

SOCIEDAD CHILENA DE INGENIERÍA HIDRÁULICA
XXVI CONGRESO CHILENO DE INGENIERÍA HIDRÁULICA

**PROCESO DE DELIMITACIÓN HIDROLÓGICA E HIDROGEOLÓGICA DE LA
CUENCA TRANSFRONTERIZA DEL RÍO SILALA**

PEDRO SANZANA^{1,2,3}
JOSE FRANCISCO MUÑOZ^{1,2}
FRANCISCO SUAREZ^{1,2}
HERNAN ALCAYAGA⁴
MAGDALENA LAGOS¹
GONZALO YAÑEZ¹

RESUMEN

Una de las actividades clave en estudios hidrológicos e hidrogeológicos es la correcta definición de las fronteras del volumen de control para llevar a cabo balances hídricos. Los métodos estándar de delimitación automática de cuencas no tienen éxito en hoyas hidrográficas complejas. En el caso específico de la cuenca transfronteriza del río Silala (Chile-Bolivia), se identificaron los siguientes desafíos: *geomorfología compleja* (topografía con grandes extensiones de baja pendiente, divisorias de agua débilmente marcadas, planicies de inundación extensas y presencia de salares con afluentes endorreicos) e *hidrogeología compleja* (acuífero transfronterizo de gran extensión en el que el flujo regional tiene un rol fundamental sobre el flujo base en los cauces de cabecera del río Loa). Además de dichas complejidades físicas, se agregó un conflicto internacional entre Chile y Bolivia. El objetivo de este artículo es describir cómo se logró llevar a cabo con éxito la delimitación de la cuenca hidrológica e hidrogeológica. Como resultado del trabajo se pudo delimitar correctamente tanto la cuenca hidrográfica del río Silala con un total de 95.5 km² (límites topográficos) y la cuenca hidrológica con un total de 304.6 km² (límites hidrogeológicos). Los resultados reportados en el presente trabajo permiten entregar valiosos antecedentes para futuros planes de manejo de la cuenca del río Loa, considerando la estrecha dependencia subterránea que existe en las vertientes y afloramientos de las nacientes del río Loa, especialmente en la cuenca del río Silala.

¹ DICTUC, Unidad de Hidrogeología. 4860 Vicuña Mackenna Av., Santiago, Chile.

² DIHA-UC, Pontificia Universidad Católica de Chile.

³ CEAZA, Grupo de Hidrogeología, Centro Avanzado de Zonas Áridas, La Serena, Chile.

⁴ Escuela de Ingeniería en Obras Civiles, Universidad Diego Portales.

1. INTRODUCCIÓN

Es sabido que los métodos de delimitación automática de cuencas no tienen éxito en hoyas hidrográficas complejas. Las complicaciones deben a distintas razones: topografía plana (v. g.: desembocaduras de ríos cercanas al mar o grandes cuerpos de agua), alteraciones antrópicas en la red de drenaje (v. g., cuencas urbanas o periurbanas altamente intervenidas), cuencas ubicadas sobre acuíferos de gran extensión (v. g., cuencas del altiplano de los Andes Central, cuencas continentales del noroeste de Norteamérica (Shook y Pomeroy, 2011). En el caso específico de la cuenca transfronteriza del río Silala, región de Antofagasta (Chile) y Departamento de Potosí (Bolivia), se identificaron los siguientes desafíos:

- **Geomorfología compleja:** topografía con grandes extensiones de baja pendiente, divisorias de agua débilmente marcadas, planicies de inundación extensas y presencia de salares con afluentes endorreicos.
- **Hidrogeología compleja:** acuífero transfronterizo de gran extensión en el que el flujo regional tiene un rol importante en la presencia de flujo base en el cauce del río Loa.

Además de dichas complejidades físicas también se agregó un conflicto internacional entre Chile y Bolivia que impidió llevar a cabo trabajos de terreno de ambos equipos en forma conjunta en la totalidad del área de estudio.

El objetivo de este artículo es reflexionar sobre el proceso de delimitación de cuencas hidrológicas e hidrogeológicas y describir cómo se logró llevar a cabo con éxito la delimitación del área de recarga de la cuenca del río Silala. La importancia de contar con una *correcta definición de las fronteras del volumen de control del sistema* es porque corresponde a la información inicial base de todo balance hidrológico e hidrogeológico. A continuación, se describe un contexto general de la cuenca de estudio. Posteriormente se describen conceptos básicos y los procesos estándar de delimitación, automática y semiautomáticas, que han ganado terreno en cuencas estándar y de alta complejidad.

1.1 Área de Estudio: Cuenca transfronteriza del río Silala

El área de estudio se ubica aproximadamente a 100 km al noreste de Calama, Región de Antofagasta, Chile (Figura 1), y corresponde a uno de los afluentes de cabecera del río Loa (Muñoz et al., 2023). El área de estudio se encuentra en un sector extremadamente árido del Altiplano Andino. Más del 90% de las precipitaciones registradas ocurren en los meses de verano (enero, febrero y marzo) (Figura 1. Climograma) y se caracteriza por una alta variabilidad interanual influenciada por el fenómeno de El Niño - Oscilación del Sur (Muñoz et al., 2017). El cauce del río Silala nace en territorio boliviano y desemboca en territorio chileno. Es uno de los principales afluentes del río San Pedro en Inacaliri, que a su vez desemboca en el río Loa (Wheater et al., 2023). En la Tabla 1 se muestran los valores de áreas estimadas por distintos estudios en la cuenca del río Silala.

