El acuífero Caplina al límite: evidencia científica y reformas urgentes para evitar el colapso del sistema subterráneo de Tacna

The Caplina Aquifer at Risk: Scientific Evidence and Urgent Reforms to Prevent the Collapse of Tacna's Groundwater System

Edwin Pino-Vargas[1]*, Víctor Pocco[2], Elizabeth Cruz[3], Carla Espinoza[4], Geraldine Albarracín[5], María Pacoticona[6], Evelyn Torres[7], Yassmin Dancé[8]

1 Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.
2 Departamento de Ingeniería Geológica-Geotecnia, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.
3 Oficina Desconcentrada de Tacna, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Tacna, Perú.
4 Dirección de Innovación y Transferencia Tecnológica, Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.
5 Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann. Tacna, Perú.
6 Oficina Desconcentrada de Tacna, Organismo de Evaluación y Fiscalización Ambiental. Tacna, Perú.
7 Subgerencia de Gestión Ambiental, Gobierno Regional de Tacna. Tacna, Perú.
8 Subgerencia de Gestión Ambiental, Gobierno Regional de Tacna. Tacna, Perú.

SOUTH SUSTAINABILITY

Citar como: Pino-Vargas, E. *et al.* (2026). El acuífero Caplina al límite: Evidencia científica y reformas urgentes para evitar el colapso del sistema subterráneo de Tacna. *South Sustainability*, 7(2), e171. DOI: 10.21142/SS-0702-2026-e171

Recibido:13/8/2026
Revisado por pares
Aceptado:4/9/2026

© Los autores, 2026. Publicado por la Universidad Científica del Sur (Lima, Perú)

*E-mail de correspondencia:
epinov@unjbg.edu.pe

Editor asociado:
Anwar Yarín

RESUMEN

El acuífero Caplina, una de las principales fuentes de abastecimiento hídrico de Tacna, se encuentra en un estado crítico de sobreexplotación que amenaza su sostenibilidad. La evidencia científica muestra que el equilibrio entre recarga y extracción se rompió en la década de 1980, hasta alcanzar en 2024 un déficit de -177 hm^3/año y una extracción aproximadamente cinco veces superior a la recarga natural. Esta situación, agravada por la expansión de la frontera agrícola, la ocupación informal del territorio y una débil fiscalización, compromete la seguridad hídrica regional. Este *policy brief* propone fortalecer el monitoreo y control de las extracciones, implementar un ordenamiento territorial que limite la expansión agrícola, revisar las licencias de uso de agua y establecer sistemas de riego tecnificado de alta eficiencia para reducir la presión sobre el acuífero.

Palabras clave: *acuífero Caplina, sobreexplotación hídrica, gestión sostenible del agua, gobernanza del agua, fiscalización ambiental, sostenibilidad hídrica*

ABSTRACT

The Caplina aquifer, one of the main sources of Tacna's water supply, is in a critical state of overexploitation that threatens its sustainability. Scientific evidence has shown that the balance between recharge and extraction was disrupted in the 1980s, reaching a deficit of -177 hm^3/year by 2024, with the extraction rate approximately five times higher than natural recharge. This situation, exacerbated by the expansion of the agricultural frontier, informal land occupation and weak regulatory enforcement, compromises regional water security. In this policy brief, we propose the strengthening of the monitoring and control of groundwater extraction, the implementation of land-use planning to limit agricultural expansion, a review of water-use licenses, and the establishment of high-efficiency irrigation systems, in order to reduce pressure on the aquifer.

Keywords: *Caplina aquifer, water overexploitation, sustainable water management, water governance, environmental oversight, water sustainability*

1. Introducción

El agua subterránea constituye la principal fuente de abastecimiento para múltiples actividades productivas y poblacionales en regiones áridas y semiáridas del mundo (Bouchaou *et al.*, 2024). Sin embargo, el incremento sostenido de las extracciones por encima de las tasas naturales de recarga, sumado a los efectos del cambio climático y al crecimiento de la demanda hídrica, viene generando procesos de sobreexplotación y deterioro de la calidad del agua en numerosos acuíferos en el mundo (Rosa y Sangiorgio, 2025). En este contexto, el acuífero Caplina representa un caso emblemático de estrés hídrico, ya que desde la década de 1980 se registra un balance hídrico negativo y una progresiva intrusión marina que amenaza la sostenibilidad del recurso. A pesar de la implementación de diversas normas, vedas y medidas regulatorias durante las últimas cuatro décadas, la evidencia científica muestra que las condiciones del sistema continúan deteriorándose (Pino-Vargas *et al.*, 2023).

