

SIEMBRA Y COSECHA DE AGUA EN IBEROAMÉRICA



Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo

La Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID) es el principal órgano de gestión de la Cooperación Española, orientada a la lucha contra la pobreza y la desigualdad, la promoción del desarrollo humano sostenible, la construcción de resiliencia de personas y comunidades y la lucha contra el cambio climático. Trabaja por la consecución de la Agenda 2030 en sus países socios, en coordinación con actores locales y globales del desarrollo.

© De esta edición: AECID 2022
© De los textos: los autores
Todos los derechos reservados

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo
Av. Reyes Católicos, 4 (28040 Madrid, España)
Catálogo General de Publicaciones Oficiales: <https://cpage.mpr.gob.es>
NIPO: 109-22-087-X

Edición y coordinación:

Dr. Sergio Martos Rosillo. Científico Titular del IGME-CSIC
Dr. Juan José Duran Valsero. Investigador Científico del IGME-CSIC.

Diseño gráfico y maquetación:

Ximena Chaperero Ayala · www.ximenachapero.com

Cita recomendada:

Martos-Rosillo, S. y Durán, J.J. (Eds.) 2022. *Siembra y Cosecha de Agua en Iberoamérica*. Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo.

Los puntos de vista, las designaciones y las recomendaciones presentadas en esta publicación, que no ha sido sometido a revisión editorial, son de exclusiva responsabilidad de los autores y pueden no coincidir necesariamente con la postura oficial de la AECID.

Esta publicación es una contribución de la Red de Investigación “Siembra y Cosecha del Agua en Áreas Naturales Protegidas” del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo.

SIEMBRA Y COSECHA DE AGUA EN IBEROAMÉRICA



In memoriam del Dr. Luciano Mateos Íñiguez, investigador del CSIC, que dedicó una gran parte de su carrera profesional a la generación de conocimiento y al estrechamiento de los lazos científicos entre España y América, en el campo del manejo sostenible del agua y del suelo.



ÍNDICE

Prólogo	5
Presentación	7
Impactos de la forestación en el agua y los suelos de los Andes <i>Impacts of forestation on water and soils in the Andes</i>	9
Siembra y Cosecha de Agua en sistemas de regadío ancestrales y tradicionales de la Quebrada de Humahuaca (Provincia de Jujuy, Argentina) <i>Water Sowing and Harvesting in ancestral and traditional irrigation systems in Quebrada de Humahuaca Valley (Jujuy Province, Argentina)</i>	21
Hidrotecnologías ancestrales de siembra, cosecha y gestión de agua en las ecorregiones andina y amazónica de Bolivia <i>Ancestral hydraulic technologies for sowing, harvesting and water management in bolivian andean and amazon ecoregions</i>	39
Siembra y Cosecha de Agua en la zona central de Chile <i>Water Sowing and Harvesting in the central zone of Chile</i>	57
Valoración de la ancestralidad: Siembra y Cosecha de Agua <i>Ancestrality valuation: Water Sowing and Harvesting systems</i>	69
Manejo participativo de bofedales en el Parque Nacional Volcán Isluga (Chile) <i>Participatory management of bofedales in the Isluga Volcano National Park (Chile)</i>	83
Evaluación preliminar de los recursos hídricos para la Siembra de Agua en la cuenca del río Palomino (Colombia) <i>Preliminary assessment of water resources for Water Sowing in the Palomino River basin, Colombia</i>	93
Enfoque ecohidrológico para restaurar cochas ancestrales del Cerro Pisaca: Siembra y Cosecha de Agua en Catacocha, Loja, Ecuador <i>Ecohydrological Approach to Restore Ancestral "Cochas" of Pisaca Hill: Water Sowing and Harvesting in Catacocha, Loja, Ecuador</i>	109
Manejo sostenible del agua: Algunos registros de siembra y cosecha de agua en Ecuador <i>Sustainable water management: Some registers of water sowing and harvesting in Ecuador</i>	129
El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España). Un ejemplo ancestral de gestión integral del agua <i>Water management in high mountain watersheds of Sierra Nevada National Park (Southern Spain). An example of ancestral Integrated Water Management</i>	141
Recarga natural vs. siembra de agua mediante acequias de careo en una cuenca semiárida de alta montaña (Sierra Nevada, España) <i>Natural vs ancestral aquifer recharge with careo channels in a semiarid highmountain watershed Sierra Nevada, Spain)</i>	159

Influencia de las acequias de careo en la composición hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas. El caso de la cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Sur de España)	173
<i>Acequias de careo influence on groundwater hydrochemical and isotopic composition. The case of the Bérchules river basin (Sierra Nevada, south of Spain)</i>	
Siembra y Cosecha de Agua en las Alpujarras: acequias de careo y de riego en la cuenca del río Trevélez (Granada, España)	187
<i>Water Sowing and Harvesting in Las Alpujarras: "careo" and irrigation ditches in the Trevélez river watershed (Granada, Spain)</i>	
Técnicas ancestrales de cosecha de agua de lluvia en México	199
<i>Ancestral rainwater harvesting techniques in Mexico</i>	
Sistema comunitario de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano en la región indígena de Mazahua, México	213
<i>Rainwater Harvesting community system for human consumption in the Mazahua indigenous region, Mexico</i>	
Amunas: infraestructura preincaica de mejora de infiltración de agua para la seguridad hídrica de los Andes	223
<i>Amunas: Pre-Inca infiltration enhancement infrastructure for Andean water security</i>	
El estado actual de las experiencias ancestrales de Siembra y Cosecha de Agua en Perú	231
<i>The current state of the ancestral experiences of planting and harvesting water in Peru</i>	

PRÓLOGO

Prólogo

En el siglo XXI no es posible hablar de gestión del agua sin hacer referencia a los riesgos asociados al cambio climático. Los nuevos escenarios, que prevén una significativa reducción de los recursos hídricos, muy especialmente en los países del Mediterráneo, han puesto en evidencia la necesidad de avanzar hacia una economía más sostenible, más respetuosa con la naturaleza y que, en definitiva, garantice la protección de los recursos para próximas generaciones.

Por eso, no es casualidad que los países más avanzados en la materia estén apostando por la Gestión Integrada de los Recursos Hídricos, para garantizar que la gestión del agua, la tierra y los recursos conexos, se lleva a cabo de manera coordinada, con el fin de maximizar el bienestar económico y social de forma equitativa, sin comprometer la sostenibilidad de los ecosistemas. Y no es tampoco casual que, en este escenario de cambio climático, todos tengamos un interés creciente en las denominadas Soluciones basadas en la Naturaleza para la Gestión del Agua (SbNGA), concepto que implica la aplicación de una serie de medidas basadas en los procesos naturales y que pueden ser utilizados para mejorar la disponibilidad de agua en cantidad y calidad, reducir los riesgos de desastres asociados a ella, mejorar la adaptación al cambio A



día de hoy, la investigación de estas soluciones se está promoviendo tanto a nivel multilateral, como sería el caso de Naciones Unidas, como a nivel de la Unión Europea y, por supuesto, a nivel nacional. Así, desde el Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico, trabajamos para avanzar en un mayor conocimiento y mejor aplicación de las posibilidades que la naturaleza siempre ha ofrecido y que olvidamos por el camino. De hecho, los ejemplos de su aplicación en el mundo son escasos y muy recientes.

Sin embargo, en algunas regiones de Iberoamérica, existen casos excepcionales de estas soluciones basadas en el conocimiento ecológico tradicional que poseen las poblaciones locales e indígenas. Encontramos así, la Siembra y Cosecha de Agua (SyCA), que consiste en una serie de procedimientos ancestrales con los que se recolecta el agua de la escorrentía superficial, procedente tanto de la fusión nival, como de la lluvia, para infiltrarla (siembra) en los acuíferos, lo que permite recuperarla (cosecha) cierto tiempo después como agua de descarga subterránea. Este desfase temporal, debido a la lenta velocidad de circulación del agua subterránea por los acuíferos, hace que el agua infiltrada mediante las amunas, las qochas y los bofedales andinos, o el de las acequias de careo alpujarreñas, en el sur de España, siga manando de forma constante a lo largo del año, proporcionando suministro de agua potable y riego en infinidad de poblaciones rurales durante los periodos secos y contribuyendo, a su vez, al mantenimiento de innumerables ecosistemas asociados y a la recuperación de la biodiversidad.

La Siembra y Cosecha del Agua puede considerarse, en sí misma, como una infraestructura verde y presenta un alto potencial para contribuir al logro de los Objetivos de Desarrollo Sostenible. En concreto, al Objetivo 6, seguridad hídrica, o al Objetivo 2, como apoyo a la agricultura sostenible. En definitiva, además de contribuir a mejorar la seguridad hídrica y la gestión del agua, genera una serie de beneficios colaterales esenciales para el desarrollo sostenible.

En este libro, que tengo el honor de prologar, se sintetizan importantes investigaciones realizadas, hasta la fecha, en materia de la siembra y la cosecha en Iberoamérica y su publicación constituye un paso más para que tanto quienes tenemos la responsabilidad de planificar y gestionar el agua y el territorio, como investigadores de cualquier parte del mundo, muy especialmente del ámbito iberoamericano, abramos los ojos a este tipo de iniciativas. Contribuir a la mejora del conocimiento de estas formas ancestrales, eficientes y resilientes de manejar el agua, es, sin duda, muy gratificante y, en este sentido, la Siembra y la Cosecha de Agua constituye un elemento de gran valor en la construcción de un futuro mejor, más seguro y más equitativo.

Hugo Morán Fernández
Secretario de Estado de Medio Ambiente
Ministerio para la Transición Ecológica y el Reto Demográfico

PRESENTACIÓN

La Cooperación Española trabaja desde hace ya muchos años para impulsar el fortalecimiento institucional y el desarrollo de capacidades de los países y las instituciones socias, en un proceso de aprendizaje que es siempre mutuo y provechoso para ambas partes. Uno de los frutos de esta colaboración es este libro en el que encontramos tantas y tan interesantes propuestas de uso de tecnologías ancestrales, procedentes de diversos países, para favorecer un mejor manejo del agua.

Dentro de esta aproximación integral, es clave la incorporación de propuestas tecnológicamente innovadoras, que recojan Soluciones Basadas en la Naturaleza (SBN) y que beban de la diversidad de saberes y los conocimientos ancestrales para ofrecer respuestas a los retos a los que se enfrenta el sector. Efectivamente, las poblaciones locales poseen un enorme acervo de conocimiento, heredado a través de siglos de trabajo e interrelación con el territorio, que ha de ser valorado, aprovechado e incluido en las propuestas y soluciones para el sector del agua. Tal es el caso de los procedimientos de Siembra y Cosecha de Agua, que permiten aprovisionar el agua procedente de la lluvia y la nieve para utilizarla después en actividades agrícolas y en abastecimientos, tal y como han hecho tradicionalmente las poblaciones de determinados lugares en la región Latinoamericana.

Conocimientos enormemente valiosos que, como se muestra en las siguientes páginas, resultan especialmente útiles para enfrentarnos a los retos que tenemos en la actualidad: cambio climático, agotamiento de acuíferos, variaciones en los patrones hídricos, etc.

Para hacer frente a estos desafíos, es necesario trabajar desde una visión de Gestión Integrada del Recurso Hídrico, entendida como el proceso que promueve la gestión y el aprovechamiento coordinado del agua, la tierra y los recursos naturales relacionados, con el fin de maximizar el bienestar social y económico, garantizando la sostenibilidad de los ecosistemas. Se trata de un enfoque que permea todas las actuaciones del Fondo de Cooperación para Agua y Saneamiento, el instrumento más ambicioso de la Cooperación Española en el sector, y en el que se incluyen las propuestas y el conocimiento local en la gestión y manejo de los recursos hídricos.

Un aspecto en el que el Fondo del Agua lleva trabajando ya desde el año 2009, cuando se puso en marcha con la colaboración del Instituto Ambiental Brasil Sustentável (ABS) el programa *Cisternas para la población del Semiárido*, una iniciativa para facilitar el acceso a estructuras simples y eficientes de captación de agua de lluvia y de aprovechamiento sostenible de recursos pluviales, enmarcada dentro de la iniciativa nacional "Un millón de cisternas para Brasil". Con ello se ayudó a proporcionar acceso al agua a la población de comunidades rurales dispersas, sin conexión a la red pública de abastecimiento, promocionando los derechos humanos, la gobernanza local, la sostenibilidad ambiental y favoreciendo el respeto a la dimensión cultural. Para ello, se tuvo en cuenta el uso de tecnologías apropiadas de captación de agua de lluvia y se trabajó involucrando a la sociedad civil en el diseño de los proyectos y en la ejecución de los mismos. Unas líneas de actuación que guían la acción del Fondo del Agua en todos sus programas.

Por otro lado, cabe señalar la importancia del trabajo en alianza para lograr una buena Gestión Integrada del Agua. En este sentido, la colaboración del Fondo del Agua con instituciones como el Instituto Geológico Minero de España (IGME), internacionalmente reconocido por su trabajo, permite a la Cooperación Española la transferencia de conocimiento y llevar a cabo estudios y servicios técnicos que permitan propiciar las estrategias de seguridad hídrica más apropiadas para cada lugar. Igualmente destacable es la colaboración continuada con el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la UNESCO, con el cual el Fondo del Agua ha trabajado en diversas capacitaciones y publicaciones que tienen como objetivo mejorar el conocimiento y las capacidades de nuestros socios en América Latina y el Caribe.

En definitiva, es una satisfacción ver recogidos en estas páginas los frutos de la red CYTED y del taller puesto en marcha por *Intercoonecta*, con el apoyo del Fondo del Agua, el IGME y el PHI. Tenemos entre manos un documento que recoge prácticas de las que tenemos mucho que aprender todos los actores que estamos comprometidos en promover las condiciones para alcanzar el Objetivo de Desarrollo 6 y conseguir el ejercicio efectivo de los derechos humanos al agua y al saneamiento.

M^a Carmen Jover Gomez-Ferrer

Jefa de Departamento del Fondo de Cooperación para el Agua y Saneamiento

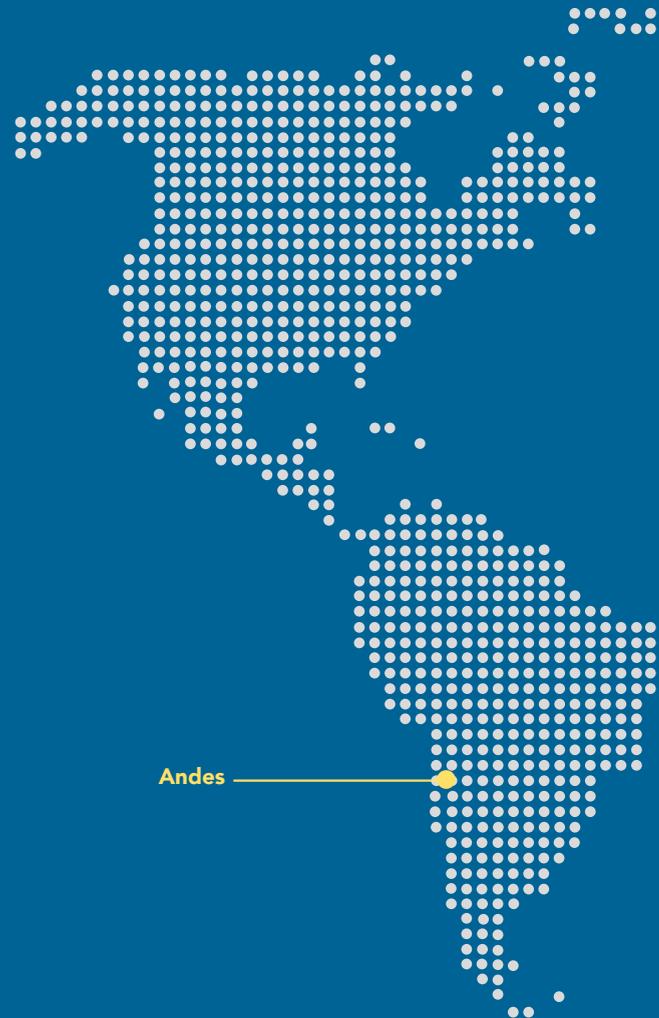
Dirección de Cooperación con América Latina y el Caribe

Agencia Española de Cooperación Internacional para el Desarrollo (AECID)



Impactos de la forestación en el agua y los suelos de los Andes

Impacts of forestation on water and soils in the Andes



Vivien Bonnesoeur^{1,2}, Bruno Locatelli^{3,4} y Boris F. Ochoa-Tocachi^{2,5,6}

- 1 Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina (CONDESAN), Lima 15048, Perú
*bonnesoeur.vivien@protonmail.com
- 2 Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA), Quito 170509, Ecuador.
- 3 Centro para la Investigación Forestal (CIFOR), Lim 12, Perú
- 4 Centro de Cooperación Internacional en Investigación Agronómica para el Desarrollo (CIRAD), Universidad de Montpellier 34, Francia
- 5 Department of Civil and Environmental Engineering & Grantham Institute - Climate Change and the Environment, Imperial College London, Londres SW7 2AZ, Reino Unido
- 6 ATUK Consultoría Estratégica, Luis Pasteur 2-30, Cuenca 010105, Ecuador.

Impactos de la forestación en el agua y los suelos de los Andes

RESUMEN

En los países andinos, la forestación sigue siendo una de las intervenciones más utilizada para resolver problemas relacionados con el agua y el suelo. Sin embargo, las evidencias científicas sobre sus impactos pueden ser confusas y no respaldan totalmente esta práctica. Tras la aplicación de una metodología rigurosa y transparente de revisión sistemática, analizamos 155 publicaciones científicas y tesis que han investigado los impactos de la forestación en diversos servicios y parámetros hidrológicos de los siete países andinos. Entre los principales hallazgos, se destacó que las plantaciones con árboles de especies exóticas y, en menor medida, los bosques nativos, consumen agua y, por lo tanto, reducen el suministro total de agua que llega a los usuarios río abajo de la mayoría de las regiones andinas. Cuando se plantan árboles, incluidas especies exóticas, en suelos degradados (suelos erosionados, sin vegetación o compactados), se puede mejorar la infiltración del suelo, reducir los caudales picos, y controlar la erosión. Sin embargo, las plantaciones con árboles de especies exóticas en herbazales conservados (páramos, jalca, punas) tienen efectos perjudiciales en el suministro de agua total y en la regulación hidrológica. Los bosques nativos existentes ofrecen regulación hidrológica y control de la erosión excelentes, más que las plantaciones de árboles maduros. Dado que la restauración de bosques nativos degradados no necesariamente significa la recuperación de los servicios hidrológicos originales, la conservación de los bosques existentes debe ser una prioridad para la gestión de cuencas.

Impacts of forestation on water and soils in the Andes

ABSTRACT

In the Andean countries, forestation is a nature-based solution often used to cope with soil degradation or water scarcity, although scientific evidences do not necessarily approve this practice. To help improve decision-making on forestation in the Andes, we reviewed the available literature concerning the impacts of forestation on water supply, hydrological regulation and mitigation of erosion and landslides. Following systematic review protocols, we synthesized 155 studies using different methods, including meta-analyses. Among the main results, we showed that exotic tree species plantations, and to a lesser extent native forest, have an important water consumption and therefore reduce the total amount of water for downstream users. Tree planting in degraded soils, including exotic tree species, can improve water infiltration, reduce peak flows and control erosion. However, exotic tree species plantation in conserved high-Andean grasslands (páramo, jalca, puna) have detrimental impacts on hydrological regulation and the total amount of water available. Native forests offer excellent ecosystem services of hydrological regulation and control of soil erosion, to a higher level than mature tree plantations. Given that the restoration of degraded native forests does not necessarily means the recovering of their original ecosystem services, the conservation of the remaining native forests should be a priority in the Andean watershed management.

INTRODUCCIÓN

En respuesta a los compromisos internacionales (por ejemplo, la Iniciativa 20x20 y el Desafío de Bonn) o a las demandas locales y nacionales de protección de la madera y de las cuencas, varios países andinos están restaurando la cobertura forestal, con la expectativa de mejorar los servicios ambientales. Los servicios ambientales relacionados con el agua, como el suministro de agua, la regulación hidrológica y el control de la erosión, son especialmente importantes para sostener la vida de más de 50 millones de pobladores andinos. En las últimas décadas, cambios rápidos e importantes en la cobertura forestal, a través de la deforestación y la forestación, han modificado de manera considerable los servicios hidrológicos en los Andes (Mathez-Stiefel *et al.*, 2017).

La forestación se define aquí como el establecimiento de cobertura forestal en forma de plantaciones o mediante la regeneración natural en zonas que en el pasado tuvieron, o no, bosques.

La forestación se define aquí como el establecimiento de cobertura forestal en forma de plantaciones o mediante la regeneración natural en zonas que en el pasado tuvieron, o no, bosques. Los argumentos más comunes que han respaldado la forestación son para producir madera, detener y revertir la degradación del suelo, proteger la biodiversidad, y mejorar los servicios hidrológicos (Locatelli *et al.*, 2015). Se incluye con frecuencia en portafolios de soluciones basadas en la naturaleza o iniciativas de infraestructura verde que recientemente están adquiriendo importancia en la gestión de cuencas y en la adaptación al cambio climático en Latinoamérica (Pramova *et al.*, 2012).

La forestación a veces se utiliza en suelos degradados (por ejemplo, erosionados, compactados, o aquellos en los que la materia orgánica se ha agotado) como un último recurso, cuando las zonas de cultivo o pastos ya no son productivas. Sin embargo, mejorar la productividad de la tierra se ha convertido en el enfoque principal de muchos proyectos de forestación, lo que ha dado lugar a una predilección por especies exóticas de crecimiento rápido (por ejemplo, eucaliptos o pinos). Sin embargo, los posibles impactos negativos sobre los suelos y el agua se han ignorado en gran medida. Además, las especies exóticas de crecimiento rápido se han plantado también en herbazales naturales y adecuadamente conservados ubicados a gran altitud, frecuentemente creando conflictos debido a la reducción del rendimiento hídrico.

Para poder responder a la pregunta de cómo debe hacerse uso de la forestación para resolver problemas relacionados con el agua y el suelo en la región, revisamos el conocimiento científico actual en lo que respecta a los impactos de la forestación sobre los suelos y el agua en los Andes. Este resumen presenta los principales hallazgos de nuestra revisión (Bonnesoeur *et al.*, 2019).

PRINCIPALES HALLAZGOS

Tras la aplicación de una metodología rigurosa y transparente de revisión sistemática, analizamos 155 publicaciones científicas y tesis que han investigado los impactos de la forestación en diversos servicios y parámetros hidrológicos (Fig. 1) de los siete países andinos (Fig. 2). Se encontraron 8 estudios ubicados en Perú, sumando un total de 23 sitios claramente definidos (a escala de cuenca o de parcela, ver tabla 1). Empleamos tanto técnicas de meta-análisis como una síntesis de datos más cualitativos.

Tabla 1.

Estudios y sitios en Perú

Estudio	Tipo de estudio	Numero de sitios	Region
(Gomez-Peralta <i>et al.</i> , 2008)	Artículo científico original	2	Pasco
(Inbar y Llerena, 2000)	Artículo científico original	12	Lima
(Ochoa-Tocachi <i>et al.</i> , 2016b)	Artículo científico original	5	Piura, Amazonas, Apurímac
(Ochoa-Tocachi <i>et al.</i> , 2016a)2016a	Artículo científico original		
(Bruijnzeel <i>et al.</i> , 2011)	Libro de síntesis de estudios	-	-
(LLerna Pinto <i>et al.</i> , 2011)	Artículo científico original	-	-
(Tobón, 2009)	Libro de síntesis de estudios	-	-
(Alfaro, 2015)	Tesis	4	Ancash

Figura 1.

Servicios hidrológicos y parámetros considerados en esta revisión con la cantidad de estudios (en círculos) para cada parámetro y tipo de bosque.

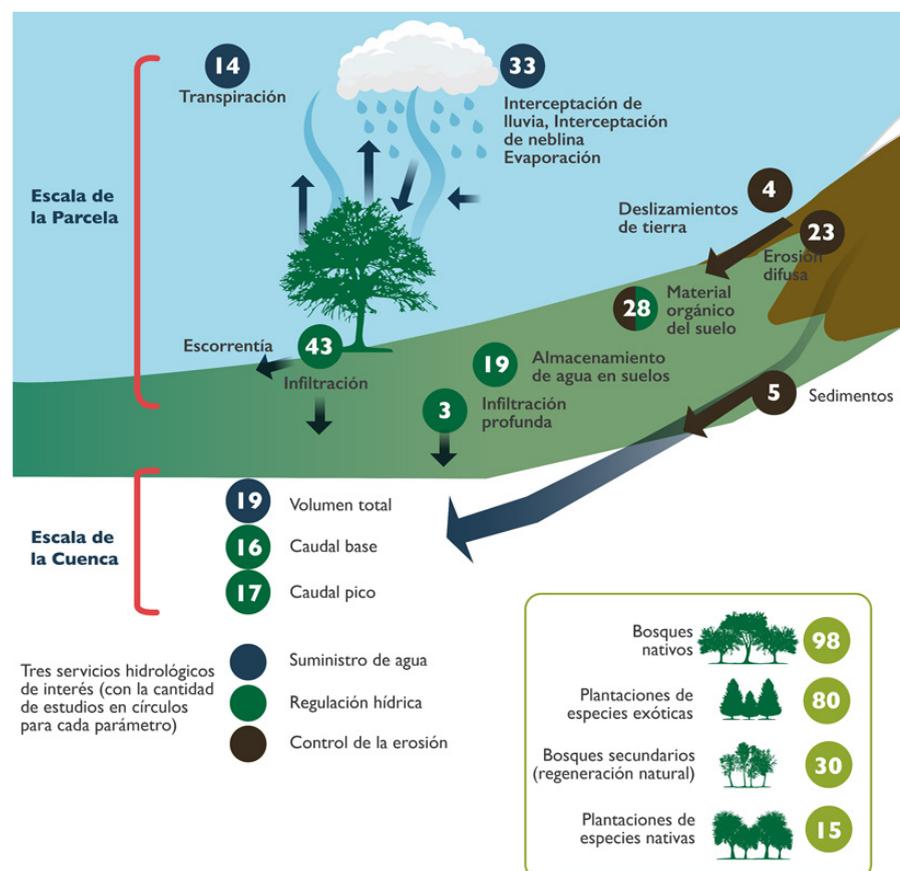
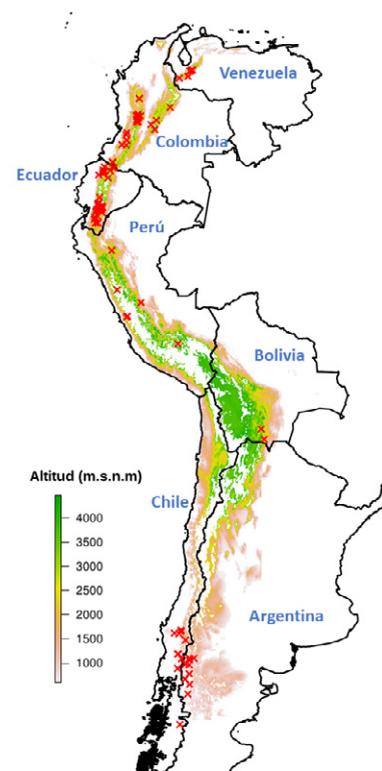


Figura 2.

Ubicación de los sitios de estudio.

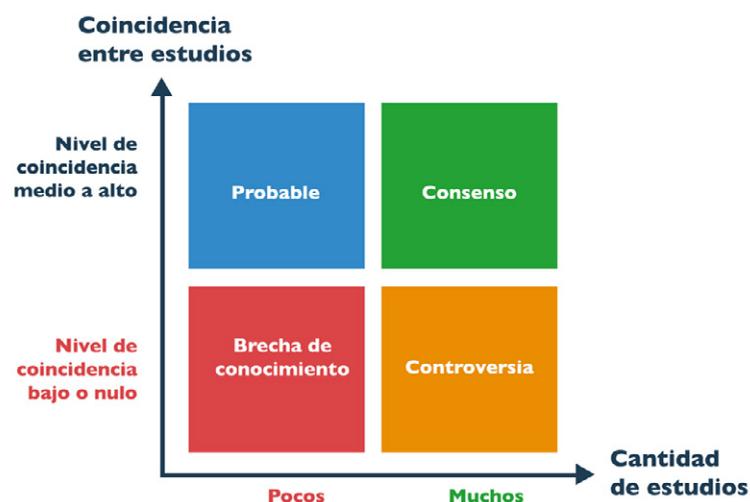


Presentamos aquí nuestras conclusiones con respecto a los impactos de la forestación en (1) el suministro de agua, (2 y 3) la regulación hidrológica y (4) la erosión del suelo. Para cada conclusión, informamos el nivel de confianza en la evidencia que encontramos en la bibliografía revisada (Fig.3). Los resultados de

la síntesis (que se resumen en la Fig. 4) se utilizaron también para identificar brechas en la investigación que se describen después de las conclusiones.

Figura 3.

La clasificación del nivel de evidencia depende de la cantidad de estudios y la coincidencia de resultados entre estudios (pocos estudios: cuatro o menos).



CONCLUSIÓN 1:

La forestación en los Andes reduce la cantidad total de agua

- Las cuencas con plantaciones con especies exóticas y, en menor medida, con bosques naturales, tienen un rendimiento hídrico menor (entre 20 y 45 %) que las cuencas con usos de suelo no forestal en los Andes (Ochoa-Tocachi et al., 2016).
- Aunque la transpiración de agua en áreas no forestadas no se ha estudiado ampliamente en los Andes, numerosos estudios de otras regiones demostraron que las plantaciones y bosques transpiran más que los herbazales por área unitaria, lo que constituye una pérdida de agua mayor para la cuenca (Locatelli and Vignola, 2009).
- Sin embargo, las plantaciones de pino y eucalipto podrían ser más eficientes que los bosques nativos, en lo que respecta a la cantidad de agua consumida por tonelada de madera producida.
- Las gotas de lluvia interceptadas por las hojas y ramas en las plantaciones y bosques que finalmente se evaporaran constituyen ~25 % de la lluvia anual. En las regiones secas de los Andes, la interceptación por la cobertura forestal es mayor y probablemente empeore la escasez de agua.
- Los usuarios de la cuenca en general pierden cantidad total de agua, pero esto no se aplica a todos ya que el vapor atmosférico resultante podría crear lluvia en otro lugar (Ellison et al., 2017). Sin embargo, no se ha estudiado la influencia de los bosques en la lluvia de los Andes.
- En menos del 10 % del área forestal andina, los bosques nublados de montaña tienen una función especial debido a que la inmersión de nubes reduce su transpiración a la vez que sus hojas y epífitas capturan gotas pequeñas de agua de neblina, que pueden constituir un aporte de agua significativo (de hasta el 15 %) (Bruijnzeel et al., 2011).
- Falta investigación que considere si la forestación en las zonas de montaña rodeadas de nubes podría incrementar la disponibilidad de agua, y cómo lo haría.

CONCLUSIÓN 2:

La forestación en los suelos degradados conserva el caudal base

- Las plantaciones forestales, incluidas las de especies exóticas, mejoran considerablemente las tasas de infiltración (en un factor de 8) en los suelos andinos degradados, por ejemplo, en los herbazales sobrepastoreados.
- La forestación sobre suelos agrícolas degradados (con niveles bajos de materia orgánica) incrementa el contenido de materia orgánica del suelo. Esto mejora la infiltración y el almacenamiento de agua en el suelo, aunque en proporciones limitadas.
- A nivel de cuenca, el efecto de la forestación en el caudal base es menos claro y depende de un frágil equilibrio: la forestación incrementa el caudal base si el efecto positivo de la infiltración mejorada en el suelo es más alto que el efecto negativo del incremento en la transpiración de las plantas. Por ejemplo, en una cuenca en Ecuador, las plantaciones con árboles de especies exóticas en suelos altamente degradados contribuyó significativamente en el incremento de los caudales base (Molina *et al.*, 2012). En suelos no degradados, el uso de agua por las plantaciones con especies exóticas muchas veces excede el aumento en la infiltración del suelo, lo que da lugar a reducciones en el caudal base (de hasta 10 veces) (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2016b).
- Las plantaciones con especies exóticas tienen transpiraciones más altas que los herbazales y bosques nativos e infiltraciones menores que los bosques o herbazales adecuadamente conservados. Por lo tanto, para el caudal base, por lo general es mejor conservar los bosques nativos o herbazales que plantar árboles.



Reforestación con la población en Huánuco, Perú.
Fotografía: Jhonatan Orestes Zavaleta Silupú

CONCLUSIÓN 3:

La forestación reduce los caudales pico durante lluvias fuertes (pero no extremas)

- La forestación reduce la escorrentía durante las lluvias fuertes pero no extremas (es decir, menores que un período de retorno de 5-10 años), lo que da lugar a inundaciones menos intensas y menos frecuentes. En efecto, la forestación en los herbazales incrementa la interceptación y transpiración, lo que mejora el amortiguamiento de la lluvia, y podría incrementar la infiltración (especialmente en el caso de los suelos degradados), lo que reduce la escorrentía superficial.
- Sin embargo, en el caso de lluvia extremas o prolongadas, el dosel y la capacidad de almacenamiento del suelo se saturan, y la cobertura forestal podría tener efectos limitados en caso de una inundación catastrófica (Bathurst et al., 2010).
- Si bien es posible que los bosques no reduzcan la magnitud de inundaciones extremas, sí podrían reducir la frecuencia con la que estas ocurren. Ha surgido una controversia en cuanto a la relación entre bosques e inundaciones debido a las diferencias en las metodologías empleadas para cuantificar y predecir la incidencia de inundaciones (Alila et al., 2009).

CONCLUSIÓN 4:

La forestación reduce la erosión de los suelos producto de la acción del agua

- Las plantaciones con especies exóticas en suelos sin vegetación pueden controlar la erosión de manera eficaz. La producción de sedimentos se reduce de manera exponencial con la cobertura vegetal superficial, de forma tal que un incremento pequeño en la cobertura vegetal superficial en tierra sin vegetación reduce de forma importante la erosión causada por el agua.
- Las plantaciones con especies exóticas y los bosques regenerados naturalmente tienen una cobertura vegetal superficial menor que los bosques nativos y los herbazales naturales, lo que da lugar a tasas de erosión moderadamente más altas pero mucho más bajas que las de los suelos degradados (Vanacker et al., 2007).
- La deforestación incrementa el riesgo de deslizamientos de tierras superficiales.
- En cambio, el impacto de la forestación en los deslizamientos de tierras ha recibido muy poca atención y requiere más investigación.

● Probable

● Consenso

● Brecha de conocimiento

● Controversia

Figura 4.

Resumen de impactos del cambio de la cobertura forestal en los parámetros hidrológicos (parte izquierda del cuadro) y vínculos entre los parámetros y los servicios hidrológicos (parte derecha).

Efectos de los cambios en la cobertura vegetal sobre los parámetros hidrológicos

Parámetros hidrológicos	 Pastizal conservado ↓  Plantación con especies exóticas	 Tierra degradada ↓  Plantación con especies exóticas	 Bosque nativo ↓  Tierra degradada	Principales vínculos entre parámetros hidrológicos y servicios hidrológicos		
	Suministro de agua	Regulación hídrica	Control de la erosión			
Cantidad total de agua	--	-	+	+		
Intercepción de lluvia	+	+	-	-		
Transpiración	++	+	-	-		
Caudal de base	--	+/-	-		+	
Caudal Pico	-	-	+		-	
Infiltración	+	++	-		+	+
Materia orgánica del suelo	-	+	-		+	+
Erosión difusa	+	--	++			-
Deslizamiento de tierra	?	?	+			-

++ Aumento fuerte	-- Reducción fuerte	+/- Controversia	+ Vínculo Positivo	Consenso
+ Aumento	- Reducción	? Brecha de conocimiento	- Vínculo Negativo	Sin Consenso

BRECHAS DE CONOCIMIENTOS PRINCIPALES

Tanto a nivel andino como en Perú, se identificaron algunas brechas de conocimiento que limitan las políticas actuales.

→ **Especies nativas.** La mayor parte de la investigación se centra en especies exóticas como pino y eucalipto. La falta de investigación en relación con las plantaciones de árboles nativos constituye una barrera para su uso en proyectos de forestación. De manera similar, se requiere más información en lo que respecta a cómo la regeneración natural de tierras abandonadas o en las que se ha detenido el pastoreo puede mejorar la regulación hidrológica.

→ **Gestión forestal.** La gestión forestal correcta (por ejemplo, densidad o duración de la rotación) y la distribución espacial de las áreas forestadas (por ejemplo, áreas clave o conectividad hidrológica) pueden mejorar los servicios hidrológicos. Por ejemplo, una densidad del rodal intermedia puede incrementar la conservación del caudal base (Ilstedt et al., 2016). Sin embargo, no se ha efectuado una investigación en el caso de los Andes.

→ **Impactos a corto plazo versus a largo plazo.** Necesitamos entender mejor cuánto tiempo tarda la recuperación de las funciones y los servicios hidrológicos. La mayoría de los estudios mostró que después de 20 años de forestación, se logra un incremento en la tasa de infiltración y un control de la erosión del suelo cercanos a los que se encontraban en los bosques nativos. Sin embargo, es posible que otras funciones hidrológicas tomen más tiempo en recuperarse. Esto destaca la importancia de conservar los bosques nativos existentes.

La forestación de los suelos degradados es beneficiosa para la regulación hidrológica y el control de la erosión difusa del agua, incluso en el caso de las especies exóticas.

RECOMENDACIONES

Reconocer que la forestación reduce la disponibilidad general del agua.

Con frecuencia se considera que los bosques tienen un efecto positivo en el agua y el medioambiente en todos los casos, lo cual puede crear expectativas poco realistas entre las partes interesadas locales que dependen del agua. Los posibles impactos hidrológicos positivos y negativos de la forestación deben evaluarse y analizarse con las partes interesadas.

Definir las prioridades espaciales para la forestación.

La forestación de los suelos degradados es beneficiosa para la regulación hidrológica y el control de la erosión difusa del agua, incluso en el caso de las especies exóticas. Para poder optimizar los servicios hidrológicos, las iniciativas de restauración del paisaje forestal en los Andes deben dar prioridad a los suelos sin cobertura vegetal, con suelos compactados, y con suelos en los que la materia orgánica se ha agotado.

Comprender las ventajas y desventajas y precisar qué se espera de la forestación.

La forestación con pino y eucalipto consume mucha más agua que la vegetación nativa en los Andes, pero hace un uso más eficiente de esta para producir madera (aquí la eficiencia se cuantifica en términos de cantidad de madera que se produce por metro cúbico de agua que se utiliza). Los encargados de tomar decisiones necesitan equilibrar las ventajas y desventajas entre agua y madera: si el objetivo es producir madera o diversificar los medios de vida locales con productos forestales, pino y eucalipto podrían ser buenas opciones. Sin embargo, si el objetivo es mejorar el suministro de agua o preservar el caudal, otras especies podrían ser mejores.

Investigar las especies nativas.

La forestación con especies nativas, además de preservar la biodiversidad, podría ser buena para los suelos y el agua, pero no sabemos suficiente al respecto. La investigación debe centrarse en las especies nativas y sus impactos para poder mejorar las prácticas de forestación y lograr que esta deje atrás su enfoque basado en pino y eucalipto solamente.

Proteger los herbazales nativos.

Los responsables de tomar decisiones a veces asumen que la forestación es clave para la conservación o restauración de cuencas, pero la realidad es que los herbazales andinos nativos en buenas condiciones ofrecen excelentes servicios hidrológicos. La restauración del paisaje o las iniciativas de infraestructura verde deben evitar las plantaciones con árboles exóticos en estos herbazales. Debe favorecerse la conservación o restauración de herbazales nativos en ecosistemas de páramo y puna, dada la importante cantidad total de agua que suministran, la regulación hidrológica, y el control de la erosión de estos ecosistemas.

Proteger los bosques nativos.

Los bosques andinos nativos son excelentes en lo que respecta a regular el caudal y proteger los suelos. Restaurar los servicios hidrológicos afectados una vez que los bosques se degradan o destruyen es difícil (o imposible) y demanda mucho tiempo. Es urgente proteger los bosques de la degradación y

deforestación, especialmente los bosques nublados, no solo por su rica biodiversidad sino también por su contribución a la regulación hidrológica y del suelo. Áreas importantes de bosques nublados de montaña siguen estando desprotegidas en la vertiente oriental de la Cordillera de los Andes en Colombia, Perú y Ecuador.

Mejorar el nivel de conocimientos acerca de la infraestructura verde y la forestación.

La restauración del paisaje y los proyectos de infraestructura verde deben invertir en el monitoreo e investigación hidrológicos, como es el caso de la red iMHEA (Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (Ochoa-Tocachi et al., 2018)). Se requiere investigar más para poder cerrar las numerosas brechas de datos y conocimiento que se han identificado en esta revisión. Los resultados de la investigación deben utilizarse en los procesos de toma de decisiones, y para orientar y apoyar el diseño, la implementación, y la evaluación de los proyectos de conservación y forestación.



Bosque seco, Piura, Perú.
Fotografía : Miguel Ángel Arreátegui Rodríguez

REFERENCIAS

- Alila, Y., Kuraś, P.K., Schnorbus, M., Hudson, R., 2009. Forests and floods: A new paradigm sheds light on age-old controversies. *Water Resources Research*, 45. <https://doi.org/10.1029/2008WR007207>
- Alvarez-Garretón, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., and Vis, M. 2021. Progressive water deficits during multiy Alfaro, G.J.G. 2015. *Caracterización de la infiltración en bosques plantados con polylepis spp., de 11 y 29 años, parque nacional Huascarán, quebrada Quilcayhuanca, Huaraz, Ancash*. Universidad Nacional Agraria La Molina.
- Bathurst, J.C., Amezaga, J., Cisneros, F., Gaviño Novillo, M., Iroumé, A., Lenzi, M.A., Mintegui Aguirre, J., Miranda, M. and Urciuolo, A. 2010. Forests and floods in Latin America: science, management, policy and the EPIC FORCE project: In memoriam: Ian Rainy Calder (1945–2009). *Water International*, 35, 114–131. <https://doi.org/10.1080/02508061003660714>
- Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M.R., Ochoa-Tocachi, B.F., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A. and Mathez-Stiefel, S.L. 2019. Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management* 433, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>
- Bruijnzeel, L.A., Scatena, F.N., Hamilton, L.S. (Eds.) 2011. *Tropical Montane Cloud Forests: Science for Conservation and Management*, Cambridge Core. Cambridge University Press. <https://doi.org/10.1017/CBO9780511778384>
- Ellison, D., Morris, C.E., Locatelli, B., Sheil, D., Cohen, J., Murdiyarsó, D., Gutierrez, V., Noordwijk, M. van, Creed, I.F., Pokorny, J., Gaveau, D., Spracklen, D.V., Tobella, A.B., Ilstedt, U., Teuling, A.J., Gebrehiwot, S.G., Sands, D.C., Muys, B., Verbist, B., Springgay, E., Sugandi, Y. and Sullivan, C.A. 2017. Trees, forests and water: Cool insights for a hot world. *Global Environmental Change*, 43, 51–61. <https://doi.org/10.1016/j.gloenvcha.2017.01.002>
- Gomez-Peralta, D., Oberbauer, S.F., McClain, M.E., Philippi, T.E., 2008. Rainfall and cloud-water interception in tropical montane forests in the eastern Andes of Central Peru. *Forest Ecology and Management*, 255, 1315–1325. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2007.10.058>
- Ilstedt, U., Bargués Tobella, A., Bazié, H.R., Bayala, J., Verbeeten, E., Nyberg, G., Sanou, J., Benegas, L., Murdiyarsó, D., Laudon, H., Sheil, D. and Malmer, A. 2016. Intermediate tree cover can maximize groundwater recharge in the seasonally dry tropics. *Scientific Reports*, 6, 21930. <https://doi.org/10.1038/srep21930>
- Inbar, M., Llerena, C.A. 2000. Erosion Processes in High Mountain Agricultural Terraces in Peru. *Mountain Research and Development*, 20, 72–79. [https://doi.org/10.1659/0276-4741\(2000\)020\[0072:EPHMA\]2.0.CO;2](https://doi.org/10.1659/0276-4741(2000)020[0072:EPHMA]2.0.CO;2)
- Llerena Pinto, C.A., Hermosa Espezúa, R.M., Llerena Bermúdez, C.M. and 2011. Las plantaciones forestales y el agua de las cuencas. *Xilema* 5.
- Locatelli, B., Catterall, C.P., Imbach, P., Kumar, C., Lasco, R., Marín-Spiotta, E., Mercer, B., Powers, J.S., Schwartz, N. and Uriarte, M. 2015. Tropical reforestation and climate change: beyond carbon: Tropical reforestation beyond carbon. *Restoration Ecology*, 23, 337–343. <https://doi.org/10.1111/rec.12209>
- Locatelli, B. and Vignola, R. 2009. Managing watershed services of tropical forests and plantations: Can meta-analyses help? *Forest Ecology and Management*, 258, 1864–1870. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2009.01.015>
- Mathez-Stiefel, S.-L., Peralvo, M., Báez, S., Rist, S., Buytaert, W., Cuesta, F., Fadrique, B., Feeley, K.J., Groth, A.A.P., Homeier, J., Llambí, L.D., Locatelli, B., Sandoval, M.F.L., Malizia, A. and Young, K.R., 2017. Research Priorities for the Conservation and Sustainable Governance of Andean Forest Landscapes. *Mountain Research and Development*, 37, 323. <https://doi.org/10.1659/MRD-JOURNAL-D-16-00093.1>
- Molina, A., Vanacker, V., Balthazar, V., Mora, D. and Govers, G. 2012. Complex land cover change, water and sediment yield in a degraded Andean environment. *Journal of Hydrology*, 472–473, 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.jhydrol.2012.09.012>
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J.D., Célleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P. and De Bièvre, B. 2018. High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific Data*, 5, 180080. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W. and De Bièvre, B. 2016a. Regionalization of land-use impacts on streamflow using a network of paired catchments. *Water Resources Research*, 52, 6710–6729. <https://doi.org/10.1002/2016WR018596>
- Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C.A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G. and Arias, S. 2016b. Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes* 30, 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>

Pramova, E., Locatelli, B., Djoudi, H. and Somorin, O.A., 2012. Forests and trees for social adaptation to climate variability and change: Forests and trees for social adaptation. *Wiley Interdisciplinary Reviews Climate Change*, 3, 581–596. <https://doi.org/10.1002/wcc.195>

Tobón, C., 2009. Los bosques andinos y el agua. Programa Regional ECOBONA-Intercooperation.