En Chile, debido a que los ríos en gran parte tienen corta extensión y alta pendiente, metodologías automáticas con uso de MEDs (Modelos de Elevación Digital) normalmente generan resultados satisfactorios (siempre que se apliquen bien las herramientas). Sin

embargo, en la zona de estudio de la parte alta del río Loa (el más extenso de Chile) se presentan complejidades adicionales, propias del sector Altiplánico.

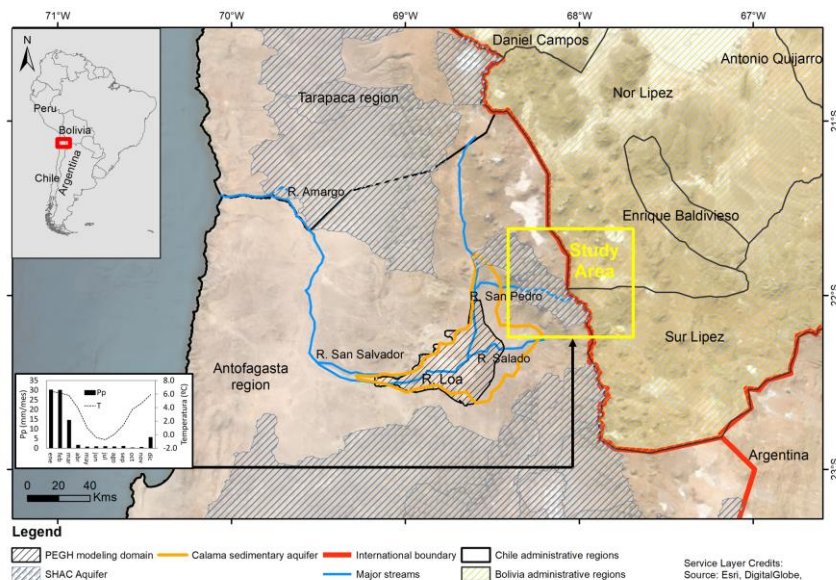


Figura 1.- Ubicación de la Zona de Estudio y Climograma Cuenca de Estudio
Fuente: a partir de Wheeler et al., (2023) y PEGH-Loa (DGA-ConPotencial, 2022).

Tabla 1.- Distintos valores de área de la cuenca del río Silala según diferentes fuentes

Estudio	DUCTEC*	DGA-PEGH-Loa (2020) adoptada a partir de DGA-DARH-CIREN (2015)
Delimitación	Cuenca topográfica	Cuenca topográfica
Área (km ²)	76	233.6

Nota: DARH-DGA, Departamento de Administración y Recursos Hídricos (DARH), Dirección General de Aguas (DGA).
DUCTEC

2. CONCEPTOS BÁSICOS

El proceso lluvia escorrentía en una cuenca es considerado un sistema abierto porque no toda la lluvia se convierte en escorrentía (existen procesos que generan salidas del sistema, por ejemplo: evaporación, infiltración, sublimación). Chow et al. (1988) define la cuenca como: una superficie de tierra que drena hacia una corriente en un lugar dado. La “divisoria de aguas” es una línea que separa la superficie de tierra cuyo drenaje fluye hacia un río dado de las superficies de tierra cuyos desagües corren hacia otros ríos. La frontera del sistema se dibuja alrededor de una cuenca, proyectando las divisorias de agua verticalmente hacia arriba y hacia abajo planos horizontales (Figura 2.a). Una vez que se tiene el volumen bien definido, la ecuación de continuidad integral para un flujo no permanente puede definirse como (Chow, 1988):

$$\frac{dS}{dt} = I(t) - Q(t) \quad \text{ec. 1}$$

Donde S es el almacenamiento de la cuenca, t es el tiempo, e $I(t)$ y $Q(t)$ son los flujos de entrada y salida de la cuenca, respectivamente (ver Figura 2.a). En caso de existir un

importante aporte de agua subterránea a los cursos superficiales, en forma de afloramiento y/o vertientes, el rol del acuífero debe ser considerado y estudiado en detalle, especialmente en sectores áridos e hiper áridos en los que el origen de la recarga puede tener una extensión mucho mayor a la cuenca hidrológica. Para definir las entradas de forma correcta se debe estudiar la extensión del acuífero y sus formaciones, por lo que los límites definidos verticalmente podrían desplazarse y no necesariamente estar alineados. En la Figura 2.b Sachse y Jacobs (2015) introducen el concepto de “cuenca topográfica” y “cuenca real”.