La problemática del acuífero Caplina no constituye un caso aislado. Diversos sistemas acuíferos ubicados en regiones áridas y semiáridas han experimentado procesos similares de sobreexplotación, descenso de niveles piezométricos, deterioro de la calidad del agua y conflictos asociados a la asignación del recurso. En el caso del desierto de Atacama chileno, el acuífero Pampa del Tamarugal presenta un incremento sostenido de las extracciones y un descenso generalizado del nivel freático, que evidencian los efectos de la presión antrópica sobre un sistema de baja recarga (Viguier *et al.*, 2019). De manera similar, los grandes acuíferos fósiles del norte de África enfrentan procesos de agotamiento asociados a extracciones excesivas, para los cuales se han planteado reducciones de bombeo como estrategia de sostenibilidad (Ahmed, 2020). Las experiencias internacionales muestran que la reducción de la presión sobre los acuíferos requiere combinar el control efectivo de las extracciones con medidas de gestión de la demanda, monitoreo continuo y fuentes complementarias de abastecimiento.

La revisión de las políticas públicas de gestión del agua subterránea, contrastada con más de 25 investigaciones desarrolladas en el acuífero Caplina, evidencia importantes brechas entre el diseño normativo y su aplicación efectiva. Las medidas implementadas no han detenido el agotamiento de las reservas ni el avance de la salinización, en un acuífero de carácter fósil cuya recuperación natural requiere escalas temporales prolongadas. La limitada fiscalización de las extracciones y la expansión agrícola sin correspondencia con la disponibilidad hídrica han profundizado esta problemática. De continuar esta tendencia, se comprometería la seguridad hídrica, el desarrollo económico y la estabilidad social de Tacna (González-Domínguez *et al.*, 2024; Narváez-Montoya *et al.*, 2021). Las comunidades rurales y pequeños agricultores enfrentarían menor disponibilidad de agua y mayores costos de bombeo, mientras que en el ámbito urbano aumentaría la presión sobre fuentes alternativas de abastecimiento. Por ello, la recuperación del acuífero constituye una prioridad ambiental, económica y social para la región Tacna.

2. Enfoque y discusión

El acuífero Caplina atraviesa una situación crítica, resultado de una combinación de factores ambientales, económicos e institucionales que, actuando de forma simultánea y prolongada en el tiempo, han provocado un uso excesivo de las reservas de agua subterránea llevándolo al balance negativo a partir de la década de 1980 (Figura 1) y un progresivo deterioro de su calidad y disponibilidad en la región de Tacna (Chucuya *et al.*, 2022; Pino-Vargas, 2023; Pocco *et al.*, 2023). Frente a este escenario, resulta fundamental comprender cuáles son los elementos que han contribuido a esta problemática; por ello, en esta sección se analizan los principales factores involucrados, con el propósito de identificar las causas más relevantes y orientar la implementación de estrategias efectivas:

Expansión agrícola y sobreexplotación histórica del recurso hídrico

Durante las últimas cuatro décadas, la extracción de agua subterránea del acuífero Caplina se incrementó de manera sostenida, con una aceleración significativa a partir de 2015, año en que se promulgó el Decreto Supremo N.° 007-2015-MINAGRI, que estableció disposiciones para la formalización y regularización de licencias de uso de agua. La expansión de la agricultura y de la actividad agroindustrial incrementó la demanda de agua para riego y profundizó el desequilibrio entre la recarga natural y los volúmenes extraídos para usos agrícolas y poblacionales (Machaca-Pillaca *et al.*, 2022). Las estimaciones disponibles indican una recarga aproximada de 19,84 hm^3/año y un déficit hídrico de 177 hm^3/año, lo que evidencia una presión muy superior a la capacidad natural de recuperación del sistema (González-Domínguez *et al.*, 2024).