Vanacker, V., Molina, A., Govers, G., Poesen, J. and Deckers, J., 2007. Spatial variation of suspended sediment concentrations in a tropical Andean river system: The Paute River, southern Ecuador. *Geomorphology*, 87, 53–67. <https://doi.org/10.1016/j.geomorph.2006.06.042>



Foto aerea de plantaciones de especies exóticas en el ámbito de la Reconstrucción Con Cambio (gestión de desastres por Fenómeno EL Niño), Lambayeque, Perú.
Fotografía: Clinton Medina



Siembra y Cosecha de Agua en sistemas de regadío ancestrales y tradicionales de la Quebrada de Humahuaca (Provincia de Jujuy, Argentina)

Water Sowing and Harvesting in ancestral and traditional irrigation systems in *Quebrada de Humahuaca Valley* (Jujuy Province, Argentina)



Juan Pablo Zamora Gómez ^{1,2}, Francisco A. Cianfagna ³

- ¹ Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Agricultura Familiar Región NOA – Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (IPAF NOA – INTA). Ruta Nacional N° 9, km 1763, Posta de Hornillos, Maimará (CP 4622), Jujuy, Argentina. zamoragomez.juan@inta.gob.ar
- ² Cátedra de Planificación y Administración. Escuela de Recursos Naturales. Facultad de Ciencias Naturales. Universidad Nacional de Salta. Avenida San Martín 5150, Salta (CP 4400), Argentina.
- ³ CONICET y Universidad Nacional del Litoral, Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, CC 217, 3000, Santa Fe, Argentina.

Siembra y Cosecha de Agua en sistemas de riego ancestrales y tradicionales de la Quebrada de Humahuaca (Provincia de Jujuy, Argentina)

RESUMEN

Los territorios de los valles áridos del Noroeste de Argentina sufrirán un enorme impacto debido al cambio climático en los próximos años. Se hace necesario estudiar diferentes Soluciones Basadas en la Naturaleza y su aplicación en iniciativas de Gestión del Agua para territorios de alta vulnerabilidad climática, como la región de la Quebrada de Humahuaca. Este valle árido (120 a 300 mm de precipitación media anual) tiene 160 km de largo y se ubica con una orientación sub meridional en el centro de la provincia de Jujuy (noroeste de Argentina). Su paisaje biocultural se sustenta en el funcionamiento de sistemas de riego ancestrales y tradicionales, a través de los cuales se aplican diversas técnicas de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA). Aquí se han identificado y se ha hecho una caracterización preliminar de distintos sistemas de SyCA ubicados en el centro de la región de la Quebrada de Humahuaca, en el fondo de valle y en afluentes de alta montaña. Aplicamos técnicas de levantamiento de campo, entrevistas a agricultores, observaciones meteorológicas y procesamiento de imágenes satelitales. La Siembra y Cosecha de Agua tiene un papel fundamental en la seguridad hídrica, los servicios ecosistémicos y la protección y conservación del paisaje biocultural en las regiones de la Quebrada, que fue declarada Patrimonio de la Humanidad por la UNESCO en 2003.

Water Sowing and Harvesting in ancestral and traditional irrigation systems in *Quebrada de Humahuaca Valley* (Jujuy Province, Argentina)

ABSTRACT

Arid Andean Valley territories in northwestern Argentina will suffer a huge impact from climate change. It is necessary to study different Nature-Based Solutions and their application in Water Management initiatives for high climate-vulnerable territories like the *Quebrada de Humahuaca* region. This arid valley (120 to 300 mm of annual average rainfall) is 160 km long and has a sub meridional orientation in the center of Jujuy province (northwestern Argentina). Its biocultural landscape is sustained by the operation of ancestral and traditional irrigation systems. Water Sowing and Harvesting systems located at the center of the *Quebrada de Humahuaca* region (in the bottom of the valley and high-mountains tributaries) were identified and preliminarily characterized. We conducted field surveys, interviews with local farmers, meteorological observations, and satellite images processing techniques. Water Sowing and Harvesting has a fundamental role in water security, ecosystem services and a biocultural landscape protection and conservation in the *Quebrada* regions, that was declared as World Heritage by UNESCO in 2003.

INTRODUCCIÓN

Los valles áridos andinos son algunos de los territorios de Argentina que se verán afectados más severamente por el cambio climático en los próximos años, de acuerdo con los diferentes escenarios evaluados por el Ministerio de Ambiente (2014). Esto plantea desafíos importantes a nivel de la gestión del agua en regiones áridas y semiáridas como la Quebrada de Humahuaca, localizada en el centro de la provincia de Jujuy (Figura 1), en el noroeste de Argentina. Frente a estos escenarios, se hace necesario relevar, recuperar y poner en valor tecnologías y prácticas de Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), para la gestión del agua en territorios climáticamente vulnerables.

Los valles áridos andinos son algunos de los territorios de Argentina que se verán afectados más severamente por el cambio climático en los próximos años.

En su Informe 2018 sobre el desarrollo mundial de los recursos hídricos, la UNESCO hizo hincapié en el papel fundamental de las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN) para cumplir con la Agenda 2030 para el Desarrollo Sostenible, además de la reducción de riesgos debido al cambio climático (UN Water, 2018). De acuerdo con este informe, las SbN “implican la conservación o rehabilitación de los ecosistemas naturales y/o la mejora o creación de procesos naturales en ecosistemas modificados o artificiales”.

Entre las Soluciones Basadas en la Naturaleza, las tecnologías relacionadas con Siembra y Cosecha de Agua (SyCA, en adelante) cobran especial relevancia. La SyCA se define como el proceso mediante el cual el ser humano recolecta e infiltra (siembra) el agua de lluvia, escorrentía superficial, hipodérmica y subterránea en el subsuelo para poder recuperarla (cosecharla) un cierto tiempo después. El concepto de SyCA es empleado fundamentalmente en América Latina, como una práctica que se nutre de los saberes

ecológicos de las comunidades locales (Martos-Rosillo *et al.*, 2020).

Los sistemas de SyCA constituyen excelentes ejemplos de SbN para la gestión integrada y adaptativa del agua. Como ejemplos de sistemas de SyCA aplicados a la mejora de la seguridad hídrica, se pueden mencionar a las acequias de careo de Sierra Nevada (Andalucía, España), que cumplen un rol fundamental en la provisión de agua con fines de uso múltiple y el sostenimiento de paisajes bioculturales fundamentales en el contexto ambiental ecológico e histórico del sur de Europa (Martos-Rosillo *et al.*, 2020).

Se entiende al paisaje biocultural como un “territorio que comparte un paisaje e identidad propia, manejado bajo un régimen unificado de gestión territorial que permite promover el desarrollo económico sustentable por medio de la protección y valoración de la naturaleza y la cultura local” (Bezaury *et al.*, 2018; citado en Morales Barragán, 2019). En este sentido, se considera que los sistemas de SyCA que se presentan en el presente trabajo contribuyen notablemente a la preservación y gestión de un paisaje biocultural singular catalogado como Patrimonio de la Humanidad, como lo es la Quebrada de Humahuaca.

El objetivo del presente trabajo es el de caracterizar los sistemas SyCA asociado a los regadíos históricos y ancestrales del sector central de la Quebrada de Humahuaca, y el de brindar una aproximación metodológica a su estudio.

Como hipótesis de trabajo, se plantea que en la Quebrada de Humahuaca se implementan prácticas de SyCA asociadas a sistemas ancestrales y tradicionales de regadío que se encuentran tanto en el fondo de valle, en las márgenes del colector principal del valle fluvial, como en los cursos superficiales tributarios de éste, en ambientes de media y alta montaña. En general, estos sistemas de regadío captan el agua proveniente de fuentes superficiales y subterráneas, que es conducida a través de acequias en terreno natural hasta las parcelas. Luego, el agua se aplica en

las parcelas a través de la técnica del riego en manto, principalmente, lográndose un amplio derrame que favorece la infiltración del agua. El agua infiltrada permite la aparición de nuevos manantiales en la base de los depósitos aluviales sobre los que se asientan las parcelas. Dichos manantiales son cosechados nuevamente en sistemas productivos ubicados aguas abajo.

Este trabajo forma parte de las actividades del Grupo Argentino de la Red de "Siembra y Cosecha del Agua en Áreas Naturales Protegidas de Iberoamérica", del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

ÁREA DE ESTUDIO

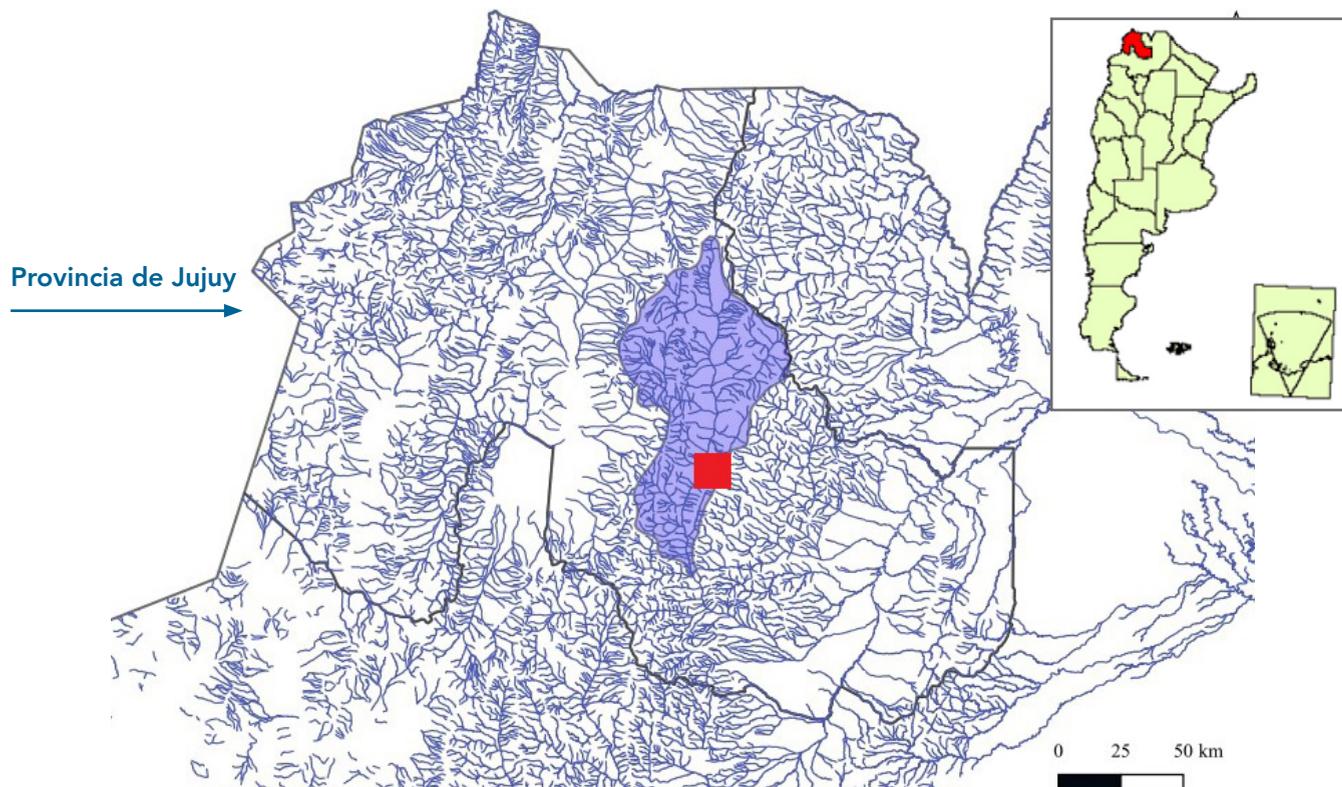
La Quebrada de Humahuaca (también conocida genéricamente como "La Quebrada"), es un valle fluvial de 160 km de longitud que se vertebró alrededor del río Grande, que es su colector principal.

En esta región encontramos cerca de 2000 ha de parcelas agrícolas bajo riego integral (Ministerio de Producción de Jujuy, 2011), que se localizan tanto en el fondo de valle, asociados al río Grande, como en sus cuencas tributarias. La producción principal es de tipo hortícola hacia el fondo de valle, y hacia los tributarios se producen cultivos andinos como papa, quinua, oca y otros cereales.

Esta región tiene una notable importancia cultural, económica, ambiental. En el año 2003 la Comisión de Patrimonio Mundial de la UNESCO inscribió a la Quebrada de Humahuaca en su listado de Patrimonio de la Humanidad (UNESCO, 2003), sobre la base de criterios relacionados con su posición estratégica que ha permitido la comunicación, desde hace 10.000 años, entre tierras altas y llanuras, el asentamiento de pueblos ancestrales, la agricultura, el comercio, en combinación con un paisaje árido fluvial de singular belleza en el que se asientan numerosas comunidades originarias y comunidades campesinas que realizan un manejo tradicional del riego.

Figura 1.

Ubicación de la Quebrada de Humahuaca a nivel del territorio de la República Argentina y de la provincia de Jujuy. En el recuadro en rojo se indica la ubicación general del área de estudio.



El régimen de precipitación en esta región se concentra entre los meses de noviembre y marzo. La precipitación en el fondo de valle es inferior a los 200 mm, mientras que en las cuencas tributarias puede llegar a 300-350 mm anuales. En la figura 2 se incluye el climograma correspondiente a la localidad de Maimará.

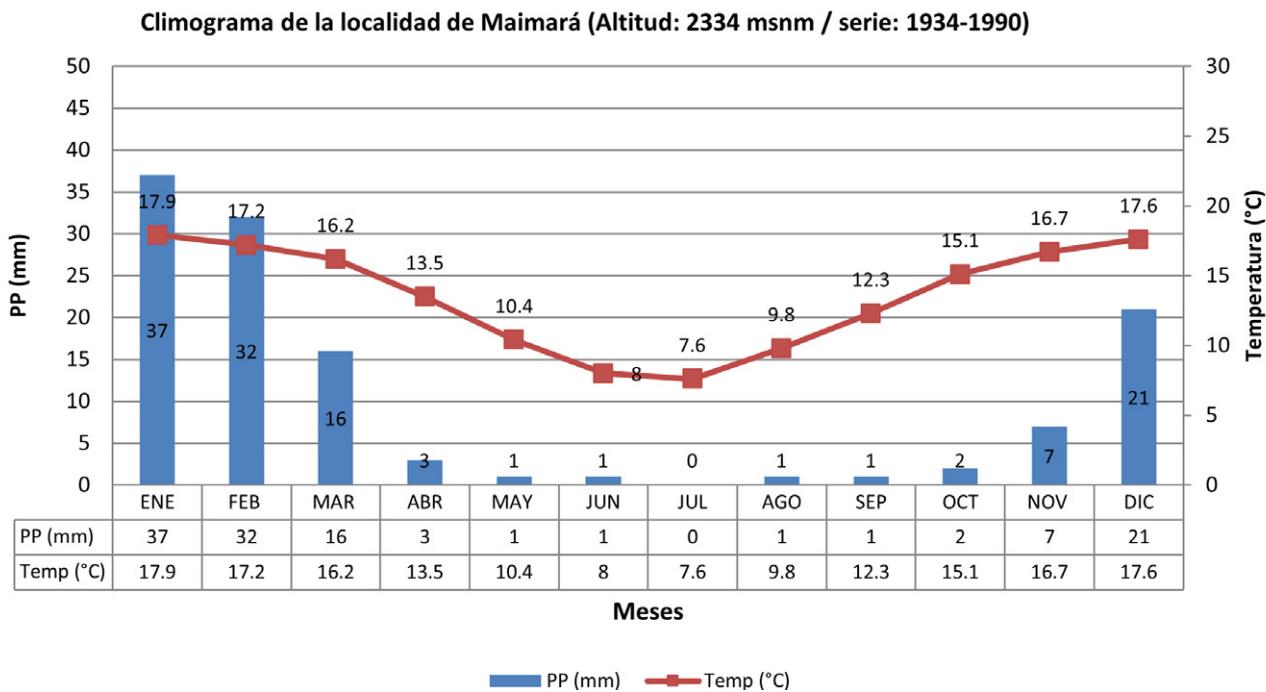
Los sistemas de regadío analizados se desarrollan sobre depósitos cuaternarios intermontanos, conspicuos en la Quebrada de Humahuaca. Algunos de ellos presentan evidencia de deformación neotectónica compresiva (Rodríguez Fernández *et al.*, 1999), debida a la deformación de piel gruesa en la región, perteneciente a la provincia geológica Cordillera Oriental (Colletta *et al.*, 1990 y Ramos y Aleman, 2000, citados en Ramos, 2017). El basamento de la Cordillera Oriental está compuesto por sedimentitas levemente metamorfizadas e intensamente deformadas. En discordancia angular sobre depósitos de edad proterozoica a cámbrica

inferior, yacen potentes unidades de sedimentitas de edad cámbrica y ordovícica. Sobre estas unidades se asientan, en suave discordancia angular, los depósitos silúricos a devónicos correspondientes a cuencas intracontinentales.

En discordancia respecto de los depósitos paleozoicos mencionados, se encuentran las distintas unidades de la cuenca del rift del Grupo Salta, de edad cretácica a eocena. El Grupo Salta representa el relleno de esta cuenca de rift: el Subgrupo Pírgua se asocia a los depósitos de sinrift y el Subgrupo Balbuena a depósitos de postrift, con su conspicua Formación Yacoraite, constituida por calizas de plataforma. El relleno final de la cuenca de rift se produce en el Eoceno con depósitos fluviales y lacustres del Subgrupo Santa Bárbara. La inversión tectónica de las estructuras del rift configura un subsuelo de considerable complejidad para su modelización numérica hidrogeomorfológica.

Figura 2.

Climograma de la localidad de Maimará. (Fuente: Zamora Gómez *et al.*, 2013, en base a Bianchi y Yáñez, 1992).



MATERIALES Y MÉTODOS

El presente trabajo constituye un abordaje preliminar a partir del cual se debe continuar profundizando en el papel de los sistemas de SyCA para el sostenimiento de servicios ecosistémicos y culturales, en un área en la que, por su categoría de conservación, el sostenimiento y desarrollo del paisaje agrícola y cultural en un contexto de cambio climático es una tarea prioritaria. Dentro de este paisaje agrícola cobran relevancia los sistemas ancestrales y tradicionales de riego.

Para la comprensión de los sistemas tradicionales de riego, el presente trabajo ha hecho investigación mediante procedimientos basados en la Investigación Acción Participativa (IAP) en busca de complementación de los saberes tradicionales y empíricos con el conocimiento de tipo técnico y científico, realizando entrevistas con agricultores familiares de la región de la Quebrada en las que se debatieron alternativas para la resolución de problemas del riego y gestión del agua. La IAP es una "metodología que apunta a la producción de conocimiento propositivo y transformador, mediante un proceso de debate, reflexión y construcción colectiva de saberes entre los diferentes actores de un territorio, con el fin de lograr la transformación social" (Ministerio de Desarrollo Social, 2009).

A partir del diálogo con productores locales y los relevamientos en terreno, se han identificado y se ha hecho una caracterización y un mapeo preliminar de los sistemas de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) en la región central de la Quebrada de Humahuaca, y se ha establecido el modelo conceptual de funcionamiento de estos. Para alcanzar estos objetivos, se emplearon herramientas de teledetección. Las características áridas del paisaje permitieron resaltar el contraste entre las parcelas irrigadas, los humedales y las tierras secas aledañas, con empleo de la herramienta NDMI (*índice diferencial de humedad normalizado* para realizar una delimitación preliminar de la influencia de la irrigación sobre la humedad de la vegetación. Esta herramienta permitió evaluar indirectamente las prácticas de SyCA, puesto que el agua es conducida por canales construidos en terreno natural (sin impermeabilización), y es aplicada en las parcelas con la técnica de riego a manto, que implica un derrame del agua en superficie amplio y extendido.

En este trabajo, a partir de series de imágenes satelitales ópticas Landsat 8 se exploró la estimación de la variación temporal del NDMI) en sectores determinados del área de estudio. El procesamiento empleado en el presente estudio se basa en imágenes corregidas SR (Surface Reflectance) del sensor Operational Land Imager (OLI) provenientes del satélite Landsat 8, operativo desde 2013. El mismo posee una resolución de 30 m de píxel, y una resolución temporal de 16 días. El NDMI se obtiene a partir de la combinación las bandas NIR (Infrarrojo cercano, 851-879 nm) y SWIR1 (Infrarrojo de onda corta, 1566-1651 nm) mediante la relación:

$$\text{NDMI} = (\text{NIR} - \text{SWIR}) / (\text{NIR} + \text{SWIR})$$

El referido índice NDMI es denominado índice diferencial de agua normalizado (NDWI) por Gao (1996). El índice NDMI detecta el agua líquida en la vegetación, a la vez que reduce las respuestas inducidas por la estructura interna y el contenido de materia seca. La reflectancia SWIR es afectada por el contenido de agua líquida en estructuras internas de la cubierta vegetal, mientras que la reflectancia NIR es sensiblemente afectada por la estructura interna y el contenido de materia seca de las hojas, no por el contenido de agua.

El índice NDMI se empleó con el fin de conducir el trabajo de campo y ensayar un análisis preliminar de la variación estacional de la humedad de los cultivos del fondo de valle que son irrigados, a través de la técnica de riego en manto, mediante la operación de acequias tradicionales y ancestrales. Particularmente se analizó el sector final del Canal Bella Vista.

La región de la Quebrada de Humahuaca cuenta con escasa información climática e hidrometeorológica. Son escasas las estaciones meteorológicas automáticas de registro continuo, y no se cuenta con estaciones hidrométricas en el río Grande ni en las cuencas tributarias. Frente a esta situación, y con el propósito de empezar a recolectar datos de precipitación en las áreas montañosas de la región bajo estudio, se procedió a instalar dos pluviómetros totalizadores en la cuenca del Huasamayo y dos en la cuenca del Arroyo Hornillos, en el sector sur del distrito de riego de Maimará (Figura 3). Esto permitirá, en el futuro, caracterizar debidamente las precipitaciones

estacionales y anuales a escala de cuenca, en áreas de difícil acceso que no cuentan con registros históricos.

Figura 3.

Pluviómetro totalizador en la subcuenca de Ovejería (Cuenca del río Huasamayo).



RESULTADOS

Modelo conceptual de Siembra y Cosecha de Agua

Los sistemas que se describen pueden ser clasificados en términos generales como pertenecientes al tipo “Sistemas de regadío históricos en terrazas y andenes” de acuerdo con las categorías propuestas por Martos-Rosillo et al (2020). Estos autores mencionan que sería posible considerar a estos sitios y estructuras como sistemas de SyCA, dado que “estos suelen tener retornos de riego del 30% al 40%; que dan lugar a manantiales y a descargas en los ríos”. A su vez, de acuerdo con su ubicación dentro del valle fluvial del río Grande, pueden ser definidos como: a) sistemas de SyCA y regadíos de fondo de valle; y b) sistemas ubicados en cuencas tributarias del río Grande.

Particularmente, se relevaron y caracterizaron los sistemas de SyCA ancestrales y tradicionales en dos sitios: a) la cuenca del río Huasamayo (tributario del río Grande), y b) el área del distrito de riego de Maimará, como un ejemplo de distrito de riego de fondo de valle.

Sistemas de SyCA en la Quebrada

Siembra y Cosecha de Agua en cuencas tributarias: casos en la cuenca del río Huasamayo

Se relevaron sistemas SyCA en la subcuenca del río Huasamayo, el cual es tributario del río Grande sobre la margen izquierda del mismo. En la cuenca del río Huasamayo los cursos de agua confluyen en un sector fuertemente encajonado, denominado localmente como La Garganta del Diablo. Aguas abajo de este encajonamiento, el río Huasamayo fue conformando un importante cono aluvial donde se asienta la localidad de Tilcara, uno de los principales núcleos poblacionales de la región, con cerca de 4.700 habitantes (DIPEC, 2022), la cual se abastece principalmente de una captación superficial ubicada en el sector de La Garganta del Diablo. En el sector sur del cono aluvial se asientan parcelas de cultivo que se abastecen de los caudales del río Huasamayo.

Dentro de la cuenca del río Huasamayo, los sistemas en los que se realizó un primer relevamiento de prácticas de SyCA fueron denominados de acuerdo con el curso de agua al que se encuentran asociados, como: a) Sistema de Ovejería; b) Sistema de Alfarcito 1; y c) Sistema de Alfarcito 2.

En la figura 4 se muestra la ubicación de los sistemas de SyCA relevados en la cuenca del río Huasamayo y la ubicación de dos pluviómetros totalizadores instalados para el análisis del medio físico en el sector norte de dicha cuenca. En la figura 5 se incluyen los valores de precipitación registrados durante las temporadas hidrológicas 2020-2021 y 2021-2022 en ambos pluviómetros totalizadores. Nótese que la precipitación registrada en el pluviómetro de Ovejería es ligeramente menor que la del pluviómetro de Casa Colorada en todos los registros conjuntos. Esto quizás pueda estar manifestando la variación del gradiente de precipitación de acuerdo con la altitud.

Figura 4.

Ubicación de sistemas de SyCA relevados en la cuenca del río Huasamayo (azul) y Sistema del canal Bella Vista en el fondo de valle. Se indica además la ubicación de los pluviómetros totalizadores en el sector norte de la cuenca mencionada.

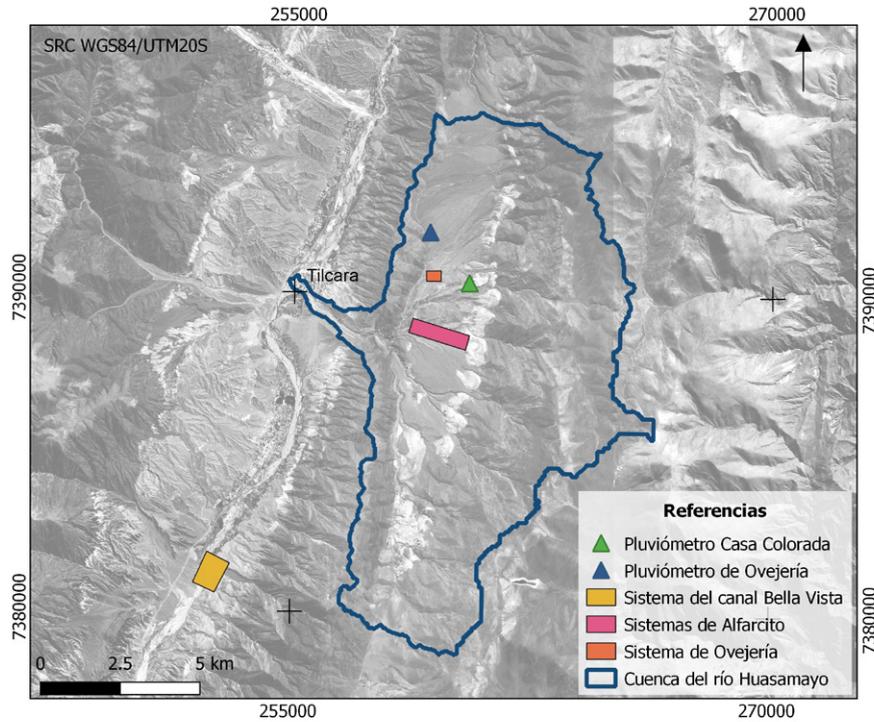
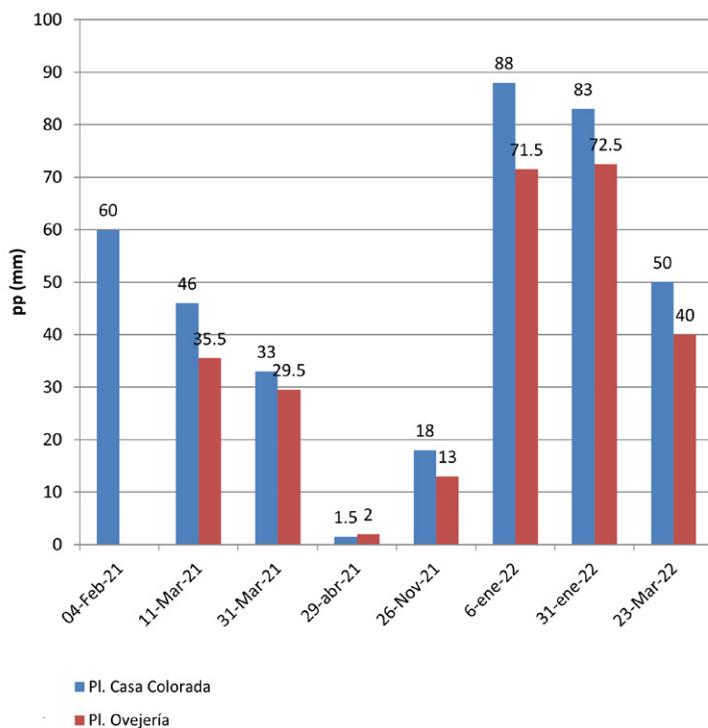


Figura 5.

Precipitación medida en el sector norte de la cuenca de Huasamayo para ambos pluviómetros totalizadores, entre el período febrero de 2021 y marzo de 2022: Pluviómetro Casa Colorada (A); Pluviómetro de Ovejería (B).



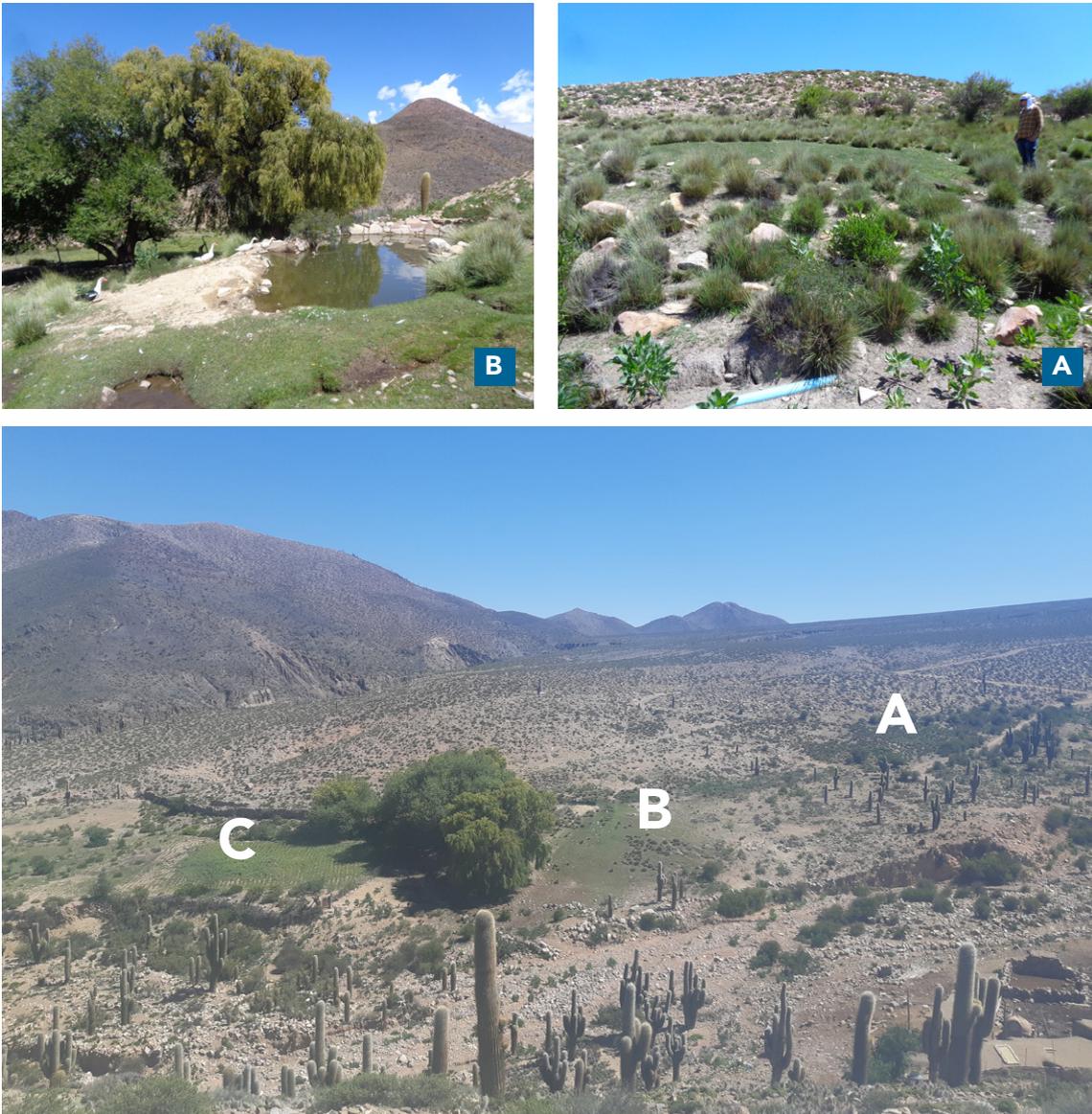
Sistema de Ovejería

El sistema de regadío de Ovejería se encuentra en la cuenca del río Huasamayo. En el paraje Ovejería, el productor entrevistado nos comentó la forma en que realiza la siembra de agua (Figura 6). Se inicia en el sector A, donde hay un manantial concentrado, que es captado y conducido a través de una acequia. En el Sector B hay una zona de pastizal natural donde

se realiza un riego en manto, facilitando la infiltración y la recarga de humedad en el perfil del suelo. En el sector C se encuentra la chacra. En otros parajes de esta misma cuenca se encuentra la misma modalidad de aplicación del agua. Los volúmenes infiltrados retornan al arroyo situado hacia la base de la vista general en la figura.

Figura 6.

Sistema de SyCA Ovejería. Riego e infiltración para desarrollo de pastizales en Paraje Ovejería: A) Manantial; B) zona de pastizal; C) chacra.



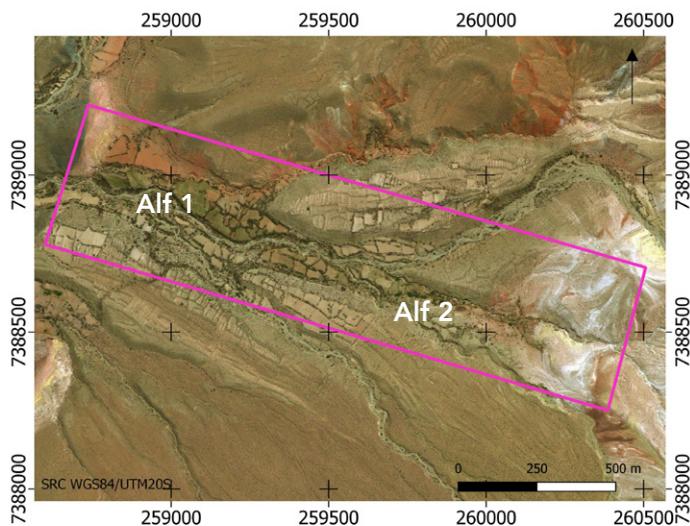
Sistemas de Alfarcito

En el paraje de Alfarcito, situado en la cuenca del río Huasamayo (Figura 7), se relevaron 2 sistemas de regadío: Alfarcito 1 (localizado en cotas más bajas, más próximo a la confluencia de los diferentes arroyos en la zona encajonada de la Garganta del Diablo), y Alfarcito 2 (ubicado en una cota más elevada).

En el Sistema Alfarcito 1, las parcelas de cultivo se ubican en lo alto de una terraza fluvial, con una potencia de 5 a 9 m de espesor. En estas parcelas se realiza la misma técnica para derramar el agua sobre una amplia franja de pastizal natural y recargar de humedad el perfil del suelo (Figura 8A). Luego, los retornos de riego se manifiestan en forma de manantiales de ladera en la base de la terraza mencionada, aportando caudal a los arroyos que rodean a esta geoforma (Figura 8B).

Figura 7.

Sistemas de SyCa en el paraje Alfarcito: Alfarcito 1 (Alf 1) y Alfarcito 2 (Alf 2).



En el caso del Sistema Alfarcito 1 se puede apreciar el estrato de arenisca de baja permeabilidad que actúa como basamento, y que propicia el alumbramiento de los manantiales mencionados (Figura 9).

Figura 8.

Riego en manto para el desarrollo de pastizales en el Sistema Alfarcito 1 (A) en la cabecera de la parcela. Los retornos de riego afloran en forma de manantial difuso (B).



En la figura 9, el productor del Sistema Alfarcito 1 señala que el Arroyo Sin Nombre (S/N) también recibe los retornos de riego aplicados en la cabecera de la parcela en forma de escurrimiento superficial, o a través del afloramiento de un pequeño manantial. También se puede apreciar la potencia de sedimentos sobre los cuales se encuentra esta parcela. Esos volúmenes escurren hacia la confluencia de este arroyo menor con el arroyo Alfarcito, adentrándose en un sector encajonado (B) donde aflora el basamento de arenisca.

Figura 9.

Escurrimiento de los retornos de riego a través del cauce del arroyo S/N. A: se observa la pared con vegetación abundante a partir de los manantiales difusos del costado de la terraza; B: aguas abajo del sitio anterior, el cauce del arroyo se estrecha y se puede apreciar la roca aflorante.



El Sistema Alfarcito 2, el cual se encuentra en un sector de mayor altitud de la cuenca, exhibe un sistema similar. Se identifica el aprovechamiento de un manantial para el riego de parcelas aguas abajo, y el retorno del riego hacia el cauce del arroyo a través de manantiales o por escurrimiento superficial.

Figura 10.

SyCA a partir de un manantial concentrado (a) en el Sistema Alfarcito 1. Riego en manto de pastizales (b).



Los actuales sistemas de SyCA relevados en la Cuenca del río Huasamayo se encuentran ubicados dentro de un complejo agrícola ancestral de época prehispánica (Figura 11) de cerca de 1200 ha de superficie, según las estimaciones de Madrazo (1969), citado en Tarragó (2005). Los primeros estudios de los sistemas de irrigación presentes en la zona fueron realizados por Debenedetti (1918). En campañas arqueológicas de mediados del siglo XX fueron relevadas estructuras hidráulicas tales como represas, canalizaciones y acequias (Lafón, 1957; citado en González, 2011), y hacia fines de ese mismo siglo fueron relevados los sistemas de irrigación por el equipo de Albeck, de acuerdo con González (op. cit.), quien realizó una caracterización de las estructuras de riego y cultivos de la región. A su vez, el complejo de la Cuenca del Huasamayo compone un conjunto más amplio de grandes áreas agrícolas prehispánicas de la Quebrada de Humahuaca, entre los que se destacan los complejos de Rodero y Coctata, ubicados en el sector septentrional de esta región (Albeck, 2016).

Figura 11.

Andenería prehispánica en la cuenca del Huasamayo.
Fuente: J. P. Zamora Gómez.



Sistemas de SyCA en el fondo de valle: caso del Distrito de Riego de Maimará

El distrito de riego de Maimará presenta un funcionamiento característico de los sitios de fondo de valle, y se abastece principalmente a partir del río Grande. A su vez, este curso de agua recibe

los aportes de manantiales concentrados y difusos (conocidos estos últimos como ciénegos en la región), localizados en las terrazas fluviales de sus márgenes. En la figura 12 se muestra el conjunto de manantiales difusos que están localizados en el sector norte del distrito de riego de Maimará, sobre la margen izquierda del río Grande; y también se incluye el manantial histórico que abastecía a la Posta de Hornillos, que en la actualidad funciona como museo y en la época colonial constituía un sitio de descanso y aprovisionamiento para viajeros y caravanas que comercializaban entre las tierras bajas y el altiplano y el Alto Perú.

Figura 12.

Fuentes de agua características de los distritos de riego de fondo de valle de la Quebrada de Humahuaca. El caso del distrito de riego de Maimará; a) manantiales difusos (ciénegos) de la zona de Tilcara; b) Manantial concentrado del Museo Histórico Posta de Hornillos. Fuente: Zamora Gómez et al. (2013).



Sistema del Canal Bella Vista

El área irrigada por el canal Bella Vista se encuentra localizada en terrazas aluviales elevadas sobre la margen izquierda del río Grande. En la figura 13 se puede apreciar la localización del sector donde se identifican las prácticas de SyCA características de fondo de valle.

A través del riego en manto, los productores de este sector aplican el agua en una amplia zona de pastizales naturales. En la figura 14a se puede observar cómo ingresa el agua a las parcelas con pastizal a través de unas regueras. Esta técnica permite la infiltración de buena parte del caudal de agua y la recarga de humedad del perfil del suelo. Posteriormente, el agua infiltrada es restituida al río Grande a través de manantiales que se encuentran en la base de la terraza aluvial (Figura 14b). El agua pasa a ser nuevamente conducida por canales y aproximadamente a 600 m aguas abajo de los mencionados manantiales, el agua es empleada nuevamente para el riego en parcelas agrícolas localizadas al sur del canal Bella Vista.

Figura 13.

Ubicación del tramo terminal del canal Bella Vista, que abastece el sector donde se relevaron las prácticas de SyCA características de fondo de valle.

