

¿De dónde viene y a dónde va el agua de las ciudades? Base de datos integrada para 243 centros urbanos argentinos

ANA L. LLANES¹; MARÍA POCA^{1,✉}; YOHANA G. JIMENEZ²; GEORGE CASTELLANOS³; BÁRBARA M. GÓMEZ⁴; MERCEDES MARCHESE⁵; NERINA B. LANA⁶; MIGUEL PASCUAL⁶; RICARDO ALBARIÑO⁷; MARÍA P. BARRAL⁸; JESÚS PASCUAL⁹; ARACELI CLAVIJO¹⁰; BORIS DÍAZ¹¹; NATALIA PESSACC⁶ & ESTEBAN G. JOBBÁGY¹

¹ Grupo de Estudios Ambientales, Instituto de Matemática Aplicada San Luis, CONICET, Universidad Nacional de San Luis, San Luis, Argentina. ² Instituto de Ecología Regional (IER), Universidad Nacional de Tucumán (UNT)- Consejo Nacional de Investigaciones Científicas y Técnicas (CONICET). Tucumán, Argentina. ³ Subgerencia Centro de Tecnología del Uso del Agua, Instituto Nacional del Agua (SCTUA-INA). ⁴ Instituto Nacional de Limnología (INALI-CONICET-UNL). ⁵ Instituto Argentino de Nivología, Glaciología y Ciencias Ambientales (IANIGLA, CONICET). ⁶ Instituto Patagónico para el Estudio de los Ecosistemas Continentales, IPEEC-CONICET. Puerto Madryn, Argentina. ⁷ Instituto de Investigaciones en Biodiversidad y Medio Ambiente, INIBIOMA, Universidad Nacional del Comahue-CONICET. ⁸ INTA, Estación Experimental Agropecuaria Balcarce. IPADS Balcarce (INTA-CONICET). ⁹ Instituto de Investigaciones Marinas y Costeras (CONICET-Universidad Nacional de Mar del Plata). ¹⁰ Instituto de Investigaciones en Energía No Convencional (INENCO-CONICET) - Universidad Nacional de Salta, Argentina. ¹¹ Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA-CR Patagonia Sur).

RESUMEN. Las ciudades dependen de distintos ecosistemas que les proveen servicios. Para el caso de la provisión de agua potable y la disposición de aguas servidas en las ciudades argentinas, el reconocimiento de esto aún es incompleto y fragmentado. Aquí presentamos la primera base de datos que mapea y clasifica las fuentes de suministro de agua y destinos de los efluentes de todas las ciudades argentinas con más 20000 habitantes (en 2010). A partir de reportes existentes, noticias periodísticas e información satelital se registraron en 243 ciudades los puntos de toma y vertido de aguas, junto a otra infraestructura asociada. Se encontró que 30.5, 17.5 y 12.6% de la población se abastece sólo de grandes ríos transfronterizos, agua subterránea y ríos y arroyos internos, respectivamente, con 25.2% abastecido por fuentes mixtas. Las ciudades que están conectadas a las redes públicas de saneamiento recurren para su disposición sobre todo a ríos y arroyos internos (26.6%); sin embargo, de la población urbana que no está conectada a la red cloacal, una proporción elevada dispone sus vertidos en acuíferos libres. La mayoría de las ciudades argentinas no devuelven las aguas de saneamiento al mismo sistema que las provee, y predominan los trasvases desde fuentes subterráneas hacia ríos y arroyos internos. La base de datos evidencia la contrastante 'presión efluente' (relación población/caudal del sistema receptor) entre ciudades vinculadas a grandes ríos (e.g., la cuenca del Paraná, con 273 habitantes.m⁻³.s⁻¹) y a cuencas internas (e.g., la cuenca de Mar Chiquita, con 16141 habitantes.m⁻³.s⁻¹). Esta base de datos, abierta para la consulta y actualización, visibiliza la conexión espacial e hidrológica entre las ciudades y la red hidrográfica, y contribuye a mejorar la seguridad hídrica y a priorizar los esfuerzos de protección de los ecosistemas acuáticos que la garantizan desde todos los niveles de gestión.

[Palabras clave: agua potable, Argentina, efluentes, hidrosistemas urbanos, servicios ecosistémicos hídricos, trasvase de agua]

ABSTRACT. Where does water come from and go to in cities? Integrated database for 243 Argentine urban centers. Cities depend on different ecosystems that provide them with services. In the case of water supply and effluent disposal in Argentine cities, its recognition is still incomplete and fragmented. Here is presented a first database that maps and classifies the water supply sources and effluent destinations of all Argentine cities >20000 inhabitants (in 2010). Utilizing existing reports, journalistic news and satellite information, water intake and discharge points were recorded, along with other associated infrastructure in 243 cities. It was found that 30.5, 17.5 and 12.6% of the population is exclusively supplied by large transboundary rivers, groundwater and internal rivers and streams, respectively, with 25.2% supplied by mixed sources. The cities that are connected to the public sanitation networks resort mainly to internal rivers and streams (26.6%) for their disposal; however, of the urban population that is not connected to the sewage network, a high proportion discharges into free aquifers. Most Argentine cities do not return sewage water to the same system that supplies it, predominantly transfers from underground sources to internal rivers and streams. The database evidences the contrasting 'effluent pressure' (population/flow rate of the receiving system) between cities linked to large rivers (e.g., Paraná basin, 273 inhabitants.m⁻³.s⁻¹) and internal basins (e.g., Mar Chiquita, 16141 inhabitants.m⁻³.s⁻¹). This database, open for consultation and updating, makes visible the spatial and hydrological connection between cities and the hydrographic network, helping to improve water security and prioritize efforts to protect aquatic ecosystems that guarantee it from all levels of management.

[Keywords: Argentina, drinking water, effluent, hydrologic ecosystem services, urban hydrosystems, water transfer]

INTRODUCCIÓN

Los servicios ecosistémicos representan los componentes y procesos de los ecosistemas que la sociedad consume o disfruta, y que contribuyen a su bienestar (Daily 1997; Boyd and Banzhaf 2007; Quétier et al. 2007; Luck et al. 2009; Quijas et al. 2010, Laterra et al. 2011). Por lo tanto, este enfoque plantea de forma explícita el vínculo entre la vida humana y el funcionamiento de los ecosistemas, útil para guiar el debate y las decisiones acerca de su uso, protección y gestión (Laterra et al. 2011; Díaz et al. 2015).

Entre los múltiples servicios ecosistémicos, aquellos relacionados con el agua se caracterizan por su complejidad, involucran grandes tasas de flujo y múltiples escalas espaciales, por lo general intermedias entre lo local y lo global, dictadas por los recorridos hidrológicos que conectan a los ecosistemas proveedores y las personas demandantes (Jobbágy et al. 2021). Ningún otro material terrestre tiene tasas tan altas de circulación en términos de masa por unidad de tiempo y distancia recorrida como el agua (Schlesinger and Bernhardt 2013); a su vez, ningún otro material entra y sale de nuestros hogares a tasas de tal magnitud. Por otra parte, a diferencia de servicios como el de regulación de gases de efecto invernadero —cuyo beneficio es de naturaleza global— o el de protección del suelo —cuya génesis es local—, los servicios de provisión de agua potable y disposición de efluentes cloacales implican conexiones que se extienden en el orden de decenas a centenas, e incluso miles de kilómetros gracias a la extensión natural de los cursos de agua y acuíferos y a su prolongación por obras de infraestructura gris. La convivencia de múltiples escalas de conexión, capaces de extenderse y transformarse por la intervención humana, plantean un desafío complejo a la hora de representar y gestionar el flujo de servicios hídricos desde el territorio hacia las personas (Jobbágy et al. 2021).

En la última década, el enfoque de servicios ecosistémicos se ha propuesto cada vez más en la gestión de los ecosistemas y el territorio a nivel mundial y nacional (Laterra et al. 2011; Pascual et al. 2021). Sin embargo, aún existe un sesgo hacia el enfoque de su oferta en detrimento del de su demanda (Yahdjian et al. 2015) y un vacío aún mayor en su tratamiento conjunto (Chen et al. 2019). La Argentina no está exenta de estos conflictos, en particular en los servicios hídricos (Jobbágy et al. 2021), por

lo que esta investigación contribuirá a reducir la brecha de conocimiento al ofrecer un análisis geográfico de dos de los servicios ecosistémicos hídricos que pueden considerarse más críticos para la vida humana: el de provisión de agua potable y el de depuración de aguas servidas. Este trabajo fue impulsado por la Red de Evaluación y Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos (REM.AQUA, remaqua.conicet.gov.ar), dedicada al vínculo ciencia-gestión de los ecosistemas acuáticos de la Argentina e integrada por instituciones académicas y gubernamentales (Domínguez et al. 2020).

El foco de este trabajo fue puesto en las ciudades, teniendo en cuenta que las mismas no solo concentran el mayor volumen de la demanda de estos servicios, sino que también reconfiguran continuamente con su infraestructura los circuitos naturales del agua (Padowski and Jawitz 2012; McDonald et al. 2014; Chung et al. 2021; Singh and Basu 2022), imponiendo conexiones que distorsionan o trascienden a las de las cuencas hidrográficas. Las ciudades, si bien secundan al riego agrícola como consumidoras de agua, aumentan aceleradamente su demanda y ponen en riesgo la seguridad hídrica (Florke et al. 2018). Aquí se propone el concepto de 'hidrosistemas urbanos' (HSU) para denominar a los sistemas hidrográficos reconfigurados por las ciudades. Se aplica este concepto al conjunto de ciudades medianas a grandes (>20000 habitantes) de la Argentina, con el objetivo general de caracterizar la variabilidad de configuraciones de los HSU en términos del tipo de fuentes a la que acceden para proveerse de agua potable y a la que disponen sus efluentes, así como del grado de transformación que imponen a los circuitos naturales del agua. El enfoque en las ciudades y sus cuencas proveedoras fue anteriormente utilizado, como por ejemplo por Tellman et al. (2018), quienes evaluaron el potencial de distintas estrategias de conservación de cuenca para mejorar la calidad del agua y mitigar inundaciones en 70 ciudades de Latinoamérica. Dichos autores encontraron que varias ciudades de la Argentina requerirían grandes inversiones en infraestructura para mejorar la seguridad hídrica.

En el sistema de gobierno federal de la Argentina, la gestión de los recursos hídricos se encuentra delegada constitucionalmente en las provincias, y éstas, a su vez, albergan una gran diversidad de sistemas políticos de regulación y gobernanza del agua (Trimble et

al. 2021a). En la actualidad, esta complejidad en el sistema de tomadores de decisiones lleva a que no exista un registro integrado, sistemático y oficial de la infraestructura dura (e.g., obras de captación o tratamiento) y blanda (e.g., sistemas institucionales) involucrada en la provisión y disposición de agua de todas las ciudades del país. A lo anterior se suma la expansión y la complejidad de esta infraestructura en su intento por acompañar el crecimiento demográfico y de consumo per cápita de la mayoría de las ciudades del país. Al presente surgen respuestas incompletas y fragmentadas ante preguntas como: ¿Qué territorios y cuáles fuentes proveen agua potable y depuran las aguas servidas de las ciudades? ¿Qué fracción de la población del país depende de fuentes de agua superficiales o subterráneas o de alimentación local o remota? ¿En qué medida las ciudades trasvasan agua entre cuencas y sistemas o en qué grado superponen sus demandas sobre los mismos recursos? ¿Qué infraestructura e instituciones intervienen en la distribución y recolección de agua en las ciudades?