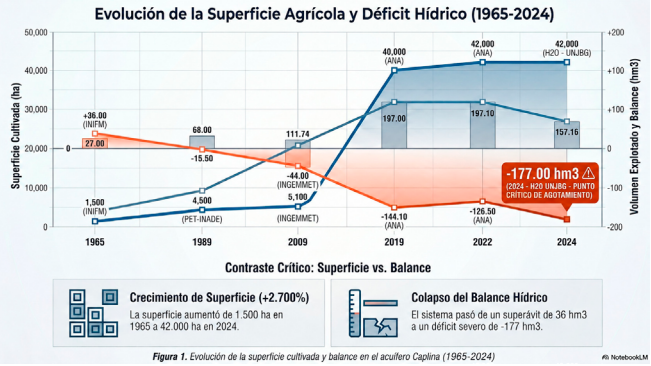


Figura 1. Evolución de la superficie cultivada y balance en el acuífero Caplina (1965 – 2024)

DOI: 10.21142/SS-0702-2026-e171

Ante la creciente actividad agrícola y agroindustrial en la irrigación La Yarada-Los Palos, ha incrementado la demanda de agua para riego, lo que impulsa informalmente la perforación de nuevos pozos ilegales. Esto agrava la situación del sistema acuífero, ya que se ha detectado que los niveles de agua del acuífero han descendido de forma gradual, y se llega a una estabilización progresiva respecto al descenso como consecuencia de la intrusión marina (Chucuya *et al*., 2022, 2025), hasta generar un riesgo mayor de deterioro de la calidad del agua subterránea.

En este sentido, es fundamental promover prácticas orientadas al uso eficiente del agua subterránea e implementar técnicas modernas de sistemas de riego para establecer volúmenes de extracción compatibles con las tasas reales de recarga del sistema acuífero; ahorrar agua usando tecnología avanzada de riego no debe significar ampliación de frontera agrícola. Asimismo, para gestionar adecuadamente los recursos debemos saber cómo se están comportando; por lo tanto, se requiere fortalecer los programas de monitoreo del agua subterránea en cantidad y calidad. La efectividad de estas acciones deberá determinarse mediante un balance hídrico que permita estimar su contribución a la reducción del déficit actual. Sin embargo, la incertidumbre asociada a las extracciones no autorizadas y a la eficiencia real de los sistemas de riego impide establecer con precisión dicho volumen. Por ello, la brecha remanente deberá abordarse mediante fuentes complementarias, como la desalación, la reutilización de aguas residuales tratadas y la recarga artificial, considerando su viabilidad técnica, ambiental y económica.

Contradicción normativa

La Ley N.° 29338, Ley de Recursos Hídricos, establece que el otorgamiento de licencias debe sustentarse en la disponibilidad hídrica y la gestión sostenible del recurso, mientras que el marco regulatorio busca proteger acuíferos sobreexplotados o en riesgo. Sin embargo, el Decreto Supremo N.° 007-2015-MINAGRI, que regula la formalización o regularización de licencias de uso de agua, mantuvo la condición de las zonas declaradas cerradas, pero permitió excepcionalmente y por única vez la formalización o regularización de usos existentes (Figura 2). Asimismo, la Ley N.° 32700 incorpora una disposición transitoria que permitirá la formalización de predios agrícolas ubicados en zonas de frontera, para beneficio de agricultores de distritos como La Yarada-Los Palos. Estas disposiciones pueden favorecer la formalización y nuevas inversiones agroindustriales en un acuífero con déficit hídrico, lo que genera un riesgo ambiental si no se articulan con su capacidad real de disponibilidad hídrica.

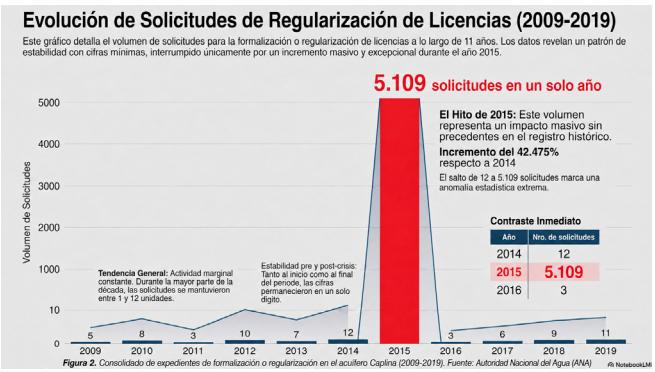


Figura 2. Consolidado de expedientes de formalización o regularización en el acuífero Caplina (2009 – 2019). Fuente: Autoridad Nacional del Agua (ANA)