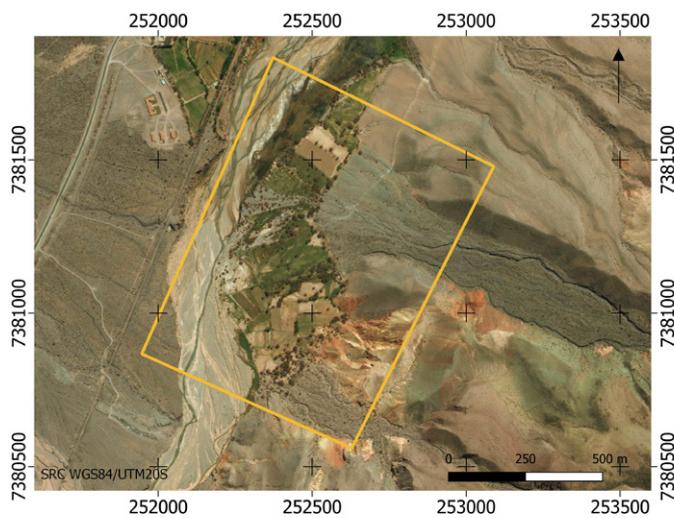


Figura 14.

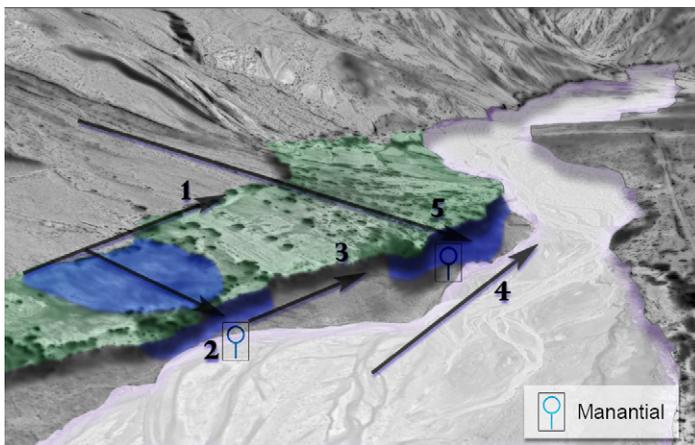
Siembra y Cosecha de Agua en el sistema de regadío Canal Bella Vista. A: Riego por manto en una parcela de pastizales naturales en lo alto de una terraza aluvial. B: Captación de manantiales que afloran en la base de la terraza aluvial en el Sistema del Canal Bella Vista. Fuente: J. P. Zamora Gómez.



Se entrevistó a Don Juan L., el agricultor responsable del riego en estas parcelas, y refirió lo siguiente: "derramo para que se descampe todo esto. Y esa agua que se pierde allá, hacia el final del campo, sale allá, allá y otro más allá ... en definitiva, son tres ojitos de agua". Don Juan también comentó el uso que le dan al agua que aflora en la base de la terraza fluvial: "... tomamos de los ojitos y esa agua la llevo hasta una parcela que tengo más abajo, donde hay mucha verdura... ". De esta manera se documenta que los agricultores son conscientes de que el agua aplicada en superficie para el riego de los pastizales termina alimentando los manantiales de la base de la terraza, que a su vez son captados y conducidos para su uso en sector aguas abajo. La figura 15 esquematiza el funcionamiento propuesto para el sistema del canal Bella Vista.

Figura 15.

Esquema de funcionamiento del Sistema de SyCA en un sector de terraza aluvial de la Quebrada de Humahuaca (tramo final del Canal Bella Vista, Distrito de Riego de Maimará). Referencias: (1) Acequia de riego "Canal Bella Vista"; (2) Aporte a la parcela a través de la técnica de riego por manto; (3) manantiales en la base de la terraza aluvial, que son captados y conducidos a parcelas ubicadas aguas abajo; (4) flujo superficial sobre el cauce del río Grande; (5) Humedal ubicado en la parte terminal del abanico aluvial.



Índice diferencial de humedad normalizado aplicado al sistema SyCA Canal de Bella Vista

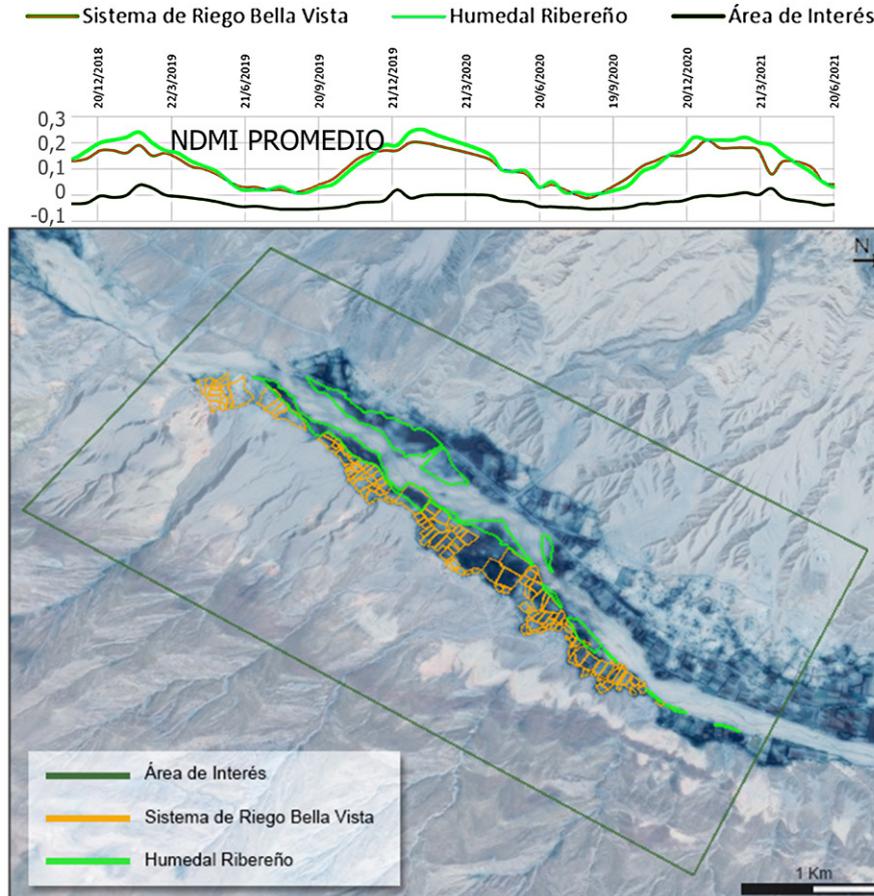
En la figura 16 están representados los valores NDMI promedio a lo largo de una serie temporal, para tres sectores delimitados de acuerdo con el sistema de SyCA definido para el Sistema del Canal Bella Vista. Los tres sectores son: 1: El sistema de riego de Bella Vista; 2: Los humedales ribereños presentes en los márgenes del río Grande. Y 3: el área de interés, que incluye a los dos sectores previos, y además al regolito, la roca, parte de la ciudad de Maimará y diversos suelos no irrigados circundantes.

En la figura 16 se caracteriza la humedad vegetal en el terreno estudiado a través el índice NDMI para un sector del distrito de riego de Maimará donde se sitúa el canal Bella Vista. Los tonos de azul representan el valor medio de NDMI por cada píxel para la estación de verano 2020-2021. El mapeo del índice NDMI permite discriminar el área sometida a riego integral, respecto de su entorno con suelos desnudos de poco desarrollo, con escasa humedad y sectores de roca aflorante. Los tonos más oscuros indican una mayor disponibilidad hídrica. Es interesante la similitud de los humedales ribereños y las parcelas incluidas en el sistema de riego en cuanto a la variabilidad e intensidad de los índices NDMI a lo largo del tiempo; ambos se diferencian del promedio general del área de interés.

Estos primeros abordajes a través de herramientas basada en sensores remotos ópticos abren nuevos interrogantes y abordajes que enriquecen la caracterización y conceptualización de los modelos conceptuales de SyCA en interacción con la dinámica hidrogeológica natural. Por ejemplo, cuánto aportan a los humedales el riego en manto infiltrado, cuánto al agua subterránea, y cuánto al río Grande. O determinar por qué los valores de NDMI en humedales fueron menores a los de las áreas irrigadas durante la primavera.

Figura 16.

Aplicación de un índice diferencial de humedad normalizado (NDMI) a un sistema de irrigación de fondo de valle (Sistema de Riego de Maimará) y al terreno árido circundante al mismo.



DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

La SyCA se muestra como un enfoque necesario para complementar y potenciar los análisis y estudios de la gestión del agua en la Quebrada de Humahuaca. Las prácticas de SyCA en los sistemas ancestrales y tradicionales que fueron descritas para el sector central del valle aportan a la preservación del paisaje biocultural, al sostenimiento de sistemas de regadío ancestrales y tradicionales, la prestación de servicios ecosistémicos, el diferimiento en el tiempo del escurrimiento superficial del río Grande y la seguridad hídrica de las poblaciones de la región. Se abordó la importancia de incorporar el enfoque de SyCA en el análisis y estudio de gestión del agua en la región de la Quebrada de Humahuaca, particularmente porque se trata de un paisaje biocultural declarado Patrimonio Cultural y Natural de la Humanidad de

la UNESCO. Estos beneficios de las prácticas de SyCA también podrían ser interés al momento de considerar programas de gestión integral de la cuenca del río Grande-Perico, que en su parte media y baja cuenta con importantes estructuras hidráulicas de regulación y almacenamiento, para la provisión de agua a distritos de riego agroindustriales y núcleos poblacionales de alta densidad.

El sostenimiento de los paisajes bioculturales de la Quebrada de Humahuaca se basa en gran medida en la gestión y mantenimiento de las acequias históricas y ancestrales de la región, que responde a un complejo sistema organizacional manejado por consorcios y grupos de regantes. Esto habla de la necesidad de fortalecer dichas organizaciones, tanto a nivel técnico y operativo, como financiero.

Se debe hacer especial referencia a la potencialidad de la infraestructura hidráulica ancestral como la existente en la cuenca del Huasamayo, como tecnologías de adaptación para frente al cambio climático. Estas tecnologías, y sus prácticas asociadas, deberían ser puestas en valor a partir del esfuerzo conjunto entre comunidades y regantes, organismos de ciencia y técnica, autoridades de aplicación, y agentes municipales. La recuperación de esta infraestructura aportará a la mejora de la seguridad hídrica de las poblaciones localizadas aguas abajo, además de favorecer la implementación de iniciativas de restauración agrohidrológica de estas cuencas torrenciales. La puesta en valor de esta infraestructura también favorecerá el arraigo y la permanencia de productores y productoras en la zona.

Se debe hacer especial referencia a la potencialidad de la infraestructura hidráulica ancestral como la existente en la cuenca del Huasamayo, como tecnologías de adaptación para frente al cambio climático.

El presente trabajo constituye un primer avance en el relevamiento y caracterización de sistemas de SyCA en el fondo de valle y las cuencas tributarias del río Grande, colector principal de la Quebrada de Humahuaca. Se ha presentado un primer abordaje metodológico para el estudio y relevamiento de los sistemas de SyCA en la Quebrada de Humahuaca, basado en el uso de herramientas de teledetección, la instalación de estaciones pluviométricas, la observación en terreno y la entrevistas a productores y comunidades originarias de la región.

También es importante enfatizar en la necesidad de profundizar el estudio de los complejos arqueológicos agrícolas ancestrales de los períodos preincaico e incaico para comprender cómo funcionaba la SyCA en tiempos ancestrales, promoviendo la rehabilitación de esta infraestructura ancestral para la mejora de la resiliencia climática de estos territorios. Se plantea como futura línea de trabajo la articulación con diferentes organismos científicos y técnicos, tanto nacionales como internacionales, para la formulación

e implementación de proyectos de rehabilitación y estudio de estos sistemas hidráulicos ancestrales, proponiendo un abordaje interdisciplinario en diálogo permanente con los saberes tradicionales de los y las agricultores y agricultoras de las comunidades locales. Es necesario conocer el tipo de tecnologías presentes en la zona, y la forma de reactivarlas y mejorarlas empleando como referencia aquellas tecnologías que ya han sido puestas en valor y que se encuentran en plena operación, como las qochas y las amunas en contextos andinos en otros países de la región.

Se debe destacar la elevada potencialidad que las tecnologías y la infraestructura ancestral de SyCA presentan como componentes de la seguridad hídrica y la ordenación hidrológica de la cuenca del río Huasamayo y el núcleo urbano que alberga en su parte baja, la ciudad de Tilcara. La puesta en valor de la mencionada infraestructura podría incidir positivamente en la infiltración de las precipitaciones estivales, la recarga de acuíferos someros a través del riego, y el incremento del tiempo de permanencia del agua en la cuenca, y el diferimiento en el escurrimiento superficial a lo largo del año, y la mejora de disponibilidad de caudales superficiales en para el uso doméstico y agrícola de la ciudad de Tilcara durante la época desfavorable.

Se plantea la importancia de comunicar el enfoque de SyCA, y abordarlo en forma conjunta con los productores agrícolas de la Quebrada. Así también, se plantea la importancia de poner a disposición de técnicos municipales, funcionarios de la autoridad de aplicación, miembros de los consorcios de riego y representantes de las comunidades indígenas del área de estudio y de la región, las herramientas de teledetección de libre acceso para el monitoreo hidrológico e hidrometeorológico de la región.

Las tecnologías de Soluciones Basadas en la Naturaleza son fundamentales para una gestión del agua y del riesgo hidrometeorológico en cuencas torrenciales como la Quebrada de Humahuaca. En este sentido, el estudio, la investigación y el desarrollo de tecnologías de SyCA constituyen un aporte importante para fortalecer y complementar el conjunto de SbN que potencialmente pueden ser implementadas dentro de los planes de adaptación y resiliencia climática de Quebrada.

Se destaca la necesidad de avanzar en la elaboración de modelos hidrogeológicos conceptuales que expliquen en funcionamiento de los sistemas de SyCA en la región. Para ello se deberá emprender acciones institucionales relacionadas con la puesta en funcionamiento de estaciones hidrometeorológicas, la realización de campañas permanentes de medición hidrológica, la caracterización y cuantificación de los componentes de precipitación, evapotranspiración, escurrimiento e infiltración de los sistemas hidrológicos bajo estudio, la evaluación de la capacidad de infiltración de las estructuras ancestrales y su impacto en la recarga global en las cuencas hidrológicas. Relacionado con esto último, cobra mucha importancia la determinación de cómo cuantificar los retornos de riego de las terrazas y los andenes y las parcelas ubicadas en las márgenes del río Grande.

Los mapas basados en series temporales y actualizadas de índices derivados del sensoramiento satelital óptico, pueden constituir una herramienta útil para incrementar la productividad hídrica de los cultivos, contribuir a la resolución de conflictos entre regantes, y la planificación y gestión general de este paisaje agrícola protegido. Así como abrir nuevos interrogantes respecto de la dinámica hidrológica superficial.



AGRADECIMIENTOS

El presente trabajo se elaboró en el marco de la Red de Siembra y Cosecha del Agua en Áreas naturales Protegidas del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (Red CYTED/SyCA). También se inscribe dentro del proyecto de colaboración institucional "Estudio comparativo de los sistemas de regadío histórico de las regiones de Sierra Nevada (Andalucía, España) y el Noroeste de la Argentina", llevado adelante entre el Laboratorio de Arqueología Biocultural (MEMOLab) de la Universidad de Granada (UGR), y el Instituto Geológico y Minero de España (IGME-CSIC) y el Instituto de Investigación y Desarrollo Tecnológico para la Agricultura Familiar región NOA (IPAF NOA), dependiente del Instituto Nacional de Tecnología Agropecuaria (INTA) de Argentina. Una parte de las actividades de este proyecto serán financiadas por el programa BEC. AR, del Ministerio de Educación de Argentina.

A su vez, se contó con el apoyo de los siguientes proyectos estructurales y plataformas de innovación de INTA: PE-E2-I041 "Aportes para la gestión integrada de los recursos hídricos (GIRH) en cuencas de las regiones de Sistema Agroalimentario Argentino", PE-E2-I505 del INTA "Uso y gestión eficiente del agua en sistemas de regadío", PE-E3-I064 del INTA "Prevención y evaluación de la emergencia y desastre agropecuario", PE-E2-I506 del INTA "Determinación y relevamiento de humedales, producción y uso sostenible", PE-E2-I043 del INTA "Acceso, uso, re-uso y manejo del agua con fines múltiples", y Plataforma de Innovación Territorial "Desarrollo de la Quebrada de Humahuaca y Valles Altura (Jujuy y Salta)".

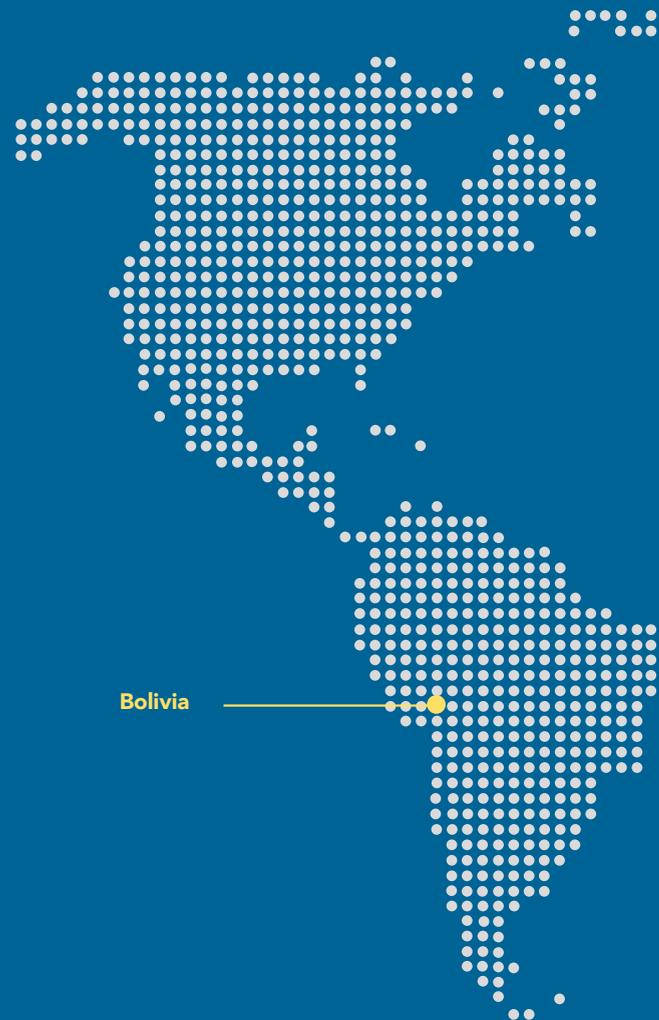
REFERENCIAS

- Albeck, M. E. 2019. Producción incaica en los Andes Centro Sur. Tecnología Agrícola en Rodero y Coctaca, Argentina. *Revista Española de Antropología Americana*. 49, 2019: 9-28.
- Bianchi, A. R. y Yañez, C. E. 1992. *Las precipitaciones del Noroeste Argentino*, 19/12/2011, https://anterior.inta.gob.ar/prorenea/info/resultados/Precip_NOA/RESULTADOS_estad_pre.asp
- Debenedetti, S. 1918. Las ruinas prehispánicas de El Alfarcito (Departamento de Tilcara, provincia de Jujuy). *Boletín de la Academia Nacional de Ciencias de Córdoba*, 24/04/2022. https://upload.wikimedia.org/wikipedia/commons/2/22/Las_ruinas_prehisp%C3%A1nicas_de_El_Alfarcito_%28departamento_de_Tilcara%2C_provincia_de_Jujuy%29.pdf
- Delgado, R. Desarrollador de estación automática Puco. En: <https://www.behance.net/erredi>. IG: @erre.d.i
- DIPEC - Dirección Provincial de Estadísticas y Censos de la provincia de Jujuy. 2022. Población de localidades y municipios de la provincia de Jujuy - Censo 2010, 25/03/2022 <http://dipec.jujuy.gob.ar/localidades-y-municipios-de-jujuy/#304-305-localidades>
- González, N. M. 2011. Estructuras prehispánicas y agricultura en la cuenca del Huasamayo (Tilcara, Jujuy). *Revista Relaciones de la Sociedad Argentina de Antropología XXXVI*, 101-122.
- Martos Rosillo, S. 2020. Las Acequias de Careo del Parque Nacional de Sierra Nevada. *I Congreso Chileno de Siembra y Cosecha de Agua* (online).
- Martos-Rosillo, S.; Durán, A.; Castro, M.; Velez, J.; Herrera F., G.; Martín Civantos, J. M.; Mateos, L.; Durán Valsero, J.; González-Ramón, A. Ruiz-Constán, A. Jódar, J. Gutierrez, C.; Hermoza, R. Bardales, J.; Peña, F. 2020. La Siembra y Cosecha del Agua en Iberoamérica; un sistema ancestral de gestión del agua que utiliza Soluciones Basadas en la Naturaleza. *Tierra y Tecnología*, 55.
- MINISTERIO DE PRODUCCIÓN DE JUJUY. 2011. *Plan Productivo Provincial*.
- Morales Barragán, F. 2019. *Paisaje Biocultural: participación vs. gestión asociada del territorio*. En: Impactos ambientales, gestión de recursos naturales y turismo en el desarrollo regional. Universidad Nacional Autónoma de México y Asociación Mexicana de Ciencias para el Desarrollo Regional A.C, México, (2), 214-226.
- Ramos, V. A. 2017. Las provincias geológicas del noroeste argentino. *Ciencias de la Tierra y Recursos Naturales del NOA. XX Congreso Geológico Argentino*. Tucumán, 42-56.
- Rodríguez Fernández, R., Heredia, N., Seggiaro, R. E., & González, M. A. 1999. Estructura andina de la Cordillera Oriental en el área de la Quebrada de Humahuaca, Provincia de Jujuy, NO de Argentina. *Trabajos De Geología*, 21(21), 321-333.
- Tarragó, M. N. 2005. Aportes del doctor Guillermo Madrazo a la arqueología del noroeste Argentino. *Revista Andes* [online]. 16. 81-92.
- UNESCO - World Heritage Convention. Decision 27 COM 8C.17 - Quebrada de Humahuaca (Argentina), 05/03/22, <https://whc.unesco.org/en/decisions/712>
- UN Water. 2018. *Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. Informe mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018*. UNESCO. 152 pp.
- Zamora Gómez, J. P. 2015. *Propuesta de gestión integrada del agua para riego en el distrito de Maimará, Quebrada de Humahuaca, provincial de Jujuy, Argentina*. Tesis de maestría. Facultad de Ingeniería y Ciencias Hídricas, Universidad Nacional del Litoral.
- Zamora Gómez, J. P., Marín-Lechado, C.; Peinado-Parra, T. García-Martínez, J., Martos-Rosillo, S. 2021. Siembra y cosecha del agua en el espacio natural de Sierra Nevada: un sistema ancestral de manejo del agua que garantiza el abastecimiento a poblaciones rurales en áreas protegidas. *CIAS2021 - Congreso Ibérico de las Aguas Subterráneas*, Valencia, 197-200.
- Zamora Gómez, J. P.; Abdo, G.; Achem, M. V.; Mamaní, P. G.; Quispe, J. E. S.; De Brito, L. A., Hermida, M. S.; Torrejón, N. D.; Binder, G. E. e Ismael, J. 2013. *Experiencia del Voluntariado Universitario en el Distrito de Riego de Maimará, Quebrada de Humahuaca, provincia de Jujuy*. Ediciones INTA, Argentina. 70 pp.



Hidrotecnologías ancestrales de siembra, cosecha y gestión de agua en las ecorregiones andina y amazónica de Bolivia

Ancestral hydraulic technologies for sowing, harvesting and water management in bolivian andean and amazon ecoregions



Alfredo Durán^{1*}, Oscar Delgadillo¹, Oscar Saavedra², René Chipana³, Andrés Gonzales⁴, Galo Muñoz⁴, Fernando Ledezma⁴

¹ Centro Andino para la Gestión y Uso del Agua (Centro AGUA)-Universidad Mayor de San Simón (UMSS). alfredo.duran3101@gmail.com, oscard.fcayp@umss.edu,

² Consultor en Gestión y auditorías ambientales. osaavedraus@yahoo.com

³ Facultad de Agronomía-Universidad Mayor de San Andrés (UMSA). renechipana@yahoo.com

⁴ Laboratorio de Hidráulica (LH-UMSS)-Universidad Mayor de San Simón (UMSS). andresgonzales.a@fcyt.umss.edu.bo, galomunoz.v@fcyt.umss.edu.bo, fernandoledezma.p@fcyt.umss.edu.bo

* P.O. Box 4926; Cochabamba, Bolivia

Hidrotecnologías ancestrales de siembra, cosecha y gestión de agua en las ecorregiones andina y amazónica de Bolivia

RESUMEN

A partir de la década de los años 60 del siglo pasado, se han descubierto progresivamente, tanto en Bolivia como en otros países iberoamericanos, una diversidad de tecnologías ancestrales de siembra, cosecha y gestión de agua. Los reportes de los hallazgos efectuados en Bolivia revelan que los sistemas construidos cumplían simultáneamente funciones de control hídrico, aprovechamiento del agua para múltiples usos, procesos productivos y protección ecosistémica, generando así condiciones de sostenibilidad, como lo demuestra el hecho de que estas hidrotecnologías tuvieron una vigencia de miles de años y constituyeron el soporte para el desarrollo social, económico, organizativo y cultural de los pueblos andinos y amazónicos. En el caso concreto de Bolivia, durante el 2019 se hizo una recopilación de las prácticas y sistemas de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) tradicionales, información que ha sido el sustento del presente trabajo, que no pretende brindar una explicación detallada de cada una de estas tecnologías, sino una comprensión de la relevancia e importancia que tuvieron en el desarrollo de los pueblos antiguos, como una contribución para el mejor entendimiento de potenciales intervenciones en la actualidad. Para ello, se realizó la revisión de la literatura referida al tema de las hidrotecnologías ancestrales, intentando poner en una línea de tiempo los principales descubrimientos reportados, explicando las bondades ambientales y los beneficios productivos de cada una. Se ha discutido también, brevemente, a partir de las experiencias y opiniones de los autores, algunos de los aspectos críticos que han impedido procesos de rehabilitación y rescate tecnológico sostenido y a gran escala de los diversos tipos de sistemas descritos.

Ancestral hydraulic technologies for sowing, harvesting and water management in Bolivian andean and amazon ecoregions

ABSTRACT

Since the 1960s, a diversity of ancestral hydraulic technologies for sowing, harvesting and water management have been discovered both in Bolivia as well as in several countries of Ibero-America. The reports of the findings made in Bolivia reveal that these hydraulic systems simultaneously fulfilled functions of water control, multiple water uses, support of productive processes, and ecosystem protection, thus generating conditions of sustainability, as evidenced by the fact that these technologies were in place thousands of years and constituted the support for social, economic, organizational and cultural development of the Andean and Amazonian peoples. To write-down this report, since 2019 a compilation of literature about traditional hydraulic systems, water sowing and harvesting technologies was made, information that has been the basis of this document, which does not intend to provide a detailed explanation of each of these technologies, but rather a understanding of the relevance and importance they had in the development of ancient peoples, as a contribution to a better understanding of potential interventions today. A literature review on the subject of ancestral hydro-technologies was carried out, trying to describe the main discoveries on a timeline and explaining the environmental benefits and productive benefits of each one. It is also briefly discussed, based on the experiences and opinions of the authors of the document, some of the critical aspects that have limited rehabilitation processes and a large-scale technological rescue of the various types of systems described.

INTRODUCCIÓN

La aplicación de hidrotecnologías de siembra, cosecha y gestión de agua se presenta como una alternativa concreta para mejorar las condiciones de captación, recarga y potencial suministro de agua subterránea y superficial, tal cual ha sucedido en distintos sitios de los Andes y la Amazonia, a través de prácticas milenarias, como las amunas del Perú (Alencastre, 2009), o las terrazas (andenes o taqanas) en zonas de montaña y sistemas de campos elevados en regiones tan diversas como Altiplano y Llanos de la Amazonia boliviana (Erickson, 1996).

La Siembra y Cosecha del Agua (SyCA) es el proceso mediante el cual el ser humano, a través de diferentes prácticas y técnicas, recolecta e infiltra (siembra) el agua de lluvia y de escorrentía en el subsuelo para poder aprovecharla (cosecharla) un tiempo después (Martos-Rosillo, 2018). Esta es una forma de gestión del agua que se creó gracias a los saberes ecológicos tradicionales adquiridos por distintas civilizaciones en diversos ámbitos geográficos del planeta (Denevan, 2001). El equilibrio hídrico y ambiental alcanzado a través de las prácticas de SyCA en distintas ecorregiones de Iberoamérica, se manifiesta en una comprobada resiliencia y una serie de impactos positivos en la gestión del agua. Las prácticas de SyCA y sus formas de gestión de agua, han permitido conservar hasta nuestros días algunas zonas ambientalmente críticas, en las cuales se alternan eventos extremos de lluvia y sequía, y en las que han ocurrido drásticos cambios sociales y climáticos durante el último siglo.

En esa perspectiva, el crecimiento de la población y la consecuente mayor demanda de agua, en el contexto del cambio climático actual y sus múltiples manifestaciones, así como los procesos de deterioro de cuencas hidrográficas y fuentes de agua, exigen una gestión eficaz e inteligente del agua. En este trabajo se describe las características del funcionamiento hidráulico y los beneficios potenciales de las hidrotecnologías de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) en las regiones andina y

Las prácticas de SyCA y sus formas de gestión de agua, han permitido conservar hasta nuestros días algunas zonas ambientalmente críticas.

amazónica de Bolivia, como un aporte para revalorar tales tecnologías ancestrales y delinear estrategias y alternativas para promover y reforzar procesos de recuperación de prácticas de SyCA en distintas zonas del país.

El trabajo constituye un estudio de caso boliviano en el marco del proyecto “Siembra y Cosecha de Agua” (SyCA), orientado a recopilar y analizar críticamente los distintos métodos de SyCA y los saberes ecológicos asociados de las comunidades locales y sus entornos, como una contribución al desarrollo de medidas y estrategias de adaptación y conservación de ecosistemas amenazados por acciones naturales y antropogénicas.

Durante el 2019 se hizo una recopilación de las prácticas y sistemas de SyCA tradicionales, información que ha sido el sustento del presente documento, el cual no pretende brindar una explicación detallada de cada una de estas tecnologías, sino una comprensión de la relevancia e importancia que tuvieron en el desarrollo de los pueblos antiguos, como un aporte para el mejor entendimiento de potenciales intervenciones en la actualidad.

Para ello, se realizó una revisión crítica de la literatura técnica y científica referida a las hidrotecnologías ancestrales, intentando poner en una línea de tiempo los principales descubrimientos reportados y explicando las bondades ambientales y los beneficios productivos de cada una. Se ha discutido también, brevemente, a partir de las experiencias y de las opiniones de los autores, algunos de los aspectos críticos que han impedido algunos procesos de rehabilitación y rescate tecnológico sostenido y a gran escala de los diversos tipos de sistemas descritos.

MARCO CONCEPTUAL

Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del agua

En los actuales escenarios de aprovechamiento de agua, ya no existen prácticamente nuevas fuentes de agua dulce disponibles. Todas las fuentes de agua superficiales y, en gran medida también, las subterráneas, ya están siendo explotadas, incluso más allá de su capacidad de reposición. Ante esta situación, en los últimos años, se han incrementado los esfuerzos orientados hacia las denominadas “Soluciones Basadas en la Naturaleza” (SBN), concepto propuesto por el Programa Mundial de Evaluación de los Recursos Hídricos de la UNESCO WWAP-ONU (WWAP, 2018).

Las SBN plantean que el ser humano “no solo es beneficiario pasivo de los productos y servicios de la naturaleza, sino que también puede proteger, gestionar y restaurar proactivamente y de forma estratégica los ecosistemas” (IUCN, 2017). Las SBN son, por ello, un concepto que abarca todas las acciones que apoyan a los ecosistemas y a los servicios que estos proveen, para responder a diversos desafíos de la sociedad, como el cambio climático, la seguridad alimentaria o el riesgo de desastres naturales. Este nuevo escenario requiere de nuevas soluciones y de nuevos enfoques en la gestión del agua, que no se basen en exclusiva en el uso de infraestructura física y que dejen de luchar contra la naturaleza para pasar a trabajar con ella (WWAP, 2018).

Todas las fuentes de agua superficiales y, en gran medida también, las subterráneas, ya están siendo explotadas, incluso más allá de su capacidad de reposición.

Las Soluciones Basadas en la Naturaleza plantean básicamente que la gestión del agua debe estar inserta en un marco de integración de sistemas ecológicos e hidrológicos y sus procesos relacionados, para asegurar la sostenibilidad de los sistemas hídricos para diversos usos (Lebundgut y Kohn, 2014; Martos-Rosillo et al, 2021). Las SBN aplicadas a la Gestión del Agua consisten, por tanto, en una serie de procesos naturales, o que imitan a la naturaleza, que se pueden

utilizar para mejorar la disponibilidad y la calidad del agua, reducir los riesgos de los desastres asociados al agua y mejorar la adaptación al cambio climático (IUCN, 2017). En este enfoque (Saavedra, 2009), son de primordial importancia la restitución y conservación de los ecosistemas naturales en el contexto de adaptación a las acciones antropogénicas y el aprovechamiento de los acuíferos como elementos de regulación hídrica.

En la perspectiva de mejorar la gestión del agua a las escalas regional y local, el aumento de la recarga procedente del agua de lluvia mediante un mejor manejo de los suelos, de los bosques y de las zonas de pastizales, la restauración de humedales naturales, la aplicación de técnicas como la Recarga Gestionada de Acuíferos (MAR por sus siglas en inglés: Managed Aquifer Recharge) (IGRAC, 2016) y la Siembra y Cosecha del Agua (Martos-Rosillo et al, 2021), pueden tener un especial protagonismo.

Tecnología hidráulica

La tecnología tiene varias definiciones, dependiendo del contexto en el que se encuentre. Generalmente, su significado se asocia con un elemento tangible (artefacto o máquina). Sin embargo, tecnología básicamente significa un conocimiento que puede ser usado para producir un bien de consumo o un servicio, con una visión más integral que involucre un equipo humano, herramientas y tareas, puesto que una herramienta no tiene ningún significado sino está relacionado con las personas y no es utilizado para resolver tareas específicas (Visscher et al, 1997). Delgadillo (2017), sostiene que una tecnología cualquiera considera tres aspectos o elementos centrales: (1) artefacto, (2) el conocimiento asociado a su uso y (3) un objetivo concreto.

Aplicada al agua, la tecnología hidráulica o hidrotecnología, puede entenderse como la aplicación práctica del conocimiento humano para controlar, gestionar y aprovechar el agua para diferentes objetivos y/o usos (agua para consumo, riego, industria, piscicultura, control de inundaciones, etc.), utilizando uno o varios elementos tecnológicos o artefactos (Delgadillo, 2017).

Gestión de agua

Según Gerbrandy and Hoogendam (1998), gestión es un concepto que se utiliza para denominar un conjunto de actividades, más los medios necesarios, para lograr un objetivo determinado. Entre las actividades de gestión está la organización y planificación de todas las acciones para lograr el objetivo. Entre los medios está el contar con gente que tiene la capacidad de:

- tener una clara visión y entendimiento del proceso a seguir
- planificar y organizar la gestión
- tomar las decisiones apropiadas para asegurar el cumplimiento de los objetivos
- coordinar y ejecutar las acciones requeridas.

Se puede aplicar este concepto de gestión también al agua. En esa perspectiva, la gestión de agua es el proceso para lograr los objetivos formulados para la distribución y el uso del agua, en base a los acuerdos colectivos, derechos de uso, marcos regulatorios y tecnología disponible. La gestión de agua incluye el conjunto de las actividades necesarias para la asignación de agua según los fines previstos, los medios disponibles, los conocimientos y artefactos requeridos, así como el trabajo de las personas que se harán cargo de llevar adelante todo el proceso (adaptado de Gerbrandy and Hoogendam, 1998).

La Siembra y Cosecha del Agua (SyCA)

Las prácticas de SyCA permiten la infiltración del agua en un acuífero para su posterior recuperación, en un emplazamiento distinto al que se recarga, bien mediante pozos y/o galerías drenantes, bien mediante el aprovechamiento del aumento del caudal de manantiales, ríos o arroyos que la SyCA genera. Es un procedimiento que requiere de un gran conocimiento hidrogeológico y del contexto geográfico local (Martos-Rosillo et al, 2020).

Distintas prácticas de SyCA ya se realizaban en los Andes antes de la llegada de los españoles (Yapa, 2016, Ochoa-Tocachi et al., 2019), y en Sierra Nevada, al Sur de España, desde al menos la Alta Edad Media (Martos-Rosillo-Rosillo et al., 2019). Yapa (2013), reporta la existencia de una serie de tecnologías de SyCA en distintas ecorregiones de Sudamérica: zonas costeras, los Andes y la Amazonia. Entre las más importantes, por su complejidad y escala geográfica, pueden citarse los sistemas de andenes o terrazas (taqanas en idioma aymara) en varias zonas andinas, desde Ecuador hasta Bolivia; sistemas de q'ochas, albarradas o lagunas pequeñas, existentes en diversas zonas desde la puna hasta la costa, en suelos de elevada permeabilidad para facilitar el almacenamiento y posterior infiltración de agua; las amunas o sistemas integrados de captación y conducción de agua en zonas altas hacia zonas permeables y posterior infiltración, a fin de alimentar vertientes y acuíferos situados en zonas más bajas (Alencastre et al, 2009; Apaza, 2021); y la tecnología de campos elevados, sistemas hidráulicos altamente complejos, diseñados como estructuras de riego y/o drenaje en el caso del Altiplano (Durán, 1992; Erickson, 1996; Denevan, 2001; PROSUKO, 2003; Angelo, 2008), y además articuladas, en el caso de la región amazónica, a estructuras de control de inundaciones, sistemas de navegación y jardines agro-forestales en zonas de asentamiento humano (Denevan, 1966 y 2006; Erickson, 2008; Michel, 1992 y 2020; Saavedra, 2009; Durán, 2021).

Estas tecnologías, en gran parte en desuso, son una prueba concreta de la gran capacidad de gestión colectiva de los pueblos originarios y sus enormes beneficios simultáneos en la producción de alimentos, control hidráulico, balance hídrico sostenible y conservación de ecosistemas. Por ello resulta de especial importancia en el momento actual reforzar los procesos de revaloración y rescate de estas tecnologías, como herramientas concretas para confrontar la grave crisis hídrica y climática que se empieza a vivir.

SISTEMAS DE SIEMBRA Y COSECHA DE AGUA EN BOLIVIA

Arbitrariamente, en este documento se han clasificado los sistemas de SyCA según la escala de su implementación. Se pueden encontrar sistemas de SyCA de gran magnitud en diferentes ecorregiones del país. Estos sistemas son característicos de culturas prehispánicas como la tiwanakota/aymara y la incaica, en las montañas del cinturón lacustre y el Altiplano, o moxeña (pueblo Arawak), en las llanuras y bosques del Beni.

Bofedales en zonas altoandinas

La cría de alpacas y llamas, así como el pastoreo de vicuñas en la época prehispánica se dio y se sigue dando en humedales de altura, conocidos como bofedales (jok'ó en aymara), que son un tipo de pradera de tierras altas con pastos nativos, siempre verdes y suculentos, de elevado potencial forrajero que crecen en suelos permanentemente húmedos (Alzérreca *et al.*, 2001; Ostria 1987; Estenssoro 1991). Los bofedales son también sistemas de recarga de agua y riego, típicos de zonas de turbera, característicos de la zona altoandina y puneña dentro de los glaciares de los Andes subtropicales y tropicales, situados a elevaciones entre 3.200 a 5.000 m s.n.m. (Estenssoro, 1991).

Figura 1.

Bofedal en la zona de Charaña, Bolivia



En épocas de déficit hídrico, los bofedales se recargan y riegan con aguas provenientes de manantiales, agua de deshielo y ríos, a través de la construcción de tomas de agua y acequias rústicas, con la finalidad de garantizar la producción de pastos y dar sustento permanente a importantes poblaciones de camélidos. En ese contexto, la existencia y sobrevivencia del hombre andino de las zonas altas y gélidas, está íntimamente relacionada a los ecosistemas de bofedales. Sin embargo, en las últimas décadas estos ecosistemas están en proceso de degradación, principalmente por el sobrepastoreo y cambios en el patrón de distribución de las lluvias, por lo que urge implementar un plan de manejo y gestión de estos ecosistemas.

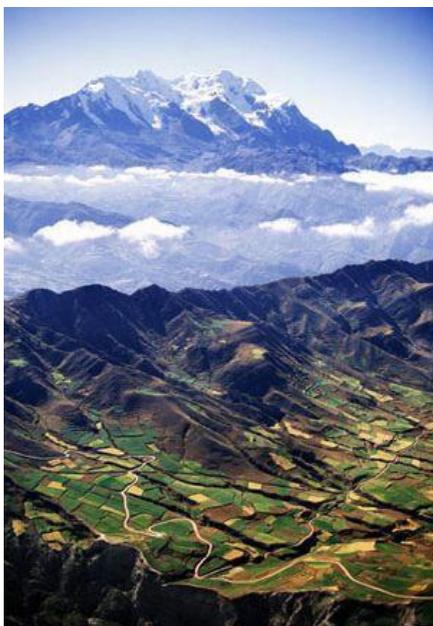
Sistemas de taqanas o terrazas en la región Andina de Bolivia

En gran parte de las zonas montañosas cercanas al lago Titicaca se encuentran zonas de terrazas de épocas prehispánicas que constituyen simultáneamente componentes de sistemas agrícolas, hidráulicos y de conservación ambiental. Las taqanas son conjuntos de terrazas escalonadas construidas en las laderas de las montañas andinas y rellenadas con tierra de cultivo.

Las taqanas cumplen diversos propósitos. En primer lugar, en zonas con elevada pendiente en las cuales no existen zonas extensas aptas para los cultivos, la construcción de andenes en las laderas de las montañas amplía en gran medida la superficie agrícola. Simultáneamente, la construcción de terrazas reduce drásticamente la pendiente, por tanto, la erosión propia de laderas empinadas y la consecuente pérdida de nutrientes, determinando mejores condiciones para los suelos, tanto en su fertilidad y estabilidad, como en profundidad y propiedades físicas, biológicas y químicas. Estas características, a su turno, facilitan las labores agrícolas y mejoran la capacidad de producción y productividad, en parte debido a la infiltración y mayor disponibilidad de agua y humedad del suelo.

Figura 2.

Sistemas de terrazas cultivadas al pie del nevado Illimani, La Paz, Bolivia.



Fotografía: Alfredo Miguel Imaña Mérida

Un sistema de taqanas puede abarcar toda la ladera de una montaña, lo cual implica una notable variación altitudinal, implicando la existencia de diversos microclimas y agro-ecosistemas en su trayecto, lo cual permite mayor biodiversidad, que se traduce en la posibilidad de cultivar una importante cantidad de especies y variedades, mejorando las condiciones de seguridad alimenticia. Además, generan adecuadas condiciones microclimáticas, de cobertura vegetal y de disponibilidad de agua en distintos espacios, que permiten la proliferación de flora y fauna silvestre, es decir, facilitan y potencian la conservación de los ecosistemas naturales (Yapa, 2013).

Las taqanas constituyen sistemas hidráulicos, pues parte de sus funciones es facilitar el transporte regulado de agua desde zonas altas hacia zonas de valle, a través de un complejo sistema de canales, zanjas de infiltración y estructuras de captación a lo largo de la ladera. Por tanto, muchas taqanas permitían no solo el riego, sino el transporte de pequeños caudales superficiales desde la montaña hacia las zonas bajas, además de conformar amplios espacios de recarga hídrica en las laderas, para su descarga posterior en manantiales y valles.

Figura 3.

Sistema de terrazas kallawayas en Charazani, provincia Bautista Saavedra, Bolivia.