Bajo la hipótesis de que A) responder a estas preguntas de forma integrada, sistemática y accesible al público puede catalizar una gestión más transparente y sustentable del agua y de los ecosistemas acuáticos, y B) considerando que, si bien el eje de la vida cultural y política de la sociedad hoy está en las ciudades, éstas necesitan expandir su mirada al territorio que las sustenta; esta contribución se propone como objetivo caracterizar la provisión y disposición de agua de las ciudades argentinas mediante la construcción de una base de datos.

Para caracterizar los HSU argentinos se utilizaron múltiples fuentes de información, enfocándose en construir una base de datos que permita 1) localizar geográficamente los puntos de toma y vertido de aguas, así como sus cuencas/territorios/cauces asociados para las 243 ciudades con más de 20000 habitantes, 2) cuantificar la contribución relativa de distintos tipos de fuentes destinadas para la provisión de agua potable a la población nacional, 3) identificar las transformaciones más notables que imponen los HSU al recorrido natural del agua, así como las situaciones más críticas de superposición/competencia por servicios ecosistémicos hídricos entre ellos, y 4) ofrecer una categorización preliminar del nivel de presión de algunos HSU sobre los ecosistemas acuáticos que reciben sus efluentes.

MATERIALES Y MÉTODOS

Para las ciudades incluidas en este estudio se eligió un umbral de población mínimo de 20000 habitantes, según el censo nacional de población 2010 (INDEC 2010). Se abarcaron así 243 centros urbanos, 73 de los cuales pertenecen a aglomeraciones mayores que incluyen al Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA) (38 ciudades), Gran Rosario (7), Gran Mendoza (6), Gran San Juan (6), Gran San Miguel de Tucumán (6), Gran Córdoba (3), Gran Resistencia (Chaco) (3), Gran Salta (2) y Gran Santa Fe (2). En conjunto, los 243 centros urbanos abarcan 77% de la población nacional. El umbral elegido representó un compromiso entre la cantidad de centros a relevar, que crece de manera desproporcionada cuando se incluyen ciudades más chicas, y el aporte a la población nacional total, que es importante en el rango de ciudades medianas. En este sentido, 73% de las 243 ciudades relevadas tiene una población entre 20000 y 100000 habitantes.

Para cada ciudad se determinó la ubicación geográfica del centro urbano, de los puntos de captación de agua y de vertido de efluentes, así como de plantas de potabilización y de tratamiento de efluentes. A partir de esa información se delimitó la cuenca de emplazamiento de la ciudad, la cuenca proveedora de agua y el curso receptor de efluentes. Para ello se tuvieron en cuenta los puntos de ubicación del centro urbano, de captación y de vertido; en estos dos últimos casos se consideraron el área aportante aguas arriba y el cauce receptor aguas abajo, respectivamente. También se registró la infraestructura de conducción y almacenamiento, y se reconoció la existencia de embalses, represas, reservorios, acueductos, canales, perforaciones y bañados artificiales, según correspondiera. En todos los casos se buscó identificar los puntos iniciales y finales en los que estos se conectan con los cauces naturales. En el caso de los embalses y otras estructuras de almacenamiento, se registró su nombre, volumen y ubicación geográfica. En el caso de los acueductos, se tuvieron en cuenta aquellos que conectan a las ciudades analizadas en la base de datos (Material Suplementario 1-Tabla S1). Para cada ciudad se registró la existencia total o parcial de trasvases entre fuentes y destino del agua consumida.

Para delimitar las cuencas se adaptaron los límites descritos por el Atlas Digital de

Cuencas y Regiones Hídricas Superficiales de la República Argentina (Ministerio del Interior 2010) en conjunto con el producto HydroSHEDSv1 (Lehner et al. 2008; Lehner and Grill 2013); específicamente, el subproducto HydroBASINS. Este subproducto provee una cobertura global uniforme de subcuencas anidadas jerárquicamente a diferentes escalas, con un esquema de codificación que permite el análisis topográfico de las cuencas. El proceso complementario para la delimitación de cuencas fue el algoritmo *Hydrology of Spatial Analyst* de ArcGIS sobre el producto SRTM V3 (*Shuttle Radar Topography Mission*) (Farr et al. 2007) provisto por la NASA a una resolución de 1 segundo arco (~30 m). Este algoritmo calcula, en un primer paso, un modelo de dirección de flujo, proceso que se basa en cómo se trasvasa el flujo de un píxel a otro en la dirección de la pendiente 'aguas abajo' (O'Callaghan and Mark 1984). A partir de este modelo se calcula la acumulación del flujo, que se expresa como el peso acumulado de todos los píxeles que fluyen hacia cada píxel adyacente con pendiente descendente en el ráster de salida. Los píxeles con una acumulación de flujo alta son áreas de flujo concentrado y son útiles para identificar cursos de agua (Jenson and Domingue 1988; Tarboton et al. 1991). Para las zonas de llanuras utilizamos productos libres del IGN, tales como los vectores de la red hidrográfica y de canales de la Argentina, y datos extraídos de la plataforma *Open Street Map* (plataforma de datos abiertos creada por una gran comunidad de colaboradores que aportan y mantienen datos a nivel global) (openstreetmap.org), siempre considerando la topografía del terreno y la presencia de cuerpos de agua superficial.

Cabe mencionar que como resultado de los trasvases, en algunas ciudades las cuencas de emplazamiento y provisión o vertido no son las mismas. En el caso de las ciudades abastecidas por agua subterránea, se documentó la existencia de las perforaciones, pero no se indicó el área de recarga asociada (equivalente a la cuenca en el caso de la provisión superficial) debido a la falta de información precisa al respecto. Siempre que fue posible, se relevó el acuífero proveedor. Se registraron además las obras de infraestructura de almacenamiento y conducción de agua asociadas a la provisión y vertido, incluyendo embalses y acueductos.

Dada la carencia de fuentes oficiales nacionales, provinciales o municipales

de información, se recopilaron los datos de manera sistemática para cada ciudad recurriendo a buscadores en línea, con el siguiente orden de prioridad: 1) reportes oficiales gubernamentales, 2) reportes oficiales de empresas prestadoras, 3) publicaciones académicas, 4) noticias periodísticas en medios locales. Cuando estas fuentes no fueron suficientes se recurrió a 5) consultas directas a informantes calificados. En todos los casos se realizó una inspección visual de imágenes satelitales de alta resolución y contemporáneas con el corte temporal propuesto en el análisis poblacional (2010-2020) para identificar y posicionar la infraestructura asociada a la captación de agua, plantas de potabilización y tratamiento de aguas servidas y la infraestructura de conducción asociada. En algunas ciudades fue necesario combinar varias fuentes de información para detectar la ubicación exacta de los puntos de captación y vertido, ya que con frecuencia los reportes oficiales o periodísticos dieron cuenta del nombre de los cursos proveedores o receptores de agua, pero no de su localización.

Se construyó una base de datos en la cual se registraron todas las variables mencionadas, así como información adicional y enlaces a los sitios *web* que aportaron la información. Se asignó un número de identificación único a cada ciudad. Cabe destacar que algunos puntos de toma y vertido se comparten por más de una ciudad. El relevamiento de información oficial aportado por gobiernos y empresas proveedoras, así como la presentada en publicaciones académicas y material periodístico, permitió documentar otras variables de interés para una parte de las ciudades. Esta información incluye caudal de provisión y de efluentes de cada toma y vertido, el consumo diario de agua potable por habitante, el ente o empresa que presta los servicios, así como el porcentaje de población abastecida por las empresas que ofrecen servicios de suministro y saneamiento. Para cada ciudad y cada una de sus tomas (87 ciudades contaron con más de una toma, 26 con más de tres) se caracterizó el tipo de fuente primaria de provisión reconociendo seis categorías: A) grandes ríos, incluye cursos de agua de amplia magnitud interjurisdiccionales transfronterizos (Ríos Paraná, Paraguay, Iguazú, Uruguay, Bermejo y Pilcomayo); B) ríos y arroyos, incluye todos los cursos superficiales originados dentro del territorio nacional y distingue los casos que son mediados por embalses o no; C) lagos,

refiere a los cuerpos naturales permanentes; D) agua subterránea, abarca tanto perforaciones que captan acuíferos libres o confinados como sistemas subálveos de ríos y arroyos; E) cosecha artificial de agua de lluvia, asociada a infraestructura específica de captación y almacenamiento, y F) desalación de agua de mar. En el caso del destino del agua vertida por las redes de saneamiento se consideraron las categorías 1) grandes ríos y 2) ríos y arroyos, mencionadas antes, a las que se agregaron 3) mar, que implica cualquier forma de vertido al océano, 4) lagunas, incluyendo cuerpos de poca profundidad naturales y artificiales, 5) lagos y embalses, 6) infiltración, que incluye la entrega directa sobre superficies terrestres secas y húmedas, así como el reúso para riego. Finalmente, se calculó la importancia relativa de cada una de las fuentes y destinos, agrupando la población según el tipo único o combinado de las fuentes y destinos. Para ello se consideró el porcentaje de la población con acceso a la red de provisión y de saneamiento. A su vez, se definió una categoría adicional de fuente y destino del agua para la sumatoria de la población de todas las ciudades que no son abastecidas por las redes públicas; es decir, aquellas sin cobertura.

Con el fin de ilustrar la importancia de los distintos tipos de fuentes y destinos de agua en las ciudades y caracterizar la magnitud de los trasvases entre ellas, se confeccionó un diagrama de flujo de tipo Sankey (Sankey 1898) utilizando el paquete `networkD3` del software R (R Core Team 2020) aplicado a una matriz tipos de fuentes por tipos de destinos de las aguas de todas las ciudades en las que se sumó la población total correspondiente. En los casos en que las fuentes fueron mixtas, se asumió una contribución igual de todas las fuentes involucradas. En el diagrama final, las fuentes de provisión de agua y la disposición de efluentes se representan mediante nodos y la cantidad de población de cada uno de ellos es representada mediante el ancho de los flujos. A su vez, para el AMBA, que es la mayor área urbana del país, se cuantificó el trasvase de agua ejercido por el conjunto de sus 37 ciudades (de más de 20000 habitantes) entre las tres fuentes y destinos principales del agua consumida y vertida por las redes públicas y por los domicilios que no están conectados a ellas. Las tres fuentes/sumideros individualizados fueron el Río de la Plata, los afluentes internos del Río de la Plata que atraviesan el aglomerado del AMBA y las aguas subterráneas. Sobre la base de los

porcentajes de población con cobertura de red potable y cloacal reportada y la fuente y destino de estas aguas de cada ciudad del AMBA, se estimó la población afectada a cada tipo de fuente/sumidero y se calculó el flujo de agua que se retira y devuelve a una misma fuente (e.g., toma y vertido al Río de la Plata) y el que se trasvasa entre ellas (e.g., toma del Río de la Plata y vertido a sus afluentes, aguas arriba). Para esto se asumió que la población no conectada a las redes usa el agua subterránea para provisión y disposición y que el flujo de agua es proporcional a la población. Para visualizar mejor estos trasvases en el AMBA se emplearon redes direccionadas aplicando el paquete `Igraph` (Csardi and Nepusz 2006) del software R (R Core Team 2020), en el que los nodos representan las localidades y fuentes de agua, y los enlaces, sus relaciones y caudales de trasvase.