La sostenibilidad del acuífero Caplina requiere superar esta gestión institucional fragmentada mediante un esquema de gobernanza multinivel que articule a la Autoridad Nacional del Agua (ANA), el Ministerio de Desarrollo Agrario y Riego (Midagri), el Gobierno Regional de Tacna e incluya a la academia representada por la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann (UNJBG) como institución proveedora de conocimiento con base científica. La ANA debería liderar el monitoreo del balance hídrico, la administración de los derechos de uso y la fiscalización de las extracciones; el Midagri, orientar las políticas de desarrollo agrícola y tecnificación del riego según la disponibilidad hídrica; el Gobierno Regional, incorporar las restricciones del acuífero en la planificación territorial y controlar la expansión de la frontera agrícola y la UNJBG, como ente rector en la generación de conocimiento del sistema acuífero con base científica. Estas entidades deberían establecer un mecanismo permanente de coordinación para compartir información, definir metas de reducción de extracciones y evaluar periódicamente las medidas de gestión.

Proliferación de pozos ilegales e informalidad

La creciente sobreexplotación del acuífero se debe a la falta de control sobre las extracciones clandestinas, lo que sugiere un desafío importante para la gestión hídrica en esta región. En este sentido, esta situación dificulta la obtención de información sobre los volúmenes reales extraídos, lo que limita la capacidad de acción de las autoridades para gestionar adecuadamente el uso del recurso hídrico; además, la autoridad de agua no cuenta con mecanismos de seguridad para implementar medidas correctivas en un sistema totalmente rebasado por la ilegalidad en las extracciones. La problemática se ve inclusive agravada por los altos niveles de informalidad presentes entre los usuarios del acuífero.

Entre los medios viables que las entidades responsables pueden adaptar es la implementación de mecanismos de fiscalización y monitoreo de la extracción de agua. Del mismo modo, la fiscalización de las extracciones deberá considerar una estrategia de gobernabilidad que permita viabilizar el cierre o la regularización de los pozos existentes, especialmente en sectores de alta complejidad social como La Yarada-Los Palos. Para ello, se requiere

establecer criterios transparentes para diferenciar los pozos susceptibles de regularización de aquellos que deberán ser clausurados, acompañando las acciones de control con procesos de información y participación de los usuarios y organizaciones agrícolas. Asimismo, la implementación progresiva de las medidas, junto con la coordinación entre la ANA, el Gobierno Regional de Tacna y las organizaciones de usuarios, permitiría reducir la resistencia social y facilitar el cumplimiento de las disposiciones de fiscalización.

Limitada capacidad de recarga natural en un entorno hiperárido y balance hídrico

A diferencia de otros sistemas acuíferos con mayores precipitaciones en otras regiones del Perú, el acuífero Caplina se desarrolla dentro de uno de los entornos más áridos del planeta Tierra, donde las lluvias son escasas e irregulares (Narváez-Montoya *et al*., 2021). Esta condición limita severamente la capacidad natural de recarga del sistema, ya que los aportes provenientes de las precipitaciones, infiltración superficial y escorrentías son insuficientes para compensar los volúmenes de agua extraídos anualmente. Como consecuencia, el acuífero posee una capacidad de recuperación naturalmente lenta frente a las presiones generadas por las actividades humanas.

En vista de este escenario, resulta indispensable reconocer las limitaciones naturales del acuífero Caplina e incorporar dichas restricciones en la planificación del desarrollo territorial y productivo de la región. Entre las alternativas viables se encuentran promover fuentes complementarias de abastecimiento hídrico, fortalecer la reutilización de aguas residuales tratadas y fomentar una asignación más eficiente del agua disponible, de manera que la sostenibilidad del acuífero no dependa exclusivamente de una recarga natural limitada.

3. Conclusiones y recomendaciones de política pública

El acuífero Caplina se encuentra en un estado crítico de sobreexplotación que amenaza con un colapso irreversible si no se implementan reformas estructurales y no estructurales. La evidencia científica acumulada revela que el equilibrio hídrico recarga-extracción se rompió en la década de 1980, al pasar de un superávit de 36,0 hm^3 en 1965 a un déficit de -177 hm^3 en 2024. La ocupación informal del territorio y la especulación de tierras, sumadas a la debilidad institucional, han propiciado un escenario donde el agotamiento del recurso perjudica a los usuarios y pone en riesgo la sostenibilidad del sistema. Se estima que, dentro de 10 a 20 años, la evolución del acuífero Caplina dependerá de las decisiones de gestión adoptadas en el presente. De ser así, bajo el escenario tendencial que se sigue, caracterizado por la continuidad de las extracciones, la expansión de la demanda y un control insuficiente de los pozos, se mantendría el déficit hídrico y se agravaría el deterioro de la calidad del agua, que incrementaría el riesgo de colapso del sistema. En contraste, un escenario de recuperación basado en el control efectivo de las extracciones, la contención de la frontera agrícola y la modernización del riego permitiría reducir la presión sobre el acuífero y avanzar hacia su estabilización. Esta perspectiva evidencia que la brecha entre ambos escenarios dependerá de la capacidad institucional para implementar de manera conjunta las medidas propuestas.