El vínculo entre los pueblos de las tierras altas y bajas

Charazani es la capital del territorio Kallawayas. La cultura Kallawayas tiene como rasgo distintivo a los médicos naturistas tradicionales de los Andes, cuyo territorio se extendía desde las faldas de los Andes orientales (cordilleras de Carabaya y de Apolo) hasta las colinas cálidas de Alto Beni. Sin embargo, su accionar alcanza un territorio mucho más amplio, en una franja de pisos ecológicos que van desde menos de 1.000 m s.n.m. hasta los 5.000 m s.n.m. Es interesante el hecho de que la cultura original Kallawayas, enraizada en las culturas puquina y tiwanakota, fue posteriormente incorporada parcialmente al imperio incaico, pero manteniendo sus vínculos con otros grupos étnicos, incluyendo varios de la familia Arawak, pobladores de la Amazonia. Este status preferencial se expresaba en que los kallawayas eran los guías y encargados de llevar en andas al Inca en sus visitas a la zona lacustre. A través de sus múltiples vínculos socio-territoriales, lograron ese derecho de desplazamiento para que puedan operar en regiones que les proporcionaban acceso a una inmensa variedad de plantas medicinales y a una interrelación con culturas del altiplano y las tierras bajas, que pudo haber sido la base de su medicina itinerante. Por ello se considera a los kallawayas como el registro viviente de la integración de saberes y tecnologías andinas y amazónicas, como se expresa en su medicina tradicional y sus prácticas agrícolas (Biblioteca Virtual de Pueblos Indígenas, sf).

Sistemas de Siembra y Cosecha de Agua en la región andina de Bolivia

Paralelamente a las terrazas, en particular en zonas de transición entre Yungas y valles interandinos, se pueden encontrar vestigios de canales de conducción de gran magnitud y decenas de kilómetros de longitud, usualmente cercanos a la red de caminos incaica, que transportaban agua posiblemente hacia asentamientos agrícolas en zonas bajas, incluidas algunas zonas de cultivo en taqanas o terrazas. No existe información documentada sobre los objetivos y funciones concretas de estos canales, pero es probable que, en forma similar a las amunas del Perú, algunos de estos canales hayan sido parte de sistemas de captación, conducción y recarga de acuíferos simultáneamente.

Los canales, casi todos contruidos de piedra y sobre sustratos de rocas fisuradas, dan la impresión de tener una doble función: conducir grandes caudales de agua desde las montañas hacia zonas bajas y simultáneamente, por sus características constructivas, actuaban también como zanjas de infiltración para su descarga en zonas de valles interandinos. Prácticamente, de forma similar a los taqanas, todos estos canales se hallan en completo abandono.

La figura 4 muestra un antiguo camino incaico que desciende hacia los Yungas de La Paz. El camino va paralelamente al curso de un arroyo encauzado y en algunas partes del trayecto coinciden ambos en el camino empedrado.

Figura 4.

Antiguo camino del Inca en El Choro, Bolivia



Fuente: Wikimedia Commons, 2005

Campos elevados o suka kollus (waru warus) del Altiplano

Los campos elevados o camellones, suka kollus como se los conoce en Bolivia (waru-warú en Perú), son una antigua tecnología de riego y drenaje en zonas altiplánicas, utilizada por más de 2000 años, originalmente por los tiwanakotas, luego por incas hasta la época colonial, cuando fueron paulatinamente abandonados. La superficie en el Altiplano de Bolivia y Perú alcanza las 8.2000 ha (Erickson, 1986).

Los suka kollus fueron contruidos en abanicos de los ríos afluentes del Lago Titicaca, particularmente en humedales, zonas conocidas como bofedales, terrenos anegadizos caracterizados por el elevado contenido de materia orgánica que confiere una buena estructura y porosidad al suelo. Consisten en camellones de cultivos, intercalados con canales a los cuales se desvía el agua de los ríos, circulando con caudales y tirantes de agua regulados mediante pequeños diques de tierra (tepes) a fin de asegurar el humedecimiento del suelo, constituyendo un método de riego subsuperficial, pues el agua ingresa lateralmente y por debajo hacia los campos cultivados. Asimismo, en momentos de exceso de lluvias, los diques pueden ser removidos permitiendo el drenaje rápido del agua. Las condiciones microclimáticas generadas por la gran masa de agua, la alta humedad ambiental y del terreno, además de elevar las temperaturas mínimas y modificar el balance de energía, atenuando el efecto de las heladas, permite elevados rendimientos agrícolas, especialmente de tubérculos (Serrano-Coronel et al. 2018; Durán, 1992).

Desde una perspectiva hídrica, la desviación de los ríos, principalmente durante la época lluviosa, hacia extensas zonas anegadizas, convertidas en áreas de cultivo gracias a la construcción de camellones, generaba una serie de beneficios agrícolas y derivados.

Desde una perspectiva hídrica, la desviación de los ríos, principalmente durante la época lluviosa, hacia extensas zonas anegadizas, convertidas en áreas de cultivo gracias a la construcción de camellones, generaba una serie de beneficios agrícolas y derivados. Por una parte, se reducía drásticamente el peligro de las crecidas e inundaciones, logrando la distribución del agua en un amplio espacio productivo gracias al sistema de canales, facilitando la infiltración y el almacenamiento de la humedad en las capas superficiales de los camellones, y con grandes mejoras en los procesos productivos y en la productividad agrícola.

Figura 5.

Camellones rehabilitados y abandonados en Koani Pampa, Tiwanaku, Bolivia.



Fotografía: Alexander Herrera, 2009

Asimismo, la mayor humedad contenida en los suelos por un mayor periodo de tiempo durante el año, implica un incremento significativo de la cobertura vegetal, no solo de cultivos sino también de vegetación natural alrededor de los camellones, facilitando incluso la vegetación acuática. Esta mayor cobertura y humedad del suelo, y especialmente la gran masa de agua en los canales, generan en conjunto un efecto regulador del flujo de energía, debido a la mayor capacidad de absorción de calor diurno en el sistema y su lenta irradiación durante la noche, atenuando así las temperaturas extremas y las heladas, creándose un microclima con un régimen regulado de temperatura y humedad del suelo y atmosférica (Durán, 1992).

La tecnología de los campos elevados en las llanuras amazónicas

Siendo asombroso que en parajes cercanos al lago Titicaca, cerca de los 4.000 m s.n.m., se implementara a una escala tan grande, una tecnología hidráulica tan sofisticada, es aún más impresionante el hecho de que en las llanuras inundables de Moxos, en el departamento del Beni, en la Amazonia boliviana, entre los 150 hasta 400 m s.n.m., se hayan descubierto más de 500.000 ha de sistemas de campos elevados, aparentemente aún más antiguos y bastante más complejos que los del Altiplano.

El primer estudio específico sobre las culturas que vivieron en los llanos de Moxos fue realizado a inicios de los años 60 del siglo pasado por el geógrafo William Denevan, quien se interesó por las huellas de las lomas que se podían observar desde aviones y mediante fotografías aéreas, siendo el primero en indagar sobre su significado, sentando las bases para investigaciones que se traducirían paulatinamente en el descubrimiento de gigantescos y sofisticados sistemas hidráulicos que fueron el soporte del desarrollo del pueblo arawak (Denevan, 1966).

Mediante esta tecnología hidráulica, junto con una gran capacidad socio-organizativa, los arawak lograron gestionar una enorme extensión de territorio y una gran cantidad de ríos tropicales, posibilitando una importante producción agrícola, forestal y piscícola, al tiempo que evitaron las inundaciones propias de las tierras bajas, mientras lograban una articulación de sus prácticas y tecnologías a los ecosistemas locales (Denevan, 1966; Erickson, 2008).

Las distintas familias de los arawak ocuparon regiones tan desconectadas entre sí como el Caribe en el Norte y el Gran Chaco hacia el sur, las fuentes del río Xingú en el Brasil meridional y desde la desembocadura del Amazonas hasta las laderas de los Andes hacia el Oeste.

El factor común fundamental de estos sistemas hidráulicos es que las llanuras del Beni, al igual que las ciénagas de Colombia o los pantanos del río Xingú, son planicies inundables que reciben el flujo de varios ríos que cruzan los llanos, inundando cada estación de

Figura 6.

Distribución geográfica del pueblo Arawak en América del Sur.



Geographic distribution of the Arawak in South America.
Fuente: PROEL, 2013

lluvias enormes extensiones de terreno. El hábitat natural de los arawak brindó, por tanto, el contexto ideal para el desarrollo de su cultura hidráulica y de la tecnología de los campos elevados.

Un ejemplo de las bondades de los campos elevados se observa en la figura 7, en la cual una plataforma reconstruida en las inmediaciones de Trinidad, Bolivia, por Oscar Saavedra en 2013, es la única porción de terreno que está fuera del agua durante una inundación del año 2015.

Lo propio se observa en el caso de camellones abandonados, los cuales sobresalen nítidamente en el terreno, mientras alrededor todo el terreno se encuentra inundado (figura 8).

Figura 7.

Plataforma reconstruida en la inundación del 15 de Febrero de 2015.



Fuente: Periódico Sol de Pando, 2015.

Figura 8.

Camellones abandonados durante una inundación en 2008, Moxos, Beni, Bolivia.



Fuente: Word Press, 2008

El río Mamoré, el más caudaloso de Bolivia, recibe aguas no solo de los afluentes locales, sino también de los ríos que descienden desde las estribaciones de los Andes. Debido a las marcadas fluctuaciones estacionales y anuales de las lluvias, sus llanuras constituyen un paisaje inestable, sujeto a rápidos cambios en el curso de los ríos, y por tanto, en la ubicación de zonas de tierra firme. Estos rápidos cambios se deben a las grandes cantidades de

sedimentos arrastrados desde los Andes, que son depositados en la planicie, y los ríos continuamente están formando meandros a lo largo de la cuenca del río Mamoré y sus afluentes.

Es en este cambiante contexto biofísico en el que tuvo lugar el desarrollo tecnológico de los campos elevados. Es obvio que gestionar este espacio dinámico requirió no solamente una alta capacidad organizativa, sino también una tecnología adaptativa que, sin alterar los patrones biofísicos naturales, generó condiciones para reducir y mitigar los desastres e impactos ambientales por falta o exceso de agua durante la mayor parte de los años, al tiempo de generar mejores condiciones de habitabilidad, alimentación y recursos para las sociedades locales. La figura 9 muestra la aparente extensión de los diversos complejos hidráulicos de las llanuras de Moxos y parte del departamento de Pando, y enfatiza en cada zona el predominio de mayor densidad de lomas, camellones, canales, según el caso, incluyendo hacia el este las "ciudades jardín" del río Xingú, en plena Amazonia brasilera. Estas ciudades jardín son llamadas así, no tanto por las construcciones realizadas, sino más bien por la riqueza en biodiversidad y la disponibilidad de recursos naturales, medios de subsistencia y alimentos (Heckenberger et al, 2009).

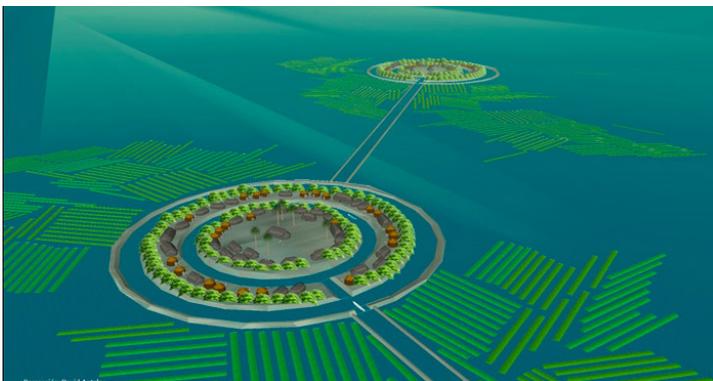
Los campos elevados constituyen una tecnología prehispánica que se desarrolló desde el año 2.000

Los campos elevados constituyen una tecnología prehispánica que se desarrolló desde el año 2.000 adC. y el siglo XIII en los Llanos de Moxos (Mojos) del Departamento del Beni en la Amazonia boliviana, de acuerdo con Denevan (2001).

adC. y el siglo XIII en los Llanos de Moxos (Mojos) del Departamento del Beni en la Amazonia boliviana, de acuerdo con Denevan (2001). La tecnología se caracteriza por la compleja articulación entre diversos tipos de obras de tierra, incluyendo lomas artificiales, como zonas de asentamiento humano, ensambladas en un conjunto de obras hidráulicas incluyendo camellones (suka kollus, waru warus o campos elevados) para producción agrícola, con base en el maíz, papa hualuza, ajíes, maní, mandioca entre otros cultivos (Erickson, 2008, en Saavedra, 2013); sistemas de canales y diques con múltiples funciones hidráulicas como riego, drenaje, navegación y regulación hídrica; lagunas y porciones de ríos con bordos para facilitar actividades piscícolas; terraplenes y caminos conectando distintas lomas y los diversos sitios de asentamiento; e islas o jardines forestales con diversidad de especies valiosas. La figura 10 representa los principales componentes de los campos elevados.

Figura 9.

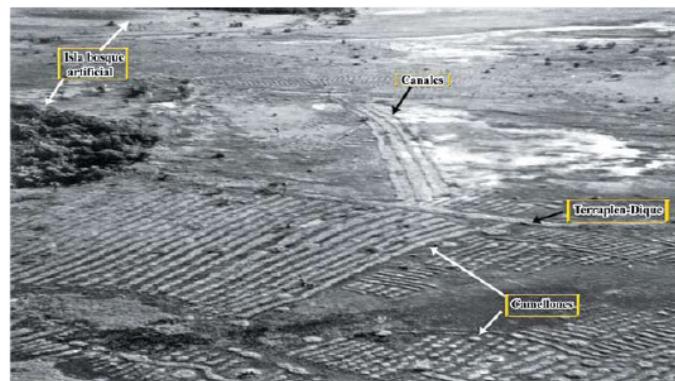
Distribución de los sistemas hidráulicos de campos elevados en Bolivia.



Fuente: Mann, 2008

Figura 10.

Esquema de los sistemas hidráulicos de los campos elevados del Beni, Bolivia.



Fuente: Denevan, 1966, en Saavedra, 2013

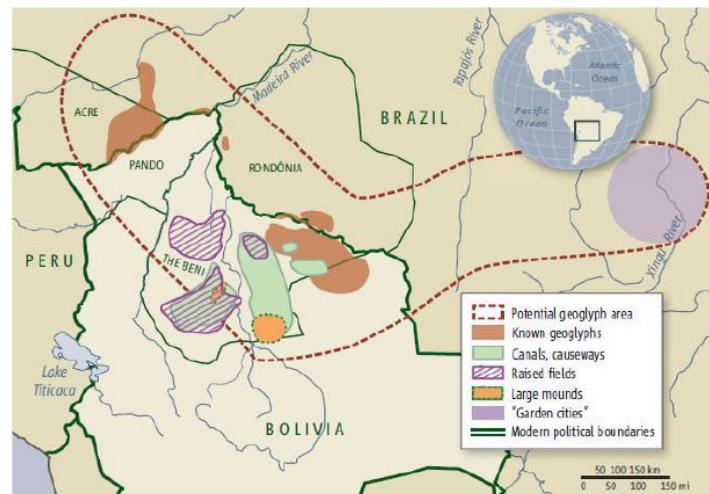
En algunos casos, los sistemas en la Amazonia presentan trampas de agua y nutrientes para su mayor permanencia en el terreno, permitiendo extender la producción hasta los periodos de transición del clima húmedo a seco (Saavedra, 2013). Más de 700 de este tipo contienen claramente obras hidráulicas para almacenar y distribuir el agua a través de canales, entre sí y los ríos aledaños; articulándose a áreas próximas de campos elevados de cultivo, como se evidencia en la zona de San Ignacio de Moxos (Saavedra, 2009).

En algunos casos, los sistemas en la Amazonia presentan trampas de agua y nutrientes para su mayor permanencia en el terreno, permitiendo extender la producción hasta los periodos de transición del clima húmedo a seco (Saavedra, 2013).

Esto es así tanto en los camellones del Beni como en los suka kollus del Altiplano (Durán, 1992; Angelo, 2008; Erickson, 1996). La alternancia de diques en un sistema de canales cumple diversidad de roles hidráulicos. Por un lado, los diques de mayor altura pueden reducir o evitar el ingreso de agua de los ríos hacia zonas pobladas en época de inundaciones. Pero el principal objetivo de los diques es distribuir el agua en una multitud de canales, reduciendo al mínimo el potencial impacto de las crecidas de los ríos. De esta forma, enormes volúmenes de agua son extendidos a grandes superficies de terreno a través del sistema de canales, atenuando en gran medida el posible daño a vidas, viviendas e infraestructuras existente. Simultáneamente, los diques facilitan la comunicación y el transporte durante la época de lluvias y la de estiaje, puesto que para la navegación de embarcaciones livianas se requiere poca altura de la lámina de agua en los canales. Los diques, al controlar la altura de agua, pueden facilitar el drenaje de ciertas zonas con exceso de agua hacia otras donde pueda evacuarse sin peligro y son, además, la herramienta para controlar los niveles de agua en canales con fines de riego durante las épocas secas.

Mediante los canales y el conjunto de pequeños diques, el agua puede ser repartida entre los sistemas de camellones. Los diques también pueden ser utilizados para cerrar ciertos espacios acuáticos más amplios, como por ejemplo las lagunas, con fines de acuicultura, regulando la entrada y salida de agua y peces, y facilitando su recolección. Y en última instancia, los diques para el control de agua, en combinación con muros elevados (para evitar el ingreso de jaguares u otros animales a las zonas con viviendas), cumplían también funciones de protección (Erickson, 2014). La figura 11 muestra algunas de las características mencionadas.

Figura 11. Conjunto de diques, camellones, canales, islas y lagunas.



Fuente: www.energiabolivia.com

La gestión del agua y del territorio a una escala tan amplia no hubiera sido posible sin contar con los medios de transporte y comunicación terrestre y acuática. Por ello, paralelamente a los sistemas hidráulicos establecidos, se han hallado vestigios de una extensa red de canales y caminos que vinculaba a diversidad de sitios de asentamientos y campos elevados, articulando así grandes extensiones de territorio (Erickson, 2000).

La capacidad tecnológica y socio-organizativa de estas culturas permitió sostener grandes poblaciones

durante centurias. Los campos elevados de la cultura zenú en Colombia habrían permitido poblaciones de hasta 160 habitantes por kilómetro cuadrado (UNESCOSOST, 2021). Solo en los llanos de Moxos, los complejos hidráulicos y asentamientos alcanzan alrededor de 20.000 lomas artificiales de 20 hectáreas cada una en promedio, conectadas a sistemas de camellones y jardines forestales por canales y terraplenes de varios kilómetros de largo en algunos casos (Rivera, 2005).

Por todo ello, la evidencia arqueológica de las últimas décadas (Erickson, 2008; Denevan, 2001) se contrapone a la teoría de que en la Amazonia solo existían sociedades tribales de subsistencia que vivían de la recolección y la pesca, en total armonía con la Naturaleza (Meggers, 1996; en Erickson, 2008). Denevan (2001) y Erickson (2008; 2010) sostienen por el contrario que los pueblos del Beni desarrollaron sistemas de cultivo intensivos, productivos y sostenibles, con capacidad de alimentar grandes poblaciones, basándose en una transformación paulatina de la selva amazónica y de los usos de la tierra, en el control hidráulico de los ríos y la gestión del agua. El descubrimiento de la tecnología de los campos elevados demuestra la existencia de sociedades complejas y desarrolladas que tuvieron la capacidad de transformar la selva amazónica, a través de una serie de acciones para domesticar y desarrollar los paisajes y ecosistemas locales, de modo tal que la actual selva amazónica no es el efecto de una evolución natural, sino más bien constituyen un conjunto de ecosistemas modificados acorde a los intereses de los pobladores de esas regiones.

Por tanto, las características de grandes porciones de selva son el resultado de intervenciones humanas que, a través de prácticas como la quema controlada, la adecuación del bosque y el paisaje para los asentamientos humanos y la agricultura, la tecnología hidráulica y la gestión del agua, el manejo de suelos y la domesticación de la gran mayoría de las especies alimenticias actuales (Saavedra, 2013), seleccionadas por su mayor valor alimenticio u otros beneficios, fueron transformando paulatinamente la selva tropical.

LOS SISTEMAS ANCESTRALES DE SYCA EN LA ACTUALIDAD

En el caso de las taqanas o terrazas existentes en Bolivia, no existió un plan o programa de gobierno que planteara su recuperación con los fines de mejorar y fortalecer la agricultura en la región andina, hasta el descubrimiento arqueológico de los campos elevados en el Altiplano, momento en se desató un gran entusiasmo por la posibilidad de rehabilitar estos sistemas hidráulicos. En Perú, desde mediados de los años 80 del siglo XX, ya se había implementado el Programa Inter-institucional de Waru Waru, entre varias otras iniciativas, en cuyo marco se realizó una serie de acciones orientadas a recuperar la tecnología y generar una nueva dinámica productiva basada en la tecnología de camellones en el Altiplano (Durán, 1992). Algo parecido aconteció en Bolivia a través del Proyecto Suka Kollus (PROSUKO, 2003), con diversos tipos de intervenciones en la región del Altiplano Norte, aledaña al lago Titicaca.

En ambos países, el aporte de la cooperación internacional fue decisivo para que programas de gobierno, ONGs y Universidades, en alianza con comunidades campesinas, se abocaran a la tarea de rehabilitar la tecnología de los campos elevados. En tal contexto, fueron realizadas diversas iniciativas a nivel de experiencias piloto, varias con gran éxito inicial. Pero paulatinamente, los esfuerzos y los éxitos fueron decreciendo y nunca se llegó a procesos de rehabilitación de gran escala en la región altiplánica. La razón del énfasis en los camellones del Altiplano se debió principalmente a la importancia socioeconómica y política de esa región tanto en Perú como en Bolivia. La posibilidad de lograr aportes en términos de mayor producción de alimentos y mayores ingresos para gran cantidad de pobladores, fue determinante para la movilización de fondos, expertos, instituciones y población, en el intento de rehabilitar una tecnología que a primera vista es tan prometedora.

En las llanuras del Beni, aunque ya existían reportes de los campos elevados, al ser zonas mucho menos pobladas y de menor relevancia socioeconómica, los escasos intentos de rehabilitación de camellones fueron solamente a nivel de campos experimentales

Figura 12.

Conjunto de diques, camellones, canales, islas y lagunas.



Fuente: Saavedra, 2013

de reducidas dimensiones. En el caso de la Amazonia, las principales experiencias de rescate e innovación se practicaron por la ONG Amazonia sostenible, entre los años 2000 y 2007 (Saavedra, 2013). No obstante, dada la escala geográfica de los antiguos campos elevados del Beni, como parte de un sistema socio-organizativo altamente desarrollado y articulado al ecosistema local, no es posible pensar en reconstituir semejante complejo tecnológico en el contexto actual.

Los motivos que explican el fracaso en la rehabilitación de los sistemas de campos elevados en ambas regiones son bastante similares, pese a las diferencias geográficas entre el Altiplano, a 4.000 m s.n.m. y las llanuras situadas a menos de 400 m s.n.m. Una primera distinción es la referida al tipo de sociedades existentes en el pasado y la actualidad. Los procesos de ocupación y asentamiento de la Amazonia, la cultura y cosmovisión amazónica, el progreso social y organizativo, el desarrollo tecnológico de los antiguos arawak, no guardan relación con los modos actuales de aprovechamiento del territorio, en los cuales la agricultura, la urbanización, la industria o el cuidado ambiental, son percibidos como categorías, campos de acción y conocimiento separados y no como parte de una gestión colectiva.

Además, la separación entre los límites político administrativos y los límites naturales de las cuencas, los ríos o los ecosistemas, constriñe de muchas formas los procesos de gestión del agua a esos niveles, mientras que en tiempos antiguos predominaba el criterio ecosistémico como eje de la gestión, desarrollo productivo y tecnológico. Es decir, en los ecosistemas intervenidos, los campos elevados eran simultáneamente el medio de vida, el ámbito de gestión, el modo de control y el marco de desarrollo de los pueblos antiguos en el contexto de su territorio. En esa perspectiva, una de las barreras principales para la readaptación y escalamiento de estas tecnologías, es que no son parte de las prioridades políticas actuales, pese a sus aparentes cualidades de productividad, resiliencia y adaptación al cambio climático.

Por tanto, existen grandes diferencias entre los pobladores del presente y del pasado sobre la concepción del espacio, los modos de vida y las formas de relación con el medio natural; parece muy complicado pensar que en la actualidad podrían generarse condiciones socio-políticas para intervenciones a escala mayor, especialmente si son planteadas como procesos de corto plazo.

Paralelamente a lo anterior, aunque no se conoce con precisión como era la organización del estado y la estructura agraria en tiempos antiguos, con seguridad eran muy distintos a los de la época actual. Esto es de fundamental importancia desde el punto de vista de la posibilidad de rehabilitar extensos campos elevados. Las lomas, camellones y terraplenes, vinculados a sistemas de canales mediante diques, con cultivos de especies hortícolas y forestales, además de la pesca y la piscicultura, involucran una gran capacidad organizativa, más allá del ámbito de una comunidad y requieren una gran cantidad de capital humano, que no solo inicie todo ese proceso, sino que lo mantenga en el tiempo. Pese a las relativamente grandes poblaciones actuales, podría requerirse además tecnología moderna y mecanización para organizar este tipo de trabajo a gran escala con una visión de progreso social, económico, ecológico y político.

Las actuales condiciones socioeconómicas de tenencia de tierra, el minifundio, los tipos de producción, las condiciones del mercado de alimentos, productos y servicios, y la diversidad de modos de vida que asumen los pobladores rurales, dificultan establecer un escenario de trabajo que permita la rehabilitación de grandes extensiones de campos elevados. Por todo ello, la rehabilitación de los campos elevados no ha sido una prioridad del gobierno central o regional y es difícil que lo sea, al menos mientras se mantengan los paradigmas de desarrollo y estilos de vida actuales.

Por otra parte, la creciente preocupación sobre el permanente deterioro de cuencas y fuentes de agua permite albergar esperanzas de que las acciones de aprovechamiento de agua deben estar articuladas a medidas de protección de las fuentes de agua y los ecosistemas en los que se encuentran éstas. Es algo que se vislumbra no solo en las políticas hídricas sino también en las legislaciones de la mayoría de los países.

En el corto plazo puede ser posible establecer acciones y proyectos a escala más reducida incluidos en planes regionales e intermunicipales, poniendo énfasis en lo que sigue siendo el mayor problema de los ríos del Beni: las inundaciones de la época de lluvias, a veces intercalados con años de sequía que también

ocasionan otro tipo de problemas. A partir del control de inundaciones como objetivo primordial, podrían generarse otras iniciativas orientadas hacia temas productivos o ecosistémicos.

En varias reuniones y eventos sobre agua, funcionarios y expertos han planteado la necesidad de rehabilitar los sistemas de camellones como una de las herramientas más concretas y factibles para controlar las inundaciones en diversas zonas del Beni, incluyendo lagunas, canales y diques como parte esencial del manejo hidráulico. A la fecha existe un sistema de alerta temprana (SAT) para el río Mamoré que brinda la información meteorológica e hídrica que, en cierta medida, reduce los daños de las crecidas. Sería deseable que, como parte del desarrollo de los sistemas de gestión hídrica regional, se añadan a este instrumento, proyectos piloto de campos elevados para evaluar *in situ* las bondades de la tecnología, pero también sus aspectos críticos.

La coordinación y articulación institucional es un factor clave para ello. Los gobiernos departamentales y municipales, en alianza con centros de investigación y otras entidades locales podrían sentar las bases para lograr una paulatina rehabilitación de sistemas de camellones en los ríos del Beni y Pando. Paralelamente, una mayor investigación y el desarrollo de las capacidades de los actores locales son otro factor importante en dicho proceso, a fin de cambiar progresivamente la angustiante realidad actual de destrucción sistemática de los ecosistemas amazónicos.

CONCLUSIONES

Los sistemas de SyCA tradicionales implementados en diversas ecorregiones de Bolivia fueron consecuencia de la evolución de civilizaciones locales, que en un particular momento histórico desarrollaron tecnologías y mecanismos de gestión del territorio y sus principales recursos naturales: agua, tierra y biodiversidad. Las capacidades de gestión y tecnología adaptadas a los ecosistemas y a las características geográficas locales, junto con una cosmovisión de su entorno y una concepción del hábitat como un bien común, brindó las condiciones de sostenibilidad necesarias para el

desarrollo de estas tecnologías a escalas regionales, generando condiciones de sostenibilidad.

Aunque no existen estudios que cuantifiquen los resultados de los SyCA implementados en relación a cambios positivos en el balance hídrico regional, sí existe evidencia empírica de efectos benéficos en el microclima y las condiciones ambientales locales, y particularmente de los beneficios concretos en los modos de vida y producción, así como en un importante aumento de la capacidad de resiliencia ecosistémica en los sitios donde fueron implementados.

Considerando la escala espacial de las tecnologías de SyCA descritas, su rehabilitación implicaría a más de un municipio e incluso provincias, lo cual implica conflictos de competencias, límites e intereses, tal cual ocurre en los actuales proyectos de manejo de cuencas o grandes proyectos hídricos. Asimismo, en la política de inversión boliviana, no existen muchos precedentes para dirigir la inversión pública a acciones que no sean obras concretas. Por tanto, existen pocas posibilidades de financiar proyectos no solo de rehabilitación de campos elevados o taqanas,

sino que además incluyan procesos de planificación y gestión, acuerdos intersectoriales, capacitación, estudios, implementación de sitios piloto y prácticas tradicionales, así como acciones orientadas a establecer mecanismos de gestión colectiva.

Un obstáculo adicional es el grado de articulación, interacción y participación institucional necesarios para implementar sistemas de SyCA de mediano plazo y a una escala intermedia. La falta de conocimiento sobre muchos procesos naturales, tanto hídricos como ecosistémicos, unido a las urgencias políticas y socioeconómicas regionales, hacen difícil consolidar el marco institucional para brindar el apoyo político, técnico y financiero requerido.

Finalmente, es alentador el hecho de que, pese a todas las dificultades, existen emprendimientos individuales, familiares o de grupos menores en comunidades y en propiedades privadas, que podrían ser la punta de lanza para la réplica del éxito socio económico y ambiental de estas tecnologías y su paulatina implementación con prácticas colectivas a escalas regionales.

REFERENCIAS

Alencastre, A. 2009. Las Amunas: recarga de acuíferos en los Andes. La gestión social del agua en Tupicocha, Huarochirí, Lima Provincias. (eds. Llosa, J., Pajares, E. y Toro, O.). Cambio climático, crisis del agua y adaptación en las montañas andinas: Reflexión, denuncia y propuesta desde los Andes (pp. 307 – 335). Lima, Perú: DESCO y la Red Ambiental. Peruana. <https://drive.google.com/open?id=0B0wk3XVEuBLkYkw1VXpERVczbXc>

Alzérrec, H., Prieto, G., Laura, J., Luna, D. and Laguna, S. 2001. *Informe Final sobre características y distribución de los bofedales en el ámbito boliviano del sistema lago Titicaca, Desaguadero, Poopó y Salar de Coipasa*. T.D.P.S. Autoridad Binacional del Lago Titicaca (ALT), Programa de las Naciones Unidas para el Desarrollo (PNUD) y Asociación Integral de Ganaderos en Camélidos de los Andes Altos (AIGACAA), La Paz. 187 pp.

Angelo, D. 2008. Los Suka Kollus o campos elevados: proyecciones de futuro para una tecnología prehispánica. In: PROSUKO. *Suka Kollus, una tecnología ancestral para el tiempo actual*. COSUDE-Inter Cooperation-PROSUKO, La Paz. 25-63.

Apaza, D. 2021. *El estado actual de las experiencias de recarga artificial y de los sistemas ancestrales de Siembra y Cosecha del Agua en Perú*. In: *Curso virtual "Sistemas de Siembra y Cosecha del Agua en Iberoamérica"*. IGME-Red SYCA-CYTED.

Banco de la República - Colombia - Museo del Oro. 20/08/21. <https://www.flickr.com/photos/museodeloro/albums/72157624104558016/with/4625462145/>

https://www.ccmagangue.org.co/pdf/pdf-desarrollo-regional/publicaciones-investigaciones/estudios/LA_MOJANA_RIQUEZA_NATURAL_Y_POTENCIAL_ECONOMICO_2004.pdf. <http://repository.ucatolica.edu.co/bitstream/10983/1595/1/RETROSPECTIVA%20DEL%20MANEJO%20DEL%20RECURSO%20HÍDRICO%20DE%20LOS%20ZENÚES%20EN%20LA%20REGIÓN%20DE%20LA%20MOJANA>.

Biblioteca Virtual de Pueblos Indígenas. s.f. *El Pueblo Kallawayá*. Portal de la Biblioteca Virtual en Salud (BVS); BVS Site 5.2.11 © BIREME/OPS/OMS, 29/06/21. <http://pueblosindigenas.bvsp.org.bo/php/level.php?lang=es&component=50&item=20>

Delgadillo, O. 2017. *Procesos de diseño y adopción tecnológica de sistemas de riego presurizado bajo gestión colectiva: Reflexiones conceptuales sobre experiencias en la cuenca Pucara*. Proyecto Cuenca Pedagógica Pucara. Informe inédito. Centro AGUA-UMSS-MMAyA. Cochabamba. 67 pp.

Denevan, W. 1966. *The aboriginal cultural geography of the Llanos de Mojos of Bolivia*. University of California Press - Berkeley and Los Angeles. Cambridge University Press London, England. 192 pp.

- Denevan, W. 2001. *Cultivated landscapes of native Amazonia and the Andes*. Oxford University press, USA. 289 pp.
- Denevan, W. 2006. Una perspectiva histórica sobre el descubrimiento de campos elevados (camellones) prehispánicos en Sud-América. In: Valdez, F. (Ed.), *Agricultura Ancestral. Camellones y Albarradas. Contexto Social, Usos y Retos del Pasado y del Presente*. Ediciones Abya-Yala, Quito, Ecuador, 17-24.
- Durán, A. 1992. *Habilitación de terrenos no aptos para Agricultura mediante la construcción de suka kollus en la región de Caquiaviri*. Tesis de Grado. Universidad Mayor de San Andrés. La Paz, Bolivia. 121 pp.
- Durán, A. 2021. Tecnología de los campos elevados en las llanuras del Beni, Bolivia. In: *Curso sobre "Buenas prácticas sobre hidrotecnologías ancestrales para la emergencia sanitaria y climática"*. Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. UNESCO-Universidad Politécnica de Catalunya-Red SYCA CYTED. 10 pp.
- Erickson, C. 1986. Waru Waru. Una tecnología agrícola del Altiplano pre-hispánico. In: De la Torre, C. y M. Burga (eds.). *Andenes y camellones en el Perú Andino. Pasado, presente y futuro*. CONCYTEC. Lima, Perú, 53-84.
- Erickson, C. 1996. Lomas de Ocupación en los Llanos de Moxos. In: Durán, A. and Bracco, R. (eds.). *Arqueología de las Tierras Bajas*. Comisión Nacional de Arqueología, Montevideo, Uruguay, 207-226.
- Erickson, C. 2000. Los caminos prehispánicos de la amazonia boliviano. In: Herrera, L. and Cardal de Schrimppff, M. (eds.). *Caminos precolombinos: las vías, los ingenieros y los viajeros*. Instituto Colombino de Antropología e Historia, Bogotá, 15-42.
- Erickson, C. 2006. El valor actual de los Camellones de cultivo precolombinos: Experiencias del Perú y Bolivia. In: F. Valdez (ed.). *Agricultura ancestral. Camellones y albarradas: Contexto social, usos y retos del pasado y del presente*. Ediciones Abya-Yala, Quito, 315-339.
- Erickson, C. 2008. Amazonia: The Historical Ecology of a Domesticated Landscape. In: Silverman H and W. Isbell (eds.). *Handbook of South American Archaeology*. Springer, New York. 157-183.
- Erickson, C. 2010. The Transformation of Environment into Landscape: The Historical Ecology of Monumental Earthwork Construction in the Bolivian Amazon. In: *Diversity 2010*, 2, 618-652. 31/1/21. www.mdpi.com/journal/diversity.
- Erickson, C. 2014. Pre-Columbian Monumental Landscapes in the Bolivian Amazon. Shepard Krech III Lecture Series. Haffenreffer Museum. Brown University. October 6, 2014. 2/10/20. <https://www.youtube.com/watch?v=EkbGr5nxZog>.
- Estenssoro, S. 1991. Los bofedales de la cuenca alta del valle de La Paz. In: Forno, E. and M. Baudoin (eds.). *Historia Natural de un Valle en los Andes*. La Paz. Instituto de Ecología, Universidad Mayor de San Andrés, Imprenta Quipus, La Paz, 109-121.
- Gerbrandy, G. and Hoogendam, P. 1998. Aguas y acequias. Los derechos al agua y la gestión campesina de riego en los Andes Bolivianos. PEIRAV-PLURAL. Cochabamba, 397 pp.
- Gondard, P. 2006. Campos elevados en llanuras húmedas. Del modelado al paisaje. Camellones, waru waru o pijales. In: Valdez, F. (ed.). *Agricultura Ancestral. Camellones y Albarradas. Contexto Social, Usos y Retos del Pasado y del Presente*. Ediciones Abya-Yala, Quito, Ecuador, 24-56.
- Heckenberger, Michael J.J., Russell, C., Fausto, C., Toney, J.R., Schmidt, M.J., Pereira, E., Franchetto, B. and Kuikuro, A. 2008. Pre-Columbian Urbanism, Anthropogenic Landscapes and the Future of the Amazon. *Science* 321(5893), 1214-1217.
- Herrera, A. and M. Alí. 2009. Paisajes del desarrollo: La ecología de las tecnologías andinas. In *Antípoda : Revista de Antropología y Arqueología*, Junio 2009; 169-194.
- IGRAC-UN. 2016. Managed Aquifer recharge – MAR. Booklet. IHE-Delft. 4 pp.
- International Union for Conservation of Nature (IUCN). 2017. Infraestructura Natural para la Gestión del Agua. Booklet. IUCN. Water. 6/06/21. <https://www.iucn.org/node/28778>
- Lebundgut, C. and Kohn, I. 2014. European traditional irrigation in transition. Irrigation in times past – a historic land use practice across Europe. *Irrigation and Drainage* 63. European Policy Brief. 4 pp.
- Mann, C. 2008. Ancient Earthmovers of the Amazon. *Science*: Vol. 321, Issue 5893, 1148-1152.
- Martos-Rosillo S. 2018. Técnicas de siembra y cosecha de agua y su papel frente al cambio climático. Instituto Geológico Minero de España-IGME. In: *Unidos por el agua: Huelva, 24 a 27 de octubre de 2018*. Vol. 3, 2019, ISBN 978-84-09-05454-1, 879-896.
- Martos-Rosillo S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno, F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldivar, J., Pedrera, A. and Durán, J.J. 2019. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: New insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology* 578 – 124047. Elsevier.
- Martos-Rosillo, S. et al. 2020. La Siembra y Cosecha del Agua en Iberoamérica; un sistema ancestral de gestión del agua que utiliza Soluciones Basadas en la Naturaleza. 6/06/21. https://www.researchgate.net/publication/339487128_La_Siembra_y_Cosecha_del_Agua_en_Iberoamerica_un_sistema_ancestral_de_gestion_del_agua_que_utiliza_Soluciones_Basadas_en_la_Naturaleza
- Martos-Rosillo, S. et al. 2021. Ancestral techniques of Water Sowing and Harvesting in Ibero-America: examples of hydro-geo-ethical systems. In: M. Abrunhosa, A. Chambel, S. Peppoloni, H. I. Chaminé (eds.). *Geoethics & Groundwater Management Congress: Theory and Practice for a Sustainable Development*. Springer Nature. Lisbon, Portugal.
- Meggers, B. 1996. *Amazonia: Man and Culture in a Counterfeit Paradise*. Revised ed. Smithsonian Books. ISBN 9781560986553. 214 pp.

Michel, M. 2020. Nuevos enfoques sobre sistemas hidráulicos en los llanos de Moxos, departamento del Beni, Bolivia. Informe inédito. 6/06/21. <https://www.researchgate.net/publication/340092446>. 24 pp.

Ochoa-Tocachi, B.F, Bardales J.D., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, J., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., De Bièvre, B., and Buytaert, W. 2019. Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. *Nature Sustainability* 2, 584–593.

Ostria, C. 1987. *Phytoécologie et paleoécologie de la vallée altoandine de Hichu Khota (Cordillère Orientale, Bolivie)*. Tesis de doctorado, Universidad Paris VI, Paris. 180 pp.

PNUD. 2005. *Bolivia Suka Kollus. Una Comunidad Conviviendo con las Inundaciones y Sequías*. In: *Gestión local del riesgo y preparativos de desastres en la Región Andina. Sistematización de buenas prácticas y lecciones aprendidas*. PNUD y DIPECHO. Graphus. Quito, Ecuador, 50 pp.

PROSUKO. 2003. *Técnica milenaria contra la pobreza*. COSUDE. Informe del Proyecto PROSUKO. La Paz, Bolivia, 16 pp.

Rivera, O. 2005. *Una cultura hidráulica dominó las antiguas tierras de Moxos*. *La Razón* 28-11-2005. 6/06/21. http://www.la-razon.com/Versiones/20051118_005364/nota_257_222007.htm.

Saavedra, O. 2009. *Culturas Hidráulicas de la Amazonia Boliviana*. Informe inédito. Oxfam. La Paz. 25 pp.

Saavedra, O. 2013. *La Cultura Hidráulica de los camellones tierras bajas y altas*. Ministerio de Educación. La Paz. 93 pp.

Serrano-Coronel G., R. Chipana, M. F. Moreno-Pérez, and Roldán-Cañas, J. 2018. Study of vertical water flows contribution to the crop water consumption in suka kollus using a mixed drainage system. *Agricultural Water Management* 206. Elsevier, 86-94.

UNESCOSOST. 2021. *Primer encuentro: Buenas prácticas sobre Hidrotecnologías ancestrales para la emergencia climática, sanitaria y alimentaria*. Cátedra UNESCO de Sostenibilidad. Universidad Politécnica de Catalunya. <https://www.facebook.com/watch/?v=422013119241037>

Visscher, J. T. and E. Quiroga. 1997. *Transferencia de Tecnología en el Sector de Abastecimiento de Agua y Saneamiento en Colombia. Una experiencia de aprendizaje*. Serie de Documentos Técnicos. Cinara – Universidad del Valle; IRC; UNESCO. Cali, 1997. 27 pp.

WWAP (Programa Mundial de las Naciones Unidas de Evaluación de los Recursos Hídricos)/ONU-Agua. 2018. *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2018: Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua*. París, UNESCO. 154 pp.

Yapa, K. 2013. *Prácticas ancestrales de crianza de agua. Una guía de campo*. PNUD. 205 pp.

Yapa, K. 2016. *Nurturing Water: Ancestral Ground Water Recharging in the Americas*. Conference: 7th Rural Water Supply Network Conference. Forum "Water for Everyone". Ivory Coast. 20 pp. https://www.academia.edu/29620297/NURTURING_WATER_ANCESTRAL_GROUND_WATER_RECHARGING_IN_THE_AMERICAS



Transición Andes Amazonia-Valle de Zongo, La Paz.
Fuente. Boris Fernández. 2022.



Siembra y Cosecha de Agua en la zona central de Chile

Water Sowing and Harvesting in the central zone of Chile



Zona central Chile

José Luis Arumí

Siembra y Cosecha de Agua en la zona central de Chile

RESUMEN

La principal actividad económica de la zona central de Chile es la agricultura, que depende de una extensa red de canales que suministra el agua de riego necesaria, debido al clima mediterráneo que la caracteriza. La red de canales de riego está conformada principalmente por canales de tierra que interactúan con los sistemas hidrológicos de las cuencas convirtiéndose en una importante fuente de recarga de los acuíferos que, a su vez, son aprovechados por pequeños agricultores que poseen pozos someros que utilizan para mantener sus explotaciones agrícolas. En la cuenca del río Diguillín, la junta de vigilancia de ese río se dio cuenta que, al secarse un canal de riego, los pozos someros que estaban en su cercanía también se secaban. Por esa razón, y como medida de apoyo a los pequeños agricultores, durante la mega-sequía que está sufriendo la zona central de Chile, ha mantenido agua en los canales de riego durante los meses invernales, sembrando agua en el acuífero que luego es cosechada por los pequeños agricultores que no tienen acceso al agua de riego de los canales. Esta práctica solidaria en torno al agua es similar a las prácticas ancestrales que se han usado tanto en Latinoamérica como en la península ibérica y refleja que problemas comunes demandan soluciones similares.