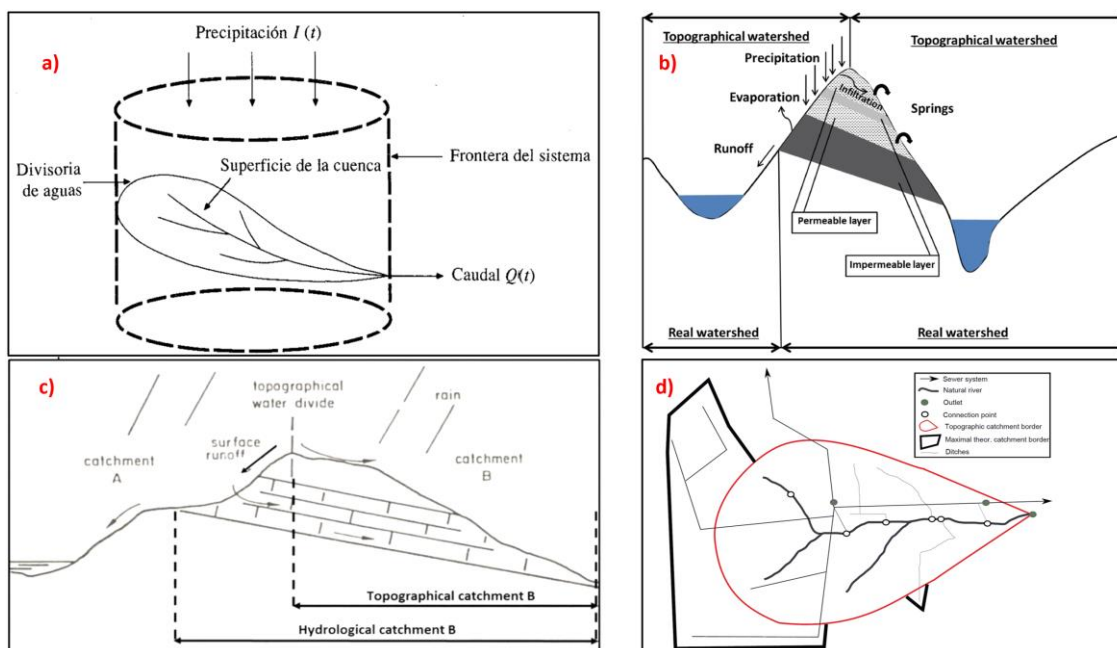


Figura 2.- Cuenca como un sistema hidrológico con límites bien definidos (a) (Chow, 1988). Cuenca topográfica (área de cuenca coincide con divisoria de agua) y Cuenca real (área de la cuenca es más extensa que la cuenca topográfica) con un acuífero de litología inclinada de gran extensión (Sachse y Jacob, 2015). Esquema de Cuenca Topográfica (cuenca A) y Cuenca Hidrológica (Cuenca B) (DHI, 2018). Esquema de Cuenca Topográfica y Cuenca Máxima Teórica (Jankowsky, 2011).

En los casos que la cuenca se desarrolle mayormente sobre roca de muy baja capacidad para transmitir agua, puede aplicarse sin problemas la aproximación del supuesto de la Figura 2a. Sin embargo, en caso de ser una formación permeable y de gran extensión es más adecuado que el sistema quede representado por el caso de la Figura 2b. Cobrará gran importancia la caracterización del acuífero para delimitar el área de entradas $I(t)$. Cabe mencionar que los límites de un sistema hidrológico no necesariamente podrían estar definidos por causas naturales, como la extensión de un acuífero regional, sino también, podrían intervenir causas antrópicas. Por ejemplo, por infraestructura hidráulica subterránea a escala de cuencas urbanas o periurbanas. En estos sistemas los límites también podrían estar alterados artificialmente y la cuenca topográfica no correspondería a un límite válido para la definición del volumen de control. Incluso se ha reportado que, bajo ciertos periodos de retorno altos, el límite espacial de cuencas periurbanas podría aumentar por cierta infraestructura que se vería sobrepasada. Shook y Pomeroy (2011) también han documentado, en llanuras del Oeste de Canadá, que los límites hidrológicos pueden estar asociados a la intensidad de las precipitaciones. Para lluvias de periodo de retorno pequeño la cuenca puede aportar en un área pequeña mientras que para periodos de retorno alto la cuenca aportante podría inundar y sobrepasar ciertas

divisoria de agua. Considerando los aspectos anteriores, conviene definir los siguientes conceptos básicos:

Cuenca topográfica/hidrográfica: se refiere a aquella cuenca en la que las divisorias de aguas definidas por las altas cumbres definen el volumen de control que drena por un punto de salida. Normalmente también se da el nombre de cuenca hidrográfica, por lo que para efectos de este estudio la cuenca topográfica e hidrológica corresponden a la misma unidad.

Cuenca hidrogeológica/hidrológica/extendida/real: se refiere al área completa de uno o varios acuíferos que reciben una recarga y la transforman en afloramientos en un punto del cauce de estudio. Por esta razón, en caso de que el acuífero posea una gran extensión el área de la cuenca hidrogeológica puede ser mayor que la cuenca topográfica. En caso contrario, que los depósitos aluviales o el acuífero quede limitado a sectores aledaños a la caja del río, el área puede ser menor que la topográfica.

Por último, ya distanciados desde el aspecto físico, vale la pena mencionar también un set de conceptos básicos relevantes de tipo jurídico administrativo con carácter internacional. En la Tabla 2 se muestra la clasificación, los instrumentos jurídicos y su posible implicancia entre los países implicados en la conservación y aprovechamiento del recurso superficial y/o subterráneo realizado por Vera (2020).