En consecuencia, resulta indispensable fortalecer los mecanismos de monitoreo, fiscalización y planificación hídrica, priorizando decisiones basadas en la disponibilidad real del acuífero y en la evidencia científica para evitar la profundización de su deterioro. Este *policy brief* propone que el acuífero Caplina requiere implementar un sistema de vigilancia tecnológica integral bajo la responsabilidad de la ANA a escala regional. No obstante, como etapa previa, es importante realizar un censo y georreferenciación de los pozos existentes mediante herramientas modernas como teledetección y uso de imágenes satelitales, complementadas por verificaciones en campo, con el fin de identificar y localizar tanto los pozos registrados como aquellos que operan de manera no autorizada. Posteriormente, los pozos identificados y autorizados deberán incorporarse progresivamente a sistemas de medición y telemetría que permitan controlar en tiempo real los volúmenes de extracción, mientras que los pozos no autorizados deberán ser sujetos a las acciones de fiscalización y control correspondientes.

Paralelamente, se deberá establecer un límite a la expansión de la frontera agrícola, que mantenga la superficie actual de aproximadamente 42 000 ha, de manera que los volúmenes de agua potencialmente ahorrados mediante mejoras en la eficiencia del riego no sean utilizados para ampliar la superficie cultivada. Finalmente, se deberá promover la implementación progresiva de sistemas de riego tecnificado de alta eficiencia en las áreas agrícolas existentes, estimando el volumen potencial de ahorro de agua en volumen anual a partir de la diferencia entre los requerimientos actuales de riego y los requerimientos esperados bajo sistemas altamente tecnificados. La aplicación conjunta de estas medidas permitiría que el ahorro generado por la tecnificación se traduzca en una reducción efectiva de las extracciones del acuífero, en lugar de generar un incremento de la demanda mediante la expansión agrícola.

Contribución de autoría

Edwin Pino-Vargas: conceptualización, investigación, escritura del borrador original, escritura, revisión y edición, y supervisión.

Víctor Pocco: investigación y escritura del borrador original.

DOI: 10.21142/SS-0702-2026-e171

Elizabeth Cruz: investigación.

Carla Espinoza: investigación.

Geraldine Albarracín: investigación.

María Pacoticona: investigación.

Evelyn Torres: investigación.

Yassmin Dancé: investigación.

Fuente de financiamiento

Autofinanciado.

Potenciales conflictos de interés

Los autores declaran no tener conflictos de interés.

Declaración sobre el uso de IA

Durante la elaboración de este trabajo, los autores utilizaron herramientas de inteligencia artificial generativa con la finalidad de apoyar la corrección gramatical, la mejora de la claridad del lenguaje y la elaboración de las figuras basadas en información recopilada por los autores. Posteriormente, los autores revisaron y editaron cuidadosamente el contenido, y asumen plena responsabilidad por todo el contenido de la publicación.

Agradecimientos

Este *policy brief* recoge insumos de los resultados de proyectos de investigación financiados con fondos de canon, sobrecanon y regalías mineras otorgados por la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann, Proyecto «Determinación de las reservas de agua dulce del acuífero Caplina y evaluación de riesgos de la salinización para un manejo sostenible del agua subterráneas, Tacna, Perú». Si bien los coautores de este trabajo son investigadores y funcionarios públicos, el documento se desarrolla de manera independiente y busca aportar al fortalecimiento del debate técnico en torno a la sostenibilidad del agua subterránea del acuífero Caplina. La presente investigación se desarrolló como parte de las actividades del Grupo H2O-UNJBG y la OEFA.