Water Sowing and Harvesting in the central zone of Chile

ABSTRACT

The main economic activity in central Chile is agriculture, which depends on an extensive network of canals to provide the necessary irrigation water due to the Mediterranean climate that characterizes it. The network of irrigation canals is mainly made up of unlined canals that interact with the hydrological systems of the basins, becoming an important source of recharge of the aquifers that in turn are used by small farmers who have shallow wells that they use to maintain their agricultural farms. In the Diguillín river basin, the Oversight Board of that river realized that, when an irrigation canal dried up, the shallow wells that were in its vicinity also dried up. For this reason and as a measure to support small farmers during the mega drought that the central zone of Chile is suffering, it has kept water in the irrigation canals during the winter months, sowing water in the aquifer that is then harvested by the small ones. farmers who do not have access to irrigation water from the canals. This solidarity practice around water is similar to the ancestral practices that have been used both in Latin America and in the Iberian Peninsula and reflects those common problems need similar solutions.

INTRODUCCIÓN

La zona central de Chile se caracteriza por poseer un clima mediterráneo, con las precipitaciones concentradas en los meses de invierno (entre abril y septiembre para el hemisferio sur) y un largo periodo sin lluvias durante la primavera y el verano (de octubre a marzo). La agricultura es la principal actividad económica y, debido al clima, depende fuertemente del riego, que se ha basado tradicionalmente en dos aspectos: la existencia de una extensa red de canales construidos principalmente por los agricultores y el manejo del agua a través de las Organizaciones de Usuarios de Agua (OUAs).

En este trabajo se describe como la red de canales afecta la hidrología de las cuencas de la zona central de Chile, transformándose en un importante mecanismo de recarga de aguas subterráneas (siembra) permitiendo que los pequeños agricultores y habitantes rurales, muchas veces sin acceso al agua de los canales, pueden obtener el agua (cosecha) desde pozos someros. A continuación, se presenta

como la junta de vigilancia del río Diguillín (JVRD) observó este efecto y lo aprovechó para garantizar el suministro de agua de los habitantes de la cuenca que no tenían otra posibilidad de obtención de agua que pozos someros.

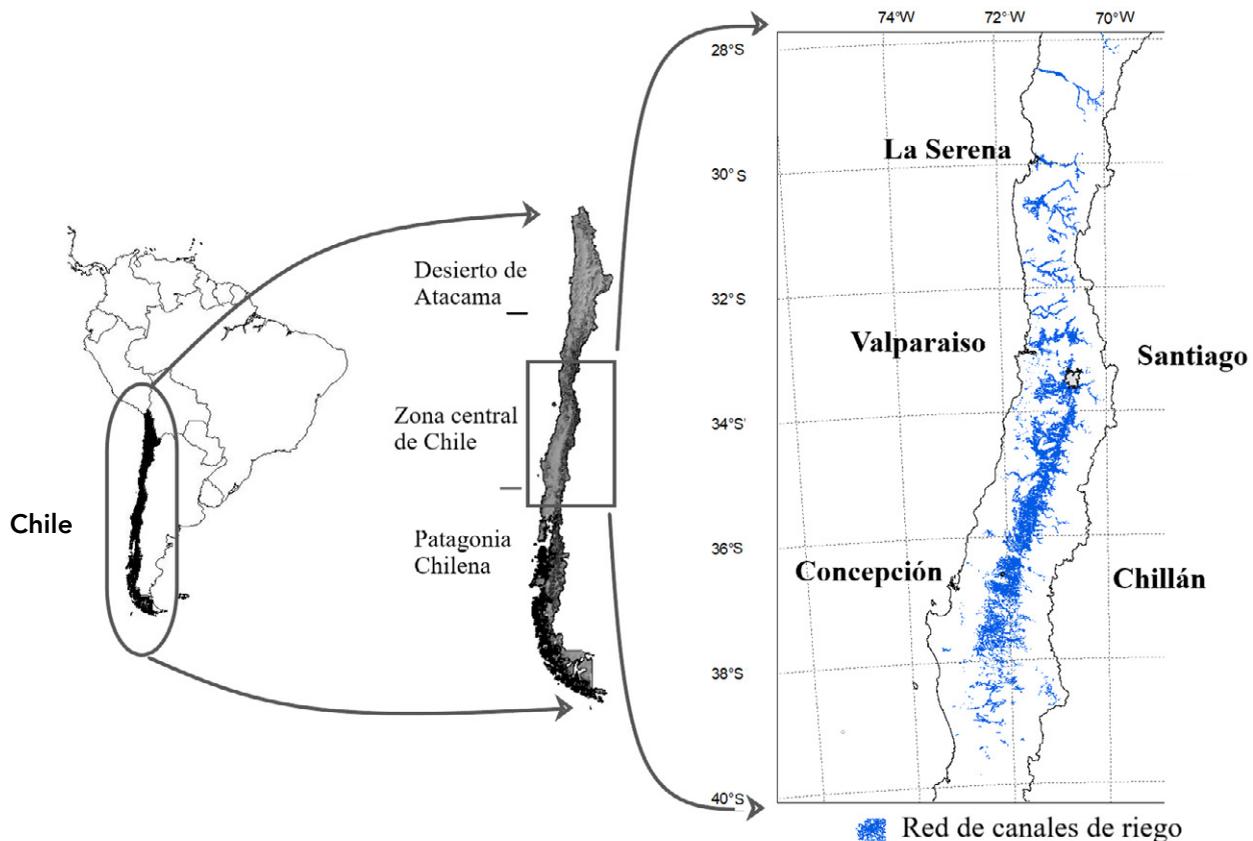
Este caso demuestra que las OUAs pueden compartir, solidariamente con los habitantes del territorio en que sitúan, sembrando agua a través de la recarga mediante el manejo de los canales, para permitir que los pequeños usuarios tengan acceso al agua, aproximándose así a los sistemas tradicionales de siembra y cosecha de agua.

LOS CANALES DE RIEGO EN LA ZONA CENTRAL DE CHILE

La zona central de Chile se desarrolla en la vertiente occidental de la cordillera de los Andes, entre el árido desierto de Atacama y la Patagonia (Figura 1).

Figura 1.

Ubicación de la zona central de Chile y su red de canales de riego.



Esta zona se caracteriza por poseer precipitaciones concentradas en los meses de invierno (entre abril y septiembre para el hemisferio sur), que son moderados, y largos veranos (de octubre a marzo) con alta temperatura (Figura 2) que favorecen el crecimiento de distintos productos agrícolas, en la medida que exista agua para riego.

Durante los meses de verano, la disponibilidad de agua depende principalmente de la acumulación de nieve en los Andes, que, al derretirse gradualmente

durante el verano, alimenta los ríos como se indica en la figura 3. Por esta razón, los canales de riego son una presencia permanente del paisaje rural de esa zona (Figura 4).

Durante los meses de verano, la disponibilidad de agua depende principalmente de la acumulación de nieve en los Andes.

Figura 2.

Precipitación y temperatura media mensual en las ciudades de Santiago y Chillán.

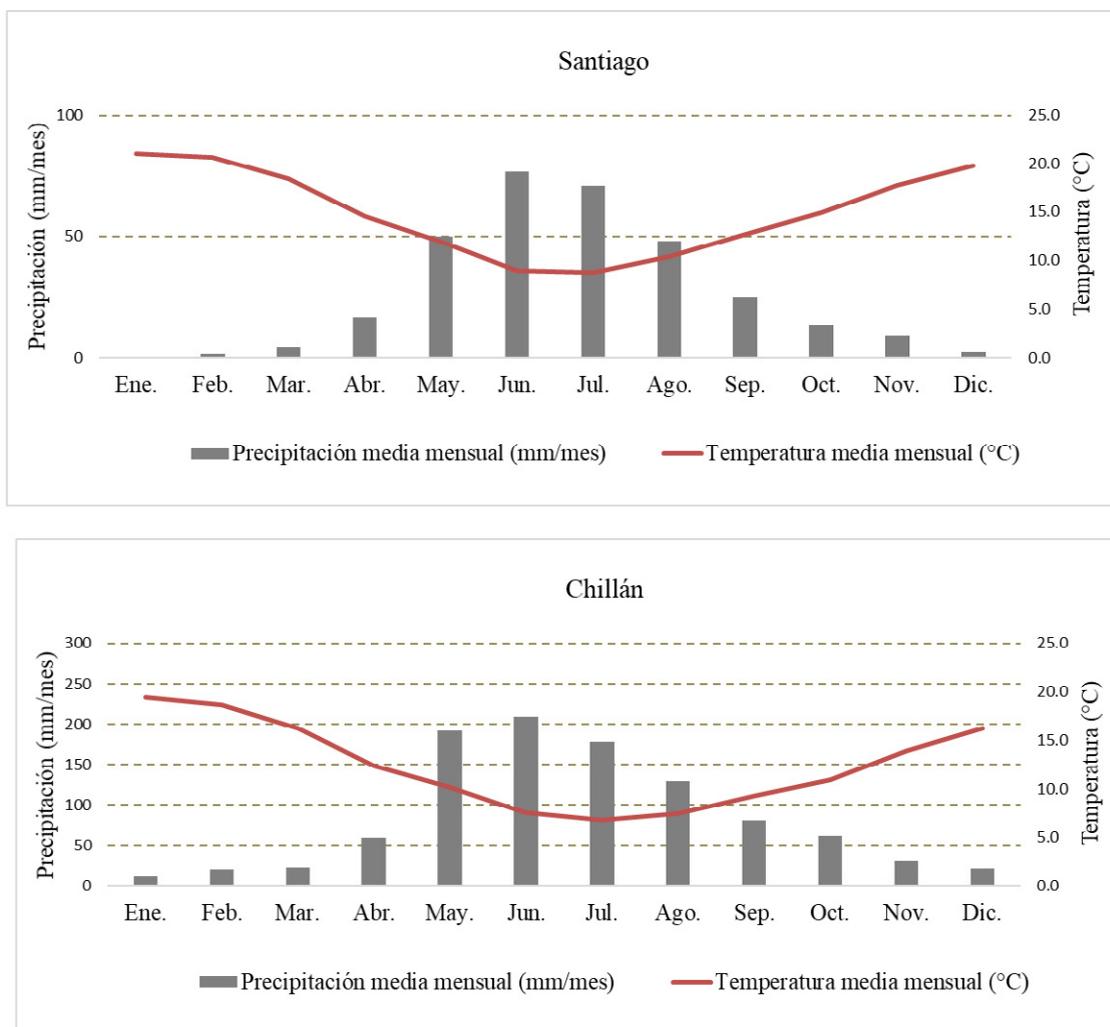


Figura 3.

Caudales medios mensuales en los ríos Maipo, ubicado cerca de Santiago y Ñuble, ubicado cerca de Chillán.

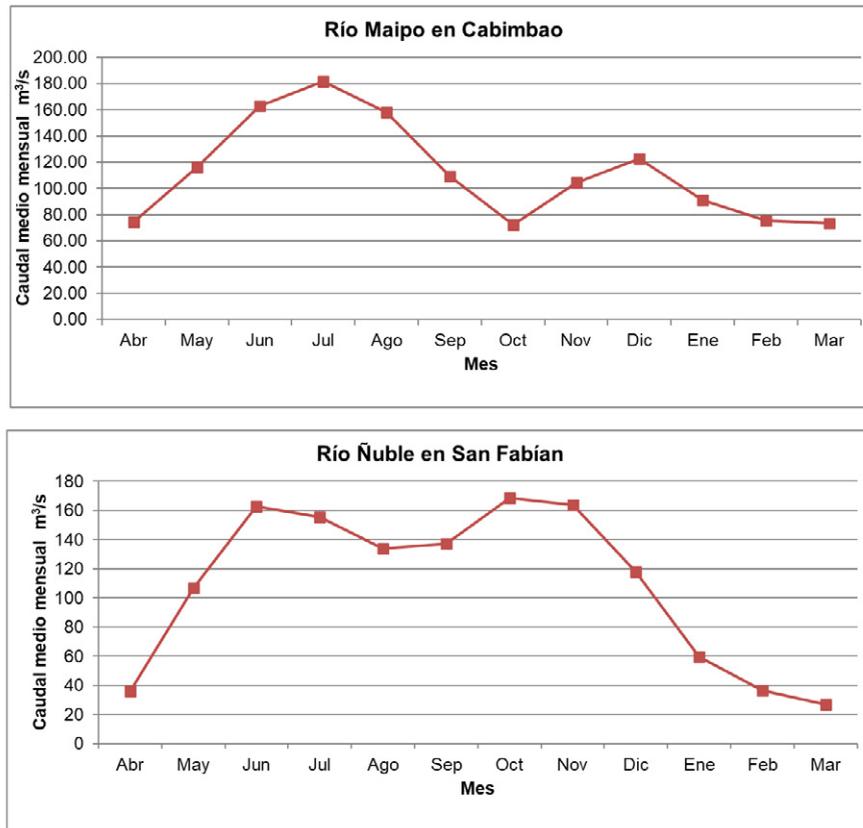


Figura 4.

Vista de canales en la zona central de Chile: a) Marco partidor en el valle de Cachapoal, b) Canal a pie de un cerro; c) Canal intrapredial; d) Canal San Carlos en Santiago.





Un sistema moderno de distribución de agua usando compuertas automáticas.
Fotografía: José Luis Arumí (2021)

Cuando el conquistador español, don Pedro de Valdivia, fundó la ciudad de Santiago, eligió un lugar donde ya existía una red de canales construida por los pueblos originarios; los primeros españoles que llegaron a Chile usaron las acequias prehispánicas para definir sus encomiendas y repartir territorios entre los conquistadores, fundando lo que conocemos como el Chile colonial (Stehberg y Sotomayor, 2012).

En el Chile colonial la agricultura de riego no era un gran negocio, y la producción económica se basaba en la explotación ganadera y en el trigo. Por esa razón, sólo al término de la colonia se construyeron nuevas acequias que fueron los canales del Maipo, para regar las producciones agrícolas en torno a Santiago y que recibieron la primera merced de agua otorgada por la nueva república de Chile en 1818, por el primer director supremo don Bernardo O'Higgins.

Después de la independencia, en el siglo XIX llegaron nuevos emigrantes, ingleses, españoles, italianos y alemanes; se fueron generando nuevos proyectos y se construyeron más acequias. Pero el gran desarrollo de la agricultura de riego chilena se produjo al descubrirse plata en el norte, y más adelante al establecerse la industria del salitre a fines del siglo XIX.

El principio básico de la administración del agua en los canales de Chile es la prorrata, que significa que todos los usuarios de un canal se reparten el agua en función de los derechos que posean, independiente del caudal que exista en el río.

Las fortunas que se generaban con la minería en el norte se usaron para construir grandes mansiones e implementar haciendas en la zona central. Debido a los largos veranos secos característicos de esa zona, las haciendas necesitaban regar los terrenos dedicados a la producción agrícola y fue como se comenzó con la construcción masiva de grandes canales de riego, de la mano de personas que querían regar sus grandes haciendas. Esos canales hoy en día cruzan el valle central de Chile. El estado de Chile comenzó muy tímidamente a construir obras de riego a mediados de la década de 1930, principalmente embalses y algunos canales asociados a estos embalses. (Sandoval, 2003).

El principio básico de la administración del agua en los canales de Chile es la prorrata, que significa que todos los usuarios de un canal se reparten el agua en función de los derechos que posean, independiente del caudal que exista en el río. Cuando hay más agua, todos reciben más agua y cuando hay menos todos reciben menos agua. Para garantizar la prorrata, se implementó el marco partididor, que es la estructura símbolo de la hidráulica chilena. Este partididor usa una lámina de metal para repartir las aguas, siguiendo la proporción que le corresponde a cada usuario (Figura 4a).

Para que la repartición de agua fuera efectiva, se generaron Organizaciones de Usuarios de Agua (OUAs) que se preocupan de mantener la infraestructura y de administrar los derechos de agua. Un caso particular de OUA son las Juntas de Vigilancia, que administran el agua captada desde las bocatomas existentes en el río para alimentar los diferentes canales que se extienden en todo el territorio que es regado en la cuenca (Arumi *et al.*, 2014)

Durante la segunda mitad del siglo XX se produjo la reforma agraria, que tuvo una consecuencia inesperada. Las grandes haciendas fueron divididas en muchas parcelas que se entregaron a pequeños agricultores, llamados desde entonces parceleros.

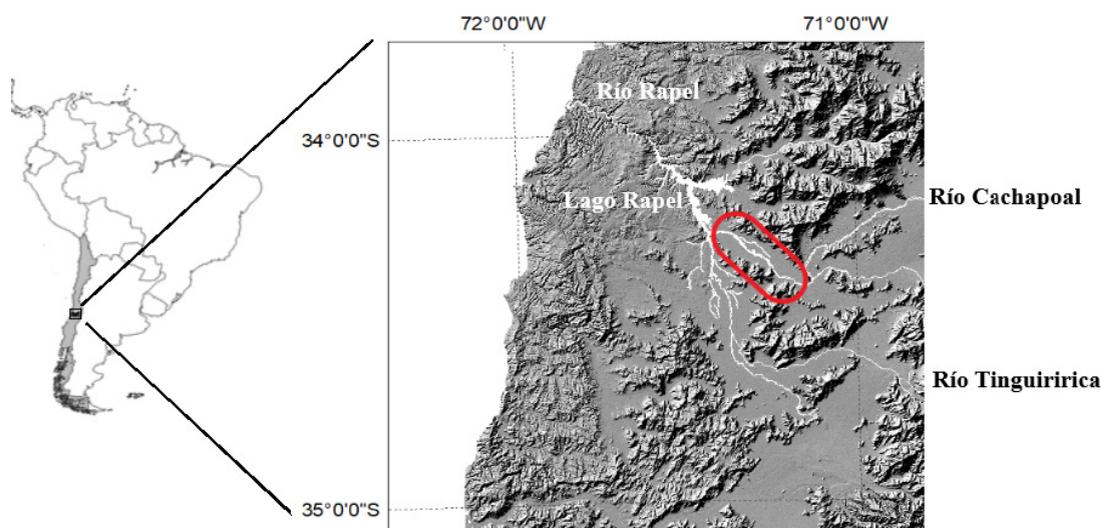
Lamentablemente, esta división fue realizada sin un trabajo social y no se consideró dar acceso a los canales de riego a muchos de estos parceleros, que debieron construir pozos someros para poder mantener una actividad agrícola de subsistencia.

LA RECARGA DESDE LOS CANALES

Entre los años 2002 y 2008 se desarrolló un estudio en el valle de Peumo (Figura 5), un pequeño valle ubicado en la Región de O'Higgins Chile ($36,3^\circ$ Latitud Sur), con una importante actividad agrícola de exportación. El objetivo de ese estudio fue comprender las relaciones y efectos entre el régimen hidrológico, el clima, la hidrogeología y el manejo en los niveles productivos y de calidad de los cultivos en dicha zona. En el Valle Central, los sistemas de transporte y distribución de agua de riego corresponden a canales, normalmente sin revestir, con pérdidas de conducción del orden de un 30% (Rivera *et al.*, 2005). Parte importante de estas pérdidas de conducción son filtraciones que pueden recargar los acuíferos, ya que es común encontrar zonas de riego ubicadas sobre acuíferos libres muy someros y por eso se puede observar el ascenso del nivel freático en el valle, al inicio de la temporada de riego.

Figura 5.

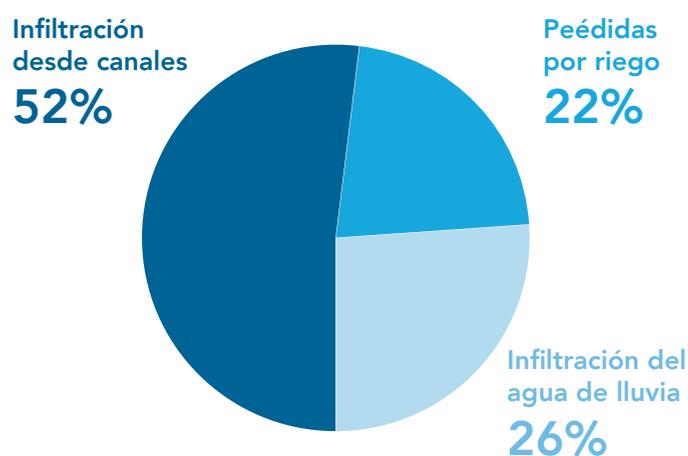
Ubicación del área del estudio en el valle de Peumo que se indica por la elipse diagonal ubicada sobre el Lago Rapel.



Mediante el uso de un monitoreo intensivo (Rivera et al., 2005) y el uso de modelos de simulación (Arumi et al., 2009; y Arumí et al., 2013) se cuantificó la influencia de la red de canales en el valle de Peumo sobre el sistema de aguas subterráneas. La infiltración desde la red de canales aporta más del 50% de la recarga que recibe el acuífero (Figura 6), alterando los patrones espaciales y temporales de recarga.

Figura 6.

Componentes que generan la recarga en el Valle de Peumo.

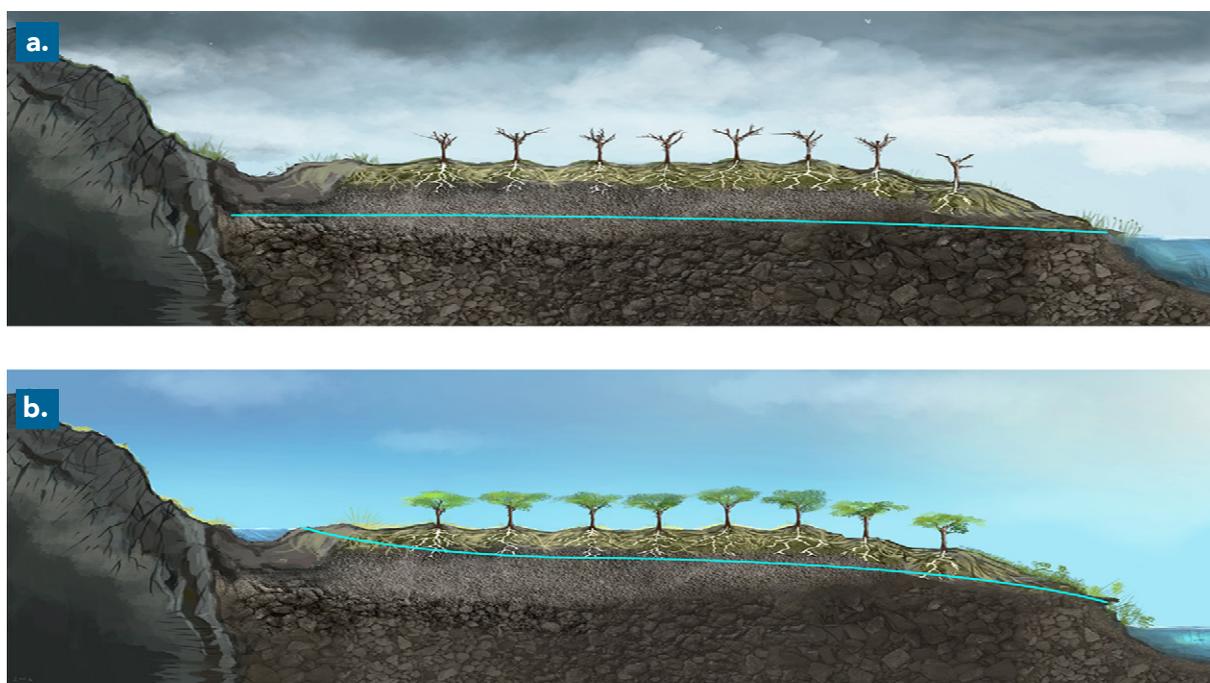


Estos resultados se validaron usando el análisis del contenido de isótopos ambientales en muestras de agua obtenidas desde los cauces superficiales, pozos someros y pozos profundos (Arumí et al., 2020).

Tradicionalmente, en Chile, las grandes inundaciones ocurren durante los meses del invierno del hemisferio sur (entre mayo y agosto) y por esa razón existe la tradición de cerrar las bocatomas de los canales de riego durante el invierno, para evitar que las crecidas de los ríos ingresen a los canales de riego produciendo daños. Este manejo afecta la recarga de las aguas subterráneas. Durante la temporada de riego, cuando se abren las compuertas en las captaciones, se produce un ascenso sostenido de los niveles freáticos debido a la infiltración desde los canales. Por otro lado, como en invierno los canales no transportan agua, estos funcionan como drenes interceptores de la escorrentía superficial y subsuperficial, disminuyendo la recarga de las zonas bajas (Figura 7). Esta interacción entre los sistemas de aguas superficiales, de riego y subterráneas afecta, y en cierta manera determina, las condiciones de manejo de la agricultura dentro del valle y la planificación del riego (Jara et al., 2017).

Figura 7.

a) Situación invernal con los canales cerrados y b) situación de verano con los canales abiertos.



LA EXPERIENCIA DEL RÍO DIGUILLÍN

En el verano del año 2010, los propietarios de uno de los canales de riego del Río Diguillín, ubicado inmediatamente al sur de la ciudad de Chillán (-37° S) solicitaron a la junta de vigilancia de ese río cerrar su bocatoma, pues había trasladados sus derechos de aprovechamiento de agua a otro canal, de acuerdo con el sistema de gestión de agua chileno, que permite trasladar derechos de un punto a otro de la cuenca.

Como resultado del cierre del canal, durante el verano del año 2011, varias comunidades de pequeños

agricultores reportaron que sus pozos someros se habían secado, pues dicho canal constituía la fuente principal de recarga de dichos pozos. Esta situación dejó de manifiesto que en la zona también los canales producían recarga de aguas subterráneas y sembró una idea en el directorio de la junta de vigilancia de ese río. Decidieron probar algo nuevo y permitieron que ingresara agua a los canales durante los meses de invierno, controlando el cierre de los canales. Esto se pudo implementar porque varios canales del río Diguillín son alimentados por la bocatoma del canal Laja Diguillín (Figura 8).

Figura 8.

Compuertas bocatoma del canal Laja Diguillín.



Al mantenerse agua en los canales se propagó la recarga a lo largo de toda la cuenca siguiendo la red de riego (Figura 9) y esto permitió aumentar el volumen de agua almacenada en la cuenca. De hecho, tras diez años de mantener esta práctica invernal, y considerando que la zona central de Chile experimenta la peor sequía de la que se tiene registro (Alvarez-Garretón et al., 2021), los pozos y humedales de la parte baja de la cuenca no han sufrido deterioro,

al tiempo que han aumentado los niveles en los pozos de los pequeños agricultores favorecidos por esta iniciativa (Figura 10).

Tras varios años donde se han implementado estas medidas, los pequeños agricultores han desarrollado una mayor identificación con el canal y colaboran con su mantención, pues reconocen que les ayuda a tener más agua en los meses de verano.

Figura 9.

Red de canales en la cuenca del río Diguillín.

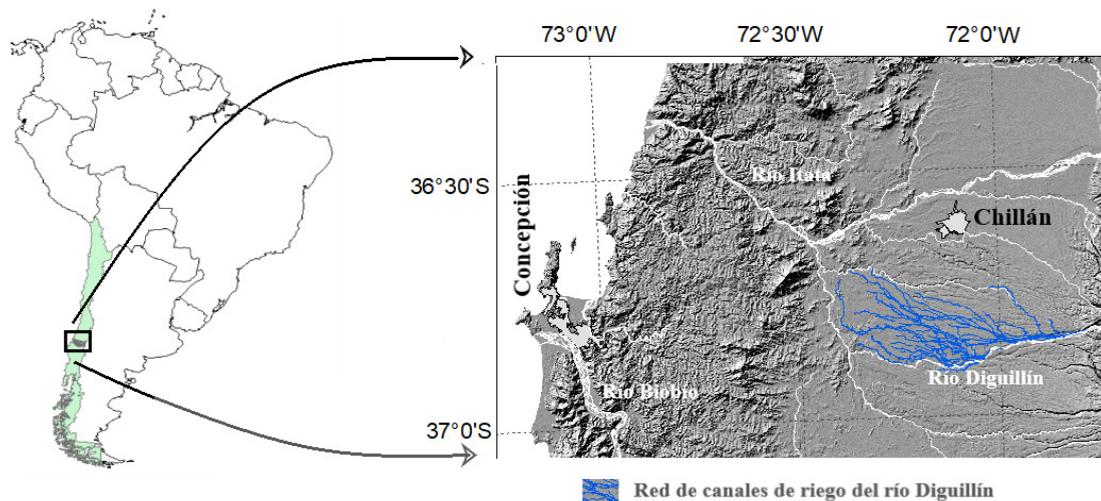


Figura 10.

Pequeños agricultores construyen pozos someros (izquierda) para mantener su producción agrícola usando riego presurizado (derecha).



CONCLUSIONES

En Chile el manejo del agua se realiza a través de Organizaciones de Usuarios de Agua, que poseen un vínculo estrecho y solidario con el territorio donde realizan su administración. En el caso de la junta de vigilancia del Río Diguillín, existe solidaridad entre los actores de la cuenca que se manifiesta a través del reparto del agua.

La recarga invernal es un proceso de siembra de agua, generada por una iniciativa de la junta de vigilancia que administra el río, con la que los pequeños agricultores pueden cosechar esta agua usando sus pozos someros.

Esta solidaridad no sólo permite que los pequeños agricultores posean parte de los recursos del agua de la cuenca en el seco verano chileno, sino que reduce la conflictividad en el territorio, contribuyendo, al menos en ese aspecto, que exista armonía entre los usuarios de la cuenca.

Es interesante ver el paralelismo con las prácticas ancestrales que se han presentado en este trabajo, porque, en definitiva, las soluciones frente a la escasez de agua pasan por que los usuarios tomen, para sembrar agua en las zonas donde esto sea posible, y se coseche donde hace falta. Eso es similar tanto en una amuna, como en una acequia de careo o en un canal de riego con independencia del momento temporal y del lugar donde se produce.

AGRADECIMIENTOS

Los autores quieren agradecer el apoyo del centro Fondap CRHIAM ANID/Fondap/15130015 para realizar esta investigación. Además del apoyo de la Comisión Nacional de Riego, de la junta de vigilancia del Río Diguillín y del anónimo revisor que contribuyó a mejorar este texto.



Trabajadores instalando una barrera temporal al inicio de la primavera.
Fotografía: Ovidio Melo (2021)

REFERENCIAS

- Alvarez-Garretón, C., Boisier, J. P., Garreaud, R., Seibert, J., and Vis, M. 2021. Progressive water deficits during multiyear droughts in basins with long hydrological memory in Chile, *Hydrological Earth System Science*, (25), 429–446
- Arumi J. L., Rivera, D. A., Holzapfel, E. A. and Muñoz, E. A. 2013. Effect of drought on groundwater in a Chilean irrigated valley. *Proceedings of the Institution of Civil Engineers-Water Management*, 166 (5), 231-241
- Arumí, J. L., D. Rivera, E. Holzapfel, P. Boochs, M. Billib, and Fernald, A. 2009. Effect of irrigation canal network on surface and groundwater connections in the lower valley of the Cachapoal River. Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*, Vol. 69(1), 12-20
- Arumí, J.L. , O. Melo, J. Nuñez and Billib, M. 2014. Riego y Usuarios del Agua en Chile. Desde la Revolución a la Evolución. In: Sanchis-Ibor, C.; Palau-Salvador, G. Mangue Alférez, I.; Martínez-Sanmartín, L.P. (eds.) *Irrigation, Society, Landscape. Tribute to Thomas F. Glick*. Universitat Politècnica de València, 661-671
- Arumi, J.L., M. Escudero, E. Aguirre, J.C. Salgado and Aravena, R. 2020. Use of environmental isotopes to assess groundwater pollution caused by agricultural activities. *Isotopes in Environmental and Health Studies*, 56:5-6, 673-683
- Jara., J., Eduardo A. Holzapfel, M. Billib, J. L. Arumi, O. Lagos and Rivera, D. 2017. Effect of water application on wine quality and yield in Carmanère under the presence of a shallow water table in Central Chile. *Chilean Journal of Agricultural Research*. Vol 77(2), 171-179.
- Rivera, D., J.L. Arumí and Holzapfel, E. 2005. Impacto de la actividad agrícola en el valle de Peumo, Chile. *Revista Gestión Ambiental* (11), 59-80
- Sandoval J. 2003. *El Riego en Chile*. Ministerio de Obras Públicas, Dirección de Obras Hidráulicas. Santiago Chile. Pp 94. http://www.doh.cl/publicacionesyestudios/Documents/historia_del_riego_en_chile.pdf
- Stehberg R. and G. Sotomayor. 2012. Mapocho Incaico. In: Nuñez H. (ed.) *Boletín del Museo Nacional de Historia Natural de Chile*, N° 61. Dirección de Bibliotecas, Archivos y Museos (DIBAM). Santiago. Chile. 85-153. https://issuu.com/mnhn_cl/docs/boletin_61_mnhn_web

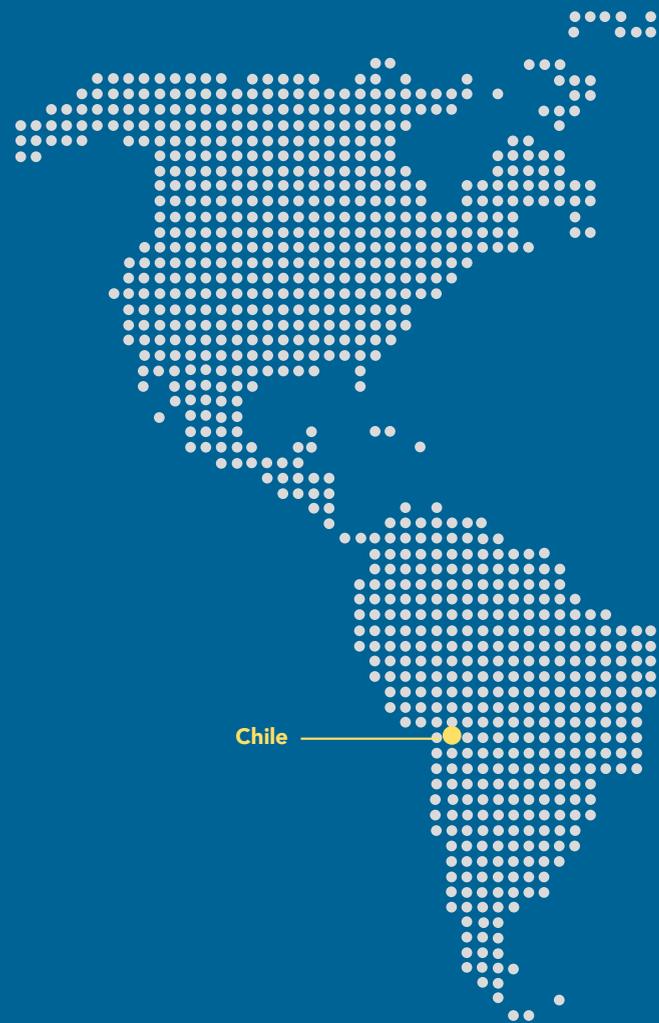


Actividad de capacitación sobre medición de canales a trabajadores de una asociación de canalistas.
Fotografía: Ovidio Melo (2020)



Valoración de la ancestralidad: Siembra y Cosecha de Agua

Ancestrality valuation:
Water Sowing and Harvesting systems



Chile

Milka Castro Lucic¹

¹ Facultad de Derecho, Universidad de Chile

Valoración de la ancestralidad: Siembra y Cosecha del Agua

RESUMEN

Los conceptos tradicional, local, indígena y ancestral, entre otros, se utilizan para referir al conocimiento no occidental. En este trabajo se discute sobre las particularidades e importancia del concepto conocimiento ancestral y el uso de otros conceptos utilizados como sinónimos, y quiénes serían portadores de este conocimiento, con el objetivo de circunscribir el uso de lo ancestral. En el paradigma de la cooperación internacional para el desarrollo se promueve la necesidad de aumentar el conocimiento sobre las prácticas indígenas ancestrales, reconociendo su armónica relación con la naturaleza, y por el aporte en el desarrollo de nuevas metodologías para mejorar la comprensión de los impactos, la adaptación y la mitigación del cambio climático. Un eje importante de este saber es la no separación de lo empírico y objetivo de lo sagrado, ámbito en que los espíritus de sus ancestros participan en cada acción que se emprenda con la naturaleza.

Este conocimiento ancestral es manifiesto en el uso y manejo de agua que hacen los pueblos indígenas, en los humedales altoandinos, de los “bofedales”, amenazados por el cambio climático. Los bofedales son importantes para mantener la biodiversidad y actúan como esponjas que mitigan la falta de agua en temporadas secas. La superficie de estos humedales es obra, en gran parte, del sistema de riego basado en el conocimiento ancestral de las técnicas de Siembra y Cosecha del Agua, en un contexto cultural donde el agua y los cerros proveedores del agua son ejes centrales de estas culturas milenarias.

Ancestrality valuation: Water Sowing and Harvesting systems

ABSTRACT

The traditional, local, indigenous and ancestral concepts, among others, are used to refer to non-Western knowledge. This paper discusses the particularities and importance of ancestral knowledge and the use of others concepts used as synonyms, and who would be carriers of this knowledge, with the objective of circumscribing the use of the ancestral. In the paradigm of international cooperation for development, the need to increase knowledge about ancestral indigenous practices is promoted, recognizing their harmonious relationship with nature, and for the contribution in the development of new methodologies to improve the understanding of the impacts, adaptation and mitigation of climate change. An important axis of this knowledge is the non-separation of the empirical and objective from the sacred, an area in which the spirits of their ancestors participate in every action that is undertaken with nature.

This ancestral knowledge is manifest in the use and management of water by indigenous peoples in the high Andean wetlands, of the “bofedales”, threatened by climate change. These wetlands are important for maintaining biodiversity and act as sponges that mitigate the lack of water in dry seasons. The surface of these wetlands is due to the work, in large part, of the irrigation system based on the ancestral knowledge of Water Sowing and Harvesting techniques, in a cultural context where water and the water-providing mountains are central axis of these millenary culture.

INTRODUCCIÓN

La ancestralidad ha emergido con fuerza, superando en precisión al concepto de tradición. La tradición es un reservorio, una fuerza a la que recurrir, una fuente de identidad históricamente configurada y una fuente que otorga una sensación de seguridad, especialidad o diferencia (Grabur, 2008). La importancia, interés y valoración del conocimiento tradicional se puede situar en la década de 1980, cuando surge la “etnociencia”, disciplina situada en la frontera entre las ciencias de la naturaleza y las ciencias sociales que tenía como objeto las relaciones de los seres humanos con la naturaleza (Beaucage, 2000). En los años siguientes, la ancestralidad tuvo un gran avance en el estudio de las culturas, esta vez en términos de *conocimientos indígenas*, para el desarrollo sostenible, lo que generó un cambio revolucionario en el paradigma de la cooperación internacional para el desarrollo. A partir de entonces se ha fomentado el interés de obtener más conocimientos sobre las prácticas indígenas y locales sobre el uso de los recursos naturales desde una perspectiva ecológica. A la vez que se había instalado en las ciencias sociales una similitud entre el *saber tradicional* y el *saber ancestral*. Sin embargo, el concepto tradicional ha sido problemático, se le ha concebido con el objetivo de establecer diferencias con las sociedades modernas o civilizadas, denota formas de vida simples, “salvajes” y estáticas. Pesa sobre el uso del término conocimiento tradicional, el significado que se le atribuyó en el paradigma del dualismo económico *tradicional-moderno*, donde el primero fue igualado a lo *atrasado* y *subdesarrollado*, por tanto, debería ser superado por lo moderno o *desarrollado*. El hecho de atribuir un supuesto agotamiento de las tecnologías tradicionales, y con ello considerarlas como un freno para el desarrollo rural, ha propiciado las políticas orientadas a la transferencia de tecnologías “científicas”. La tradición, por oposición al cambio, debía ser desechada o destruida, pues las personas no debían seguir atadas por la tradición. De hecho, la tradición se convirtió en sinónimo de lo que estaba siendo superado por la ciencia o modernidad (Grabon, 2001). El conocimiento tradicional tendría un carácter impreciso, al incorporar tanto las prácticas de las comunidades indígenas y no indígenas de todo el mundo, como al sector rural y el urbano.

Desde mediados del siglo XX, en el nuevo marco normativo internacional de la Organización Internacional del Trabajo, con el Convenio 169 (1989), y la Declaración de Naciones Unidas sobre los Derechos de los Pueblos Indígenas (2007), los países firmantes deben reconocer los derechos de los pueblos indígenas sobre sus territorios y recursos naturales, y de todo su patrimonio ancestral, cultural y espiritual; este contexto hizo necesario crear el término *conocimiento indígena* (Warren, 1995); y en este proceso de cambio de paradigma descolonizador, emerge la valorización de las prácticas culturales, la espiritualidad y los valores tan importantes para la supervivencia, el bienestar y los estilos de vida de subsistencia en sus hábitats, que fueron ignorados por las políticas colonizadoras (Bronen y Cochrane, 2021).

El conocimiento local e indígena se refiere a los entendimientos, habilidades y filosofías desarrollados por sociedades con largas historias de interacción con su entorno natural.

Existen muchas definiciones sobre estos conceptos, con diferencias entre ellos. En la definición de conocimiento indígena de UNESCO, se asimila el concepto a lo local, lo que no es compartido por otros autores: “El conocimiento local e indígena se refiere a los entendimientos, habilidades y filosofías desarrollados por sociedades con largas historias de interacción con su entorno natural. Para los pueblos indígenas y rurales, el conocimiento local informa la toma de decisiones sobre aspectos fundamentales de la vida cotidiana. Este conocimiento es parte integral de un complejo cultural que también abarca el idioma, los sistemas de clasificación, las prácticas de uso de recursos, las interacciones sociales, los rituales y la espiritualidad. Estos sistemas únicos de conocimiento son elementos importantes de la diversidad biológica y cultural mundial y son la base de un desarrollo sostenible adaptado al modo de vida local” (UNESCO s/f). Rigoberta Menchú Tum, Premio Nobel de la Paz, el año 2013, sostiene, críticamente,

que la academia occidental ha venido denominando “conocimiento local” a los conocimientos propios de los pueblos originarios; lo que tendría una connotación racista, porque los saberes locales son conocimientos universales. Menchú, opta por saberes indígenas ancestrales: “la construcción del conocimiento es colectiva, la comunidad se convierte en investigadora, valida el conocimiento, lo mantiene y lo reproduce con el fin de que esté al servicio de todos y todas (...). El conocimiento desde la visión de nuestros pueblos no es perjudicial, se construye pensando en la vida tanto individual y colectiva, porque busca mantener equilibrio y armonía en las relaciones de los seres humanos y la comunidad; y de estos con la madre naturaleza y el universo” (Menchú, 2013). Esta construcción del conocimiento ancestral, resultado de experiencias de ensayo y error permanente, hoy constituye parte de un importante cúmulo de conocimientos heredados, que tiene la particularidad de conformar sistemas basados en epistemologías orales. Son saberes generales y

prácticos acumulados a través de generaciones, y actualizados por cada nueva generación, que orientan a las sociedades humanas en sus innumerables interacciones con su entorno (Khalifa, 2017, 2020). Aun cuando son propios de la cultura de los pueblos indígenas, serían aplicados también a las formas de producción de campesinos no indígenas, lo que mostraría prontamente las diferencias con los componentes culturales heredados, en el saber de los pueblos indígenas.