Tabla 2 diferentes conceptos relacionados con aguas transfronterizas compartidas

Concepto	Instrumento Jurídico-Artículo	Definición
Cuenca hidrográfica internacional	Reglas de Helsinki (1966) Regla Núm. 2	Zona geográfica que se extiende por el territorio de dos o más Estados y está demarcada por la línea divisoria de un sistema hidrográfico de aguas superficiales y freáticas que fluyen hacia una salida común.
Aguas transfronterizas	Convenio de la CEPE de 1992 (Convención de Helsinki) Artículo 1	Agua superficial es o freáticas que señalan, atraviesan o se encuentran situadas en las fronteras entre dos o más Estados.
Curso de agua internacional	Convención sobre el derecho de los usos de los cursos de agua internacional es para fines distintos a la navegación de 1997 Artículo 1	Sistema de aguas de superficie y subterránea que, en virtud de su relación física, constituyen un conjunto unitario y normalmente fluyen a una desembocadura común.
Acuífero transfronterizo	Resolución de la Asamblea General de Naciones Unidas sobre el derecho de los acuíferos transfronterizos A/ RES/63/ 1 24 de 2009 Artículo 2	Acuífero formación geológica permeable portadora de agua, situada sobre una capa menos permeable, y el agua contenida en la zona saturada de la formación. Sistema acuífero: una serie de dos o más acuíferos que están conectados hidráulicamente.

Fuente: Moran et al (2015)

3. DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROLOGICAS

3.1 Metodologías Automáticas basados en Modelos de Elevación Digital

Mediante el uso de Sistemas de Información Geográfica (SIG) y Modelos de Elevación Digital (MED) se han desarrollado múltiples métodos de delimitación automática. Estos métodos no son aplicables a todo tipo de cuencas, ni a todas las escalas, ya que existen limitaciones propias de cada una de las metodologías que impiden llevar a cabo el trabajo de forma automática. Los principales problemas están asociados topografías de baja pendiente en la que los mapas de dirección de flujo tienden a entregar resultados erróneos. Para el

proceso de extracción de la red de drenaje se debe dar un valor umbral de área acumulada aguas arriba, que determina el inicio de la red fluvial, que se puede describir como el punto en que el agua pasa desde flujo de ladera a flujo en la caja de río. Normalmente se obtiene este valor a partir del conocimiento de la zona de estudio en el que se puede utilizar red trazados por autoridades locales (Institutos Geográficos Militares, IGMs, u otras autoridades).

3.2 Metodologías Semiautomáticas: Uso de Modelos de Elevación Digital e Información de Infraestructura Hidráulica

En las zonas en las que no funcionan de forma satisfactoria las metodologías automáticas antes mencionadas se han propuesto nuevas metodologías. Los Modelos de Terreno Digital (MTDs) normalmente se utilizan con una grilla regular y pueden acomodarse con bastante facilidad a distintos terrenos. Sin embargo, con una representación tan regular, la elevación puede estar subestimada en las zonas más accidentadas y sobrestimada en las zonas más suaves (Rodríguez et al., 2002). Es por ello que, se ha considerado que las geometrías Triangulaciones de Terreno (TIN), que utilizan elementos de tamaño variable, permiten resolver este problema en zonas demasiado planas. Jankwofsky et al. (2013) indica que los resultados de los métodos automático y manual no serán necesariamente los mismos, lo que puede afectar al cálculo de los coeficientes de escorrentía.

4. DELIMITACIÓN DE CUENCAS HIDROGEOLÓGICAS

La cuenca hidrogeológica para el presente trabajo se define como el área aportante en recarga al acuífero que genera los afloramientos que son parte del flujo base de un río. La delimitación de zonas de recarga en la mayor parte de los casos se lleva a cabo de forma escalada mediante procesos semiautomáticos. En la Figura 3 se resume en un flujograma la cantidad de información a recopilar a partir de una figura del SEA (2012).

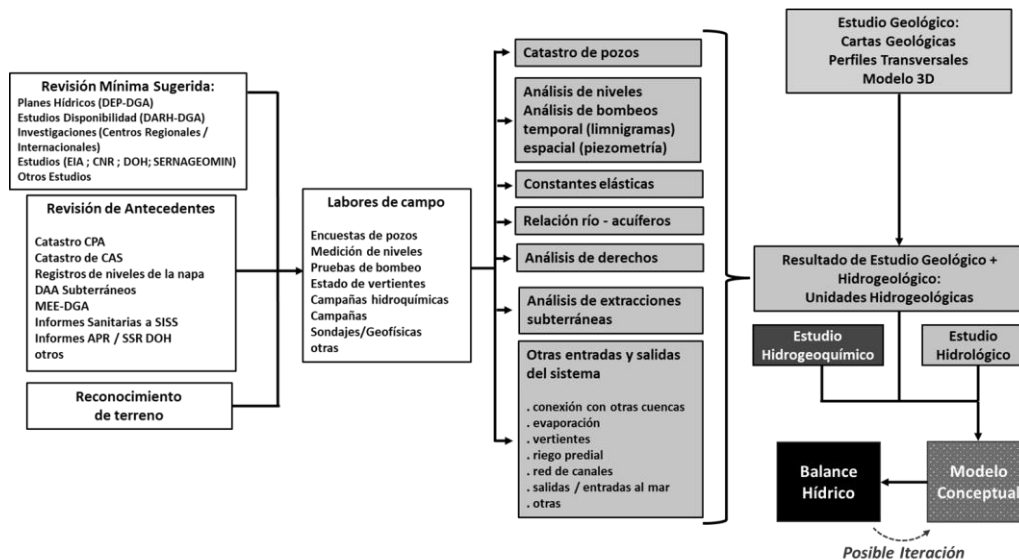


Figura 3.- Flujograma para llevar a cabo un modelo hidrogeológico conceptual en el que se debe definir en forma correcta los límites hidrogeológicos de una cuenca

Fuente: modificado a partir de SEA (2012).