Finalmente, la base de datos elaborada se utilizó para explorar dos aspectos del impacto de los efluentes sobre los cursos de agua raramente analizados en forma integral a nivel nacional. El primer aspecto consistió en comparar el consumo per cápita de agua de las ciudades con la oferta superficial per cápita de la que disponen, según los caudales medios de sus fuentes (se consideraron solo casos abastecidos por aguas superficiales). El segundo buscó comparar el impacto relativo de los efluentes de las ciudades considerando el subconjunto de aquellas conectadas al Río Paraná y a la laguna Mar Chiquita (Córdoba) a través de los ríos de la falda oriental de las Sierras de Córdoba y el Río Dulce, considerando la relación entre la población abastecida por la red cloacal y el caudal del curso de agua receptor. Para estos cálculos se utilizaron los valores de caudal medio de los cursos de agua, según lo reportado por la Subsecretaría de Recursos Hídricos de la Nación y fuentes académicas, y la población total de las ciudades afectadas según el porcentaje que accede a la red cloacal (de acuerdo con el Censo 2010) (INDEC 2010).

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Datos recopilados y fuentes de información

Se obtuvo un registro unificado y geolocalizado de los puntos de provisión y disposición de agua, así como el de la identidad de los cuerpos de agua asociados, para 243 ciudades de la Argentina. De este modo se abarcó más de tres cuartas partes de

la población nacional (77.5% del total en las 243 ciudades con más de 20000 habitantes en 2010) (INDEC 2010) (Material Suplementario 1-Tabla S1). Para el total de ciudades se registraron 371 puntos de captación con una localización física única, con la excepción de algunas baterías de pozos cercanos entre sí que, por fines prácticos, se caracterizaron como un sitio único. Se obtuvo la ubicación exacta del 62% de estos sitios, mientras que un 15% adicional se reportó dentro de los ejidos urbanos correspondientes sin especificar ubicación dentro de los mismos. Del 23% de las tomas restantes, correspondientes en su mayoría a aguas subterráneas, no se precisó ubicación exacta y para los fines del mapeo nacional se lo ubicó dentro del ejido urbano correspondiente. En el caso de los puntos de vertido de efluentes, para un 83% de los casos se identificó su ubicación exacta, mientras que el 6% no presentó ningún tipo de sistema de concentración de los mismos. Para el 11% restante no se pudo precisar el punto exacto de vertido, pero se ofrece en muchos casos información sobre la posición de las plantas de tratamiento. Del total de las ciudades relevadas, el 74.1% poseen planta de tratamiento de efluentes o algún tipo de tratamiento primario de los mismos. Para el 16.9% de las localidades se encontró que no poseen planta de tratamiento (e.g., Rosario) y para 22 ciudades no se encontró el dato (9.1%).

La disponibilidad de información específica fue mayor para los puntos de toma que para los puntos de vertido y, en general, menor para las ciudades más chicas. Se encontró información oficial sobre los puntos de toma y vertido de agua en 57.5% y 42.4% de las ciudades, respectivamente, y al resto se lo obtuvo a partir de combinar fuentes académicas y periodísticas, así como de la inspección de imágenes y conocimiento experto de los autores. La información completa o parcial respecto a los puntos de toma y vertido de agua se obtuvo en un 28% de los casos de entes gubernamentales, en 28% de empresas prestadoras, en 32% de medios periodísticos y en 12% de artículos educativos/académicos; este fue el orden de preferencia que se usó al encontrar múltiples fuentes. La búsqueda realizada demostró la escasez y la fragmentación de la información oficial disponible al público, así como la relevancia de los medios periodísticos locales como fuente de información alternativa (y en muchos casos, precaria). Este primer hallazgo resalta la falta

de visibilidad o de conocimiento público que tienen los ecosistemas acuáticos que proveen o reciben las aguas urbanas. También quedó evidenciado que la información respecto a la disposición de efluentes tiene menor difusión o se trata con mayor confidencialidad respecto a la provisión de agua potable. Es importante destacar que trabajos anteriores han propuesto que, ante eventos de crisis hídrica, el conocimiento que la población urbana tiene acerca de las fuentes y destinos del agua que utiliza puede ser determinante a la hora de definir futuras trayectorias y adaptaciones (Fuenfschilling and Truffer 2016; Castro et al. 2020).

Territorio y ecosistemas proveedores y receptores de agua

El conjunto de centros urbanos analizados ocupa 0.36% de la superficie continental del país (10243 km²), mientras que 44.9% (1248993 km²) del territorio nacional es responsable de proveerles aguas superficiales (Figura 1). Al área de aporte nacional se le suma una mayor, que abarca países vecinos (1414599 en Brasil, 406752 en Paraguay, 220919 en Bolivia, 119261 en Uruguay y 12129 km² en Chile, respectivamente). El agua aportada por estos países vecinos ingresa, principalmente, a través de grandes ríos transfronterizos por el noreste del país (ríos Paraná, Iguazú, Uruguay y Paraguay) y en menor medida desde el noroeste (río Pilcomayo) y el sur cordillerano (e.g., ríos Gallegos en Santa Cruz y Grande en Tierra del Fuego).

Se debe destacar que solo una fracción del territorio nacional está involucrada en la provisión de agua a las ciudades relevadas (Figura 1c). Se destacan zonas proveedoras de agua superficial, incluyendo la captada en acuíferos subálveos, las cuales pueden categorizarse en 1) sistemas serranos internos, incluyendo las Sierras Subandinas Santa Bárbara (provincias de Jujuy, Salta, Catamarca, Tucumán), las Sierras Pampeanas (provincias de La Rioja, Córdoba, San Luis) y las sierras de Tandilia y Ventania (sudeste de la provincia Buenos Aires); 2) segmentos de la cordillera de los Andes en Mendoza y en las provincias patagónicas, y 3) algunas cuencas aisladas de paisajes ondulados (Misiones y Entre Ríos) (Figura 1a). Las aguas subterráneas son una fuente importante de provisión, y en su mayor parte provienen de sistemas acuíferos que recargan en forma difusa en las llanuras sedimentarias (84%

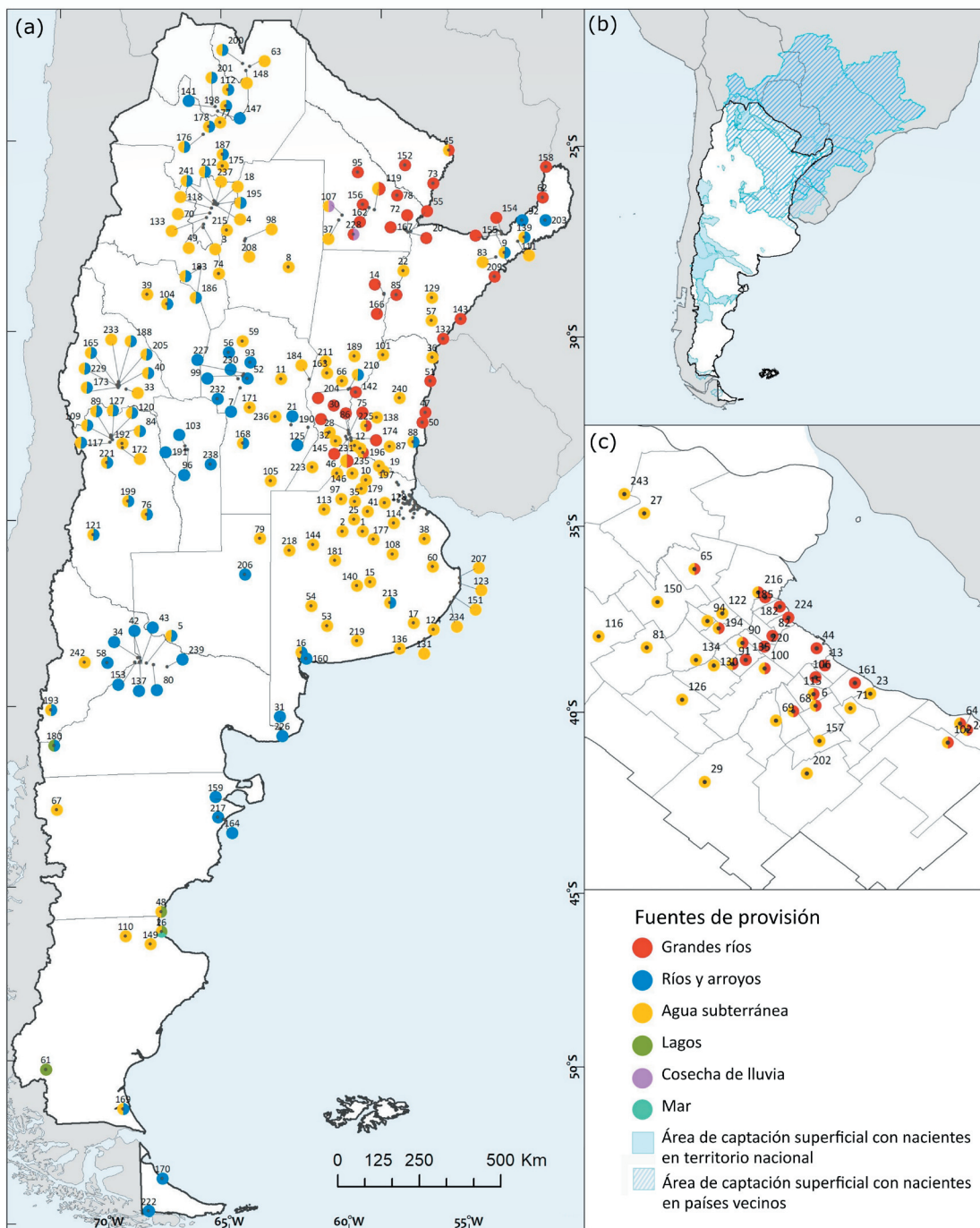


Figura 1. (a) Mapa de la Argentina en el que se detalla la ubicación y el tipo de fuente de provisión de agua de las 243 ciudades con más de 20000 habitantes relevadas en este estudio. En líneas de puntos se encuadra el Área Metropolitana de Buenos Aires (AMBA). (b) Detalle de la ubicación y tipo de fuente de provisión de agua del AMBA. En (a) y (b), los números indican los códigos de identificación de las ciudades que se detallan a continuación y se corresponden a los indicados en la Tabla S1 del Material Suplementario 1. (c) Cuencas de provisión de agua superficial de origen nacional y transfronterizas.

Figure 1. (a) Map of Argentina showing the location and type of water supply of the 243 cities with over 20000 inhabitants surveyed in this study. With dotted lines the Metropolitan Area of Buenos Aires (AMBA) is framed. (b) Detail of the location and type of water supply for cities in the AMBA. In (a) and (b), numbers represent the identifier codes for each of the cities that are detailed below and correspond to the ids in Table S1 of the Supplementary Material 1. (c) Basins that provide superficial water supply from national and transnational origins.