El saber ancestral, en estricto rigor, estaría circunscrito al conocimiento propio de los pueblos indígenas; sin embargo, es frecuente que en la literatura que alude al conocimiento no científico occidental se le utilice indistintamente para referir también al conocimiento de los *campesinos* o *pequeños agricultores no indígenas*. A mayor abundamiento, el concepto ancestral es confundido sin mayor cuestión, con el concepto tradicional. ¿Cuál es, entonces, la esencia de la ancestralidad? En sentido amplio, es la evocación



Trabajo colaborativo (Ayni) de la Comuna de Colchane, en Turuna (Región de Tarapacá, Chile).
Fotografía: Diego Aranibar Esteban / Iniciativa Mas Agua

de la profundidad temporal de los conocimientos. En el caso de los pueblos indígenas, la ancestralidad remite a la esencia, a la estrecha vinculación con el espíritu de sus antepasados, en los sistemas simbólicos, el lenguaje, las costumbres, las formas compartidas de pensar el mundo, y los códigos que rigen el comportamiento cotidiano, así como a los condicionantes del medio geográfico, a través de las particularidades que adquieren en el contexto de su cultura, la organización técnica del trabajo, y las formas de racionalizar la explotación específica de los recursos disponibles (Margulis, 1977, Bate, 1984). Considerando que la cultura es dinámica, también debe otorgarse importancia en la configuración de la singularidad cultural, a elementos introducidos, y que generalmente van asociados a las transformaciones que experimenta la sociedad rural, sea de población indígena o población local campesina. Los campesinos no indígenas, también poseen conocimientos que provienen de saberes heredados del pasado, pero la diferencia con los pueblos indígenas radica en el vínculo con la cultura que revitaliza la presencia espiritual de sus antepasados en las acciones, con convencimiento de la presencia de aquellos espíritus en sus actividades cotidianas entre estos últimos.

Lo cierto es que se ha intensificado el interés en los conocimientos de los pueblos indígenas, por la contribución que pueden hacer para mitigar los efectos del cambio climático. En el paradigma de la cooperación internacional para el desarrollo, se valora la necesidad de conocer más sobre las prácticas indígenas y locales del uso de recursos desde una perspectiva ecológica. Y, más allá de presentar a los pueblos indígenas como atrasados o víctimas de la pobreza, se acentúa su gran potencial de adaptación hacia el medio ambiente, característica que se pone de relieve en su capacidad para modificar conductas en respuesta a los cambios que experimenta el clima. Durante el desarrollo de la Cumbre para la Tierra en 1992 de la Organización de las Naciones Unidas (ONU), en Río de Janeiro, se ratificó también el Convenio sobre la Diversidad Biológica. La Convención, en el preámbulo, subrayó la relevancia del conocimiento indígena en tanto conforma "sistemas de vida tradicionales basados en los recursos biológicos, y la conveniencia de compartir equitativamente los beneficios que se derivan de la utilización de los conocimientos tradicionales, las innovaciones y

las prácticas pertinentes para la conservación de la diversidad biológica y la utilización sostenible de sus componentes" (Naciones Unidas, 1992).

Otro término de carácter general, que surgió en la década de los años ochenta ha sido el Conocimiento Ecológico Tradicional (TEK); este concepto sostiene que "el conocimiento indígena tradicional se refiere al saber y *know how* acumulados a lo largo de las generaciones, y renovados por cada nueva generación, que guían a las sociedades humanas en sus innumerables interacciones con su entorno circundante" (Nakashima *et al.*, 2012). Si bien valora el conocimiento indígena, lo hace retomando el término tradicional, concepto muy discutido como hemos señalado, en las ciencias sociales.

El Conocimiento Ecológico Tradicional se aplica para describir el conocimiento que tienen las culturas indígenas sobre su entorno inmediato natural en el marco de un conocimiento holístico o visión del mundo (Berkes, 1993); esta cosmovisión contrasta con el mal manejo de una variedad de paisajes naturales que han sido alterados y que, en muchos casos, ha ocasionado la pérdida de especies y su hábitat, y puesto bajo presión recursos naturales y escasos como el agua. Como respuesta a este tipo de situaciones, en tiempos más bien recientes, la ciencia occidental moderna ha vuelto la mirada hacia el conocimiento acumulado por miles de años, reconociendo en ello que, combinado con la ciencia occidental será una forma legítima de entender el mundo físico (Aikenhead y Elliot, 2010).

Estas diferentes conceptualizaciones tienen el mérito que destacan un aspecto clave, el componente de conocimiento observacional local de las especies y otros fenómenos ambientales, un componente de la forma, práctica, en que las personas llevan a cabo sus actividades que involucran el uso de recursos y, además, un componente de creencia sobre cómo las personas encajan o se relacionan con los ecosistemas (Berkes 1999, en Berkes, *et al.*, 2000). Lo cierto es que, a diferencia de la ciencia, el conocimiento indígena no opone lo secular a lo espiritual, y por lo tanto no separa lo empírico y objetivo de lo sagrado e intuitivo. En sociedades indígenas, tales fronteras son permeables (Nakashima y Roué, 2002).

ANCESTRALIDAD EN LA GESTIÓN CULTURAL DEL AGUA EN LOS ANDES DEL NORTE DE CHILE: SIEMBRA Y COSECHA EN BOFEDALES

Las culturas andinas desarrollaron tempranamente conocimientos en ingeniería hidráulica, como han sido señalados desde los primeros años de la conquista, por varios y diversos autores, con la presencia de obras de irrigación: acueductos, canales, acequias, represas, reservorios y diques, en los valles de la costa y valles interandinos de la sierra (Ravines, 1978). Dos importantes evidencias arqueológicas señalan el origen de las técnicas de captaciones, traslados, almacenamientos, y retener la humedad. Una, es Caral, al norte de la ciudad de Lima, hace 5.000 años (Shady, 2006); y la otra, Chavín que hace 3.000 años contaba con un extenso sistema de drenaje de canales subterráneos (Rick et al., 2012). La ingeniería hidráulica pre inca e inca (XIV-XV), se extendió hacia diferentes regiones, como ocurrió en el norte de Chile, representada en canales, sistemas de drenaje, represas y andenerías, en la precordillera (alrededor de los 3.000 m s.n.m). Si bien, no hemos encontrado referencias sobre el sistema de riego de bofedales, es posible que ello se deba a su invisibilidad, dada la inexistencia de infraestructura física manifiesta, lo que invisibiliza la gestión del agua que sí se aplica en ellos. En este trabajo se presentarán algunas conclusiones sobre el sistema de riego y manejo de los bofedales, como una aproximación a los principios que sustentan las técnicas de Siembra y Cosecha de Agua, proceso mediante el cual el ser humano recolecta e infiltra (siembra) el agua de lluvia, escorrentía superficial, hipodérmica y subterránea en el subsuelo para poder recuperarla (cosecharla) un cierto tiempo después. (Martos-Rosillo et al., 2020).

En las primeras sociedades complejas de Los Andes, existen “evidencias de obras hidráulicas destinadas tanto a la defensa de las márgenes de los ríos (...) como a encauzar sus aguas, conservarlas o almacenarlas en represas” (Ravines y Solar 1980). Estas obras ingenieriles se complementaban con una sofisticada trama cognoscitiva y ritualística en la búsqueda por la sobrevivencia, cuando el hombre decide ascender y avanzar junto al ganado por zonas montañosas y desérticas. Simultáneamente con establecer

Los cultivos se practican en los andenes con muro de enrocado acondicionado a la pendiente del terreno, práctica muy utilizada por la cultura Inca, que permite aprovechar eficientemente el agua de riego.

cierta territorialidad y algunos asentamientos, fue plasmando de significados su mundo circundante, a la vez que se sometía a los designios de las veneradas alta cumbres de cerros personificados y a las fuerzas de la naturaleza, preservando en un lugar importante de la mitología el culto a los antepasados. En este sentido las ceremonias propiciatorias, parte de la ideología andina, pueden ser consideradas como un sistema adaptativo más, destinado a coadyuvar en la extracción de energía del medioambiente de manera efectiva. Se conformó así una cosmovisión donde el agua, siendo un elemento central mantiene una gran vinculación con los camélidos en los ritos propiciatorios, donde la sangre y la grasa de éstos son sustancias de la vida (Greslou, 1989). Por ello, las ceremonias a la naturaleza se inician con una wilancha, sacrificio de un llamo blanco, preferentemente, como ofrenda a la madre tierra. En esta cosmovisión, que requerirá de mayores estudios, las montañas concebidas como depositarias del agua y por tanto responsables del caudal de ríos y vertientes son invocadas con éstas y otras ofrendas en cada ceremonial correspondiente a hitos elementales del ciclo productivo anual. Podría ser que sean las mismas llamas las que se encuentran al interior de los cerros más elevados, como ocurre en Paratía, por ello la manera de aumentar el rebaño es invocándolas para que salgan a la tierra (Flores Ochoa, 1977).

La zona a la que se hará referencia comprende un extenso territorio semidesértico de las montañas del extremo norte de Chile entre los 17°50' y 26 ° L.S., en la vertiente occidental de la cordillera de Los Andes, el altiplano.

Figura 1.

Detalle de algunos de los canales de distribución del agua superficial en el bofedal de Parinacota



Esta es una inmensa planicie o llanura elevada, a un promedio de 3.700 m.s.n.m.; tiene cerca de 300 km de ancho y unos 1.500 km de largo, y se extiende desde los 15° hasta los 27° de latitud sur (Charrier y Muñoz, 1997). Entre los 4.000 a 4.800 ms.n.m. se encuentra la ecorregión denominada Puna, donde se han formado importantes sistemas de humedales: glaciares, lagunas, pastos húmedos, bofedales, vegas de altura, salares y turberas. Los bofedales son praderas naturales en planicies, donde se almacena el agua proveniente de las lluvias estivales y de las aguas subterráneas, asociada a riachuelos provenientes de glaciares y el derretimiento de nieve (Squeo et al. 2006); se desarrollan en zonas de anegamiento permanente, lo que les hace dependientes de la presencia de agua corriente para el adecuado suministro de oxígeno, como también para el lavado de sales (Wright, 1963). Forman micro relieves ondulados con ciertas especies predominantes como *Oxychloe andina* (pak'ó), *Distichiamuscoides* (pak'io hembra), *Patosiac fr. clandestina*, *Scirpus atacamensis*, *Deyeuxia Chrysantha*, *Deyeuxia velutina*, *Carex sp* (Castro Lucic et al. 1993). Se les encuentra, en relación al gradiente hídrico, desde estado flotante, emergentes o sumergidas, hasta el borde o límite de la vegetación zonal (pajonal o tolar).

Un catastro de humedales de la Puna arrojó un total de 435 unidades. Siguiendo la secuencia de las cuencas en sentido norte-sur, entre los 17° L.S. y 20° L.S., se extiende la zona de puna húmeda, donde se identificaron 209 humedales de diferentes dimensiones y localización. Al sur de esta zona, hasta los 25° L.S. aproximadamente, en la puna seca y salada, se catastraron 226 humedales, pero un número muy escaso de bofedales, como consecuencia de la menor cantidad de precipitaciones y mayor salinidad (Castro Lucic, M. et al. op.cit).

El hábitat de estos pueblos andinos abarcó una extensa zona cuya geografía; el perfil altitudinal muestra entre la costa y las altas cumbres, tres pisos ecológicos claramente diferenciados: altiplano (4.000 ms.n.m.), precordillera (3.000 ms.n.m.) y valles costeros.

Alrededor de los 3.000 metros, en la precordillera, área montañosa donde los cursos de agua en pequeñas quebradas dan vida a valles más cálidos, aptos para la agricultura, posibilitaron la conformación de pequeños poblados de agricultores en grandes extensiones de suelos aterrizados, andenerías que cuentan con

complejas redes de irrigación controladas por la organización comunal. El tercer nivel, corresponde a los valles costeros, en cuencas que nacen en la precordillera. En cada uno de los dos pisos ecológicos, precordillera y altiplano, se utilizan diversos sistemas ancestrales de riego, con represas, manejo de las pendientes, y control de los procesos de infiltración del agua.

En el altiplano, los glaciares, ríos, lagos y lagunas, han dado origen a bofedales que se encuentran dispersos en zonas más bajas. Son numerosos los afloramientos de agua que dan orígenes a formaciones de bofedales de diferentes tamaños. Las lluvias y los glaciares dan origen al complejo lacustre Chungará-Cotacotani, que además de proveer el agua que da origen a los bofedales, tiene una connotación sagrada (Fig. 2). En el lago Chungará estaría el origen de los camélidos, "un pago con un ritual cruento sería necesario para capturar los llamos o alpacas que salgan de él". Estos sistemas de aguas subterráneas y superficiales se refuerzan por la sacralidad que se les ha otorgado, donde la interconexión es parte del conocimiento ancestral. Los cerros protectores de cada comunidad, proveedores el agua, gozan de un alto reconocimiento. Todos ellos son venerados y recordados en cada ritual que acompaña las diferentes fases de su ciclo productivo anual.

El manejo del agua en los bofedales que hacen los pastores, se inicia desde que el agua ingresa al bofedal, quienes la guían por surcos (acequias) que han abierto previamente. Aplican técnicas de conducción y almacenamiento con canales surcados en la misma vegetación y pequeñas represas. Estas acciones generan una red de canales con el objetivo de inundar toda la superficie requerida. Las pequeñas represas tienen como objetivo elevar el nivel freático y así aumentar el caudal, y también desviando las aguas hacia zonas más altas y elevadas donde no llega el curso natural de las aguas a objeto de ampliar la superficie del bofedal; para ello proceden a "plantar champas" de bofedal.

En otros tiempos, cuando había más ganadería, ampliaban el bofedal, llevando el agua hasta las orillas secas, sin bofedal, donde regaban constantemente para conseguirlo. Esta práctica demuestra que la superficie de los bofedales era, la mayoría de las veces, producto del trabajo humano. El manejo de los humedales también contempla los cambios

Figura 2.

Lago Chungará (4.500 m s.n.m.)



En el altiplano, los glaciares, ríos, lagos y lagunas, han dado origen a bofedales que se encuentran dispersos en zonas más bajas.



estacionales. Todos los años, en el mes de mayo, al inicio del tiempo invernal, cuando la temperatura puede llegar a los -20° , cierran las represas para evitar que el bofedal se congele, desviando toda el agua al curso del río. En primavera, en el mes de septiembre, se inicia el ciclo de riegos nuevamente. Durante los meses de diciembre a marzo, el bofedal se riega con las abundantes lluvias estivales provenientes de la cuenca amazónica. La suave topografía de las cuencas endorreicas del altiplano que drenan hacia Bolivia, permite las infiltraciones de agua proveniente de lagos y las lagunas, y la conformación de los bofedales, y es posible que nutran las zonas húmedas ubicadas en las cabeceras de las quebradas que surgen más abajo,

hacia la costa. Son quebradas que dan origen a una serie de pueblos que se encuentran a menor altura, en el piso precordillerano.

Este bofedal se encuentra, en la cuenca del Río Lauca que pertenece a la cuenca endorreica del Sistema Titicaca-Desaguadero-Poopó-Salar de Coipasa. La emigración hacia las ciudades costeras fue generando, a partir de los años cincuenta, cambios en el manejo de los bofedales. Antiguamente, cuentan, la organización del riego era colectiva, con ceremonias a los cerros proveedores del agua, los canales principales debían ser limpiados por todos los usuarios; en los años ochenta, el riego se había vuelto individual y las ceremonias se

habían replegado a los predios familiares. Se podían apreciar los efectos de la emigración.

El altiplano es una zona preferentemente de crianza de ganadería de camélidos, llamas (*Lama glama*) y alpacas (*Lama paco*); los asentamientos de los pastores se encuentran dispersos, siguiendo el patrón de distribución de los humedales.

LA PRESENCIA DE LOS ANCESTROS

Los saberes ancestrales de los pueblos indígenas de las montañas andinas han hecho posible la ampliación de la superficie de los humedales, con prácticas milenarias del uso, manejo y significado del agua. Claramente, los sistemas de valores, conocimientos y prácticas únicas, han sido ignoradas en los estudios de gestión y visión andina del agua. Es urgente arrojar luz sobre la existencia de una antigua gestión de las aguas subterráneas, heredadas de los ancestros; estas prácticas comienzan y terminan con rituales, ofrendas e invocaciones a las deidades, incorporándolos en las prácticas de gestión de las aguas subterráneas. La fe en las fuerzas sobrenaturales fortalece el sentido de unidad, de pertenencia y aumenta la resiliencia de la comunidad (Yapa, 2016). De los espíritus ancestrales depende la armonía cósmica, ellos protegen a los miembros de las comunidades de enfermedades y calamidades y aseguran el éxito en todos los aspectos de las actividades comunitarias. El culto a los cerros, proveedores del agua, es una práctica que trasciende los pueblos indígenas de América; el compromiso humano con los espíritus ancestrales juega un papel central en las prácticas y cosmologías chamánicas de pueblos indígenas de otros continentes. Los cerros son residencia de poderosos espíritus de sus antepasados asociados a la tierra, la fertilidad o las lluvias; poseen dos figuras diferentes, unos son protectores y reciben la denominación de *achachila* y *machula* en el rol de abuelos, y *awkillu*, padre; los otros son los *apu*, *wamanio mallku*, les corresponde a jefes del ámbito político, parecería ser una elección que valoriza más el papel de ordenador y dirigente de la deidad (Martínez, 1983). En Perú, reciben los nombres de *apus*, *wamanis* o *awkillu*, y en Bolivia y Chile *achachilas* o *mallkus*. Estas entidades tutelares, con poderes sobrenaturales, no sólo han modelado el paisaje, también controlan los fenómenos meteorológicos, custodian a plantas y animales, incluso los depósitos mineros. Es por ello,

que, a través de rituales, diálogos y ofrendas, se les invoca para propiciar las lluvias y buenas cosechas. Las ofrendas y el sacrificio de animales constituyen “pagos” que las comunidades hacen a las entidades tutelares que en ellos habitan a fin de mantenerlos satisfechos, porque un cerro hambriento o un cerro furioso es difícil de aplacar (Gil García y Fernández Juárez, 2008).

DISCUSIÓN Y CONCLUSIONES

El conocimiento ancestral es propio de los pueblos indígenas; su esencia es buscar el equilibrio de las relaciones entre los seres humanos y de éstos con la naturaleza y el universo, bajo la tutela de los cerros sagrados, lugar donde habitan los espíritus de sus antepasados, “sus abuelos”. Son los proveedores del principal componente de la naturaleza que hace posible la vida, el agua. Es, por tanto, el concepto que contiene todo el significado y valor del saber indígena. Y más aún, cuando hoy la ancestralidad ha adquirido un papel preponderante, en el reconocimiento de los derechos de los pueblos indígenas.

Los saberes ancestrales han recibido un reconocimiento no esperado después de siglos de negación, hoy han sido llamados para enfrentar el cambio climático. Sin embargo, la efectividad está condicionada por varios factores, como la claridad del concepto, la diferencia entre sus portadores indígenas y campesinos no indígenas o los límites de este conocimiento. En el conocimiento ancestral indígena, las personas son portadoras de una cultura que revitaliza la presencia espiritual de sus antepasados en cada acción de relaciones con la naturaleza, con el convencimiento de la presencia de sus espíritus en sus actividades cotidianas. Sus ancestros viven junto a ellos. Los campesinos no indígenas generalmente conservan un conocimiento heredado de sus antepasados, ligado a las actividades productivas, pero no está asociado al respeto y reconocimiento de su presencia en la vida diaria. Entre los indígenas, las técnicas cotidianas se mezclan con técnicas mágicas, un conjunto de acciones, instrumentos y prácticas que buscan dominar las fuerzas sobrenaturales para producir determinados efectos en ellas (González Casanova, 1987).

Los pueblos indígenas han demostrado tener una fina percepción de los efectos del cambio climático, como es la reducción del hielo en los glaciares o la disminución



Bofedal de Caquena (Chile).
Fotografía: Luciano Mateos

de las lluvias. Por lo que resulta muy significativo que se haya desarrollado un interés por conocer, promover y valorizar el conocimiento ancestral, especialmente las tecnologías hídricas. Sin embargo, aún cuando la ancestralidad ha sido revalorada en la agricultura ante los desafíos que plantea el cambio climático, la tendencia es capturar preferentemente los aspectos relacionados sólo con la experiencia y conocimientos tecnológicos de los pueblos originarios a escala mundial (ONU, 2019), ignorando la interrelación de aquellas con los aspectos *organizacionales*: organización comunal, normas, autoridades, e *ideacionales*: los valores como la reciprocidad y la complementariedad y la significación mágico religiosa del agua. La tecnología andina es bidimensional: considera siempre una dimensión simbólico-religiosa, como complemento de la dimensión empírica (Condori y van Kessel, 1992).

Varios acontecimientos han dotado de poder simbólico a los pueblos indígenas, en especial el Convenio N°169 de la OIT, y la Declaración de Naciones Unidas sobre los derechos de los pueblos indígenas, fortaleciendo sus identidades y movilizaciones. Los pueblos indígenas también han recibido un creciente respaldo de parte de aquellos organismos internacionales cuyo objetivo es la protección de la biodiversidad, la alimentación, la salud y el medioambiente. En estas resoluciones se ha sostenido que el manejo de los recursos efectuado por parte de los pueblos indígenas es invaluable; y así ha quedado demostrado en diversos estudios sobre la conservación de la biodiversidad biológica, la diversidad genética, el perfeccionamiento de los cultivos y el conocimiento de plantas medicinales. En 1992, el Convenio sobre la biodiversidad establece

las obligaciones de cada parte contratante: “Con arreglo a su legislación nacional, respetará, preservará y mantendrá los conocimientos, las innovaciones y las prácticas de las comunidades indígenas y locales que entrañen estilos tradicionales de vida pertinentes para la conservación y la utilización sostenible de la diversidad biológica y promoverá su aplicación más amplia, con la aprobación y la participación de quienes posean esos conocimientos, innovaciones y prácticas, y fomentará que los beneficios derivados de la utilización de esos conocimientos, innovaciones y prácticas se compartan equitativamente” (Art.8, J).

En el escenario político y científico, la crisis ambiental ha llevado al cuestionamiento de los límites de la modernidad, de la ciencia y la tecnología. La pobreza y la injusticia social se asocian directa o indirectamente, con el deterioro ecológico, y con las políticas de exclusión económica, política, social y cultural. En respuesta al paradigma globalizador y homogeneizante, se ha comenzado a valorar la heterogeneidad, la diversidad, la complejidad ambiental y el entrecruzamiento de saberes en relaciones de interculturalidad.

Entre los pueblos andinos la particularidad fundamental recae en la noción de ancestralidad que acentúa la evocación de sus antepasados remotos, de quienes los miembros de una comunidad asumen descender, representados aquéllos como espíritus guardianes de la comunidad, mercedores de cultos, portadores de una fuerza conservadora del orden social y territorial que une, en respetuosas relaciones de reciprocidad al individuo con su comunidad y a una tierra protegida por sus ancestros (Isbell, 1997; Dillehay, 2000; Kaulicke,

2001; Millones, 2001; Gil, 2003; Muñoz y Chacama, 2006; en Muñoz, 2017). De ese conocimiento del pasado, se tienen hoy las huellas en un paisaje antropomorfizado, bajo el control de los espíritus de las altas cumbres, montañas que ocupan un lugar central en los mitos de origen, y en las prácticas cotidianas.

Frente a la escasez del recurso hídrico, producto del cambio climático, resulta necesaria la comprensión de la importancia de los conocimientos ancestrales y el rol que pueden cumplir.

Contra toda sentencia, no han desaparecido, y, por el contrario, la valoración ha aumentado profusamente. Como sostiene Greslou (1989) si las creencias y costumbres relacionadas con el agua han sobrevivido mejor a cinco siglos de transculturación, se debe a que los ritos han mantenido su vigencia, porque son importantes para la producción y porque refuerzan la cohesión de los grupos sociales. En la zona altoandina, si bien existen valiosos estudios de los humedales de las altas cuencas, son insuficientes en cuanto al conocimiento de los saberes ancestrales.

El conocimiento ancestral como parte de la cultura de los pueblos indígenas y no propiedad de un individuo, es un derecho colectivo que pertenece y beneficia a toda la comunidad, que se reproduce y conserva a través de la costumbre y las reglas de herencia del conocimiento. Los derechos colectivos de los pueblos indígenas garantizan el mantenimiento de la diversidad biológica y de los conocimientos sobre el manejo de los recursos naturales. El reconocimiento de estos derechos, constituye un importante respaldo, indirecto, para una de las demandas que más dificultades ha encontrado: la soberanía territorial y patrimonial de los pueblos indígenas. En definitiva, el conocimiento ancestral era una barrera para el desarrollo y modernización. Por cierto, que este enfoque evolucionista, llamado modernizante, recibió por los años sesenta severas críticas por su énfasis ahistórico, y por proponer que siendo la pobreza resultado de la escasez de capital y de la falta de habilidades tecnológicas, por lo que había que propiciar políticas hacia el sector rural orientadas hacia la erradicación de ese conocimiento y hacia la transferencia de modernos factores de la producción. En general, la transferencia tecnológica se ha reducido, básicamente, a la compra y adaptación de la tecnología disponible en los mercados de los países industrializados, transformando los predios agrícolas

en verdaderos espacios de experimentación. En la actualidad, el marco jurídico que reconoce los derechos ancestrales de los pueblos indígenas, reivindica el conocimiento ancestral y las prácticas tecnológicas.

La Siembra y Cosecha de Agua, llamada también "crianza de agua", en los bofedales, se realiza capturando, infiltrando y reteniendo el agua de escorrentía en el período de lluvias estivales muy intensas, por medio de la construcción de canales, represas, diques y desvíos del agua. De otro modo tomarían el curso de un riachuelo central; los diques se construyen con piedras y champas. En el altiplano hay una serie de hoyadas que sólo en épocas de lluvias se transforman de lagunas; hay otras que tienen una más larga duración. Esta tecnología se ha ido abandonando, a medida que las personas mayores que llevaban a la práctica toda la complejidad material e inmaterial de la siembra y cosecha del agua, han fallecido o han migrado a la ciudad. En este escenario cambió lentamente el sistema de pastoreo y disminuyó el número de ganado, y con ello también disminuyó el estímulo para ampliar zonas de riego.



Bofedales en Turuna (Región de Tarapacá, Chile).
Fotografía: Diego Aranibar Esteban / Iniciativa Mas Agua.

REFERENCIAS

Aikenhead, G.S. and Dean, E. 2010. An Emerging Decolonizing Science Education in Canada. *Canadian Journal of Science, Mathematics and Technology Education*. 10:4, 321-338.

Bate, L. 1984. Cultura, Clases y Cuestión Étnico-Nacional. Juan Pablos Editor. México. 141 pp.

Berkes, F. 1993. Traditional ecological knowledge in perspective. In *Traditional Ecological Knowledge: Concepts and Cases*, J. T. Inglis (ed.). Ottawa: International Program on Traditional Ecological Knowledge and International Development Research Centre. Pp 1- 9. Consultado 10 enero 2022, http://www.nafaforestry.org/forest_home/documents/TKdefs-FH-19dec06.pdf

Berkes, F., J. Colding and C. Folke, 2000, Rediscovery of Traditional Ecological Knowledge as Adaptive Management. *Ecological Applications*. Vol. 10, No. 5, pp. 1251-1262.

Bronen, R. and P. Cochrane, 2021. Decolonize climate adaptation research. *Science*. Vol. 372. Consultado 20 enero 2022. <https://www.science.org/doi/epdf/10.1126/science.abi9127>

Castro Lucic, M., M. Bahamondes, M. Jaime, y C. Meneses, 1992, *Cultura Hídrica, un caso en Chile*. UNESCO/ORCALC, La Habana. 93pp.

Castro Lucic, M., M. Bahamondes, H. Salas, P. Azócar. 1993. *Identificación y Ubicación de Áreas de Vegas y Bofedales de las Regiones Primera y Segunda*. Universidad de Chile, Facultad de Ciencias Sociales y Ministerio de Obras Públicas, Dirección General de Aguas. Santiago, Chile. 230 pp.

Castro Lucic, M. y M. Bahamondes, 1996. "Pastoreo en humedales de tierras altas del norte de Chile. Persistencia y cambios". En *Actas del 2º Congreso Chileno de Antropología*. Valdivia. 559-566.

Castro Lucic, M., 2000, "Llamereros de Puna salada en los Andes del norte de Chile". In: *Pastoreo altoandino, Realidad sacralidad y posibilidades*. J. Flores Ochoa and Y. Kobayashi editores. Plural/MUSEF; 2000: 85-109

Condori Cruz, D. y Van Kessel, J. 1992. *Criar la vida: trabajo y tecnología en el mundo andino*. Santiago, Chile. Vivarium Ediciones. 167 pp.

Convention on Biological Diversity, 2007, Artículo 8 (j): Traditional Knowledge and the convention on biological diversity. Consultado 20 diciembre 2021. <http://uis.unesco.org/en/glossary-term/traditional-knowledge>

Charrier, R. y Muñoz, N. 1997. Geología y tectónica del Altiplano chileno. En Charrier, R.(ed.) *El Altiplano: Ciencia y conciencia en los Andes*. Universidad de Chile, 23-31.

Feng Qu, 2021, Embodiment of Ancestral Spirits, the Social Interface, and Ritual Ceremonies: Construction of the Shamanic Landscape among the Daur in North China. *Arctic Studies Center, Liaocheng University, Dongchangfu District, Liaocheng 252000, China*. <https://doi.org/10.3390/rel12080567>

Gil García, F. y Fernández Juárez, G. 2008 El culto a los cerros en el mundo andino: estudios de caso. *Revista Española de Antropología Americana*. vol. 38, núm. 1, 105-113.

González Casanova, P., 1987. *La falacia de la investigación en ciencias sociales*. Ed. Océano, México. 199 pp.

Graburn, N. 2008. What is tradition? *Museum anthropology*. Volume 24, N° 2/3: 6-24.

Greslou, F. 1989. *Visión andina y usos campesinos del agua*, Lima, PRATEC. 215 pp.

Khalifa, M. 2017. Centering Ancestral Knowledges: Leadership in *Learning Environments*. Seattle, WA. 2020. Family Leadership Design Collaboratie. Consultado 25 noviembre 2021. https://familydesigncollab.org/wp-content/uploads/2020/10/Khalifa_Ancestral-Knoweldges.pdf

Margulis, M. 1977, "La Cultura Popular", en *Revista Arte, Sociedad e Ideología*. No. 2, México. 64-77.

Martínez, G. Los dioses de los cerros en los Andes. In: *Journal de la Societé des Américanistes*. Tome 69, 1983. 85-115. doi: <https://doi.org/10.3406/jsa.1983.2226>. Consultado 10 enero 2022. https://www.persee.fr/doc/jsa_0037-9174_1983_num_69_1_2226

Martos-Rosillo, S. et al. 2020. La Siembra y Cosecha del Agua en Iberoamérica; un sistema ancestral de gestión del agua que utiliza Soluciones Basadas en la Naturaleza. *Tierra y Tecnología* n° 55. Consultado 10 febrero 2022.

<https://www.icog.es/TyT/index.php/2020/02/la-siembra-y-cosecha-del-agua-en-iberoamerica-un-sistema-ancestral-de-gestion-del-agua-que-utiliza-soluciones-basadas-en-la-naturaleza/>

Menchú, R. 2013, El valor del conocimiento ancestral. En *América Latina en Movimiento*. Consultado 25 noviembre 2021. <https://www.alainet.org/es/articulo/78579>

Muñoz, I., 2017. Viviendo con los ancestros: la vida ceremonial de las poblaciones prehispánicas en el pukara de Sana Lorenzo, Valle de Azapa, Norte de Chile. *INTERCIENCIA*, diciembre Vol. 42 N° 12, 789-797.

Nakashima, DJ., McLean, K., Thulstrup, HD., Ramos, A., Rubis, JT. 2012 *Weathering uncertainty: traditional knowledge for climate change assessment and adaptation*. UNESCO and Darwin, UNU, Paris, 120 pp.



Nakashima, D. and Roué, M. 2002, Indigenous Knowledge, Peoples and Sustainable Practice. Volume 5, Social and economic dimensions of global environmental change, *Encyclopedia of Global Environmental Change*, 314–324. Consultado el 15 enero 2022. https://www.researchgate.net/publication/283363793_Indigenous_knowledge_peoples_and_sustainable_practice

OMPI. Organización mundial de la propiedad intelectual, 2010. Consultado 10 enero 2022. <https://www.wipo.int/tk/es/tk/>

ONU, 2019, *La ciencia y el conocimiento tradicional, una alianza necesaria para el desarrollo sostenible*. Consultado 20 diciembre 2021. <https://www.unep.org/es/noticias-y-reportajes/reportajes/la-ciencia-y-el-conocimiento-tradicional-una-alianza-necesaria>

Pajares Garay, E. y J. Llosa Larrabure, 2010, *Cambio climático y resiliencia en los Andes Enunciar una política educativa para la complejidad*. Foro Educativo, Lima, Perú. 95 pp.

Ravines, R. 1978, *Tecnología andina*. Instituto de Estudios Peruanos, Lima, Perú. 821 pp.

Ravines, R. y Solar, F. 1980. "Hidráulica Agrícola Prehispánica". En *Allpanchis*. N° 15. Instituto de Pastoral Andina. Cusco. Perú. 69-81.

Rick, J., Hurd, J. and J. Varga-Neumann, 2012, Chavin de Huanta, a Past Challenge to Nature, a Current Challenge to Archeological Conservation. Paper Presented at *Terra Conference*. Lima, Perú. Consultado 10 febrero 2022. https://www.academia.edu/12213071/Chavin_de_Huantar_a_Past_Challenge_to_Nature_a_Current_Challenge_to_Archaeological_Conservation

Shady, R., 2006. Caral-Supe, *La Civilización más Antigua de América*. Instituto Nacional de la Cultura, Lima, Perú. 44 pp.

Squeo, F., W. Barry, Aravena, R. and D. Espinoza, 2006. Petlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural* 79: 245-255

Troncoso, R. 1983. *Caracterización ambiental del ecosistema bofedal de Parinacota y su relación con la vegetación*. Tesis Ingeniero Agrónomo, Facultad de Ciencias Agrarias y Forestales, Universidad de Chile, Santiago, Chile, 252 pp.

UNAMBA. Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac. s/f. <https://es.scribd.com/document/333460280/Siembra-y-Cosecha-de-Agua>

UNESCO, s/f. Consultado 10 enero 2022. <https://en.unesco.org/links>

White, T. and M. Candea. 2018. Animals. In *The Cambridge Encyclopedia of Anthropology*. Edited by F. Stein, S. Lazer, M. Candea, H. Dieberger, J. Robbins, A. Sanchez and R. Stasch. Cambridge: Department of Social Anthropology, University of Cambridge. En Feng. Qu, 2021. Consultado el 20 octubre 2021. <http://doi.org/10.29164/18animals>.

Yapa, KA. (2016). Nurturing ancestral ground water recharging in the Americas. In: 7th *RWSN Forum "Water for Everyone"*, Abidjan, Ivory Coast. Consultado 28 octubre 2021. https://rwsnforum7.files.wordpress.com/2016/11/full_paper_0067_submitter_0174_a-s-yapa_kashyapa.pdf



Trabajo colaborativo (Ayni) de la Comuna de Colchane, en Turuna (Región de Tarapacá, Chile). Fotografía: Diego Aranibar Esteban / Iniciativa Mas Agua



Manejo participativo de bofedales en el Parque Nacional Volcán Isluga (Chile)

Participatory management of bofedales
in the Isluga Volcano National Park
(Chile)



Sebastián García, Bernier¹, Natalia, Piñones Valenzuela¹

¹ Corporación Nacional Forestal (CONAF), Paseo Bulnes 285, Santiago, Chile.

Manejo participativo de bofedales en el Parque Nacional Volcán Isluga (Chile)

RESUMEN

El siguiente documento trata sobre el trabajo que han realizado los guardaparques del Parque Nacional Volcán Isluga durante los años 2020 y 2021, en relación con el manejo de bofedales en los sectores de Ancuyo y Enquelga, dentro del Parque Nacional Volcán Isluga (Chile), a través de acciones de participación con las comunidades que habitan dicho territorio. Se presentan, también, convenios de colaboración con otras instituciones que fueron actores relevantes para comenzar con estas iniciativas, ya que aportaron su experiencia, profesionales y financiamiento para la contratación de mano de obra e implementos de trabajo. Además, se describe el marco teórico y los principales términos que relacionan el humedal y el trabajo realizado. Por otro lado, se expone el contexto social de los habitantes del sector, referencias del cambio en el tiempo de las prácticas ancestrales relacionadas con el manejo del agua y la relación intrínseca de los elementos de la naturaleza con el ser humano.

Participatory management of bofedales in the Isluga Volcano National Park (Chile)

ABSTRACT

The following document deals with the work carried out by the park rangers of the Isluga Volcano National Park during the years 2020 and 2021 about the management of bofedales in the Ancuyo and Enquelga sectors, within the Isluga Volcano National Park, through participation actions with the communities that inhabit the said territory. It also points out Collaboration Agreements with other relevant institutions in starting these initiatives since they contributed with their experience, professionals and financing for hiring labour and work implements. In addition, a theoretical framework is carried out in which the main terms related to the type of wetland being discussed are described, contextualizing the previously described work. On the other hand, the social context of the inhabitants of the sector is exposed, references to the change over time of ancestral practices related to water management and the intrinsic relationship of the elements of nature with the human being.



INTRODUCCIÓN

Los bofedales corresponden a un tipo particular de humedales presentes en la región altoandina (Estensoro, 1991). Estos humedales se forman sobre suelos orgánicos saturados de agua de forma permanente o estacional. Se ubican principalmente en valles o depresiones y rara vez en las laderas de cerros (Squeo *et al.*, 2006). El agua presente en los bofedales puede provenir de la lluvia, de ríos, del deshielo y de los aportes de agua subterránea (Ostria, 1987; Zavala y Cepeda, 2006). Debido a su ubicación en límites bióticos (altitud y temperatura) y composición turbosa del suelo, las plantas presentan un crecimiento lento (Körner, 2003) y la descomposición de materia vegetal es prácticamente nula (Collins y Kuehl, 2000).

De acuerdo con Yager (2009), los bofedales cumplen importantes funciones ecosistémicas, económicas, culturales y paisajísticas que comprenden: i) recarga de acuíferos, ii) acreción de sedimentos, iii) remoción de contaminantes y iv) conversión del agua de lluvia en un flujo constante de agua que alimenta a los ríos (Benavides *et al.*, 2013). Así mismo, los bofedales son el hábitat de una riqueza biológica que incluye una amplia diversidad de flora y fauna (Tellería *et al.*, 2006; Coronel *et al.*, 2007; Flores, 2013; Meneses, 2013).

El bofedal andino es uno de los recursos naturales más importantes que tienen las comunidades indígenas del norte de Chile. Durante siglos, gran parte de la ganadería indígena y fauna silvestre andina han sobrevivido gracias a su manejo. Así, desde tiempos

precolombinos, las comunidades andinas que han habitado el territorio chileno, donde hoy se emplaza el Parque Nacional Volcán Isluga, han contribuido al desarrollo ecológico del recurso hídrico, utilizando técnicas ancestrales para retener el agua mediante el manejo de bofedales. Estas comunidades mediante el ayni, sistema de reciprocidad laboral, de ayuda mutua, han logrado rescatar, mantener y expandir los bofedales, lo que ha permitido el desarrollo social y económico de estas comunidades humanas, quienes domesticaron camélidos y aprovecharon la introducción de ovinos, en tiempos de la conquista, utilizando este ecosistema, vital para su subsistencia. Se trata, por tanto, de sistemas naturales, en los que ser humano ha sabido convivir con la naturaleza, aprovechando los conocimientos ecológicos locales.

En adelante, se explicará como la Corporación Nacional Forestal (CONAF) y en especial sus guardaparques, han intentado poner en valor y, a la vez, perpetuar esta práctica dentro del Área Silvestre Protegida, Parque Nacional Volcán Isluga.

DESCRIPCIÓN DEL ÁREA DE ESTUDIO

El área de estudio se encuentra situada en el extremo norte de Chile, región de Tarapacá, comuna de Colchane, dentro del Parque Nacional Volcán Isluga y, específicamente, en algunos sectores de los bofedales de Enquelga y Ancuyo (Figuras 1 y 2).

Figura 1.

Situación de la zona de estudio



Con una superficie de 174.744 hectáreas, el Parque Nacional Volcán Isluga, cuenta con un increíble relieve de alturas y con una fabulosa flora y fauna, las cuales se extienden entre la precordillera y el Altiplano Andino.

Figura 2.

Límites del Parque Nacional Volcán Isluga



Con una superficie de 174.744 hectáreas, el Parque Nacional Volcán Isluga, cuenta con un increíble relieve de alturas y con una fabulosa flora y fauna, las cuales se extienden entre la precordillera y el Altiplano Andino. Se ubica en la región de Tarapacá, a una altitud promedio de 4000 metros y 232 km al noreste de la ciudad costera de Iquique. En él se encuentran los cerros Latarama, Tatajachura y Qinsachata (5207, 5252 y 5400 metros de altura, respectivamente) y el Volcán Isluga (5.218 m s.n.m.). Esta zona fue declarada Parque Nacional en 1967.

Los bofedales de Ancuyo y de Enquelga se sitúan en la cuenca endorreica del Río Isluga, también conocido como Sitani o Río Arabilla, que nace al pie del cerro Alpajeres (5060 m s.n.m.), formándose a partir de la unión de dos esteros. La cuenca está ubicada en la Región de Tarapacá y posee una extensión de 2440 km² de la cual 2295 km² quedan en Chile. Conserva un curso de dirección muy constante al este hasta vaciarse en la pequeña laguna Mucalliri, en el entorno del salar de Coipasa, cumpliendo un recorrido de 54 km (CADE-IDEPE, 2004).

Los bofedales altoandinos de Enquelga y Ancuyo presentan un clima de estepa de altura, con una

precipitación media de 300 mm/año, que se produce básicamente, mediante las lluvias de los meses estivales, provenientes del anticiclón Atlántico y de las nevadas, principalmente invernales, provenientes del anticiclón Pacífico.

La superficie y la altitud media del bofedal de Ancuyo es de 95 ha y 3.985 m s.n.m. mientras que en el caso del bofedal de Enquelga es de 246 ha y 3.910 m s.n.m.

En estos humedales se distinguen varias formaciones vegetales que deben ser destacadas desde el punto de vista hidrológico. Es el caso de bofedales, vegas y pajonales hídricos. Los bofedales son formaciones vegetales que presentan dominancia de las especies con crecimiento en cojín, que forman cuerpos compactos, donde destacan las especies *Oxychloe andina* y *Zameioscirpus atacamensis*, asociadas generalmente a niveles de agua subterránea permanentes y poco profundos, cursos de agua corrientes o suelos sobresaturados. Estos pueden ser salinos o no salinos, dependiendo de si el cubrimiento de sales superficiales es mayor o menor a un 5% (Ahumada y Faúndez, 2009). Por su parte, la vega es una formación vegetal en la que dominan especies

con crecimiento rizomatoso, capaz de formar un césped parejo o pequeños cojines herbáceos que no superan los 30 cm de altura. Están dominadas por *Deyeuxia velutina* y *Deyeuxia eminens* acompañadas de *Calandrinia compacta*, *Arenaria rivularis* y *Nastanthus caespitosus*. Su cobertura varía entre un 30%, en suelos más descubiertos, y sobre un 70% en sectores con mayor vegetación. El régimen hídrico se encuentra asociado a niveles freáticos superficiales o subsuperficiales. Se las puede clasificar como salinas, si su porcentaje de sales es mayor al 20% de cubrimiento y como no salinas, si es menor a ese porcentaje (Ahumada y Faúndez, 2009). Por último, las formaciones de pajonal hídrico, presentan dominancia de especies con crecimiento cespitoso, donde el estrato varía entre 40 y 60 cm de altura. Las especies dominantes para este tipo corresponden a *Deyeuxia eminens* y *Deyeuxia velutina*, con coberturas que superan el 50% en sectores con altos porcentajes de cobertura vegetal. Asociados a este tipo de formación es frecuente encontrar la presencia de un musgo característico del género *Bryum*, además de especies hidrófilas como *Potamogeton strictus*, *Rupia marítima* y *Myriophyllum quitense*. Los aportes hídricos de esta formación son variados. Se encuentran asociados a suministros hídricos estables o permanentes y niveles freáticos medios o altos. Esta formación puede clasificarse en salina o no salina, si su superficie de

aflorescimiento de sales es menor al 30% o mayor al 30%.