5. CASO DE ESTUDIO: CUENCA DEL RÍO SILALA, AFLUENTE DE CABECERA DEL RÍO LOA.

La delimitación de la cuenca hidrológica y la cuenca extendida natural (cuenca hidrológica) que se describe en el presente artículo fue desarrollada principalmente como insumo base para la modelación hidrológica de la cuenca del río Silala (Yáñez-Morrón et al., 2023 (en desarrollo); Muñoz et al., 2022). La caracterización descrita en este acápite considera diferentes estudios que se han utilizado para caracterizar el río Silala. Estos estudios fueron realizados por instituciones públicas como la Dirección General de Aguas (DGA), el Servicio Nacional de Geología y Minería (SERNAGEOMIN) e instituciones de investigación como la Pontificia Universidad Católica de Chile, el Centro de Ciencia del Clima y la Resiliencia (CR2) y CCSF (actualmente Cornell Atkinson Center for Sustainability). También se consideraron estudios de Alcayaga (2017), Arcadis (2017) y el Instituto Danés de Hidráulica (DHI, 2018). En un inicio los estudios del río Silala correspondieron a estudios llevados a cabo por particulares en la solicitud de derechos superficiales y subterráneos presentados a la DGA.

5.1 Aproximación de Cuenca Hidrológica río Silala (Alcayaga, 2017) y extensión zona alta río Loa DGA-PEGH (2022)

Para delinear la cuenca del río Silala en Inacaliri Alcayaga (2017) utilizó diversas fuentes de información que dan diferentes interpretaciones del área de captación. Estas fuentes incluyen mapas IGM históricos de sector chileno y boliviano, fotografías aéreas y Modelos Digitales de Elevación (MED) derivados de teledetección. Se trabajó con: i) GDEM V2-ASTER, con una resolución de 30 m, llamado DEM-30m; y ii) un Modelo Digital de Elevación con resolución de 15 m. iii) un DEM ALOS -AW3DTM con una resolución de 5 m. En la Figura 4.a se muestra los resultados de las tres cuencas llevadas a cabo por Alcayaga (2017).

Por otro lado, la Dirección General de Aguas llevo a cabo el PEGH-Loa (DGA-ConPotencial, 2022), donde generó una minuta indicando que en la actualidad sólo dos empresas tienen derechos consuntivos constituidos sobre las aguas del Silala. Estos dos derechos están en territorio de plena soberanía chilena: Ferrocarriles Antofagasta Bolivia (FCAB), que tiene uno por 237 l/s, y Codelco, que tiene dos, por 119 l/s y 411/s. Además, señala que en ese punto de cruce hay aportes a nivel superficial, como los antes descritos y, tal como ocurre en las cuencas de la zona cordillerana altoandina, también se estima que existe un flujo subterráneo pasante como lo enunciaron Jordan et al. (2015) que hasta el momento no ha sido cuantificado, pero no debería ser considerado como nulo (DGA-PEGH-LOA, 2022). El área de la cuenca definida por estación “Río Siloli antes B.T. FCAB” ubicada en el río Siloli la estima en 233.6 km² (según delimitación DGA-DARH-CIREN (2015)). DGA-ConPotencial para el PEGH río Loa (2022) utilizó las cuencas las cuencas del DARH definidas por DGA-CIREN (2015) debido a inconsistencia en el balance del acuífero San Pedro (por falta de recarga). Es por ello que se decidió incorporar en su modelo hidrológico el área extendida para no subestimar la recarga del acuífero San Pedro (Figura 1, al interior de cuadrado amarillo). En la Figura 4.b se muestra la cuenca considerada actualmente en la implementación del Plan Estratégico de la Cuenca del río Loa.