Referencias: 1) 25 de Mayo. 2) 9 de Julio. 3) Aguilares. 4) Alderetes. 5) Allen. 6) Almirante Brown. 7) Alta Gracia. 8) Añatuya. 9) Apóstoles. 10) Arrecifes. 11) Arroyito. 12) Arroyo Seco. 13) Avellaneda. 14) Avellaneda (Santa Fe). 15) Azul. 16) Bahía Blanca. 17) Balcarce. 18) Banda del Río Salí. 19) Baradero. 20) Barranqueras. 21) Bell Ville. 22) Bella Vista. 23) Berazategui. 24) Berisso. 25) Bragado. 26) Caleta Olivia. 27) Campana. 28) Cañada de Gómez. 29) Cañuelas. 30) Capitán Bermúdez. 31) Carmen de Patagones. 32) Casilda. 33) Caucete. 34) Centenario. 35) Chacabuco. 36) Chajari. 37) Charata. 38) Chascomús. 39) Chilecito. 40) Chimbass. 41) Chivilcoy. 42) Cinco Saltos. 43) Cipolletti. 44) Ciudad Autónoma de Buenos Aires CABA. 45) Clorinda. 46) Colón (Buenos Aires). 47) Colón (Entre Ríos). 48) Comodoro Rivadavia. 49) Concepción. 50) Concepción del Uruguay. 51) Concordia. 52) Córdoba. 53) Coronel Pringles. 54) Coronel Suárez. 55) Corrientes. 56) Cruz del Eje. 57) Curuzú Cuatiá. 58) Cutral Có. 59) Deán Funes. 60) Dolores. 61) El Calafate. 62) Eldorado. 63) Embarcación. 64) Ensenada. 65) Escobar. 66) Esperanza. 67) Esquel. 68) Esteban Echeverría. 69) Ezeiza. 70) Famaillá. 71) Florencio Varela. 72) Fontana. 73) Formosa. 74) Frías. 75) Funes. 76) General Alvear. 77) General Güemes. 78) General José de San Martín. 79) General Pico. 80) General Roca. 81) General Rodríguez. 82) General San Martín. 83) Gobernador Ing. Valentín Virasoro. 84) Godoy Cruz. 85) Goya. 86) Granadero Baigorria. 87) Gualeguay. 88) Gualeguaychú. 89) Guaymallén. 90) Hurlingham. 91) Ituzingó. 92) Jardín América. 93) Jesús María. 94) José C. Paz. 95) Juan José Castelli. 96) Juana Koslay. 97) Junín. 98) La Banda. 99) La Calera. 100) La Matanza. 101) La Paz. 102) La Plata. 103) La Punta. 104) La Rioja. 105) Laboulaye. 106) Lanús. 107) Las Breñas. 108) Las Flores. 109) Las Heras (Mendoza). 110) Las Heras (Santa Cruz). 111) Leandro N Alem. 112) Libertador General San Martín. 113) Lincoln. 114) Lobos. 115) Lomas de Zamora. 116) Luján. 117) Luján de Cuyo. 118) Lules. 119) Machagai. 120) Maipú. 121) Malargüe. 122) Malvinas Argentinas. 123) Mar de Ajó - San Bernardo. 124) Mar del Plata. 125) Marcos Juárez. 126) Marcos Paz. 127) Mendoza. 128) Mercedes (Buenos Aires). 129) Mercedes (Corrientes). 130) Merlo (Buenos Aires). 131) Miramar. 132) Monte Caseros. 133) Monteros. 134) Moreno. 135) Morón. 136) Necochea-Quequén. 137) Neuquén. 138) Nogoyá. 139) Oberá. 140) Olavarría. 141) Palpalá. 142) Paraná. 143) Paso de los Libres. 144) Pehuajó. 145) Pérez. 146) Pergamino. 147) Perico. 148) Pichanal. 149) Pico Truncado. 150) Pilar. 151) Pinamar. 152) Pirané. 153) Plottier. 154) Posadas. 155) Posadas (Extensión). 156) Presidente Roque Sáenz Peña. 157) Presidente Perón. 158) Puerto Iguazú. 159) Puerto Madryn. 160) Punta Alta. 161) Quilmes. 162) Quitilipi. 163) Rafaela. 164) Rawson (Chubut). 165) Rawson (San Juan). 166) Reconquista. 167) Resistencia. 168) Río Cuarto. 169) Río Gallegos. 170) Río Grande. 171) Río Tercero. 172) Rivadavia (Mendoza). 173) Rivadavia (San Juan). 174) Rosario. 175) Rosario de la Frontera. 176) Rosario de Lerma. 177) Saladillo. 178) Salta. 179) Salto. 180) San Carlos de Bariloche. 181) San Carlos de Bolívar. 182) San Fernando. 183) San Fernando del Valle de Catamarca. 184) San Francisco. 185) San Isidro (Buenos Aires). 186) San Isidro (Catamarca). 187) San José de Metán. 188) San Juan. 189) San Justo. 190) San Lorenzo. 191) San Luis. 192) San Martín. 193) San Martín de los Andes. 194) San Miguel. 195) San Miguel de Tucumán. 196) San Nicolás de los Arroyos. 197) San Pedro (Buenos Aires). 198) San Pedro (Jujuy). 199) San Rafael. 200) San Ramón de la Nueva Orán. 201) San Salvador de Jujuy. 202) San Vicente (Buenos Aires). 203) San Vicente (Misiones). 204) Santa Fe. 205) Santa Lucía. 206) Santa Rosa. 207) Santa Teresita - Mar del Tuyú. 208) Santiago del Estero. 209) Santo Tomé (Corrientes). 210) Santo Tomé (Santa Fe). 211) Sunchales. 212) Tafí Viejo. 213) Tandil. 214) Tartagal. 215) Termas de Río Hondo. 216) Tigre. 217) Trelew. 218) Trenque Lauquen. 219) Tres Arroyos. 220) Tres de Febrero. 221) Tunuyán. 222) Ushuaia. 223) Venado Tuerto. 224) Vicente López. 225) Victoria. 226) Viedma. 227) Villa Allende. 228) Villa Ángela. 229) Villa Barboza - Villa Nacusi. 230) Villa Carlos Paz. 231) Villa Constitución. 232) Villa Dolores. 233) Villa General San Martín - Campo Afuera. 234) Villa Gesell. 235) Villa Gobernador Gálvez. 236) Villa María. 237) Villa Mariano Moreno - El Colmenar. 238) Villa Mercedes. 239) Villa Regina. 240) Villaguay. 241) Yerba Buena - Marcos Paz. 242) Zapala. 243) Zárate.

del total de tomas subterráneas de las que se pudo identificar la identidad de la fuente primaria (e.g., acuíferos Puelche y Pampeano en Buenos Aires, Salto Chico en Entre Ríos)), con excepción de perforaciones subálveas que pueden asociarse directamente al aporte de ríos (16% del total de tomas subterráneas de las que se pudo identificar el nombre de la fuente primaria (e.g., Río Los Sarmientos en La Rioja, Río Tercero en Córdoba)). Este análisis refleja una característica peculiar de la Argentina respecto a su disponibilidad de agua, que es la de su media a baja oferta de agua 'verde', es decir, aportada por la precipitación dentro del territorio (Schyns et al. 2019), respecto a la alta disponibilidad de agua 'azul'. Dos tercios del agua azul es provista naturalmente desde naciones adyacentes, fundamentalmente por los aportes del río Paraná, de los que más del 90% son extraterritoriales (Giacosa et al. 2020).

Se encontró que 55% de los habitantes de los centros urbanos analizados tiene acceso a

servicios públicos de agua que dependen de un único tipo de fuente, y 30.8% a aquellos que dependen de dos tipos distintos o más (Figura 2, Material Suplementario 2-Tabla S2), siendo en total un 14.1% la población no abastecida por agua potable. Dicha población accede por sus propios medios a fuentes que son sobre todo subterráneas y, en menor medida, a puntos de abastecimiento extradomiciliarios de las redes públicas (Juárez et al. 2018; Plataforma del Agua 2022). En términos de población abastecida, la fuente predominante de provisión de agua es la de los grandes ríos, con 30.5% de la población que se provee solo de esta fuente (e.g., ciudades de Rosario, Santa Fe, Paraná, Posadas, Corrientes, Concordia y el núcleo central del AMBA [en total, 41 ciudades]). Un 13.2% adicional lo hace de manera combinada con aportes de agua subterránea (e.g., ciudades de cordones intermedios del AMBA [en total, 17 ciudades]). Cabe notar que los centros urbanos abastecidos por los grandes ríos no se limitan a aquellos ubicados en los márgenes de los

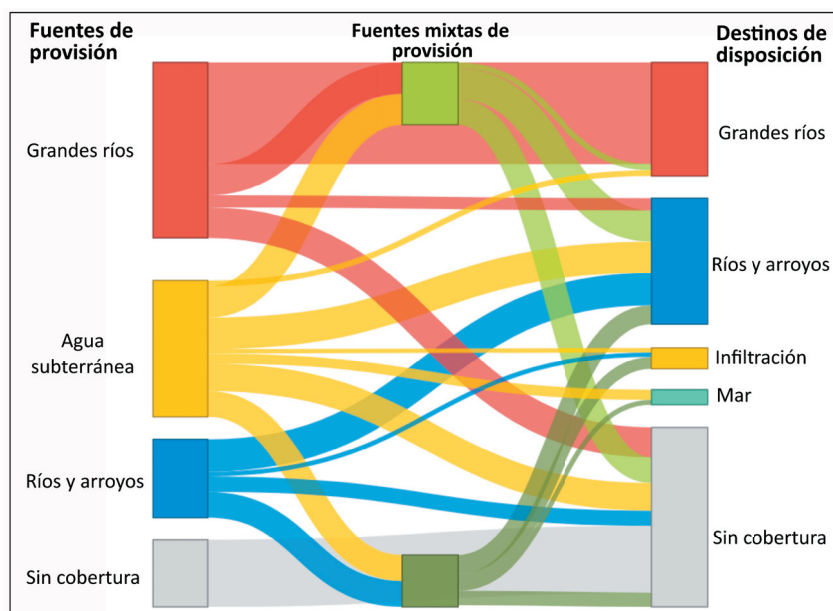


Figura 2. Diagrama de flujos del tipo Sankey evidenciando las fuentes primarias (grandes ríos, agua subterránea y ríos y arroyos,) y mixtas (grandes ríos y agua subterránea, ríos y arroyos y agua subterránea) de provisión de agua y los destinos de disposición (grandes ríos, ríos y arroyos, infiltración, mar) de las 243 ciudades relevadas de la Argentina. El ancho de los flujos indica el tamaño de la población abastecida por cada una de ellas. Además, se muestra la proporción de la población sin cobertura de provisión de agua y disposición de efluentes. Para simplificar, el diagrama no muestra aquellas fuentes que aportan a una pequeña proporción de la población (lagos, cosecha de lluvia y mar).