La captación del agua, que alimenta a los bofedales de Ancuyo y de Enquelga, se hace principalmente desde el río Isluga, el cual nace en las vertientes del sector de Pasirijo, a 16 kilómetros de distancia. Antes de la llegada del río Isluga al bofedal de Ancuyo, a la altura del caserío de Chaguane, hay una vertiente o manantial muy importante, desde donde se capta el agua de abastecimiento para seis pueblos y se distribuye por tuberías a más de 12 kilómetros de distancia. En la Figura 3 se puede apreciar a la izquierda el sector de Pasirijo, donde nace el río Isluga, y el recorrido que sigue el río hasta llegar a ambos bofedales y que, por supuesto, continúa hacia el este.

Una vez que al agua llega al bofedal de Ancuyo, esta se distribuye de forma natural y de forma artificial, mediante los canales manejados por la población local. En la Figura 4 se puede identificar los principales canales de distribución de agua en el bofedal de Ancuyo, en líneas celestes y los puntos 1, 2, 3, 4 correspondientes a los puntos desde donde se alimenta a la laguna Aravilla. El punto 5 se corresponde con el punto de desagüe de la laguna, a través de otro canal que se incorpora al cauce del río Isluga (Figura 4).

Figura 3.

Mapa de situación de los bofedales de Ancuyo y Enquelga y de las poblaciones más cercanas.



Figura 4.

Mapa de los principales canales de distribución del agua en el bofedal de Ancuyo y de los puntos de alimentación y desagüe de Laguna Aravilla.



La Laguna Aravilla recibe, además, el agua proveniente de distintas vertientes o manantiales que nacen en su interior. Esta laguna, además de presentar un elevado número de especies vegetales, es utilizada por más de 30 especies de aves, como fuente de alimentación, nidificación y refugio; servicios ecológicos que solo puede ofrecer un espejo de agua relevante y en el que la población local, gracias a sus saberes ancestrales, mediante el manejo del agua, permite mantener esta rica biodiversidad.

Agua abajo del bofedal de Ancuyo, el río Isluga se encuentra con una angostura, que una vez superada, da paso al bofedal de Enquelga, donde se repite la misma forma de distribución del agua, existiendo también, otros aportes adicionales de agua subterránea donde destacan los asociados a las Termas de Enquelga.

MANEJO DE LOS BOFEDALES

A través de los años y de conversaciones con personas locales, quienes expresan diferentes problemáticas en

su día a día, agudizadas por la condición actual de avanzada edad y despoblamiento de las localidades, se ha podido comprobar que muchas tareas de mantenimiento del entorno natural del Parque Nacional se están dejando de hacer, dado que se requiere un importante esfuerzo físico y de un número importante de personas dispuestas a colaborar. Entre estas actividades están los floreos de animales, reparaciones de viviendas, pastoreos y el manejo de bofedales. Esta última es la que se abordará en este documento.

Según lo que comparten pobladores como Don Apolinario Castro, Bernabé Vilches y Juana Flores, entre otros, quienes aún tienen ganado de alpacas, llamas y ovejas, se ha perdido la tradición del manejo de bofedal a través de aynis. El ayni es el trabajo en conjunto de varias familias, para, en este caso, la limpieza, rectificación y creación de canales, en el territorio de una familia, con el compromiso de cooperar también en los distintos sectores pertenecientes a otras familias que participan en la faena.

Hace no más de 20 años, la cantidad de población

y su edad promedio permitían mantener en óptimas condiciones los bofedales, distribuyendo el agua de una forma adecuada y efectiva. Este trabajo se realizaba normalmente en dos temporadas, otoño y primavera, según la mirada occidental, y según la mirada andina, previos a las heladas y posterior a estas, en los meses de abril, mayo y septiembre y octubre, respectivamente. Según Don Pedro Castro, guardaparque de la unidad, nacido y criado en el poblado de Enquelga y perteneciente a la etnia aymara, esos meses son los adecuados para trabajar en los bofedales, dado que el clima es más estable, al no haber lluvias ni fríos extremos que provocan congelación de flujos de agua y de los mismos cojines de vegetación, imposibilitando el trabajo. Don Pedro también indica que, durante el invierno, cuando comienzan a congelarse los cuerpos de agua, se genera un aumento en los caudales y niveles agua, de ahí la importancia de su mantención previa. Por otro lado, con las lluvias estivales claramente aumentan aún más los niveles de agua, generando zonas de inundación y aposamiento, perjudicando directamente la vegetación y al ganado doméstico. La vegetación es afectada, ya que, al estar saturada de agua durante largos periodos de tiempo, se pudre, muriendo los denominados “cojines verdes”. Por su parte, el ganado no puede acceder a las zonas de pasto y puede quedar atrapado en el fango hasta su muerte, especialmente las crías.

El diseño del trazado de los canales o camellones lo evalúa la familia que maneja cada sector del bofedal, para lo que toman en cuenta varios factores. Uno de ellos es el de la toma de agua. Puede ser directa desde alguna vertiente, o bien, la continuación o ramificación de un canal ancestral. Otro aspecto fundamental es la relación con los vecinos. Es sumamente importante acordar con los vecinos el trabajo que se va a realizar, ya que todo está conectado en el bofedal de alguna forma. También se evalúa la recuperación o arreglo de algún canal ancestral o la creación de alguno nuevo, por cambios que pudo haber en el terreno con el paso del tiempo. Cuando se hacen nuevos canales se tienen en cuenta la pendiente, la longitud y el estado del suelo, de esta forma se calcula cuanto tiempo y con cuantas personas es posible realizar la labor.

Es importante aclarar la forma en que se trabajan estos canales. Idealmente es una labor para varias personas, principalmente para optimizar el tiempo

de trabajo dentro de la chacra (bofedal), ya que en ocasiones se deben desviar los cursos de agua para trabajar con tranquilidad y estos pueden afectar a otros lugares. En estas circunstancias el trabajo se debe hacer con rapidez. Entre los participantes se distribuyen labores que varían según estado del terreno, además se genera un compartir entre todos haciendo más amena la faena. El trabajo en si busca que los canales tengan aproximadamente 40 cm de ancho y 50 cm de profundidad. Esto puede variar según el caudal o la importancia de distribución de agua. Para hacer los canales se utilizan herramientas como palas, azadones y picotas, con las cuales se hace el “champeo”, que es la extracción de un trozo de bofedal similar a un cubo, para esto se generan cortes descendentes principalmente con pala. Estas champas pueden utilizarse para tapar algún escape de agua, cerrar canales temporalmente o incluso se pueden replantar.

Si los trabajos en los canales se hacen de la forma correcta, dando la profundidad y ancho necesario, estos pueden durar un par de años sin la necesidad de mantenimiento, si bien, normalmente se realizan limpiezas periódicas, siendo así la tarea más liviana. Como se ha descrito, este trabajo se hace 100% a mano. No obstante, actualmente algunas máquinas pueden trabajar en los bordes de los bofedales donde el terreno es duro, haciendo el trabajo mucho más rápido, pero no es posible mecanizarlo dentro del bofedal, donde se sigue trabajando de la forma tradicional.

Lamentablemente, en el contexto actual, ya casi no existe apoyo entre familias y las que quedan, suelen estar formadas por parejas de avanzada edad, que reciben poco apoyo de hijos y nietos. Por lo anterior, es necesario recurrir a contratar mano de obra, principalmente jóvenes bolivianos que saben realizar este tipo de trabajos, lo que conlleva un costo económico adicional para la familia. En este contexto, el Departamento de Áreas Silvestres Protegidas de la región, durante el año 2015, trabajó en la elaboración de un plan de conservación del Parque, a través de la metodología de estándares abiertos para la conservación, donde se identificaron objetos de conservación entre los que se encuentran los bofedales y cuerpos de agua. De igual forma, el Ministerio de Agricultura a través del Servicio Agrícola Ganadero e Instituto de Desarrollo Agropecuario está

generando proyectos con los que se financian las labores de recuperación de bofedales y cuerpos de agua. Estas ayudas ya han beneficiado a un número importante de pobladores durante los últimos años, pero es importante destacar que el apoyo no llega a toda la población que lo necesita. Los motivos son diversos. La limitada capacidad logística de los equipos territoriales para llegar a todos los lugares o simplemente que las personas no califiquen con lo requerido. En este sentido conviene destacar que algunas familias no llegan a enterarse de la existencia de estos proyectos. Es en estos casos donde la iniciativa del equipo de guardaparques del PNVI es esencial.

Por último, se quiere destacar que los pobladores no solo cuidan el agua a través de prácticas como las descritas anteriormente, también existen creencias ancestrales y rituales, entre la que destaca la “rogativa de lluvia”, que se sigue haciendo en la actualidad, siendo el responsable de llevarlo a cabo el cacique del periodo, con su familia y las personas de la comunidad que deseen participar. Se realiza una vez al año, normalmente a finales de diciembre o comienzos de enero, fechas que acuerdan entre caciques de los diferentes sectores del altiplano de la comuna e incluso en coordinación con comunidades bolivianas cercanas. Es una tradición muy respetada, se realiza con mucha fe, rindiendo un tributo a la madre tierra para que los beneficie con lluvias, buenas para sus cultivos y crecimiento de vegetación. Esta ceremonia es realizada físicamente en la cumbre del cerro Coraguani frente a la laguna, en la cual existen pircas y una mesa ceremonial.

DESCRIPCIÓN DEL TRABAJO REALIZADO

Un convenio del 2020, entre la CONAF y la Corporación Norte Grande, a través de su programa “Más Agua” permitió la contratación de mano de obra y su capacitación técnica para realizar labores de limpieza y rectificación de canales en un total de 800 m lineales. En estas labores, además de los guardaparques, intervinieron siete vecinos de las poblaciones cercanas. Por otra parte, en 2021, fue la CONAF la que financió la intervención en dos sectores del bofedal, labores, que, a modo de ejemplo, se describen a continuación.

La primera intervención se realizó en el sector de bofedal de Ancuyo conocido como Laguna Aravilla, Lugar Llacho Veco. Este sector es utilizado por Leonardo Castro, Flora García y su familia. En esta zona había una zona con el agua aposada en diversos sectores, situación que impedía el tránsito de animales para pastar y generaba un alto riesgo de atrapamiento. Además, este estancamiento del agua, que impide su correcta distribución, también provoca la pudrición de la vegetación en un lado del bofedal y su desecamiento por el otro. En total, se trataba de una extensión de 86 m² aproximadamente. Como aporte de CONAF al mejoramiento del bofedal en este sector, se realizó una intervención en 426 metros de canal, en los que se realizaron labores de limpieza, rectificación, ensanchamiento y profundización. Para realizar esta labor se contrató a un proveedor quien realizó parte del trabajo, principalmente la de ensanchamiento y profundización, mientras que el resto del trabajo fue realizado por la misma familia, junto con el guardaparque Pedro Castro.

La segunda intervención se realizó en el Sector Angostura, entre Baden y Enquelga, Lugar Chullpa, utilizado por las familias de Felipe Castro, Andrés Castro, Leonardo Castro y María Segunda Mamani. En este bofedal la problemática era distinta. Había una fuerte presencia de paja de río y además existían zonas con una profunda lámina de agua que impedían el paso de los animales y que podían provocar su atrapamiento. Los problemas estaban derivados de las pérdidas de agua del canal que proviene del bofedal de Aravilla.

Reunidas las personas implicadas de la comunidad de Enquelga, se decidió reparar este canal, para lo que se contrató a distintos trabajadores para limpiar, acondicionar y extender este canal. Estas reparaciones se extendieron a lo largo de 156 metros lineales, dejando un ancho de 40 cm por 50 cm de alto. Cabe mencionar que el trabajo se realizó de forma manual, con palas, actuando sobre un área que equivale aproximadamente a 46 m². Para la CONAF, el costo monetario de la ejecución de estos manejos en bofedales fue de 425.000 pesos chilenos, más las horas de trabajo del guardaparque en gestión administrativa, coordinación con pobladores locales y apoyo en obras. A continuación, en las figuras 5, 6 y 7, se presentan algunas imágenes de los trabajos realizados.

Figura 5.

Mapa referencial de dos sectores trabajados.



Figura 6.

Pobladores y personas contratadas para trabajo.



Figura 7.

Canal reparado dentro del bofedal.



En la Figura 6 es posible ver como se extraen pajas de río, para poder trabajar directamente en el canal. Estas pajas son un muy buen alimento para el ganado y forman el hábitat de diferentes especies de aves acuáticas. Una vez despejado el tramo a trabajar se comienza con la extracción de tierra y champeos en el caso de formaciones vegetales como bofedal.

CONCLUSIONES

El manejo ancestral del agua que realiza la población local en los bofedales del Parque Nacional Volcán Isluga es esencial para su supervivencia, para el mantenimiento de su cultura indígena y para la conservación de la rica diversidad ecológica asociada a estas singulares zonas húmedas. Son los pobladores locales los que saben, dado el conocimiento adquirido y transmitido de generación en generación, las intervenciones que deben realizarse en cada rincón de estos bofedales, para hacer un uso correcto y para mantener este frágil equilibrio ecológico.

En los bofedales del Parque Nacional Villcán Isluga se está produciendo una disminución de aportes por precipitación en relación a épocas anteriores, pero existe una disponibilidad de agua constante, que proviene de las diversas vertientes que dan lugar al río

Isluga. El manejo de estos aportes continuos de agua es el que debe ser aprovechado de la mejor manera, como se venía realizando unas decenas de años atrás. Es aquí donde deben acoplarse los recursos del estado y privados con los saberes ancestrales de la población local, para de esta forma, poder implementar prácticas que sean realmente efectivas, permanentes y con la adecuada pertinencia cultural.

Trabajar con recursos propios de la CONAF y de forma directa con las personas locales, en acciones de mejoramiento de bofedal, fortalece el vínculo entre la institución y la comunidad, creando confianzas que abren puertas a otros tipos de actividades participativas dentro del área protegida. Este tipo de acciones conlleva mayor esfuerzo en el trabajo administrativo y de terreno, pero, sin duda, es bien recompensado por los resultados conseguidos.

REFERENCIAS

Ahumada, M. y L. Faúndez, 2009. *Guía Descriptiva de los Sistemas Vegetacionales Azonales Hídricos Terrestres de la Ecorregión Altiplánica (SVAHT)*. Ministerio de Agricultura de Chile, Servicio Agrícola y Ganadero, SAG. 118 pp.

Benavides, J.C., D.H. Vitt and R.K. Wieder. 2013. The influence of climate change on recent peat accumulation patterns of *Distichia muscoides* cushion bogs in the high elevation tropical Andes of Colombia. *Journal of Geophysical Research: Biogeosciences*. 118(4): 1627-1635.

CADE-IDEPE. 2004. *Diagnóstico y clasificación de los cursos y cuerpos de agua según objetivo de calidad. Cuenca del Río Isluga*. 62 pp.

Collins, M.E. and R. Kuehl. 2000. *Organic matter accumulation and organic soils*. Lewis Publishers, Boca Raton, EUA

Coronel, J.S., S. Declerck and L. Brendonck. 2007. High altitude peatland temporary pools in Bolivia house a high cladoceran diversity. *Wetlands*. 27(4): 1166-1174.

Corporación Nacional Forestal, CONAF, 2015. *Insumos para la elaboración del Plan de Conservación de Bofedales en el Parque Nacional Volcán Isluga*. Departamento Áreas Silvestres Protegidas CONAF Región de Tarapacá.

Estensoro, E.S. 1991. Los bofedales de la cuenca alta del valle de La Paz.. En: Forno, E. & M. Baudoin (Eds.) *Historia Natural de un Valle en los Andes*. UMSA, Instituto de Ecología. La Paz, Bolivia. 109-121

Flores, A. 2013. *Ecomorfología y ecología alimentaria del*

género Orestias (Pisces Cyprinodontiformes) en la puna xerofítica de la provincia Sud Lípez. Potosí Bolivia. Tesis de licenciatura en Biología. Universidad Mayor de San Andrés, La Paz, Bolivia

Körner, C. 2003. *Alpine plant life: functional plant ecology of high mountain ecosystems*. Springer Science & Business Media.

Meneses, R. 2012. *Estado de arte de los bofedales en la Cordillera Real en el área que abarca la cuenca de Khara Kota hasta la cuenca de Choqueyapu*. Herbario Nacional de Bolivia & Unidad de Limnología. Banco Interamericano de Desarrollo (BID). La Paz, Bolivia. 102 p

Ostria, C. 1987. *Phytoecologie et paleoecologie de la vallee Alto-Andine de Hichu Kkota (Cordillere Orientale, Bolivie)*. Ph.D. Thesis, Universidad de París, París, Francia

Squeo, F.A., B. G. Warner, R. Aravena and D. Espinoza. 2006. Bofedales: high altitude peatlands of the central Andes. *Revista Chilena de Historia Natural*. 79(2): 245-255.

Tellería, J.L., J.L. Venero and T. Santos. 2006. Conserving birdlife of Peruvian highland bogs: effects of patch-size and habitat quality on species richness and bird numbers. *Ardeola*. 53: 271-283.

Yager, K.A. 2009. *A herder's landscape: deglaciation, desiccation and managing green pastures in the Andean puna*. Ph.D. Thesis, Yale University, USA.

Zavala, H. and J. Cepeda. 2006. Caudales ecológicos en vegas altoandinas: un estudio de caso. En: Geoecología de los Andes desérticos. La Alta Montaña del Valle del Elqui. La Serena. 525-551

Evaluación preliminar de los recursos hídricos para la Siembra de Agua en la cuenca del río Palomino (Colombia)

Preliminary assessment of water resources for Water Sowing in the Palomino River basin, Colombia



Jorge Julián Vélez-Upegui¹, Jeannette Zambrano-Nájera¹,
Jorge Jódar², Sergio Martos-Rosillo³

- 1 Universidad Nacional de Colombia Sede Manizales. Instituto de Estudios Ambientales. Departamento de Ingeniería Civil. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Carrera 27 # 64-60 Manizales, Colombia. jjvelezu@unal.edu.co, jdzambranona@unal.edu.co
- 2 Instituto Geológico y Minero de España. C/Manuel Lasala, 44, 9°C. Zaragoza, 50006. j.jodar@igme.es
- 3 Instituto Geológico y Minero de España. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Granada, 18006. s.martos@igme.es

Evaluación preliminar de los recursos hídricos para la Siembra de Agua en la cuenca del río Palomino (Colombia)

RESUMEN

La Siembra y Cosecha de Agua forma parte de los métodos basados en la naturaleza que retoman prácticas ancestrales para un uso eficiente del agua, favoreciendo la recarga de acuíferos en períodos húmedos para su uso en periodos secos. Estimar adecuadamente la cantidad del recurso hídrico disponible en una región o cuenca es fundamental para la siembra de agua, para lo cual se utilizan diferentes modelos hidrológicos, dependiendo de la cantidad y calidad de la información. Se presenta el estudio de la cuenca del río Palomino, ubicada en la Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), donde se propone una metodología multimodelo para evaluar los recursos hídricos. Se aplican 12 modelos agregados, especialmente utilizados en cuencas con escasa información hidrológica. Se realiza una calibración y una validación para cada modelo, posteriormente se propone la simulación a largo plazo para determinar la cantidad de agua disponible y calcular los índices de regulación hidrológica. El enfoque multimodelo permite estimar la incertidumbre del balance hidrológico, que es un problema típico para las cuencas hidrológicas con poca disponibilidad de datos. El método propuesto es sencillo y puede ser replicado en otras regiones dada su versatilidad y facilidad de uso.

Preliminary assessment of water resources for Water Sowing in the Palomino River basin, Colombia

ABSTRACT

The Water Sowing and Harvesting is part of the methods based on nature that take up ancestral practices for an efficient use of water, favoring the recharge of aquifers in wet periods for use in dry periods. Properly estimating the amount of water resources available in a region or basin is fundamental for the sowing of water, for which different hydrological models are used depending on the quantity and quality of the information. The case study is the Palomino River basin in the Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia), a mountain watershed for which little hydrological data is available, as it typically happens in mountain areas. A hydrological model ensemble approach is proposed here to evaluate the water resources of the basin. The ensemble is composed of 12 conceptual lumped parameter models which are especially well suited for simulating the behavior of hydrological basins with scarce data. A manual calibration and validation are carried out for each model. Furthermore, a long-term simulation is performed to estimate available water resources while inferring the hydrological regulation indices of the watershed. The model ensemble approach allows coping with the uncertainty of hydrological balances in watersheds with little data availability. The proposed methodology is simple and may be replicated in other mountain basins.

INTRODUCCIÓN

El cambio climático, el crecimiento poblacional, los cambios de usos y coberturas del suelo, los conflictos por el uso del agua, la contaminación de las fuentes hídricas y la mala planificación de los recursos hídricos, están incrementando la demanda del recurso hídrico a nivel global y de manera no sostenible. La problemática de satisfacer esta demanda es un reto que puede ser abordado siguiendo Soluciones basadas en la Naturaleza (SbN) (Blöschl *et al.*, 2019). La Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) es una de las SbN, y se plantea como una solución inspirada en análogos naturales a los problemas generados por el incremento en la demanda del recurso hídrico y la escasez de este, cada vez más acentuada por el calentamiento global, que en zonas de montaña reduce los eventos de precipitación en forma de nieve y por ende la infiltración del agua del deshielo, que maximiza la recarga en los acuíferos subyacentes (Chen *et al.*, 2018; Pardo-Igúzquiza *et al.*, 2019; Jódar *et al.*, 2020), impactando directamente en los caudales de base de las cuencas hidrológicas asociadas.

La regulación hídrica o hidrológica (RH), ya sea natural o artificial, es el mecanismo que facilita el almacenamiento del excedente de agua durante las épocas lluviosas para ser utilizado en los períodos secos.

Las SbN son rentables y proporcionan a la vez beneficios ambientales, sociales y económicos, ayudando a aumentar la resiliencia de los ecosistemas afectados (WWAP, 2018). En este sentido, la SyCA es un sistema de gestión integral del recurso hídrico en las zonas de cabecera de las cuencas hidrológicas que garantiza la sostenibilidad de la gestión mientras satisface la demanda del recurso hídrico de los ecosistemas y usuarios asociados aguas abajo (Martos-Rosillo *et al.*, 2020).

La regulación hídrica o hidrológica (RH), ya sea natural o artificial, es el mecanismo que facilita el almacenamiento del excedente de agua durante las épocas lluviosas para ser utilizado en los períodos

secos. Desde una perspectiva de gestión, interesa maximizar la RH de manera que los caudales de base de la cuenca hidrológica se mantengan elevados y estables durante el mayor tiempo posible, de forma que permitan disponer del recurso hídrico durante la época de estiaje (Kundzewicz *et al.*, 2008; González-Zeas *et al.*, 2015; Cuevas-Moreno, 2020).

Si se pretende estimar la capacidad de RH, hay que evaluar el balance hídrico de la cuenca, para lo cual es recomendable el uso de modelos hidrológicos que capturen los principales procesos involucrados en la evolución de los diferentes términos del balance hidrológico. Estos procesos suelen ser complejos, presentan variaciones espaciotemporales y, a menudo, no son lineales con los términos del balance. Para la evaluación del balance hidrológico en zonas de montaña, donde la disponibilidad de datos suele ser escasa, se utilizan con frecuencia modelos hidrológicos agregados de tipo conceptual, también llamados modelos lluvia-escorrentía (Beven, 2012). Los resultados de este tipo de modelos están sujetos a la incertidumbre, que viene tanto de los datos medidos como de la estimación de los parámetros por parte del modelo. Los parámetros del modelo dependen de los procesos hidrológicos incluidos en la formulación del propio modelo y las ecuaciones que éste resuelve. Dado que cada modelo genera y propaga la incertidumbre de manera diferente, es difícil acotar la incertidumbre asociada a los términos del balance usando un único modelo. En este sentido, han surgido las técnicas multimodelo como herramientas para estimar la variabilidad de la incertidumbre asociada a los términos del balance (p.ej., Seiller *et al.*, 2012; Parker, 2013; Li *et al.*, 2018; Dion *et al.*, 2021)

El principal objetivo de este trabajo es evaluar los recursos hídricos disponibles mediante la modelación hidrológica agregada de tipo conceptual con técnicas multimodelo, que sirvan como insumo a las estrategias de “siembra de agua” en cuencas con información escasa y estimar la RH de la cuenca del río Palomino, ubicado en el Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta (Colombia).

ZONA DE ESTUDIO

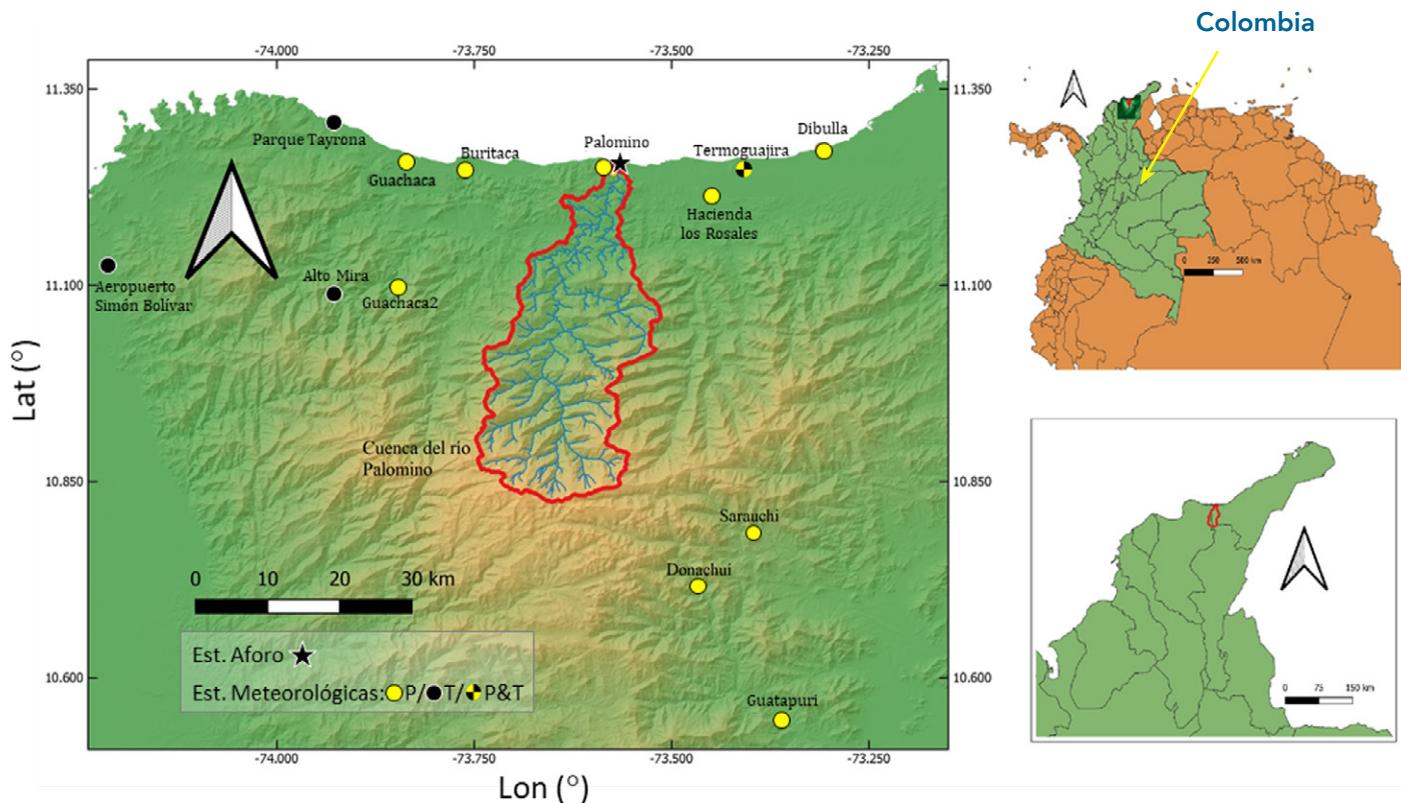
La cuenca del río Palomino es parte del Parque Nacional Natural Sierra Nevada de Santa Marta y del Parque Nacional Natural Tayrona, cuya máxima elevación es 5680 m s.n.m. Desemboca en el mar Caribe, con un área aproximada de 687,4 km² y una longitud del cauce principal de 77 km, con una pendiente media de la cuenca de 0,48, lo que indica un tiempo de concentración aproximado de 7,5 horas según la metodología presentada en Vélez y Botero (2011). En el río Palomino sólo hay una estación de aforo que se encuentra a la salida de la cuenca (Figura 1). El caudal anual promedio correspondiente al intervalo 1973-2019 es 303 m³/s, lo que equivale a una descarga al mar de 785 hm³/año. Los principales usos del agua en la cuenca son el doméstico y el pecuario, con un gran consumo de agua por parte de la minería del carbón y los cultivos de palma.



Río Palomino cuatro kilómetros antes de la desembocadura al mar. Se observa la vegetación de ribera típica del bosque tropical. Fotografía: Jorge Julián Vélez (2018)

Figura 1.

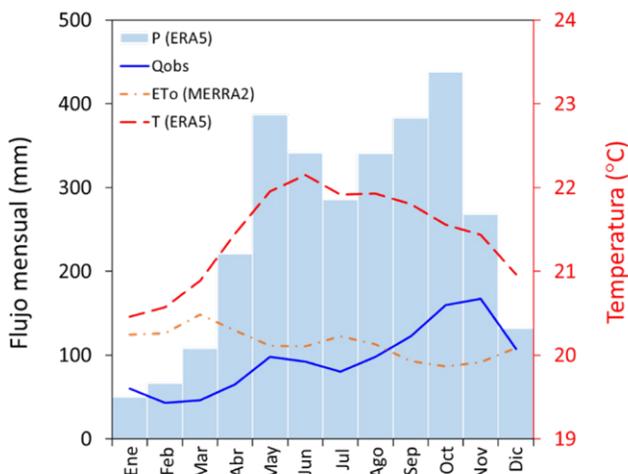
Localización general del PNN Sierra Nevada de Santa Marta y de la cuenca del río Palomino (en rojo). Se incluye la ubicación de las estaciones meteorológicas en las proximidades de la zona de estudio y las del Instituto de Hidrología y Meteorología de Colombia utilizadas en este trabajo (Buritaca, Donachuí, Sarauchi y Palomino).



La Sierra Nevada de Santa Marta es el sistema montañoso litoral más alto del mundo y el sistema más alto del mundo en la zona tropical. El clima varía gradualmente con la altitud, desde tropical (Am - Köppen Geiger; Peel *et al.*, 2007) en la costa, hasta polar (ET - Köppen Geiger; Peel *et al.*, 2007) en las cumbres de la Sierra. Esta modifica en parte el clima de la región, atrapando gran parte de la humedad que traen los vientos alisios del nordeste. En término medio, la cuenca del río Palomino presenta un régimen de lluvias abundantes, superiores a los 3000 mm/año, que se distribuyen a lo largo de una época seca y otra húmeda bien marcadas (Figura 2). Esta estacionalidad en la precipitación queda bien reflejada en el caudal de descarga medido en la estación de aforo del río Palomino. Además de una variación estacional, la precipitación también presenta una variabilidad climática interanual, la cual está asociada a la Zona de Confluencia Intertropical y relacionada con la influencia de los eventos El Niño-Oscilación de Sur (ZCIT y ENOS). La temperatura promedio en la cuenca es del orden de 21 °C, con pocos cambios estacionales (Figura 2).

Figura 2.

Precipitación (P), descarga del río Palomino medida en la estación de aforo (Qobs), evapotranspiración de referencia (ETo) y temperatura (T) mensuales promediadas para el ámbito geográfico de la cuenca del río Palomino durante el periodo 1979-2020.



MATERIALES Y MÉTODOS

Información geoespacial y series hidroclimáticas

El Modelo de Elevación Digital (MED) utilizado es del Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS; Vogelmann *et al.*, 2001) con celdas de 30 m x 30 m y disponible con libre acceso (USGS, 2021). Los parámetros geomorfométricos de la cuenca han sido estimados utilizando las herramientas del Sistema de Información Geográfica de acceso abierto QGIS SAGA (Passy and Théry, 2018).

Las series temporales que requieren los modelos hidrológicos son el caudal de descarga de la cuenca (Q), la precipitación (P) y la temperatura (i.e. temperatura máxima, mínima y promedio) (T). Los caudales de descarga Q se obtienen de la estación de aforo del río Palomino (Fig 1), que pertenece al Instituto de Hidrología y Meteorología de Colombia (IDEAM). Las series de P y T se obtienen de las estaciones meteorológicas del IDEAM en la zona de estudio (Figura 1). Cuando es necesario estas series de P y T se rellenan con los datos de los satélites CHIRPS y MERRA2, respectivamente. Para las series de P se realiza un análisis de consistencia con un análisis de doble masa. Dado que los modelos agregados requieren una única serie temporal de las variables climáticas, estas se obtienen promediando espacialmente para el centroide de la cuenca mediante los polígonos de Thiessen.

La evapotranspiración potencial (ETP) se estima usando la ecuación de Jaramillo (2006), que presenta la dependencia de la ETP promedio anual con la cota topográfica para las estaciones meteorológicas ubicadas en la zona cafetera colombiana. Los valores anuales promedio de ETP para las diferentes estaciones meteorológicas se obtienen aplicando el modelo de Penmann-Monteith (Allen *et al.*, 1998) a cada una de ellas. Dado que la ETP se obtiene como un único valor para el centroide de la cuenca, la variabilidad temporal se asigna siguiendo la misma variabilidad temporal que la serie de temperatura promedio de la cuenca.

Para el cálculo del balance hidrológico a largo plazo se complementan las series temporales de P y ETP con los datos de reanálisis provenientes de los proyectos CHIRPS (Funk *et al.*, 2015) y MERRA2 (Gelaro *et al.*, 2017). Estos datos son de libre acceso y están disponibles a través de la plataforma Climate Engine (Huntington *et al.*, 2017; <https://climateengine.org>).

Modelación hidrológica

En la cuenca hidrográfica del río Palomino no hay apenas estaciones que permitan medir la evolución de las variables meteorológicas ni su dependencia con la altitud (Figura 1). Esta falta de información a escala local obliga a usar información meteorológica de otras fuentes, principalmente de observaciones satelitales (e.g., MERRA2; Reichle *et al.*, 2017) y de modelos meteorológicos de reanálisis (e.g., ERA-5; Hersbach *et al.*, 2020). Estos datos llevan asociada una incertidumbre no despreciable que se propaga de manera natural a los resultados obtenidos con la modelación hidrológica (Jódar *et al.*, 2011). Por

este motivo y para acotar la incertidumbre en la modelación se recurre el uso de técnicas de simulación multimodelo (Velázquez *et al.*, 2010).

En este trabajo se utilizan 12 modelos hidrológicos agregados de tipo conceptual, que requieren de datos de P y ETP para estimar el flujo de descarga de la cuenca simulada mediante la resolución de un balance hidrológico. Este tipo de modelos suele presentar una estructura jerarquizada de zonas de almacenamiento de agua, también conocidas como tanques, que permiten flujos de transferencia entre ellas, y a las cuales les afectan diversos procesos hidrológicos como pueden ser, entre otros, la interceptación, evapotranspiración, la infiltración, la recarga o la descarga (Figura 3). El número de cajas de almacenamiento, su jerarquía de transferencia de flujos y los procesos hidrológicos asociados dependen de cada modelo. Cabezas (2015) presenta una descripción detallada de los modelos conceptuales más utilizados en la bibliografía, que son los que van a ser utilizados en el presente trabajo (Tabla 1).

Figura 3.

Modelo general de balance de un modelo agregado con cuatro cajas de almacenamiento donde se incluyen algunos de los procesos que influyen en el balance de masas del sistema y la respuesta de este en términos de descarga.

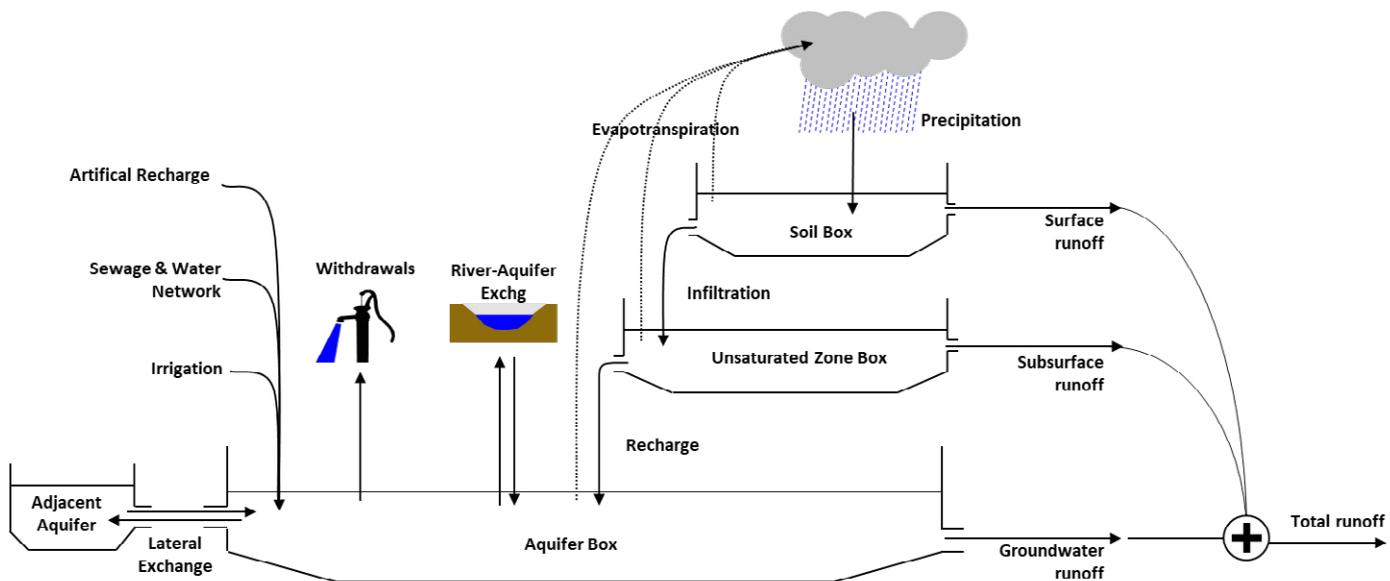


Tabla 1.

Modelos agregados utilizados en el presente trabajo.

Modelo	Num. Tanques ^(a)	Num. Par. ^(a)	Discret. Temp. ^(c)	Referencias
SHIA	4	9	Diaria	Vélez (2001); Cabezas (2015)
GR4J	3	4	Diaria	Pierrin et al. (2003)
HBV	3	7	Diaria	Bergström (1976); Siebert (2005); Cabezas (2015)
SIMHYD	3	7	Diaria	Chiew et al. (2002); Cabezas (2015)
Témez	2	4	Mensual	Témez (1977); Cabezas (2015); Jódar et al. (2017)
GR2M	1	2	Mensual	Makhlouf and Michel (1994); Cabezas (2015)
Salas-Smith ^(d)	--	--	Mensual	Salas and Smith (1981); Cabezas (2015)
T-M ^(e)	2	3	Mensual	Alley (1984); Cabezas (2015)
Palmer	2	3	Mensual	Cabezas (2015)
abcd	2	4	Mensual	Alley (1984); Cabezas (2015)
Wapaba	2	5	Mensual	Zhang et al. (2011); Cabezas (2015)
V2M-WASMOD	1	4	Mensual	Xu (2002); Li et al. (2010)

^(a)Número de tanques de almacenamiento; ^(b)Números de parámetros calibrados; ^(c)Discretización temporal; ^(d)Salas-Smith es un modelo autorregresivo ARMA(1,1). Se puede asimilar a un modelo de dos tanques; ^(e)Thornthwaite - Mather.

Calibración de los modelos

Todos los modelos hidrológicos de tipo conceptual requieren de un proceso de calibración de los parámetros, siempre buscando que los parámetros que tienen sentido físico no lo pierdan durante la calibración, con el objeto de garantizar la coherencia de los modelos y de disminuir el efecto de la equifinalidad en los parámetros de los modelos (Her and Seon, 2018). La calibración se realiza minimizando el error entre los caudales observados y los calculados por el modelo. Para expresar el error de calibración se utilizan dos indicadores, el índice de Nash-Sutcliffe (*NSE*) y el error volumétrico porcentual (*EV*), definidos mediante las ecuaciones 1

$$NSE = 1 - \frac{1}{N} \cdot \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Cal_i} - Q_{Obs_i})^2}{\sigma_{Obs}^2} \quad (1)$$

$$EV = \frac{\sum_{i=1}^N (Q_{Cal_i} - Q_{Obs_i})}{\sum_{i=1}^N Q_{Obs_i}} \quad (2)$$

y 2, respectivamente, donde *QCal* y *QObs* son los caudales calculados y observados, respectivamente, Σ es la varianza muestral de los caudales observados, y *N* es el número de observaciones de caudal. La tabla 2 muestra los rangos de valores asociados al tipo de ajuste obtenido para cada índice.

Tabla 2.

Rango de valores asociados a los indicadores de desempeño NSE y EV.

NSE	EV	Valoración
<0.2	>20	Insuficiente
0.2-0.4	±10 a ±20	Satisfactorio
0.4-0.6	±5 a ±10	Bueno
0.6-0.8	±3 a ±5	Muy Bueno
0.8-1.0	0 a ±3	Excelente

Dada la definición de *NSE* y *EV*, la calibración tiende a minimizar esos índices sobreajustando los picos de caudal. Para garantizar que el modelo reproduce el comportamiento de la descarga de la cuenca durante los periodos de caudales bajos (p. ej., estiajes estacionales y sequías), una vez calibrado el modelo se ha de verificar que la Curva de Duración de Caudales (CDC) obtenida por el modelo para el periodo de calibración sea similar a la observada, mostrando al menos un 70 % de correspondencia entre ambas distribuciones. En el presente trabajo el periodo de calibración comprende desde octubre-1973 hasta octubre-1980 (Figura 6). Por otro lado, la validación se realiza para verificar el correcto funcionamiento del modelo calibrado para un intervalo de tiempo diferente al de calibración. En el presente trabajo el periodo de validación abarca desde octubre-1988 hasta octubre-1995.

Índices de regulación hidrológica

La regulación hídrica (RH) se define como la capacidad de una cuenca hidrológica para mantener un régimen de caudales, el cual es el resultado de la interacción entre el sistema suelo-vegetación con las condiciones climáticas y las características físicas y geomorfológicas de la cuenca (IDEAM, 2018). Esta capacidad de regulación ha de servir tanto para laminar los eventos máximos de caudal como para garantizar la descarga del caudal ecológico. Por RH se puede entender también la cantidad de agua que es capaz de almacenar la cuenca durante un periodo para liberarla más adelante en otro periodo. Para evaluar la RH se utilizan principalmente tres índices: (1) el índice de regulación hídrica (*IRH*; IDEAM, 2018), (2) el índice *Pathlength* (*LR*; Gustafson et al., 2004) y (3) el índice *Flashiness* (*RB*; Baker et al., 2004). Estos índices vienen definidos por las ecuaciones 3, 4 y 5, respectivamente

$$IRH = \frac{\bar{q} \Delta t}{V_T} \quad (3)$$

$$LR = \frac{\sum_{i=1}^N q_i - q_{i-1}^2 + t_i - t_{i-1}^2}{\bar{q} \Delta t} \quad (4)$$

$$RB = \frac{\sum_{i=1}^N |q_i - q_{i-1}|}{\sum_{i=1}^N q_i} \quad (5)$$

donde q_i es el caudal medio del día i -ésimo, de una serie temporal de caudal de longitud y promedio, y típicamente $(t_i - t_{i-1})$ equivale a un día, siendo V_T el área bajo la curva de duración de caudal (IDEAM, 2018).