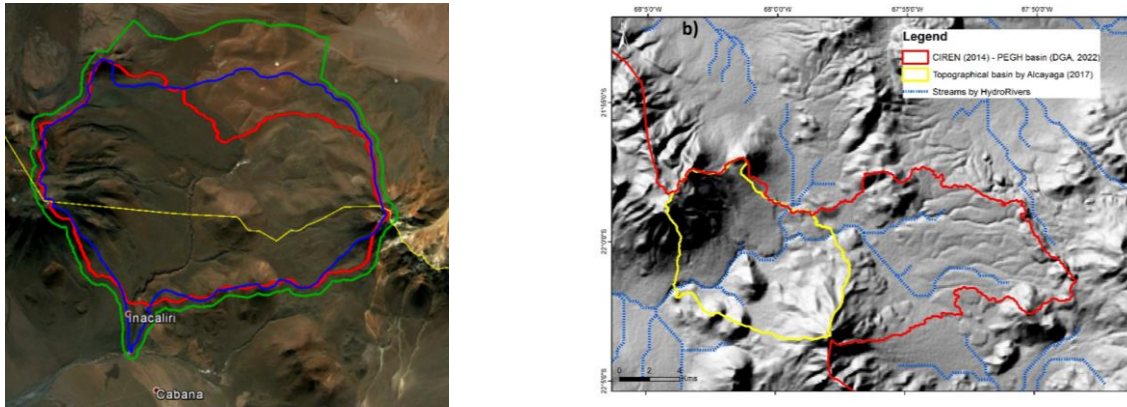


Figura 4.- (a) Delineación de la cuenca del río Silala en la comisaría de Inacaliri a partir de DEM-5m, DEM-15m y DEM-30m (Aclayaga, 2017). (b) cuenca adoptada por Alcayaga (amarilla, DEM 5m), la cuenca estimada por CIREN (2015) y mantenida por DGA-PEGH (2022). En el panel b) también se observa la red de ríos de la fuente HydroRivers en el que traspasa la zona alta del río silala a otras subcuencas (denota divisorias topograficas debilmente maracadas).

5.2 Aproximación cuenca hidrogeológica (Jordan et al., 2015)

Jordan et al. (2015) describen que no ha habido un análisis previo del potencial de interconexiones hidráulicas entre las rocas que contienen los acuíferos de la zona, aunque se han desarrollado extensos planes de monitoreo para intentar demostrar la presencia o ausencia de conexiones hidráulicas. Jordan et al. (2015) indican también que los límites de la cuenca subterránea no están claramente establecidos, tanto en la región occidental (Cordillera de la Costa) como en el altiplano oriental, donde el límite puede coincidir con la cuenca de agua superficial o puede extenderse al este de la cuenca superficial, por debajo de la Meseta Altiplánica

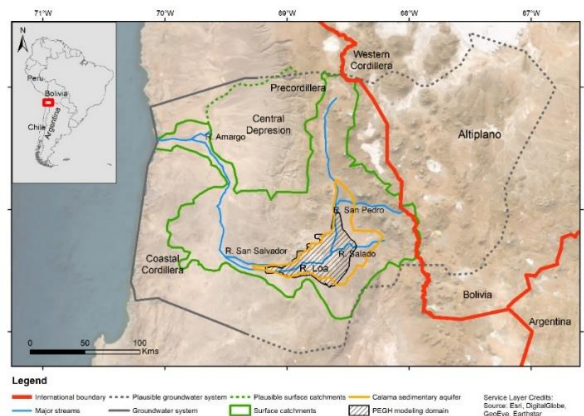


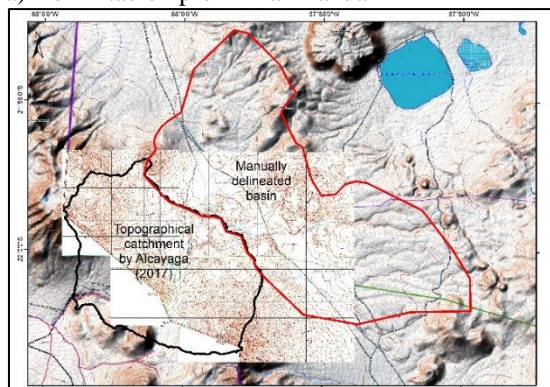
Figura 5.- Extensión posible de cuenca topografica, cuenca hidrologica, cuenca hidrogeológica y posible extensión de aportes de recarga (Jordan et al., 2015).

En la Figura 5, Jordan et al. (2015) muestran la cuenca de captación superficial en verde, negro discontinuo donde el flujo es un paso subterráneo es importante. La extensión máxima plausible de la cuenca subterránea se dibuja en negro (línea punteada) para los bordes definidos donde hay poca posibilidad de recarga; línea discontinua donde existe una posible recarga, pero no hay certeza de la validez de esta selección del límite de la cuenca de la cuenca subterránea.

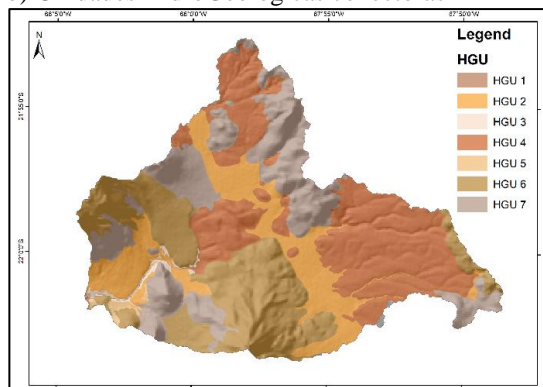
5.3 Cuenca topográfica e hidrográfica adoptada: delineación a partir de MED, geología y cartas IGMs.

La cuenca topográfica recomendada como válida es aquella que se ha delimitado con la mejor información topográfica a la fecha: el trabajo realizado por Alcayaga (2017) que utilizó como base el MDE de 5 m de resolución validado con la cartografía chilena y boliviana del IGM. Por otro lado, considerando la información de SERNAGEOMIN (2017; 2019; 2020) y las Unidades Hidrogeológicas (UHs; Gómez et al. 2023 (en desarrollo); Yáñez-Morroni et al., (en desarrollo)) se llevó a cabo el siguiente procedimiento para extender los límites de la recarga de la parte alta: 1) Identificación de las Cuenclas aportantes de la zona alta considerando información de curvas de nivel de Mapas IGM Bolivia aguas arriba de la cuenca delimitada por Alcayaga (2017). 2) Identificación de UH ubicadas aguas arriba que aportan flujo subterráneamente. SERNAGEOMIN, 2017; 2019; 2020; CR, Vol. 1, p.9). 3) Identificación de las subcuenclas mediante la delimitación automática con el uso Modelo Alos Palsar (12.5). 4) Identificación de inicios de cauces PyGeoNET (Passalacqua et al. 2010). 5) Verificación de pasos 3 y 4 con Cartas IGM Bolivia. 6) Extensión de cuenca topográfica a cuenca natural extendida (cuenca hidrogeológica) del río Silala En la Figura 6 se muestran los resultados de los pasos previos del 1 al 6.

