloques de riego BC07 y BC03). Por otro lado, el modelo WEAP Quillcay desarrollado aquí estima una demanda insatisfecha potencial solo para el bloque de riego BC07 distribuido en enero, febrero, abril y diciembre (Figura 6).

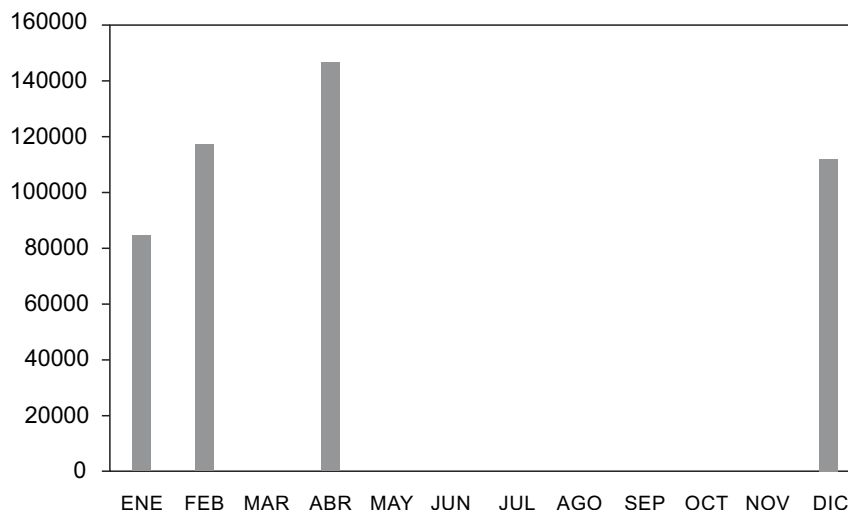


Figura 6. Demandas insatisfechas simuladas WEAP en la subcuenca de Quillcay (bloque de riego BC07).

CONCLUSIONES

El modelo WEAP desarrollado aquí cumple los dos objetivos de este estudio: (1) a pesar de la complejidad del proceso de modelación para esta cuenca glaciar, la falta de datos, la definición de aportes y los procedimientos de calibración, el modelo es una plataforma amigable que puede simular múltiples escenarios de uso del agua y las condiciones de las cuencas una vez que dichos escenarios son definidos por los actores o los tomadores de decisiones; y, (2) el modelo simula los procesos de distribución del agua que ocurren en la cuenca, representativos de condiciones a largo plazo en la misma.

Las limitaciones del modelo provienen de dos fuentes principales de error en el modelo hidrológico conceptual: (1) sobreestimación de la acumulación del glaciar debido a la precipitación y, (2) sobreestimación de la escorrentía debido a suposiciones acerca de áreas impermeables en la cuenca. Como resultado, los flujos aguas arriba (entre las lagunas y los primeros nodos de demanda) en el modelo, son mucho menores que los caudales reales. En cambio, la sobreestimación de la escorrentía afecta los flujos simulados aguas abajo, volviéndolos mayores a los valores previstos. No existen mediciones reales de caudales para comparar o para estimar la magnitud del error introducido por estas

suposiciones, excepto en el valor de caudales promedio en el Plan Maestro del Abastecimiento de Agua y Saneamiento de Huaraz (EPS, 2006). Récords mensuales de los caudales en por lo menos uno de los cursos de agua en la subcuenca de Quillcay ayudaría a incrementar la exactitud de los resultados.

La estimación de la velocidad de deshielo de los glaciares usando los datos GRACE es un enfoque innovador y brinda información que no está disponible en otras fuentes. Sin embargo, las suposiciones en cuanto a (1) la contribución total de la precipitación a la acumulación y, (2) el deshielo como único componente de ablación, podrían introducir otros errores en los resultados. Con datos adicionales, el modelo precipitación-escorrentía puede también ser mejorado al incluir un modelo subterráneo de las “2 cubetas” en WEAP para representar la infiltración y evapotranspiración en el sistema.

El modelo actual simula un periodo de tiempo histórico (2003-2012). Las proyecciones del clima futuro, abastecimiento del agua y demanda del agua deben ser estimadas fuera del modelo y luego introducidas como parámetros del modelo si deben simularse escenarios futuros.

REFERENCIAS

Allen, R. G., Pereira, L. S., Raes, D., & Smith, M. (1998). *Crop evapotranspiration - Guidelines for computing crop water requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Rome: FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations.

EPS Chavín. (2006). *Plan Maestro Optimizado 2006-2035*. Huaraz: EPS Chavín S.A.

METI/NASA/USGS. (2009). *ASTER Global DEM Validation - Summary Report*, Tech. rep., METI/ERSDAC, NASA/LPDAAC, USGS/EROS.

INEI - Instituto Nacional de Estadística e Informática, Perú. (2012). *Estimaciones y Proyecciones de Población Total por Sexo de las Principales Ciudades, 2000-2015*. Boletín Especial No. 23, Dirección Técnica de Demografía e Indicadores Sociales. Instituto Nacional de Estadística e Informática.

INEI - Instituto Nacional de Estadística e Informática. (2008). *Perfil Sociodemográfico del Perú. Censos Nacionales 2007: XI de Población y VI de Vivienda*. Instituto Nacional de Estadística e Informática, Fondo de Población de las Naciones.

NCAR - National Center for Atmospheric Research Staff. (2014). *The Climate Data Guide: GPCC Global Precipitation Climatology Centre*. Disponible en <https://climatedataguide.ucar.edu/climate-data/gpcc-global-precipitation-climatology-centre>. Accedido el 12 de febrero del 2014.

Rabatel et al. (2013). Current state of glaciers in the tropical Andes: a multi-century perspective on glacier evolution and climate change, *The Cryosphere*, 7, 81–102.

Quesquén, A. Q. (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*. Informe Final, Programa de Formalización de Derechos de Usos de Agua, PROFODUA – Fase II. Lima: Intendencia de Recursos Hídricos – Instituto Nacional de Recursos Naturales.

Stockholm Environment Institute - SEI. (2007). *Water evaluation and planning system, WEAP*. Boston: Stockholm Environment Institute.

NOTAS

MODELO DE RECURSOS HÍDRICOS DE LA SUBCUENCA DE QUILLCAY