Figure 2. Flow diagram of Sankey type that shows the primary sources (large rivers, groundwater and rivers and streams) and mixed sources (large rivers and groundwater, rivers and streams and groundwater) of water supply and disposal destinations (large rivers, rivers and streams, infiltration, sea) of the 243 cities of Argentina surveyed. Flow width indicates the proportion of the population supplied by each of them. Also shown is the proportion of the population without coverage of water supply and disposal of effluents. For simplicity, the diagram does not show those sources that contribute to a small proportion of the population (lakes, rain harvest and sea).

ríos e incluyen algunos abastecidos a gran distancia, accediendo al servicio a través de acueductos (e.g., ciudades de Presidencia Roque Sáenz Peña y Quitilipi en Chaco [en total, 4 ciudades]). Si bien el 42.2% de la población se abastece en alguna proporción de agua subterránea, lo hace predominantemente en forma conjunta con aguas superficiales de los grandes ríos (13.2%) o de cuencas internas. La población que depende exclusivamente de esta fuente (17.5%) se encuentran en la llanura pampeana y chaqueña (e.g., ciudades de Pergamino, Junín, Mar del Plata, Santiago del Estero [en total, 105 ciudades]). Las cuencas internas del país aportan agua a un 23.9% de la población, alimentando a un 12.6% exclusivamente de esta fuente, incluidas grandes ciudades del país (e.g., Córdoba, Neuquén), mientras que 10.9% combina esta fuente con agua subterránea (e.g., Gran Mendoza, Gran San Juan, Gran San Miguel de Tucumán, La Rioja, Salta [en total, 38 ciudades]). Cerca de la mitad de la población abastecida por cuencas internas (11.8%) recibe su contribución regulada por reservorios o embalses, lo que destaca la relevancia de

esta infraestructura gris, influenciando la estabilidad y la calidad del volumen de agua aportado. Las cuencas internas que se destacan por la cantidad de población que proveen son la de los ríos Suquia (~910 mil habitantes), Limay-Neuquén-Negro (~690 mil habitantes), Mendoza (~550 mil habitantes) y San Juan (~440 mil habitantes). El resto de los tipos de fuentes incluyen A) a los lagos naturales, que pueden considerarse como un subconjunto de las cuencas internas y que incluyen al Nahuel Huapi y al Musters en la Patagonia, B) al agua de lluvia, que es cosechada en forma directa y se utiliza en dos localidades de la provincia de Chaco, y C) al agua de mar desalinizada, que se distribuye en Caleta Olivia (Figura 2, Material Suplementario 2-Tabla S2).

Entre los tipos de destinos de los efluentes cloacales de las ciudades argentinas ganan importancia los ríos y arroyos internos, que reciben los efluentes de un 26.6% de la población (Figura 2, Material Suplementario 2-Tabla S2). Los ríos internos que se destacan por la magnitud de efluentes urbanos recibidos son el Matanza y Reconquista en el AMBA (~1.3 y

0.7 millones de habitantes, respectivamente), el Primero o el Suquía en Córdoba (~780 mil habitantes), el Salí en Tucumán (~480 mil habitantes) y el Mojotoro en Salta (~460 mil habitantes). Los grandes ríos, si bien son receptores importantes de efluentes (24.4% de la población), reciben un aporte menor que el agua que suministran para consumo. La disposición de aguas al océano y la infiltración en sistemas terrestres tiene un peso apreciable, recibiendo los efluentes del 4.3 y 4.5% de la población. Cabe aclarar que en este trabajo se consideró al destino 'infiltración' como el conjunto de efluentes cloacales que se vierten en canales que terminan en humedales, cauces secos, basurales, cañadones, así como aquellos efluentes destinados a riego (ACRES). Finalmente, la proporción más alta de todas las categorías de análisis de disposición la lleva la población sin cobertura en las ciudades, que alcanza un 38.1% y que de forma preponderante entrega sus efluentes al sistema subterráneo libre localmente a través de pozos ciegos (Juárez et al. 2018; Plataforma del Agua 2022). El análisis conjunto de fuentes y destinos del agua total consumida por ciudades en el país permite detectar los trasvases más significativos entre tipos de sistemas (Figura 2). Entre ellos se destaca el que va desde grandes ríos y aguas subterráneas a los ríos y arroyos internos (17.7% de la población) y el que va desde todas las fuentes superficiales hacia a la población sin cobertura de saneamiento experimentando, por lo tanto, un trasvase al sistema subterráneo libre local (13.8% de la población) (Figura 2, Material Suplementario 2-Tabla S2).

Lo analizado anteriormente destaca algunos aspectos notables del país respecto a la provisión y disposición de aguas urbanas. El primero es el alto grado de uso domiciliario de los grandes ríos y, por lo tanto, la dependencia de fuentes que tienen un origen extraterritorial y que están expuestas al encadenamiento sucesivo de vertidos y captación de agua de múltiples ciudades en su recorrido. En este sentido, McDonald et al. (2014), a escala global, mostraron que el 78% de la población de las 50 ciudades más grandes del mundo (de más de 750000 habitantes) es provisto por fuentes de aguas superficiales, cuyas nacientes, en algunos casos, se encuentran a gran distancia de las ciudades. Otro aspecto notable en la Argentina es la dependencia de muchas ciudades de fuentes subterráneas (Figura 2), en una llanura en donde el alto contenido de arsénico en sus sedimentos conlleva a un

problema crónico para la salud humana (Litter et al. 2019). Ejemplo de ello son las ciudades de Pergamino, Junín y Chivilcoy con 91399, 87509 y 58152 habitantes, respectivamente (Material Suplementario 1-Tabla S1) (Litter et al. 2019). Además, dado que numerosas ciudades del centro de la Argentina se abastecen de ríos y arroyos mediados por embalses para la provisión de agua, surge la vulnerabilidad a la pérdida de la calidad de agua en los mismos causadas por floraciones algales —en especial, algas tóxicas como las cianobacterias— en condiciones naturales o favorecidas por actividades antropogénicas (e.g., la contaminación resultante de los usos ganaderos y agrícolas de las cuencas y el uso turístico de los espejos de agua y de sus costas), así como por el impacto de incendios (O'Farrell et al. 2019). Finalmente, se destaca la dependencia predominante de las ciudades de un único tipo de fuente de agua (57.3%), aspecto que puede representar una vulnerabilidad ante crisis de provisión causadas por deterioro de la calidad o mermas de la cantidad o accesibilidad al agua (Rygaard et al. 2011; Trimble et al. 2021b).

Redireccionamiento de flujos de agua

Los HSU argentinos varían en el grado de complejidad de sus redes de captación y disposición de agua, y en las transformaciones que estas imponen al flujo natural de agua en el territorio (Figuras 2 y 3). Más allá de los trasvases agregados de todo el país entre tipos de fuentes y destino (Figura 2), muchas ciudades efectúan trasvases de cuencas resultantes de la disposición de efluentes en una cuenca distinta a la proveedora. Del total de las ciudades relevadas, 146 (60.1%) trasvasa totalmente el agua que recibe a otra cuenca. En mayor medida, estos trasvases están direccionados desde fuentes de agua subterránea hacia ríos y arroyos. Por otro lado, 38 ciudades (15.6%) realizan trasvases parciales, en los que una parte del agua que reciben se dispone en un sistema acuático diferente; mientras que sólo 41 ciudades (16.9%) no hacen trasvases. Cabe aclarar que para 18 ciudades, todas de baja población, no se pudo recabar esta información.

Ejemplos destacables de trasvases por la magnitud de la población y los caudales involucrados son el área metropolitana de Córdoba, que impone un trasvase parcial al abastecerse de los Ríos Primero (70% de la población) y Segundo (30% de la población),

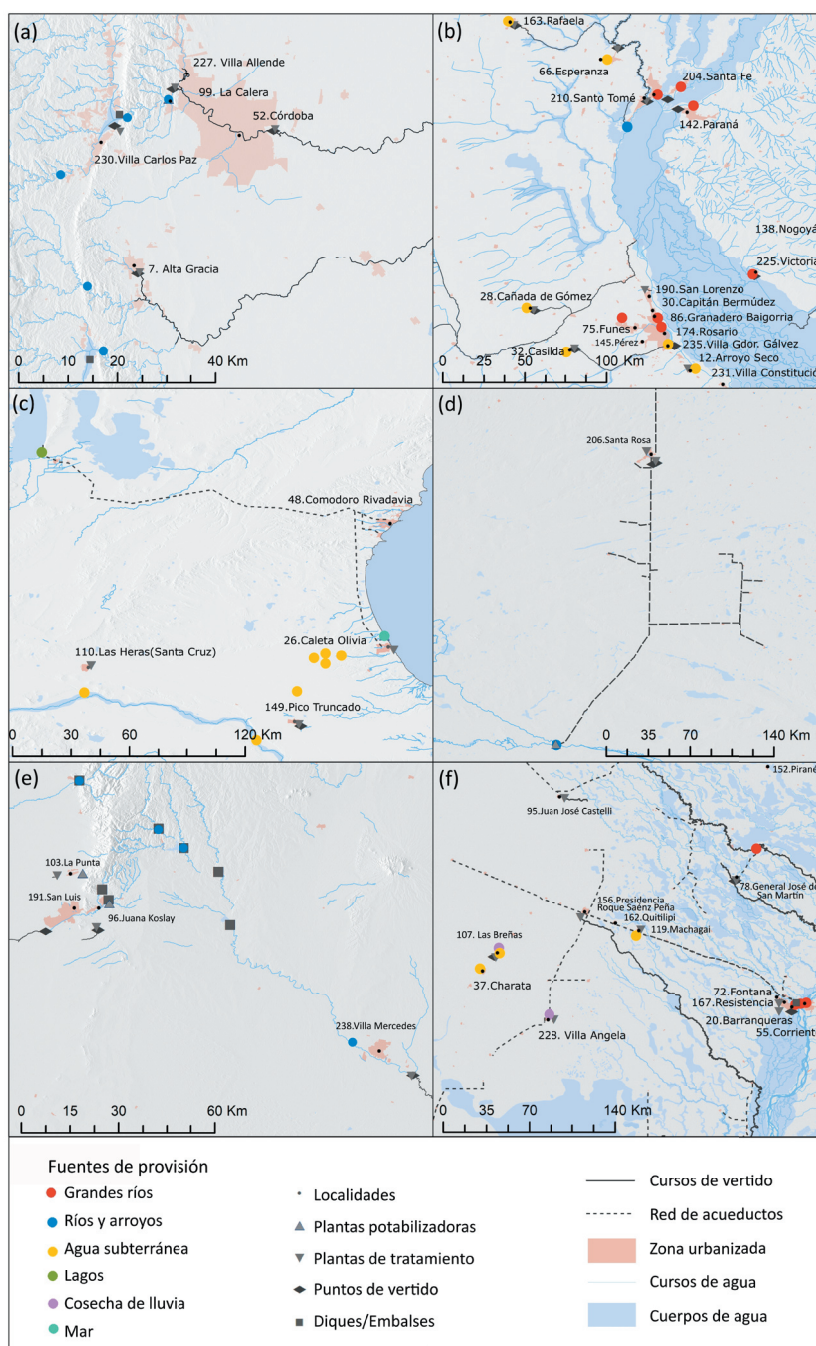


Figura 3. Selección de casos regionales de las ciudades argentinas relevadas en este estudio que ejemplifican trasvases, encadenamientos y casos particulares. Cada panel muestra el tipo y ubicación de las fuentes de provisión, la presencia de embalses o acueductos, la ubicación de las plantas potabilizadoras, el emplazamiento de las ciudades, la localización de plantas de tratamiento cloacal, el punto de vertido de efluentes con o sin tratamiento y los cursos de vertido. (a) Área metropolitana de la ciudad de Córdoba, (b) ciudades de las provincias de Santa Fe y Entre Ríos ubicadas a orillas del Río Paraná, (c) ciudades de la provincia de Santa Cruz y sur de la provincia de Chubut, (d) ciudad capital de la provincia de La Pampa, (e) ciudades del centro-este de la provincia de San Luis y (f) ciudades de la zona centro de la provincia del Chaco.