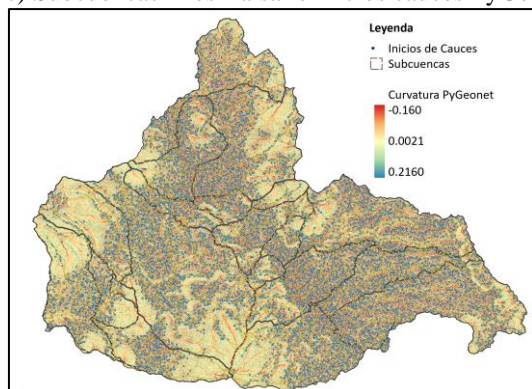
a) Delimitación preliminar manual



b) Unidades HidroGeológicas conectoras



c) Subcuenclas Alos-Palsar e inicios cauces PyGeonet.



d) Limite de cuenca extendida

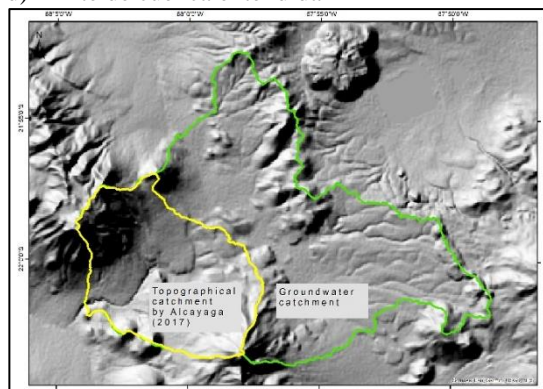


Figura 6.- a) Cuenca Topográfica y delimitación manual de zona alta. b) Identificación de Unidades Hidrogeológicas conductoras de flujo. c) Identificación de subcuenclas y cauces de cabecera. d) Cuenca Natural Extendida.

6. COMENTARIOS Y CONCLUSIONES

En el presente artículo se realizó una revisión de conceptos básicos y una recopilación de metodologías para definir la cuenca hidrológica e hidrogeológica. Supuestos incorrectos en el área que dan origen al flujo base podrían acarrear problemas asociados al no entendimiento del modelo conceptual del sistema.

Los estudios iniciales de balance hidrológico en la cuenca del río Silala sólo utilizaron la cuenca topográfica como primer insumo. Sin embargo, la zona actual incluye un área extendida que requirió la integración de distintas disciplinas de Ciencias de la Tierra. Como resultado se logró delimitar la cuenca topográfica superficial del río Silala con un total de 95.5 km² mientras que la cuenca aportante a la recarga del acuífero (responsable del flujo base de la cabecera del río Loa) es de un total de 304.6 km². Las cuencas hidrográfica e hidrogeológica del presente artículo corresponde a las que se utilizaron para desarrollar un modelo hidrológico semidistribuido (Yáñez-Morrón et al., en revisión) para estimar la distribución de la recarga de agua subterránea a los acuíferos del dominio del modelo de recarga de agua subterránea del río Silala (Taylor y Peach, 2023).

La metodología aplicada en el presente estudio debiera implementarse en las cuencas de cabecera del sector Altiplánico considerando la información de Jordán et al. (2015). De esta manera disminuiría la incertidumbre sobre las fuentes de recarga de las vertientes ubicadas en la zona altiplánica.

En la Figura 7 se muestra las cuencas obtenidas del actual proceso de delimitación (7.a) y la cuenca implementada en la modelación hidrológica e hidrogeológica de Yáñez-Morrón et al (en desarrollo).