Referencias bibliográficas

Ahmed, M. (2020). «Sustainable Management Scenarios for Northern Africa's Fossil Aquifer Systems». *Journal of Hydrology*, 589, 125196. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2020.125196

Bouchaou, L., El Alfy, M., Shanafield, M., Siffeddine, A. y Sharp, J. (2024). «Groundwater in Arid and Semi-Arid Areas». *Geosciences*, 14(12), 332. Disponible en: https://doi.org/10.3390/geosciences14120332

Chucuya, S., Pacci, R., Bustincio, B., Taya-Acosta, E., Alfonso-Morales, W., Huayna, G., Pino-Vargas, E., Ingol-Blanco, E., Mora, A., Torres-Martínez, J. A., Narvaez-Montoya, C. y Mahlknecht, J. (2025). «Reconstructing Aquifer Dynamics with Machine Learning: Linking Irrigation Expansion to Groundwater Decline in a Data-Scarce Hyper-Arid Region». *Agricultural Water Management*, 322, 110018. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.agwat.2025.110018

Chucuya, S., Vera, A., Pino-Vargas, E., Steenken, A., Mahlknecht, J. y Montalván, I. (2022). «Hydrogeochemical Characterization and Identification of Factors Influencing Groundwater Quality in Coastal Aquifers, Case: La Yarada, Tacna, Peru». *International Journal of Environmental Research and Public Health*, 19(5), 2815. Disponible en: https://doi.org/10.3390/ijerph19052815

González-Domínguez, J., Mora, A., Chucuya, S., Pino-Vargas, E., Torres-Martínez, J. A., Dueñas-Moreno, J., Ramos-Fernández, L., Kumar, M. y Mahlknecht, J. (2024). «Hydraulic recharge and element dynamics during salinization in an overexploited coastal aquifer of the world's driest zone: Atacama Desert». *Science of The Total Environment*, 954, 176204. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2024.176204

Machaca-Pillaca, R., Pino-Vargas, E., Ramos-Fernández, L., Quille-Mamani, J. y Torres-Rua, A. (2022). «Estimación de la evapotranspiración con fines de riego en tiempo real de un olivar a partir de imágenes de un drone en zonas áridas, caso La Yarada, Tacna, Perú». *Idesia (Arica)*, 40(2), pp. 55-65. Disponible en: https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8867694

Narváez-Montoya, C., Torres-Martínez, J., Pino-Vargas, E., Cabrera-Olivera, F., Loge, F. y Mahlknecht, J. (2021). «Predicting adverse scenarios for a transboundary coastal aquifer system in the Atacama Desert (Peru/Chile)». *The Science of The Total Environment*, 806(Part 1), 150386. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.150386

Pocco, V., Chucuya, S., Huayna, G., Ingol-Blanco, E. y Pino-Vargas, E. (2023). «A Multi-Criteria Decision-Making Technique Using Remote Sensors to Evaluate the Potential of Groundwater in the Arid Zone Basin of the Atacama Desert». *Water*, 15(7), 1344. Disponible en: https://doi.org/10.3390/w15071344

Pino V., E. (2021). «Conflictos por el uso del agua en una región árida: Caso Tacna, Perú». *Diálogo Andino*, 65, pp. 405-415.

Pino-Vargas, E. (2023). «Caplina Aquifer, after 100 years of exploitation as a sustenance for agriculture in arid zones». World Multidisciplinary Civil Engineering-Architecture-Urban Planning Symposium WMCAUS 2022. Praga, República Checa. Disponible en: https://doi.org/10.1063/5.0170368

Pino-Vargas, E., Espinoza-Molina, J., Chávarri-Velarde, E., Quille-Mamani, J. Ingol-Blanco, E. (2023). «Impacts of Groundwater Management Policies in the Caplina Aquifer, Atacama Desert». *Water*, 15(14), 2610. Disponible en: https://doi.org/10.3390/w15142610

Rosa, L. y Sangiorgio, M. (2025). «Global water gaps under future warming levels». *Nature Communications*, 16(1), 1192. Disponible en: https://doi.org/10.1038/s41467-025-56517-2

Viguier, B., Jourde, H., Leonardi, V., Daniele, L., Batiot-Guilhe, C., Favreau, G. y De Montety, V. (2019). «Water table variations in the hyperarid Atacama Desert: Role of the increasing groundwater extraction in the Pampa del Tamarugal (Northern Chile). *Journal of Arid Environments*, 168, pp. 9-16. Disponible en: https://doi.org/10.1016/j.jaridenv.2019.05.007