Figure 3. Selected regional cases of the surveyed Argentinean cities that exemplify water transfers, concatenation, and particular cases. Each panel shows the type and location of water supply sources, dams and/or aqueducts, the location of cities, water treatment plants and sewage treatment plants, as well as the point of discharge of effluents with or without treatment and pouring courses. (a) Metropolitan area of Córdoba city, (b) cities of Santa Fe and Entre Ríos provinces along the riverbanks of the Paraná river, (c) cities of Santa Cruz and south of Chubut Provinces, (d) capital city of La Pampa province, (e) cities of the center-east of San Luis Province and (f) cities of the central area of Chaco province.

y disponer sus efluentes conjuntos en el primer curso de agua, acrecentando su caudal final (Figura 3a). Otra transformación, más drástica, es la que imponen los HSU de las ciudades capitales de las provincias de San Luis y La Pampa. La primera capta agua de la ladera oriental de las Sierras de San Luis, de uno de los afluentes del Río Quinto, y la vierte como

efluente en una cuenca endorreica pequeña ubicada en la ladera suroccidental de las mismas sierras, que termina duplicando su caudal natural (Figura 3e). La ciudad de Santa Rosa (La Pampa) y otras 15 localidades se abastecen por medio de un acueducto de 264 km que desvía hacia el norte las aguas del Río Colorado después de tratarlas. Los efluentes

de Santa Rosa, en particular, que es la ciudad más poblada de la provincia, no regresan a la cuenca proveedora y se vierten hacia una pequeña cuenca endorreica que tiene a la laguna del 'Bajo Giuliani' como punto final de descarga (Figura 3f). En estos dos casos el impacto hidrológico sobre los cursos receptores es proporcionalmente mayor que sobre los proveedores por tratarse de cuencas con mucho menor caudal ecológico.

El AMBA es el mayor conglomerado urbano del país y presenta una diversidad de redireccionamientos de los flujos de agua que puede sintetizarse en tres grandes fuentes y destinos de las aguas domiciliarias que incluyen al Río de la Plata (RdP), a los afluentes de este que recorren el área urbana (Af) y a las aguas subterráneas (AS) (Figura 4). Al considerar la identidad de las fuentes y los destinos de cada departamento del AMBA y la magnitud de los flujos involucrados se pueden cuantificar los trasvases efectuados entre los tres componentes (Tabla 1). De este análisis se observa que si bien la mayor fracción de la población del AMBA recibe y devuelve las aguas que utiliza al mismo sistema, tanto en su núcleo central dependiente del RdP (32.7% de la población) (Tabla 1) como en su cordón más periférico dependiente de las AS (42.2% de la población, Tabla 1), las zonas intermedias realizan trasvases que pueden tener alto impacto hidrológico local. Uno de ellos, con departamentos como La Matanza o Morón (trasvase RdP→Af, 14.6% de la población) (Tabla 1) y Merlo o Tigre (trasvase AS→Af, 3.8% de la población) (Tabla 1), incrementando el caudal de los afluentes urbanos; el otro, con departamentos como Avellaneda, San Isidro o La Plata (trasvase RdP→AS, 5.3% de la población) (Tabla 1), lo que genera aportes extraordinarios al sistema freático con sus descargas a pozos ciegos. En la medida en que la metrópolis de Buenos Aires se extendió, siguiendo el eje fluvial

del Río de la Plata y los ejes signados por las principales vías de transporte (Lanzetta 2021), los modos de provisión y disposición de aguas fueron cambiando. Los sistemas subterráneos fueron desplazados por los superficiales, lo cual implica una transición temporal en los trasvases que hoy se puede apreciar en el espacio a lo largo del gradiente núcleo-periferia (Figura 1b). Se sugiere así una Fase I (AS→AS) —actualmente dominante en los cordones más periféricos—, una Fase II (RdP→AS) prevalente en cordones intermedios, y una Fase III (RdP→RdP) alcanzada hoy por la Ciudad Autónoma de Buenos Aires y sus departamentos más próximos. Esta transición puede explicar el ascenso freático observado durante la Fase II (Hernández and González 1997; Lanzetta, 2021).

Esta aproximación simplificada al análisis de los trasvases ocasionado por los HSU de la Argentina ignora otros flujos que pueden ser relevantes en algunas ciudades, pero ilustra una de las aplicaciones potenciales de la base de datos. Tanto las redes de suministro como las de saneamiento pueden intercambiar aguas con la zona freática generando transformaciones de los flujos naturales. Algunas de esas transformaciones ocurren cuando las recargan con sus pérdidas o cuando las captan y descargan en zonas en las que los niveles freáticos ascienden por encima de la cota de la red cloacal (Karpf and Krebs 2011; McGrane 2016; Wu et al. 2020). Del mismo modo, los aportes clandestinos o accidentales de escurrimiento pluvial, flujos favorecidos por la impermeabilización de las superficies urbanas, pueden constituir un aporte extra intermitente hacia las redes cloacales, lo cual puede perjudicar la eficiencia de su tratamiento y ocasionando vertidos con escasa o nula depuración (Van Rooijen et al. 2010; Correa de Oliveira et al. 2020). Ejemplo de ello, de aquellos relevados en la base de datos aquí presentada, son las ciudades de

Tabla 1. Tabla de contingencia del porcentaje de la población del Área Metropolitana de Buenos Aires implicada en cada uno de los trasvases entre las fuentes de provisión de agua y el cuerpo receptor de vertido de efluente: Río de la Plata, afluentes del Río de la Plata y agua subterránea.

Table 1. Contingency table of the percentage of the population of the Metropolitan Area of Buenos Aires involved in each of the transfers between the water supply sources and the receiving body of effluent discharge: Río de la Plata, tributaries of the Río de la Plata and groundwater.

| | Disposición | | |
|-------------------------------|-----------------|-------------------------------|------------------|
| | Río de la Plata | Afluentes del Río de la Plata | Agua subterránea |
| Provisión Río de la Plata | 32.72 | 14.59 | 5.34 |
| Afluentes del Río de la Plata | - | 1.32 | - |
| Agua Subterránea | - | 3.81 | 42.22 |

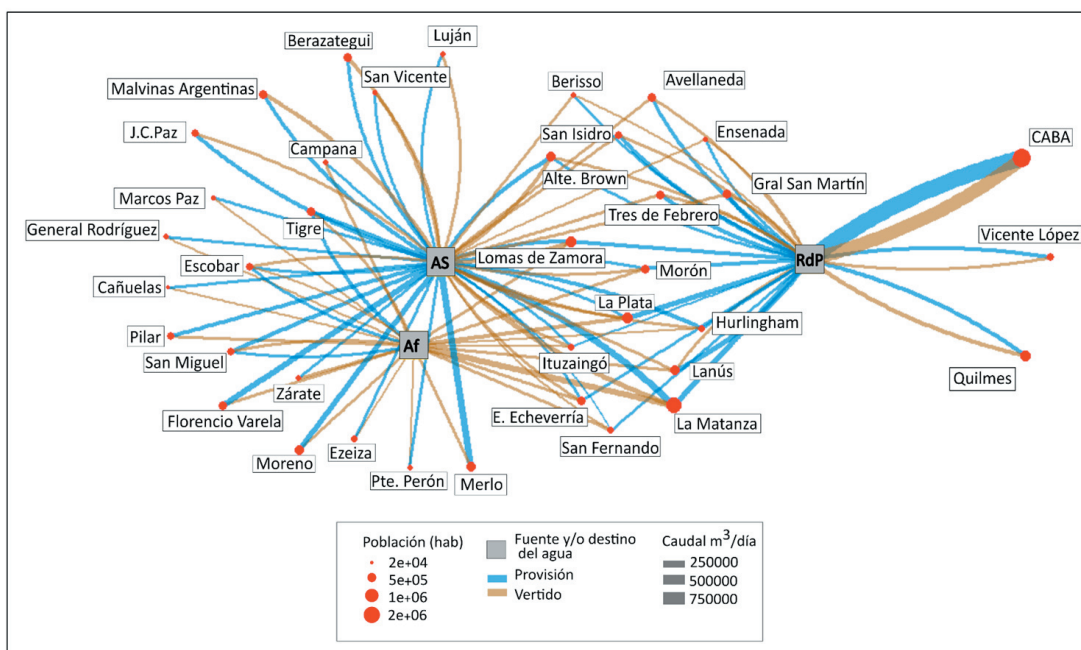


Figura 4. Red direccionada que comprende las 37 ciudades del Área Metropolitana de Buenos Aires, en la que los nodos representan las ciudades (círculos), y el diámetro de los mismos, la población. Las fuentes y destinos del agua se representan mediante cuadrados, siendo RdP: Río de la Plata; Af: afluentes del Río de la Plata; AS: agua subterránea. Los enlaces indican sus relaciones (azul para provisión de agua y marrón para vertido de efluentes) y el grosor de los mismos indican el caudal de trasvase.

Figure 4. Directed network comprising 37 cities of the Metropolitan Area of Buenos Aires, where the nodes represent the cities (circles) and their diameter represent the population. Water sources and destinations are represented by squares as RdP: de la Plata river; Af: tributaries of de la Plata river; AS: groundwater. Links indicate their relationships (blue for water supply and brown for sewage discharge) and the thickness of the links indicate the transfer flow.

Comodoro Rivadavia, General Güemes, Juan José Castelli, Marcos Paz (Material Suplementario 1-Tabla S1).

Magnitud del impacto de efluentes sobre cursos de agua

Además de los trasvases destacados en la sección anterior se pueden reconocer relaciones entre ciudades cuyos HSU están conectados. Varias ciudades se vinculan por un encadenamiento sucesivo de disposición de efluentes, en algunos casos tratados y en otros no, y captación de agua corriente aguas abajo. Ejemplos de estas conexiones entre HSU son las numerosas ciudades encadenadas del Río Paraná (Figura 3b), al cual debe sumarse el de los ríos que desagan la vertiente oriental de las Sierras de Córdoba (Figura 3a). Estos incluyen a lo largo del río Primero a la ciudad de Villa Carlos Paz (aguas arriba del Gran Córdoba [la primera dispone sus efluentes en el embalse que abastece a la segunda]); a lo largo del río Segundo, a la ciudad de Alta Gracia (aguas arriba de la ciudad homónima); a lo largo del río Tercero, a la ciudad homónima (aguas

arriba de la ciudad de Bell Ville) y a estas dos (aguas arriba del punto de captación subálveo que abastece a muchos centros urbanos vía acueducto), y a la ciudad de Marcos Juárez. En el Río Paraná, este encadenamiento de vertidos y captaciones puede tener menor riesgo por la relativa baja población con relación al altísimo caudal (273 habitantes.m³.s⁻¹ de flujo fluvial aguas arriba de las captaciones del AMBA en el Río de la Plata) (Tabla 2). Sin embargo, en las cuencas serranas, estos aportes son relativamente mucho mayores (~5245 habitantes.m³.s⁻¹ de flujo en el Río Tercero aguas arriba de la captación de Marcos Juárez). Más allá de los impactos sobre otros HSU, el análisis de la relación entre la población que descarga efluentes y el caudal de los cursos de agua que los reciben permite la identificación preliminar de ecosistemas acuáticos con alta presión efluente. Otro sistema identificado con alta presión de HSU es la cuenca de Mar Chiquita (Córdoba), en la que los Ríos Dulce y Primero (o Suquía) reciben aportes de los aglomerados urbanos del Gran San Miguel de Tucumán y Santiago del Estero (10298 habitantes.m³.s⁻¹ de flujo) (Tabla 2) y

Tabla 2. Estimación de la presión efluente sobre los ecosistemas acuáticos para tres ejemplos de cuencas contrastantes: la cuenca del Paraná antes de su desembocadura en el Río de la Plata, aguas arriba de los puntos de toma de una gran fracción del AMBA; la cuenca del Río Tercero aguas arriba de la ciudad de Marcos Juárez y la cuenca de la laguna Mar Chiquita (mayor lago salado del continente y foco de esfuerzos de conservación [recientemente incorporada al sistema de áreas protegidas nacionales]). Se indican los componentes de la cuenca, la cantidad de ciudades de más de 20000 habitantes involucradas, la identidad de aquellas con mayor población, la población abastecida por la red cloacal, el caudal medio de los cursos receptores y la intensidad efluente.