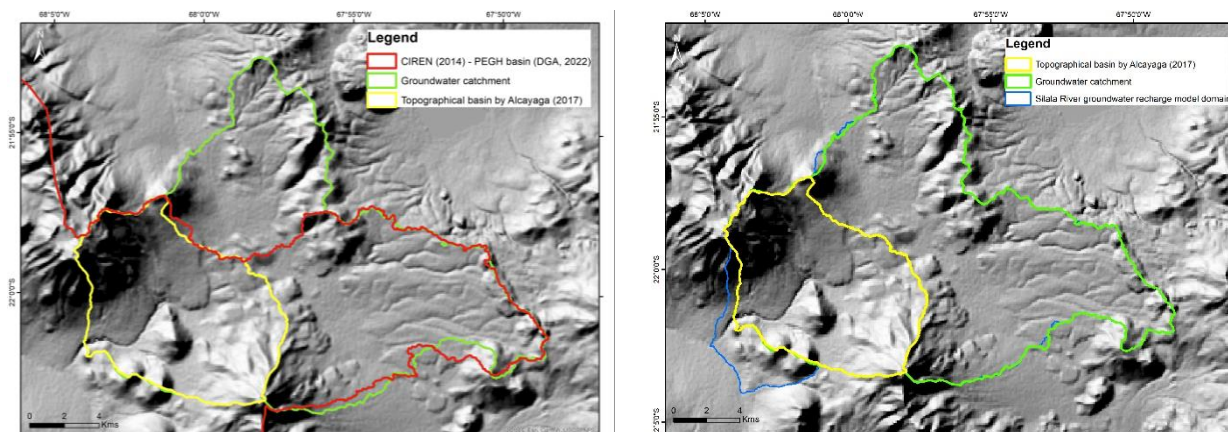


Figura 7.- Cuencas trazadas por distintos estudios de Alcayaga (2017) y PEGH Loa (DGA-ConPotencial, 2022) (a). Cuencas Topográfica e Hidrogeológica Adoptada (305 km²) (b)

Por último cabe destacar que a pesar del amplio acuerdo actual con respecto a los límites de la cuenca hidrológica e hidrogeológica, tanto Chile como Bolivia reconocen que éstos siguen siendo inciertos y están sujetos a revisión a medida que se disponga de más información.

REFERENCIAS

- Alcayaga, H. (2017). Characterization of the drainage patterns and river network of the Silala River and preliminary assessment of vegetation dynamics using remote sensing. Memorial of the Republic of Chile, I.C.J. Pleadings, dispute over the status and use of the waters of the Silala (Chile v. Bolivia). Vol. 4, Annex I.
- Arcadis. (2017). Detailed Hydrogeological Study of the Silala River. Memorial of the Republic of Chile, I.C.J. Pleadings, dispute over the status and use of the waters of the Silala (Chile v. Bolivia). Vol. 4, Annex II.
- Chow, V., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). Applied hydrology.
- Danish Hydraulic Institute (DHI). (2018). Study of the flows in the Silala wetlands and springs system. Counter-Memorial of the Plurinational State of Bolivia. Annex 17.
- DGA-CIREN (2015). Redefinición de la clasificación red hidrográfica a nivel Nacional.
- DGA-ConPotencial (2021). Plan Estratégico de Gestión Hídrica en la cuenca de Loa S.I.T. N° 472. ConPotencial para DGA, Ministerio de Obras Públicas. Santiago, Chile.
- Gómez, C., Ramírez, E., García, S., Suárez, F., Muñoz, J.F.(2023, Under Review). Hydrogeological characterization of the Silala river basin. Under Review in WIREs Water
- Jordan, T., Lameli, C. H., Kirk-Lawlor, N., & Godfrey, L. (2015). Architecture of the aquifers of the Calama Basin, Loa catchment basin, northern Chile. *Geosphere*, 11(5), 1438-1474.
- Muñoz, J. F., Suárez, F., Alcayaga, H., McRostie, V., & Fernández, B. (2023). Introduction to the Silala River and its hydrology. *WIREs Water*, e1644. <https://doi.org/10.1002/wat2.1644>
- Taylor, A., & Peach, D. (2023). Groundwater modeling of the Silala basin and impacts of channelization. *WIREs Water*, e1662. <https://doi.org/10.1002/wat2.1662>
- Passalacqua, P., Do Trung, T., Foufoula-Georgiou, E., Sapiro, G., Dietrich, W.E., 2010. A geometric framework for channel network extraction from lidar: nonlinear diffusion and geodesic paths. *J. Geophys. Res.* 115, F01002.
- Rodriguez F, Andrieu H, Creutin JD. 2003. Surface runoff in urban catchments: Morphological identification of unit hydrographs from urban databanks. *Journal of Hydrology* 283(1-4): 146-168.
- SEA (2012). Guía para el uso de Modelos de Aguas Subterráneas en el SEIA.
- Sachse A. y Jakobs L. (2015) OpenGeoSys Tutorial Computational Hydrology I: Groundwater Flow Modeling. Chapter 1. Hydrology.
- Shook, K. R., & Pomeroy, J. W. (2011). Memory effects of depressional storage in Northern Prairie hydrology. *Hydrological Processes*, 25(25), 3890-3898.
- Taylor, A., & Peach, D. W. (2023). A Groundwater model for the Silala River basin. *WIREs Water* (under Review).
- Vera, L. C. (2020). Aguas dulces entre Chile y Bolivia: el Silala en su laberinto. *Relaciones internacionales: Revista académica cuatrimestral de publicación electrónica*, (45), 163-183.
- Wheater, H. S., Peach, D. W., Suárez, F., & Muñoz, J. F. (2023). Understanding the Silala River—Scientific insights from the dispute over the status and use of the waters of the Silala (Chile v. Bolivia). *WIREs Water*, e1663. <https://doi.org/10.1002/wat2.1663>

Yáñez-Morróni, G, Suárez, F., Muñoz, J.F. Lagos, M.S. (2023, en Desarrollo). Hydrological modelling of the Silala River Basin. 1. Model development and long-term groundwater recharge assessment. Under Review in WIREs Water

Yáñez-Morróni, G, Suárez, F., Muñoz, J.F. Lagos, M.S. (2023, en Desarrollo). Hydrological modelling of the Silala River Basin. 2. Validation of hydrological fluxes with contemporary data. Under Review in WIREs Water