Table 2. Estimations of the effluent menace over the aquatic ecosystems in three contrasting examples of watersheds: the Paraná basin before its outlet in the Río de la Plata, upstream of the tap points of a large fraction of the Metropolitan Area of Buenos Aires (AMBA), the basin of Río Tercero upstream of Marcos Juárez city, and the basin of the Mar Chiquita Lake (the largest salt lake on the continent and a focus of conservation efforts). The major components of the watersheds are indicated, together with the number of cities with more than 20000 inhabitants, the identity of those cities with the largest population, the supplied population by the sewage network, the average flow of the receiving water courses and the effluent intensity.

| Cuenca | Cantidad de ciudades | Principales ciudades | Población abastecida (1000 hab.) | Caudal (m ³ /s) | Intensidad efluente (hab.m ⁻³ .s ⁻¹) |
|--------------------|----------------------|--------------------------------------|----------------------------------|----------------------------|---|
| Paraná total | 74 | | 4783 | 17500 | 273 |
| Directo | 22 | Gran Rosario, Gran Santa Fe | 2205 | 17000 | 130 |
| Vía afluentes | 52 | AMBA norte, Pergamino, Rafaela | 2578 | 500 | 5157 |
| Río Tercero | 3 | Río Tercero, Villa María, Bell Ville | 110 | 21 | 5245 |
| Mar Chiquita total | 17 | | 1679 | 104 | 16141 |
| Vía Guanusacate | 1 | Jesús María | 28 | 4 | 7110 |
| Vía Salí-Dulce | 11 | Gran Tucumán, Gran Santiago | 772 | 75 | 10298 |
| Vía Suquía | 3 | Gran Córdoba | 814 | 10 | 81417 |
| Vía Xanaes | 2 | Alta Gracia y Arroyito | 64 | 15 | 4243 |

del Gran Córdoba (81417 habitantes.m⁻³.s⁻¹ de flujo) (Tabla 2), respectivamente. Estos son conducidos junto a los aportes de los ríos Segundo (o Xanaes) y Guanusacate hacia el humedal de Ansenúza, uno de los más grandes lagos salados del continente (Bucher and Curto 2009), que recibe en promedio una intensidad efluentes 60 veces más alta que la del Río Paraná (Tabla 2).

Es importante destacar que el servicio de depuración de la contaminación efluente por parte de los ecosistemas acuáticos involucra procesos complejos y sujetos a controles hidrológicos, como los que se capturan con las relaciones población-caudal anteriores, pero también ecológicos —vinculados a la capacidad específica de ríos y lagos de procesar contaminantes— y socio tecnológicos, determinando la calidad de los efluentes vertidos por los hogares y tratados posteriormente en las plantas de tratamiento. Por otro lado, es fundamental monitorear y contemplar las variaciones hídricas extremas en los caudales que pueden sufrir los ecosistemas acuáticos dado el contexto de cambio climático como, por ejemplo, la bajante extraordinaria del Río Paraná con valores de caudal mínimos históricos desde mediados del 2019 (Naumann et al. 2022). Lejos de tratar este proceso en forma abarcativa, la base de datos presentada aquí hace aportes para la

identificación y priorización preliminar de las situaciones más críticas de los HSU del país con relación al servicio de depuración de efluentes. Cabe notar que la búsqueda de mejores marcos de análisis está en continuo avance y requiere de información cuantitativa que se actualice periódicamente (Willcock et al. 2021). Algunos aspectos para considerar incluyen los cambios de la población tanto estacionales (e.g., turismo) como de largo plazo (e.g., migración), la calidad del tratamiento de los efluentes urbanos previo al vertido, el aporte adicional que hacen otros sectores como el agrícola-ganadero y el industrial, así como la dinámica anual e interanual de los caudales de los cursos receptores que favorecen o restringen la capacidad de dilución de efluentes.

CONCLUSIÓN

En este trabajo se establece una conexión espacial e hidrológicamente explícita entre centros urbanos y la red hidrográfica que les provee agua potable y dónde se realiza la deposición de efluentes de las 243 ciudades de más de 20000 habitantes de la Argentina. La base de datos presentada aquí, principal contribución de este trabajo, no pretende ser una fuente de información oficial ni definitiva, sino una plataforma abierta y sujeta a actualizaciones, correcciones y

aportes de usuarios de distintos sectores y niveles jurisdiccionales. Comprender la relación entre la demanda de la población y la oferta de servicios hídricos permite priorizar aquellas fracciones del territorio nacional y ecosistemas acuáticos más críticos para la seguridad hídrica, así como las oportunidades para mejorarla a partir del ordenamiento territorial y la aplicación de soluciones basadas en la naturaleza (Jobbágy et al. 2021; Pascual et. al 2021). Algunos de los contrastes sobresalientes de la provisión de servicios hídricos a las ciudades del territorio argentino son: 1) la disparidad en términos de área y caudal de oferta hídrica por habitante entre el corredor de los grandes ríos, expandido en varias provincias por los acueductos, y el resto del país dependiente de menos recursos; 2) la concentración de la demanda de servicios hídricos en pocas cuencas y superficie del territorio nacional; 3) la importancia del recurso subterráneo como fuente complementaria en muchas ciudades, así como su aporte exclusivo a ciudades de la llanura en donde la calidad del agua debido al alto contenido de arsénico puede ser un problema; 4) la preponderancia de embalses regulando los aportes de las cuencas internas del país, con la problemática acompañante de colmatación y contaminación; 5) la existencia de varias ciudades que encadenan el vertido

de efluentes de una con la provisión de otra aguas abajo, y 6) la alta presión efluente en cuencas endorreicas del centro del país. Estas realidades son abordadas típicamente por tomadores de decisión municipales y provinciales y apoyada, en muy pocos casos, por la comunidad científica. Por lo tanto, la identificación de familias de problemáticas comunes permitirá alinear los esfuerzos del sistema de ciencia y técnica junto a los de las distintas agencias nacionales y provinciales dedicadas a la gestión ambiental, la infraestructura y el bienestar humano.

AGRADECIMIENTOS. Este trabajo fue elaborado en el marco de la Red de Evaluación y Monitoreo de Ecosistemas Acuáticos (REM.AQUA), en base a un convenio entre el CONICET y el Ministerio de Ambiente y Desarrollo Sostenible de la Nación, Argentina, con financiación de esta última. María Poca, Miguel Pascual y Esteban Jobbágy contaron además con el apoyo del proyecto Governagua (IAI) para la ejecución de este trabajo (SGP-HW 056). M. Poca también contó con el apoyo de la Agencia I+D+i a través del FONCyT (PICT-2018-03143) y de CONICET (PIP-2712). Ricardo Albariño recibió financiación de la Agencia I+D+i (PICT-2020-1426). Los comentarios y sugerencias de tres revisores y el editor asociado mejoraron significativamente el manuscrito.

REFERENCIAS

- Boyd, J., and S. Banzhaf. 2007. What are ecosystem services? The need for standardized environmental accounting units. *Ecological Economics* 63:616-626. <https://doi.org/10.1016/j.ecolecon.2007.01.002>.
- Bucher, E. H., and E. D. Curto. 2009. Managing Salt Lakes in the Neotropics: Challenges and Alternatives The Case of Mar Chiquita, Argentina. <https://digitalcommons.usu.edu/nrei/vol15/iss1/24>.
- Castro, J.E., G. Ariel Kohan, A. Poma and C. Ruggerio. 2020. Territorialidades del agua. Conocimiento y acción para construir. Ediciones CICCUS. Red WATERLAT-GOBACIT. <https://doi.org/10.2307/j.ctv1xg5hd9>.
- Chen, J., B. Jiang, Y. Bai, X. Xu, and J. M. Alatalo. 2019. Quantifying ecosystem services supply and demand shortfalls and mismatches for management optimization. *Science of The Total Environment* 650:1426-1439. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.09.126>.
- Chung, M. G., Frank, K. A., Pokhrel, Y., Dietz, T., and J. Liu. 2021. Natural infrastructure in sustaining global urban freshwater ecosystem services. *Nature Sustainability* 4(12):1068-1075. <https://doi.org/10.1038/s41893-021-00786-4>.
- Correa de Oliveira, D. B., W. D. A. Soares, and M. A. C. R. de Holanda. 2020. Effects of rainwater intrusion on an activated sludge sewer treatment system. *Revista Ambiente e Água* 15(3). <https://doi.org/10.4136/ambi-agua.2497>.
- Csardi, G., and T. Nepusz. 2006. The igraph software package for complex network research. *InterJournal, Complex Systems*, 1695. URL: igraph.org.
- Daily, G. C. 1997. Introduction: What are Ecosystem Services? Pp. 1-10 *en* G. C. Daily (ed.). *Nature's Services: Societal Dependence on Natural Ecosystems*. Island Press, Washington, D.C. USA.
- Díaz, S., S. Demissew, J. Carabias, C. Joly, M. Lonsdale, N. Ash, A. Larigauderie, J. Adhikari, et al. 2015. The IPBES Conceptual Framework - connecting nature and people. *Current Opinion in Environmental Sustainability* 14:1-16. <https://doi.org/10.1016/j.cosust.2014.11.002>.
- Domínguez, E., A. Giorgi, and N. Gómez. 2020. La bioindicación en el monitoreo y evaluación de los sistemas fluviales de la Argentina: bases para el análisis de la integridad ecológica. Primera edición. Eudeba. Ciudad Autónoma de Buenos Aires, Argentina.
- Farr, T. G., P. A. Rosen, E. Caro, R. Crippen, R. Duren, S. Hensley, M. Kobrick, M. Paller, E. Rodríguez, L. Roth, D. Seal, S. Shaffer, J. Shimada, J. Umland, M. Werner, M. Oskin, D. Burbank, and D. E. Alsdorf. 2007. The shuttle radar topography mission. *Reviews of Geophysics* 45(2). <https://doi.org/10.1029/2005RG000183>.

- Flörke, M., C. Schneider, and R. I. McDonald. 2018. Water competition between cities and agriculture driven by climate change and urban growth. *Nature Sustainability* 1:51-58. <https://doi.org/10.1038/s41893-017-0006-8>.
- Fuensschilling, L., and B. Truffer. 2016. The interplay of institutions, actors and technologies in socio-technical systems - An analysis of transformations in the Australian urban water sector. *Technological Forecasting and Social Change* 103:298-312. <https://doi.org/10.1016/j.TECHFORE.2015.11.023>.
- Giacosa, R., C. Paoli, and P. Cacik. 2020. Conocimiento del Régimen Hidrológico. Pp. 69-104 *en* C. Paoli and M. Schreider (eds.). *El Río Paraná en su tramo medio*. Universidad Nacional del Litoral, Santa Fe, Argentina.
- Hernández, M. A., N. González, and J. Chilton. 1997. Impact of rising piezometric levels on Greater Buenos Aires due to partial changing of water services infrastructure. Pp. 237-242 *en* J. Chilton (ed.). *Groundwater in the urban environment*. Proceedings of the XXVII IAH Congress on Groundwater in the Urban Environment, Nottingham UK. A. A. Balkema. URL: sedici.unlp.edu.ar/handle/10915/26650.
- Jenson, S. K., and J. O. Domingue. 1988. Extracting Topographic Structure from Digital Elevation Data for Geographic Information System Analysis. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing* 54(11):1593-1600. <https://doi-org/10.4236/jwarp.2012.49081>.
- Jobbágy, E. G., M. Pascual, M. P. Barral, M. Poca, L. G. Silva, J. Oddi, G. Castellanos, A. Clavijo, B. G. Díaz, and P. E. Villagra. 2021. Representación espacial de la oferta y la demanda de los servicios ecosistémicos vinculados al agua. *Ecología Austral* 32:213-228. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.1.1.1213>.
- Juárez, P., L. Becerra, and H. Thomas. 2018. Agua para el Desarrollo. Hacia la Planificación Estratégica de Sistemas Tecnológicos Sociales. Pp. 45-66 *en* P. Juárez (ed.). *Hacia la gestión estratégica del agua y saneamiento en el sur-sur: visiones, aprendizajes y tecnologías*. Universidad Nacional de Quilmes, Bernal, Buenos Aires, Argentina.
- Karpp, C., and P. Krebs. 2011. Quantification of groundwater infiltration and surface water inflows in urban sewer networks based on a multiple model approach. *Water Research* 45(10):3129-3136. <https://doi.org/10.1016/j.watres.2011.03.022>.
- Lanzetta, M. 2021. Los desafíos del cambio climático en grandes metrópolis latinoamericanas. *Estado y Políticas Públicas* 17:19-38.
- Laterra, P., E. Jobbágy, and J. Paruelo. 2011. Valoración de Servicios Ecosistémicos. Conceptos, herramientas y aplicaciones para el ordenamiento territorial. Ediciones INTA. Primera edición. Buenos Aires, Argentina.
- Lehner, B., and G. Grill. 2013. Global river hydrography and network routing: baseline data and new approaches to study the world's large river systems. *Hydrological Processes* 27(15):2171-2186. <https://doi.org/10.1002/hyp.9740>.
- Lehner, B., K. Verdin, and A. Jarvis. 2008. New global hydrography derived from spaceborne elevation data. *Eos, Transactions, American Geophysical Union* 89(10):93-94. <https://doi.org/10.1029/2008eo100001>.
- Litter, M. I., A. M. Ingallinella, V. Olmos, M. Savio, G. Difeo, L. Botto, et al. 2019. Arsenic in Argentina: Occurrence, human health, legislation and determination. *Science of the Total Environment* 676:756-766. <https://doi.org/10.1016/J.SCITOTENV.2019.04.262>.
- Luck, G. W., R. Harrington, P. A. Harrison, C. Kremen, P. M. Berry, R. Bugter, et al. 2009. Quantifying the contribution of organisms to the provision of ecosystem services. *BioScience* 59:223-235. <https://doi.org/10.1525/BIO.2009.59.3.7>.
- McDonald, R. I., K. Weber, J. Padowski, M. Flörke, C. Schneider, P. A. Green, T. Gleeson, et al. 2014. Water on an urban planet: Urbanization and the reach of urban water infrastructure. *Global Environmental Change* 27:96-105. <https://doi.org/10.1016/J.GLOENVCHA.2014.04.022>.
- McGrane, S. J. 2016. Impacts of urbanisation on hydrological and water quality dynamics, and urban water management: a review. *Hydrological Sciences Journal* 61(13):2295-2311. <https://doi.org/10.1080/02626667.2015.1128084>.
- Naumann, G., G. Podestà, J. Marengo, J. Luterbacher, D. Bavera, C. Arias Muñoz, et al. 2022. El episodio de sequía extrema de 2019-2021 en la Cuenca del Plata. EUR 30833 ES. Oficina de Publicaciones de la Unión Europea, Luxemburgo, ISBN 978-92-76-47671-9. <https://doi.org/10.2760/346183>.
- O'Callaghan, J. F., and D. M. Mark. 1984. The extraction of drainage networks from digital elevation data. *Comput Vis Graph Image Process* 28(3):323-344. [https://doi.org/10.1016/S0734-189X\(84\)80011-0](https://doi.org/10.1016/S0734-189X(84)80011-0).
- O'Farrell, I., C. Motta, M. Forastier, W. Polla, S. Otaño, N. Meichtry, M. Devercelli, and R. Lombardo. 2019. Ecological meta-analysis of bloom-forming planktonic Cyanobacteria in Argentina. *Harmful Algae* 83:1-13. <https://doi.org/10.1016/j.hal.2019.01.004>.
- Padowski, J. C., and J. W. Jawitz. 2012. Water availability and vulnerability of 225 large cities in the United States. *Water Resources Research* 48(12). <https://doi.org/10.1029/2012WR012335>.
- Pascual, M., M. P. Barral, M. Poca, N. Pessacg, L. G. Silva, R. Albariño, M. E. Romero, and E. G. Jobbágy. 2021. Ecosistemas acuáticos continentales y sus servicios: Enfoques y escenarios de aplicación en el mundo real. *Ecología Austral* 32(1bis):195-212. <https://doi.org/10.25260/EA.22.32.1.1.1290>.
- Plataforma del Agua. 2022. Informe de la plataforma del agua argentina 2017. URL: plataformadelagua.org.ar/mapa/argentina.
- Quétier, F., E. Tapella, G. Conti, D. Cáceres, and S. Díaz. 2007. Servicios ecosistémicos y actores sociales. Aspectos conceptuales y metodológicos para un estudio interdisciplinario *Gaceta Ecológica* (84-85):17-26. URL: redalyc.org/articulo.oa?id=53908503.
- Quijas, S., B. Schmid, and P. Balvanera. 2010. Plant diversity enhances provision of ecosystem services: A new synthesis. *Basic and Applied Ecology* 11:582-593. <https://doi.org/10.1016/J.BAAE.2010.06.009>.
- R Core Team. 2020. R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL: R-project.org.

- Reyna, S., T. Reyna, and M. Lábaque. 2014. Fire Impacts to Quality of Reservoirs San Roque and Los Molinos. *Pinnacle Environmental and Earth Sciences* 1(2):315-321.
- Rygaard, M., P. J. Binning, and H. J. Albrechtsen. 2011. Increasing urban water self-sufficiency: New era, new challenges. *Journal of Environmental Management* 92:185-194. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2010.09.009>.
- Sankey, H. R. 1898. Introductory note on the thermal efficiency of steam-engines. Report of the committee appointed on the 31st of March 1896, to consider and report to the council upon the subject of the definition of a standard or standards of thermal efficiency for steam-engines: With an introductory note. *Minutes of Proceedings of the Institution of Civil Engineers* 134:278-283. incl. Plate 5. Also published in: *The Engineer* 86, Sept. 2, 1898:236-237. <https://doi.org/10.1680/imotp.1898.19100>.
- Schlesinger, W. H., and E. S. Bernhardt. 2013. *Biogeochemistry: an analysis of global change*. Third edition. Academic press Elsevier, Waltham, USA.
- Schyns, J. F., A. Y. Hoekstra, M. J. Booij, R. J. Hogeboom, and M. M. Mekonnen. 2019. Limits to the world's green water resources for food, feed, fiber, timber, and bioenergy. *Proceedings of the National Academy of Sciences* 116(11):4893-4898. <https://doi.org/10.1073/pnas.1817380116>.
- Singh, N. K., and N. B. Basu. 2022. The human factor in seasonal streamflows across natural and managed watersheds of North America. *Nature Sustainability* 5:397-405. <https://doi.org/10.1038/s41893-022-00848-1>.
- Tarboton, D. G., R. L. Bras, and I. Rodríguez-Iturbe. 1991. On the Extraction of Channel Networks from Digital Elevation Data. *Hydrological Processes* 5:81-100. <https://doi.org/10.1002/hyp.3360050107>.
- Tellman, B., McDonald, R. I., Goldstein, J. H., Vogl, A. L., Flörke, M., Shemie, et al. 2018. Opportunities for natural infrastructure to improve urban water security in Latin America. *Plos ONE* 13(12):e0209470. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0209470>.
- Trimble, M., P. R. Jacobi, T. Olivier, M. Pascual, C. Zurbriggen, L. Garrido, and N. Mazzeo. 2021a. Reconfiguring Water Governance for Resilient Social-Ecological Systems in South America. Pp. 113-135 *in* J. Baird and R. Plummer (eds.). *Water Resilience. Management and Governance in Times of Change*. Springer International Publishing Cham, Switzerland. https://doi.org/10.1007/978-3-030-48110-0_6.
- Trimble, M., P. H. C. Torres, P. R. Jacobi, N. Dias Tadeu, F. Salvadores, L. Mac Donnell, et al. 2021b. Towards Adaptive Water Governance in South America: Lessons from Water Crises in Argentina, Brazil, and Uruguay. *World Sustainability Series* 31-46. https://doi.org/10.1007/978-3-030-76624-5_3.
- Van Rooijen, D. J., T. W. Biggs, I. Smout, and P. Drechsel. 2010. Urban growth, wastewater production and use in irrigated agriculture: a comparative study of Accra, Addis Ababa and Hyderabad. *Irrigation and Drainage Systems* 24(1):53-64. <https://doi.org/10.1007/s10795-009-9089-3>.
- Willcock, S., A. Parker, C. Wilson, T. Brewer, D. Bundhoo, S. Cooper, et al. 2021. Nature provides valuable sanitation services. *One Earth* 4(2):192-201. <https://doi.org/10.1016/j.oneear.2021.01.003>.
- Wu, H., X. Gao, M. Wu, Y. Zhu, R. Xiong, and S. Ye. 2020. The efficiency and risk to groundwater of constructed wetland system for domestic sewage treatment-A case study in Xiantao, China. *Journal of Cleaner Production* 277:123384. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.123384>.
- Yahdjian, L., O. E. Sala, and K. M. Havstad. 2015. Rangeland ecosystem services: Shifting focus from supply to reconciling supply and demand. *Frontiers in Ecology and the Environment* 13:44-51. <https://doi.org/10.1890/140156>.