El índice IRH varía entre 0 y 1, de manera que valores inferiores a 0.5 indican una RH muy baja, y por encima de 0.85 una RH muy alta. El índice LR está comprendido entre 0 y 2, indicando una variación nula o máxima, respectivamente, ante un estímulo hidrológico. No obstante, $LR < 0.2$ indican una baja regulación hidrológica. El índice *Flashiness* es siempre mayor que 0 pero no está acotado superiormente, y refleja la frecuencia y rapidez de los cambios a corto plazo en el caudal, cambios que son especialmente relevantes durante los eventos de precipitación que generan un ascenso repentino de caudal con la recesión correspondiente de caudal tras cesar el evento.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Se realiza la modelación hidrológica con los diferentes modelos. Primeramente, se lleva a cabo un proceso de calibración manual para el período de octubre de 1973 a octubre de 1980. Luego se realiza la validación de los modelos para el período de marzo de 1989 a marzo de 1996, empleando los parámetros previamente calibrados y ajustando las condiciones iniciales. Durante los procesos de calibración y validación se verifican los indicadores de desempeño (*NSE* y *EV*; Figura 4), el ajuste de la Curva de Duración de Caudal (CDC; Figura 5) y el ajuste visual entre los caudales observados y simulados (Figura 6).

Si se observa el comportamiento de los modelos desde una perspectiva estadística, y centrándonos en la CDC o curva de distribución de caudales (Figura 5), se puede observar que, tanto para el periodo de calibración como el de validación, el percentil 50 de los modelos se ajusta muy bien a los caudales observados para todo el rango de caudales, y los percentiles 10 y 90 son siempre una envolvente a los caudales observados.

Figura 4.

Resultados obtenidos por los diferentes modelos en términos de los indicadores (A) NSE y (B) EV. La línea continua, discontinua corta y discontinua larga hacen referencia a los periodos de calibración, validación y total de simulación, respectivamente.

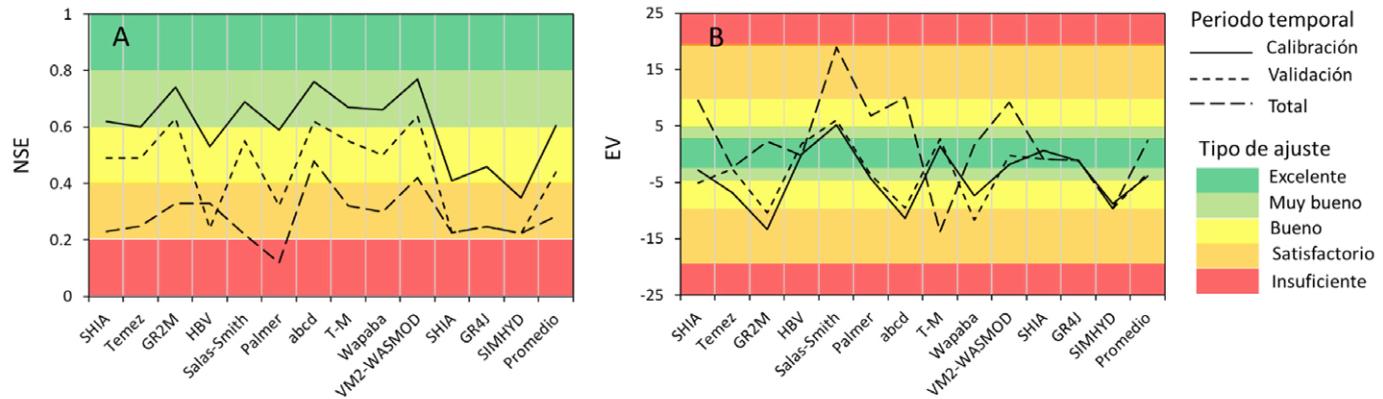


Figura 5.

Resultados obtenidos de curva de duración de caudal (CDC) para los periodos de (A) calibración, (B) validación, y (C) total de simulación. Los resultados se dan en términos de los percentiles 10 (línea discontinua larga), 50 (línea continua) y 90 (línea discontinua corta). En caso del periodo total, también se marca el caudal Q₉₅ asociado al percentil 95 de la CDC.

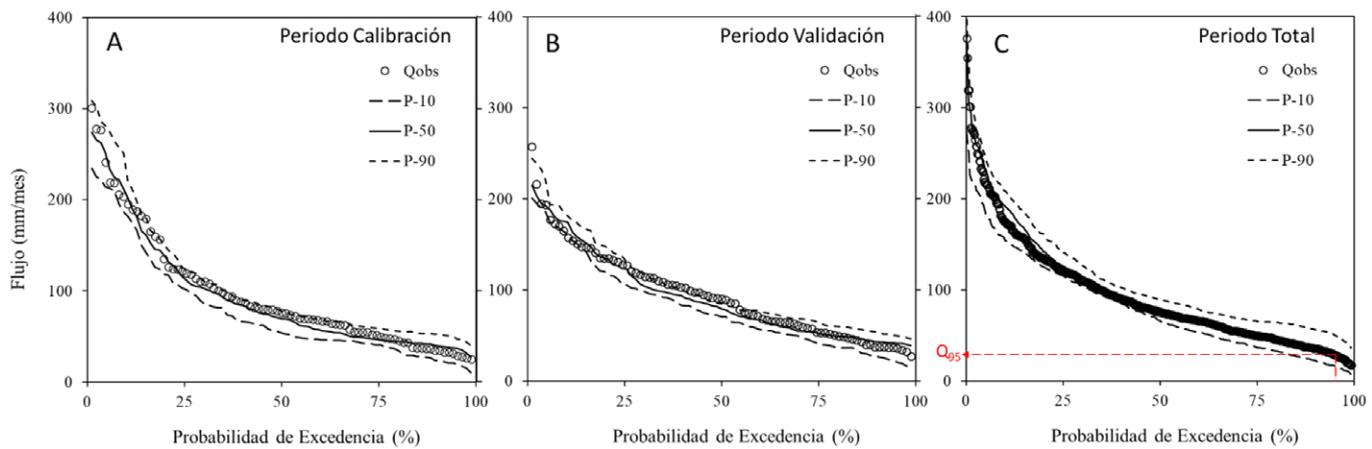
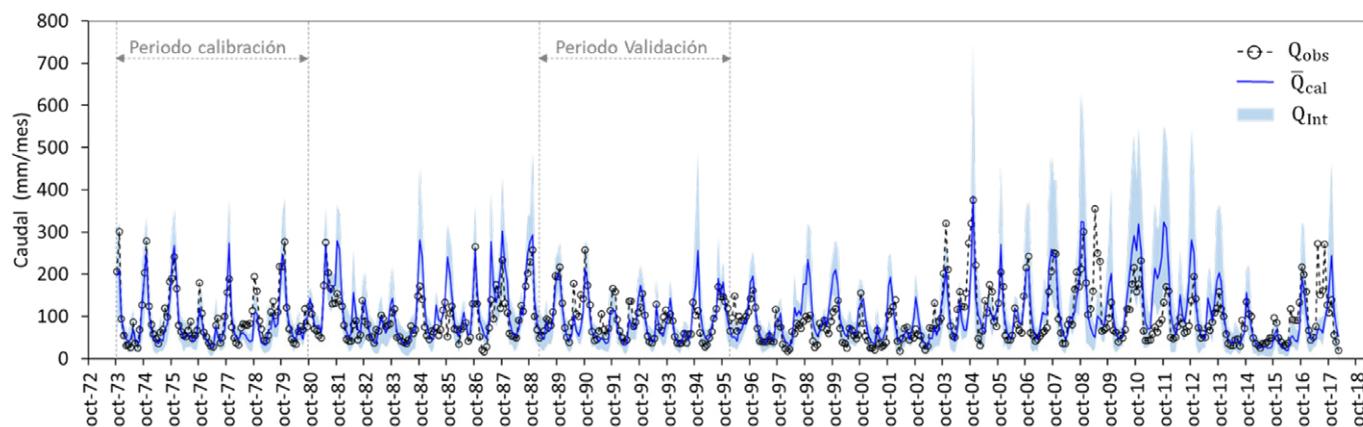


Figura 5.

Caudales medidos en la estación de aforo de Palomino, y caudal promedio para el conjunto de modelos hidrológicos calibrados en la cuenca del río Palomino. El área sombreada indica el intervalo de variación de caudal entre los diferentes modelos.



Desde una perspectiva de la respuesta de los modelos en términos de caudal de descarga, todos los modelos dan una respuesta acorde con el hidrograma observado en la estación de aforo. En este sentido, la figura 6 muestra para el intervalo total de simulación (1973-2019), el hidrograma medido en la estación de aforo y el hidrograma de la aproximación multimodelo, que se obtiene como el hidrograma promedio de los doce modelos agregados. Así mismo, se muestra el intervalo de variación de caudal asociado al hidrograma multimodelo. Este intervalo viene acotado por el caudal máximo y mínimo del conjunto de modelos para cada tiempo de cálculo. Como se puede ver, el hidrograma de la aproximación multimodelo ajusta bien el comportamiento del hidrograma observado, tanto para el periodo de calibración como el de validación.

Los resultados en términos de indicadores *NSE* y *EV*, *CDC* y de ajuste a las curvas de caudal calibración y validación son satisfactorios, y se plantea aplicar la aproximación multimodelo al periodo total de simulación. En este sentido, los resultados comentados anteriormente, en términos de indicadores, curvas de distribución y ajustes al hidrograma observado son completamente extrapolables al periodo total de simulación, obteniéndose resultados totalmente

análogos a los ya presentados para los tres criterios de evaluación considerados (Figs. 4, 5 y 6).

En la Tabla 3 se presenta para el periodo total de simulación los términos medios del balance obtenidos con cada modelo hidrológico, así como los promedios y las desviaciones estándar correspondientes. Los valores obtenidos para los términos del balance presentan una cierta variabilidad para los diferentes modelos, pero es difícil seleccionar qué modelo simula mejor el comportamiento hidrológico de la cuenca. Por ejemplo, los modelos GR2M y abcd presentan en la calibración muy buen ajuste según el índice *NSE*, muestran un mayor error en el volumen acumulado porcentual dado por el índice *EV*, y presentan flujos de base y valores de *ETR* pequeños, en relación con el resto de los modelos. Los modelos HBV y SHIA dan ajustes satisfactorios para *NSE* y *EV*, pero simulan poca escorrentía superficial. Los modelos Wapaba y Salas-Smith simulan aproximadamente el doble de flujo de base que escorrentía superficial, contrario a lo que simula el VM2-WASMOD. Siendo los modelos Palmer, T-M y HBV los que simulan la escorrentía superficial y el flujo de base con buenos indicadores. Se destaca coherencia en el coeficiente de escorrentía, que varía entre 0,50 y 0,72, con un valor medio de 0,63. Algunas de las diferencias en los términos

del balance vienen generadas por la discretización temporal con la que se resuelve la ecuación de balance, ya que los modelos con una discretización mensual pueden reducir la recarga estimada para una misma precipitación mensual acumulada respecto a la obtenida con un modelo de discretización diaria, y estas diferencias se trasladan al resto de los términos del balance. En cualquier caso, para poder resolver el impacto de la discretización temporal en los balances, y por ende en los indicadores elegidos para juzgar la bondad de cada modelo, es necesaria información de detalle en el ámbito de la zona de estudio de la que no se dispone.

El único término del balance que se puede comparar directamente con los valores medidos de una cuenca hidrográfica es la descarga total. Es fundamental que el modelo con el que se va a gestionar el recurso hídrico sea capaz de captar la variabilidad observada en este término del balance. En este sentido, la figura 7 presenta para el periodo total de simulación la variabilidad de la descarga total del río Palomino (1) estimada con cada modelo, (2) obtenida promediando las series temporales de caudal de todos los modelos (i.e. aproximación multimodelo) y (3) la correspondiente a las observaciones en la estación de aforo. Como se puede ver, la variabilidad

Tabla 3.

Resumen del balance hidrológico anual correspondiente a cada uno de los modelos a partir de la simulación para el periodo total (1973-2019) en la cuenca del río Palomino.

Modelo	Esc.Superficial (mm/año)	Interflujo (mm/año)	Flujo Base (mm/año)	ETR (mm/año)	Qsim (mm/año)	Coef.Escorr. (-)
SHIA	9.0	576.3	647.1	910.4	1232.4	0.65
GRJ4	152.1	ND	1170.3	905.8	1322.4	0.70
HBV	2.2	417.7	936.0	925.4	1356.0	0.72
SIMHYD	0.1	196.4	986.6	957.9	1183.0	0.63
Temez	177.9	ND	916.1	900.8	1093.9	0.56
GR2M	676.7	ND	473.5	790.9	1150.2	0.59
Salas-Smith	403.9	ND	933.7	603.5	1337.6	0.69
Palmer	485.3	ND	716.2	749.2	1201.5	0.62
abcd	1078.7	ND	161.9	214.8	1240.6	0.64
T-M	737.6	ND	232.6	836.2	970.2	0.50
Wapaba	342.9	ND	799.7	799.3	1142.6	0.59
VM2-WASMOD	806.4		421.6	720.3	1228.0	0.63
Promedio ^(a)	406.1	396.8	699.6	776.2	1204.9	0.63
Desv.Std. ^(b)	357.8	190.8	317.7	204.2	109.4	0.06

(a) Promedio de los valores medios de los términos del balance.

(b) Desviación estándar de los valores medios de los términos del balance.

de la descarga total en términos de los tres cuartiles (i.e., 25 %, 50 % y 75 %) asociados a cada modelo es, en general, diferente a los correspondientes a la descarga observada, pero estas diferencias se reducen al considerar la distribución de valores asociada a la serie temporal de la aproximación multimodelo. La Tabla 4 presenta estas diferencias en términos tanto de incremento como de variación relativa respecto al caudal observado. En general, los valores de los cuartiles de la aproximación multimodelo tienden a sobreestimar ligeramente los caudales observados, y en particular cuando estos caudales son bajos, una situación que se corresponde típicamente con la época de estiaje. Este resultado en la cuenca del río Palomino puede ser poco relevante dado el caudal promedio alto que descarga la cuenca. No obstante, en cuencas ubicadas en zonas áridas y semiáridas una sobreestimación del 10 % puede ser relevante en la gestión del recurso, sobre todo durante las épocas secas, ya que, en general, los caudales ambientales que dan servicio a los ecosistemas dependientes del recurso hídrico suelen estar en torno a ese porcentaje del caudal promedio. En particular, en Colombia, el caudal ecológico se estima como el caudal de permanencia en el cauce durante el 95 % del tiempo. Este valor se corresponde con el percentil del 95 % de la CDC (Figura 5C), que para el río Palomino se corresponde con un flujo de 347 mm/año, un valor que es 3.5 veces mayor que la discrepancia de caudal, para el segundo cuartil (i.e., percentil 50), entre la aproximación multimodelo y las observaciones. En este sentido, se considera interesante la estrategia multimodelo como herramienta para caracterizar la dinámica hidrológica de la cuenca del río Palomino. Como se puede observar, el método multimodelo arroja buenos resultados, a pesar de que no es posible determinar un modelo que sea sustancialmente mejor que los demás, ya todos se comportan de diferente forma y contribuyen a que el valor medio sea el más adecuado. Esta característica es especialmente interesante en cuencas hidrológicas con información escasa, y en las que la calidad de la información acerca de las características hidrogeológicas de la cuenca puede ser discutible.

Con los resultados del balance hidrológico de la aproximación multimodelo (Tabla 3) y las curvas de duración de caudales (Figura 5C) se calculan los índices de regulación hidrológica IRH (Ecu.3),

Figura 7.

Diagrama de cajas para la descarga anual de la cuenca del río Palomino calculada por los diferentes modelos, la descarga correspondiente al multimodelo (sombreado en gris), y la descarga observada en la estación de aforo (sombreado en azul).

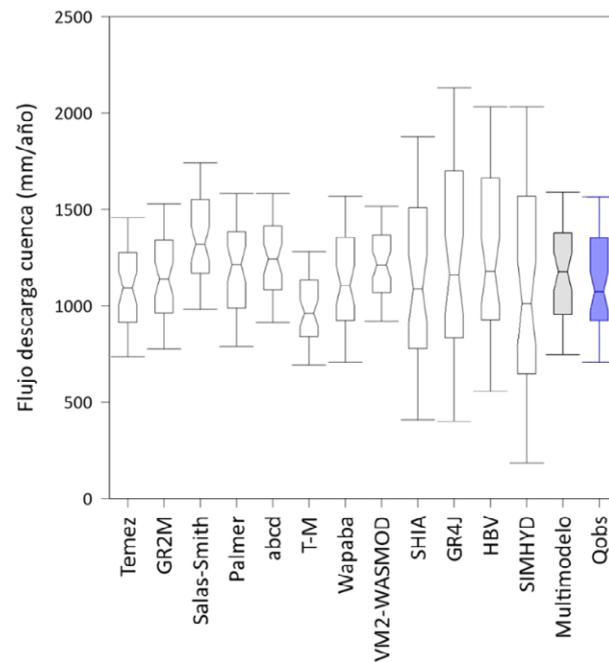


Tabla 4.

Cuartiles, incrementos y diferencias relativas entre cuartiles para las series de caudales de la aproximación multimodelo, y de caudales observados.

	$Q_{\text{Multimodelo}}$ (mm/año)	Q_{obs} (mm/año)	DQ ^(a) (mm/año)	dQ ^(b) (%)
Perc 75 %	1357	1350	6.6	0.50
Perc 50 %	1179	1076	102.9	9.60
Perc 25 %	955	925	30.1	3.30

(a) $DQ = Q_{\text{Multimodelo}} - Q_{\text{obs}}$

(b) $dQ = (Q_{\text{Multimodelo}} / Q_{\text{obs}}) - 1$

LR (Ecu.4) y R-Blindex (Ecu.5). Para la zona de estudio, IRH y LR presentan valores de 0,58 y 0,2, respectivamente, indicando de manera clara que la cuenca del río Palomino tienen una baja capacidad

de regulación hídrica. El valor del índice *RB* es de 0,19, indicando que la cuenca presenta una baja respuesta hidrodinámica ante estímulos hidrológicos. Estos resultados son coherentes entre sí y también con los presentados por el IDEAM (2018), quienes calculan el *IRH* para todo Colombia y en particular para la zona del PNN Sierra Nevada de Santa Marta, donde obtienen una capacidad de regulación hídrica de moderada a baja.

Los índices de regulación hídrica pueden ir variando con el tiempo, bien porque hay modificaciones en el régimen climático de la cuenca o bien por las acciones antrópicas sobre el sistema hidrológico. La Figura 8 presenta la evolución del índice *RB* en el río Palomino para el periodo 1973-2019. Como se puede observar, el índice presenta una tendencia descendente con una pendiente de -0.15/100 años. Analizando la serie temporal del índice *RB* con un test de Mann-Kendall (Mann, 1945; Kendall, 1975), y asumiendo un nivel de significancia de 0,05, se obtiene un valor del parámetro de Mann-Kendall $Z=-2,51$ con una probabilidad $p=0,01$, lo que indica que la tendencia observada es estadísticamente significativa. Esta tendencia sugiere que las condiciones de regulación en la cuenca han ido empeorando, probablemente

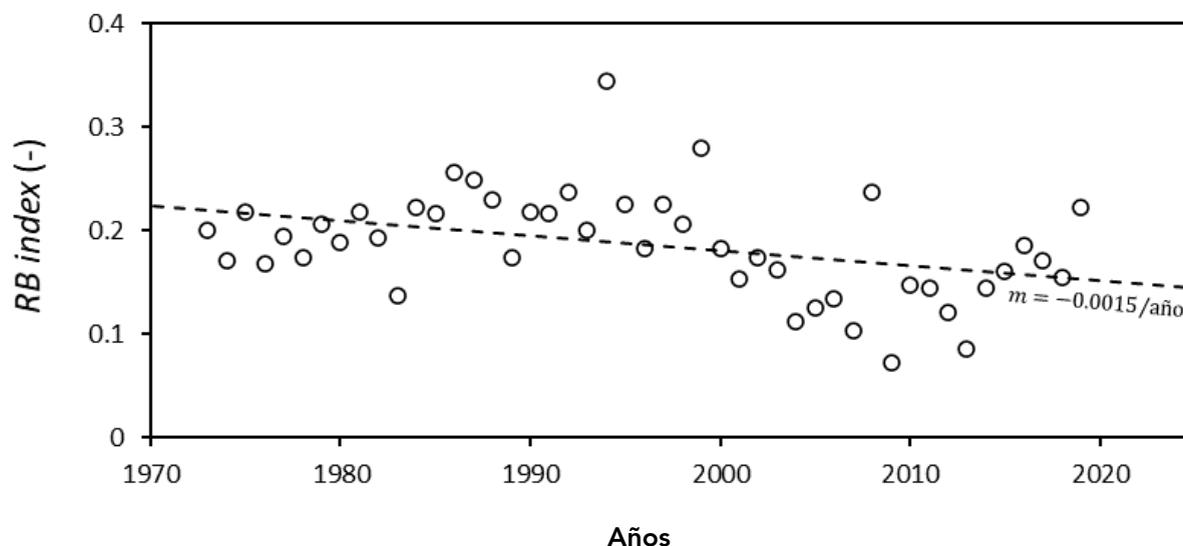
por el efecto combinado de los cambios de uso del suelo en la región y el impacto del cambio climático.

Los índices de regulación hídrica de la cuenca indican que esta presenta problemas de regulación y que estos problemas van empeorando con el tiempo. Por otro lado, la elevada componente de flujo de base de este río (que supone un 58 % de la escorrentía media total) indica la existencia de una importante tasa de recarga en los materiales acuíferos conectados con el río. Estas características hacen de la cuenca del río Palomino una buena candidata para la realización de actividades de Siembra y Cosecha de Agua, las cuales contribuirán a incrementar los recursos hídricos en la cuenca durante los periodos de estiaje, tal y como se ha observado en otras cuencas de alta montaña con problemáticas similares en diferentes sitios de Iberoamérica (Martos-Rosillo et al., 2020).

Los índices de regulación hídrica de la cuenca indican que esta presenta problemas de regulación, presentando a su vez un elevado caudal de base.

Figura 8.

Variación temporal del índice *RB* para la cuenca del río Palomino para el intervalo 1973-2019. La pendiente de la recta de regresión es $m = -0.0015/\text{año}$.



Este trabajo constituye un primer paso para una modelación hidrológica integral de cuenca que permita acoplar un modelo de aguas subterráneas. Esto permitirá cuantificar la recarga natural a los acuíferos que subyacen bajo las zonas de recarga en el PNN Sierra Nevada de Santa Marta, y la relación entre las aguas superficiales y subterráneas que fluyen en la zona de estudio. De esta manera se incrementará el conocimiento de los acuíferos existentes en Colombia, una labor que se encuentra actualmente en desarrollo. En este sentido, los acuíferos ubicados en la región de La Guajira y la parte alta del Valle de Magdalena ya han sido identificados. Falta mejorar en la caracterización de los acuíferos asociados a la Sierra Nevada de Santa Marta y los ubicados en el piedemonte, en los que sería interesante realizar una recarga inducida mediante técnicas de siembra del agua.

CONCLUSIONES

Se ha modelizado la respuesta hidrológica de la cuenca del río Palomino calibrando 12 modelos conceptuales-agregados y realizado una aproximación multimodelo. Los resultados indican que la estrategia multimodelo está mejor que el uso de un solo modelo. Esta aproximación permite estimar los términos del balance y su incertidumbre correspondiente. El método propuesto es sencillo y presenta resultados preliminares integrados de disponibilidad y regulación hídrica para zonas con información escasa y puede

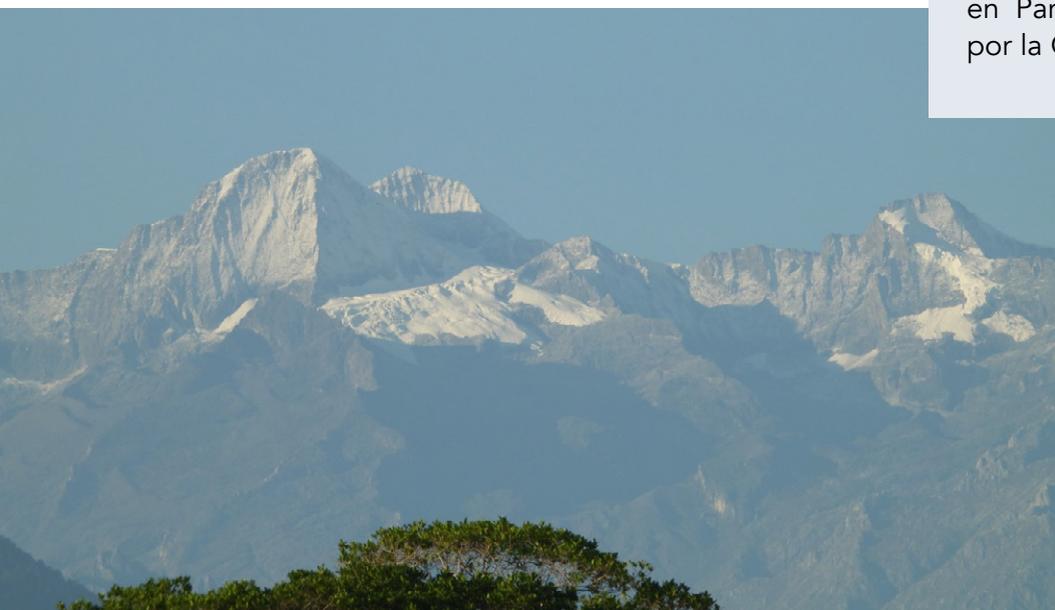
ser replicado en otras regiones dada su versatilidad y facilidad de uso.

El rendimiento hídrico en la cuenca del río Palomino es bajo y con tendencia a disminuir, por lo que bajo condiciones de cambio climático esta condición se espera que empeore, aspecto evidenciado por el descenso de los índices de regulación observado en los últimos años, lo que reduce los caudales base y el agua disponible para los ecosistemas y las comunidades, afectando la seguridad hídrica en la región.

Los índices de regulación hídrica de la cuenca indican que esta presenta problemas de regulación, presentando a su vez un elevado caudal de base. Se está, por tanto, ante una cuenca en la que un manejo del agua mediante técnicas como la Siembra y Cosecha de Agua, podría incrementar la capacidad de regulación hídrica de este río. Además, los resultados de este trabajo deben servir como una herramienta para la planificación hídrica de esta cuenca, de tal forma que se puedan tomar las diferentes medidas estructurales y no estructurales que contribuyan a la mejora de la cantidad de agua durante los períodos de estiaje.

AGRADECIMIENTOS

Los autores expresan su agradecimiento al proyecto "Red de Siembra y Cosecha de Agua en Parques Nacionales Naturales" financiado por la CYTED.



Acercamiento de los picos glaciares en la parte alta de la cuenca del Río Palomino.
Fotografía: Enrique Santander (2019).

REFERENCIAS

- Allen, R.G., Pereira, L.S., Raes, D. and Smith, M. 1998. *Crop Evapotranspiration - Guidelines for Computing Crop Water Requirements*. FAO Irrigation and drainage paper 56. Food and Agriculture Organization of the United Nations, Rome, Italy, 327 pp.
- Alley, W.M. 1984. On the treatment of evapotranspiration, soil moisture accounting and aquifer recharge in monthly water balance models. *Water Resources Research*, 20 (8), 1137-1149.
- Baker, D.B., Richards, R.P., Loftus, T.T. and Kramer, J.W. 2004. A New Flashiness Index: Characteristics and Applications to Midwestern Rivers and Streams. *Journal of the American Water Resources Association*, April, 503-522.
- Bergström, S. 1976. *Development and Application of a Conceptual Runoff Model For Scandinavian Catchments*, SMHI Hydrology, Reports RHO, No. 7, Norrköping, Sweden, 134 pp.
- Beven, K., 2012. *Rainfall-Runoff Modelling: The Primer (2nd ed.)*. John Wiley and Sons Ltd, West Sussex, UK, 488 pp.
- Blöschl, G. et al. 2019. Twenty-three Unsolved Problems in Hydrology (UPH) - a community perspective. *Hydrological Sciences Journal*, 64 (10), 1141-1158.
- Cabezas, F. 2015. *Análisis estructural de modelos hidrológicos y de sistemas de recursos hídricos en zonas semiáridas [Structural analysis of hydrological models and water resources systems in semi-arid zones]*. PhD thesis, Universidad de Murcia, Spain.
- Chen, Z., Hartmann, A., Wagener, T. and Goldscheider, N. 2018. Dynamics of water fluxes and storages in an Alpine karst catchment under current and potential future climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 22 (7), 3807-3823.
- Chiew, F.H.S., Peel, M.C. and Western, A.W. 2002. Application and testing of the simple rainfall-runoff model SIMHYD. In: Singh, V. P. and Frevert, D. K (eds.), *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publications, Colorado, USA, 335-367.
- Cuevas-Moreno, J. 2020. *Propuesta metodológica para la representación cuantitativa de la regulación hídrica en las distintas escalas de cuenca hidrográfica*. M.Sc. Thesis, Universidad Nacional de Colombia, Colombia.
- Dion, P., Martel, J.L. and Arsenault, R. 2021. Hydrological ensemble forecasting using a multi-model framework. *Journal of Hydrology*, 600, 126537.
- Funk, C., Peterson, P., Landsfeld, M., Pedreros, D., Verdin, J., Shukla, S., Husak, G., Rowland, J., Harrison, L., Hoell, A. and Michaelsen, J. 2015. The climate hazards infrared precipitation with stations - a new environmental record for monitoring extremes. *Scientific data*, 2 (1), 1-21.
- Gayathri K.D., Ganasri, B.P. and Dwarakish, G.S., 2015. A Review on Hydrological Models. *Aquatic Procedia*, 4, 1001-1007.
- Gelaro, R., McCarty, W., Suárez, M. J., Todling, R., Molod, A., Takacs, L., Randles, C. A., Darmenov, A., Bosilovich, M. G., Reichle, R., Wargan, K., Coy, L., Cullather, R., Draper, C., Akella, S., Buchard, V., Conaty, A., da Silva, A. M., Gu, W., Kim, G., Koster, R., Lucchesi, R., Merkova, D., Nielsen, J. E., Partyka, G., Pawson, S., Putman, W., Rienecker, M., Schubert, S. D., Sienkiewicz, M. and Zhao, B. 2017. The Modern-Era Retrospective Analysis for Research and Applications: Version 2 (MERRA-2). *Journal of Climate*, 30 (14), 5419-5454.
- González-Zeas, D., Garrote, L., Iglesias, A, Granados A. and Chávez-Jiménez, A. 2015. Hydrologic Determinants of Climate Change Impacts on Regulated Water Resources Systems. *Water Resources Management*, 29, 1933-1947.
- Gustafson, D.I., Carr, K.H., Green, T.R., Gustin, C., Jones, R.L. and Richards, R.P. 2004. Fractal-based scaling and scale-invariant dispersion of peak concentrations of crop protection chemicals in rivers. *Environmental science & technology*, 38 (11), 2995-3003.
- Her, Y. and Seon, Ch., 2018. Responses of hydrological model equifinality, uncertainty, and performance to multi-objective parameter calibration. *Journal of Hydroinformatics*, 20 (4), 864-885.
- Hersbach, H., Bell, B., Berrisford, P., Hirahara, S., Horányi, A., Muñoz-Sabater, J., Nicolas, J., Peubey, C., Radu, R., Schepers, D., Simmons, A., Soci, C., Abdalla, S., Abellan, X., Balsamo, G., Bechtold, P., Biavati, G., Bidlot, J., Bonavita, M., De Chiara, G., Dahlgren, P., Dee, D., Diamantakis, M., Dragani, R., Flemming, J., Forbes, R., Fuentes, M., Geer, A., Haimberger, L., Healy, S., Hogan, R.J., Hólm, E., Janisková, M., Keeley, S., Laloyaux, P., Lopez, P., Lupu, C., Radnoti, G., de Rosnay, P., Rozum, I., Vamborg, F., Villaume, S. and Thépaut, J.N. 2020. The ERA5 global reanalysis. *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, 146 (730), 1999-2049.
- Huntington, J., Hegewisch, K., Daudert, B., Morton, C., Abatzoglou, J., McEvoy, D., and Erickson, T. 2017. Climate Engine: Cloud Computing of Climate and Remote Sensing Data for Advanced Natural Resource Monitoring and Process Understanding. *Bulletin of the American Meteorological Society*, 98 (11), 2397-2410.
- IDEAM, 2018. *Estudio nacional del agua*. Instituto de Hidrología, Meteorología y Estudios Ambientales, Ministerio de Medio Ambiente y Desarrollo, Colombia, 253pp.
- Jaramillo, A. 2006. Evapotranspiración de referencia en la región andina de Colombia. *Revista Cenicafé*, 57 (4), 288-298.
- Jódar, J., Sapriza-Azuri, G. and Carrera-Ramírez, J. 2011. *Methodology for the assessment of uncertainty*

in hydrological extremes. Water and Global Change (WATCH), Technical Report No. 54, 41 pp.

Jódar, J., Carpintero, E., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Cabrera-Arrabal, J.A., Navarrete-Mazariegos, E., González-Ramón, A., Lambán, L.J., Herrera, C. and González-Dugo, M.P. 2018. Combination of lumped hydrological and remote-sensing models to evaluate water resources in a semi-arid high altitude ungauged watershed of Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 625, 285-300.

Jódar, J., González-Ramón, A., Martos-Rosillo, S., Heredia, J., Herrera, C., Urrutia, J., Caballero, Y., Zabaleta, A., Antigüedad, I., Custodio, E. and Lambán, L.J. 2020. Snowmelt as a determinant factor in the hydrogeological behaviour of high mountain karst aquifers: The Garcés karst system, Central Pyrenees (Spain). *Science of the Total Environment*, 748, 141363.

Kendall, M.G., 1975. *Rank Correlation Methods*. Griffin, London, UK, 202pp.

Kundzewicz, Z.W., Mata, L.J., Arnell, N.W., Döll, P., Jimenez, B., Miller, K., Oki, T., Şen Z. and Shiklomanov, I. 2008 The implications of projected climate change for freshwater resources and their management, *Hydrological Sciences Journal*, 53 (1), 3-10.

Li, L., Xu, C-Y. and Singh, V.P. 2010. Evaluation of the subjective factors of the GLUE method and comparison with the formal Bayesian method in uncertainty assessment of hydrological models. *Journal of Hydrology*, 390 (3-4), 210-221.

Li, Z., Yu, J., Xu, X, Sun, W, Pang, B. and Yue, J. 2018. Multi-model ensemble hydrological simulation using a BP Neural Network for the upper Yalongjiang River Basin, China. *Proc. IAHS*, 379, 335-341.

Makhlouf, Z. and Michel, C. 1994. A two-parameter monthly water balance model for French watersheds. *Journal of Hydrology*, 162 (3-4), 299-318.

Mann, H.B. 1945. Nonparametric tests against trend. *Econometrica*, 13 (3), 245-259.

Martos-Rosillo, S., Durán, A., Castro, M., Vélez, J.J., Herrera, G, Martín-Civantos, J.M, Mateos, L., Durán, J.J., Jódar, J., Gutiérrez, C., Hermoza Espezúa, R.M. and Peña, F. 2020. Ancestral Techniques of Water Sowing and Harvesting in Ibero-America: Examples of Hydrogeoethical Systems. In: Abrunhosa, M., Chambel, A., Peppoloni, S. and Chaminé, H.I. (eds.), *Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development*. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham, 489-492.

Parker, W.S. 2013. Ensemble modeling, uncertainty and robust predictions. *WIREs Clim Change*, 4, 213-223.

Pardo-Igúzquiza, E., Collados-Lara, A.J. and Pulido-Velazquez, D. 2019. Potential future impact of climate change on recharge in the Sierra de las Nieves (southern Spain) high-relief karst aquifer using regional climate models and statistical corrections. *Environmental Earth Sciences*, 78 (20), 1-12.

Passy, P. and Théry, S. 2018. The use of SAGA GIS modules in QGIS. In: Baghdadi, N., Mallet, C. and Zribi, M. (eds.), *QGIS and generic tools*, 1. John Wiley & Sons, Hoboken, NJ, USA, 107-149.

Peel, M.C., Finlayson, B.L. and McMahon, T.A. 2007. Updated world map of the Köppen-Geiger climate classification. *Hydrological Earth System Sciences*, 11, 1633-1644.

Pierrin, C., Michel C. and Andreassian, V. 2003. Improvement of a parsimonious model for streamflow simulation. *Journal of Hydrology*, 279, 275-289.

Reichle, R.H., Draper, C.S., Liu, Q., Girotto, M., Mahanama, S.P., Koster, R.D. and De Lannoy, G.J. 2017. Assessment of MERRA-2 land surface hydrology estimates. *Journal of Climate*, 30 (8), 2937-2960.

Salas, J.D. and Smith, R.A. 1981. Physical Basis of Stochastic Models of Annual Flows. *Water Resources Research*, 17 (2), 428-430.

Seiller, G., Anctil, F. and Perrin, C. 2012. Multimodel evaluation of twenty lumped hydrological models under contrasted climate conditions. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16, 1171-1189.

Témez, J.R. 1977. *Modelo matemático de transformación "precipitación-aportación"*. Asociación de Investigación Industrial Eléctrica (ASINEL), Madrid, Spain, 39pp.

USGS 2021. *EarthExplorer*. United States Geological Survey (USGS), 03/11/21, <https://earthexplorer.usgs.gov/>.

Velázquez, J. A., Anctil, F. and Perrin, C. (2010). Performance and reliability of multimodel hydrological ensemble simulations based on seventeen lumped models and a thousand catchments. *Hydrology and Earth System Sciences*, 14 (11), 2303-2317.

Vélez, J.I. 2001. *Desarrollo de un Modelo Hidrológico Conceptual y Distribuido Orientado a la Simulación de las Crecidas*. PhD Thesis, Universitat Politècnica de Valencia, Spain.

Vélez, J.J. and Botero, A. 2011. Estimación del tiempo de concentración y tiempo de rezago en la cuenca experimental urbana de la quebrada San Luis, Manizales. *DYNA*, 78 (165), 58-71.

Vogelmann, J.E., Howard, S.M., Yang, L., Larson, C.R., Wylie, B.K. and Van Driel, N. 2001. Completion of the 1990s National Land Cover Data Set for the conterminous United States from Landsat Thematic Mapper data and ancillary data sources. *Photogrammetric Engineering and Remote Sensing*, 67 (6), 650-662.

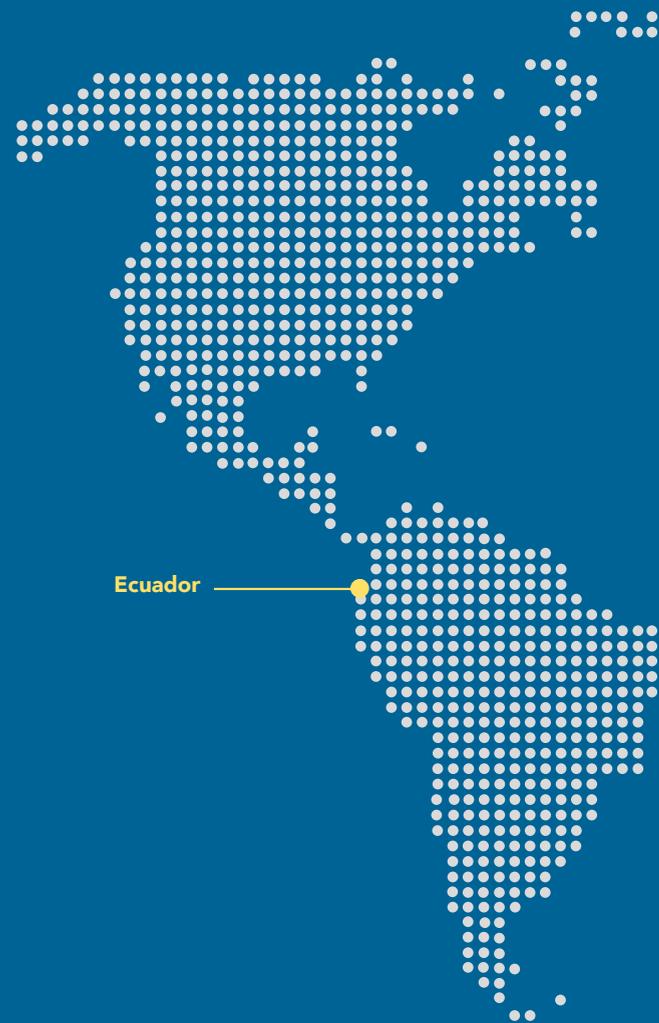
Xu, C-Y. 2002. WASMOD – *The water and snow balance modelling system*. In: Singh, V.P. and Frevert, D.K. (eds.), *Mathematical Models of Small Watershed Hydrology and Applications*. Water Resources Publications, LLC, Colorado, USA, 555-590.

Zhang, Q.J., Pagano, T.C., Zhou, S.L., Hapuarachchi, H.A.P., Zhang, L. and Robertson, D.E. 2011. Monthly versus daily water balance models in simulating monthly runoff. *Journal of Hydrology*, 404, 166-175.



Enfoque ecohidrológico para restaurar cochas ancestrales del Cerro Pisaca: Siembra y Cosecha de Agua en Catacocha, Loja, Ecuador

Ecohydrological approach to restore ancestral "cochas" of Pisaca Hill: Water Sowing and Harvesting in Catacocha, Loja, Ecuador



Marco Albarracín^{1,2,3}, Jorge González¹, Galo Ramón⁴, José Romero³
Sergio Martos-Rosillo^{3,6} y Carlos Iñiguez-Armijos⁷

1 Universidad Politécnica Salesiana, Quito, Ecuador

2 Fundación Ecohidrológica, Quito, Ecuador

3 Red Iberoamericana de Siembra y Cosecha de Agua en Áreas Naturales Protegidas

4 Fundación de Desarrollo COMUNIDEC, Quito, Ecuador

5 Corporación Naturaleza y Cultura Internacional (NCI), Loja, Ecuador

6 Instituto Geológico y Minero de España-Consejo Superior de Investigaciones Científicas, Granada, España

7 Laboratorio de Ecología Tropical y Servicios Ecosistémicos, Departamento de Ciencias Biológicas y Agropecuarias, Universidad Técnica Particular de Loja, Loja, Ecuador

Enfoque ecohidrológico para restaurar cochas ancestrales del Cerro Pisaca: Siembra y Cosecha de Agua en Catacocha, Loja, Ecuador.

RESUMEN

En la microcuenca hidrográfica de la quebrada de San Pedro Mártir, en la provincia de Loja, en el sur de Ecuador, se realiza desde la época pre-Incaica, un sistema de manejo del agua, del suelo y de la vegetación en el que las cochas y los atajados o tajamares se constituyen como elementos esenciales. Estos sistemas de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) están diseñados para retener e infiltrar lentamente en el subsuelo las aguas precipitadas durante el periodo de lluvias. Una vez que el agua se infiltra en las partes altas de los valles, las cochas y/o en los aluviales de las quebradas mediante los tajamares, pasa a circular lentamente por los acuíferos y surge por ríos perennes, quebradas intermitentes y manantiales situados aguas abajo durante la época seca. De esta manera, contribuyen al mantenimiento de la vegetación, al mejoramiento de la biodiversidad y a una mayor disponibilidad de agua para distintos usos durante el extenso periodo de estiaje que caracteriza a esta región. En este trabajo, se presentan las principales características meteorológicas, hidrológicas y ecohidrológicas de esta microcuenca, así como también los trabajos de recuperación de los saberes ancestrales utilizados para recuperar y construir nuevas cochas y tajamares. Además, con el objeto de analizar los efectos de la SyCA sobre la biota, se realiza un análisis comparativo de la distribución de los distintos tipos de vegetación mediante datos satelitales, antes y después de las intervenciones en la microcuenca y alrededor de los sistemas de SyCA. Los excelentes resultados conseguidos gracias al diálogo entre científicos y la población local, y al apoyo de varias instituciones locales e internacionales han hecho que este sistema SyCA haya contribuido a mejorar la calidad de vida y las condiciones ecológicas en el entorno de la ciudad de Catacocha. Este esfuerzo ha sido reconocido por el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la UNESCO, haciendo que esta zona sea uno de los pocos Sitios Demostrativos de Ecohidrología a nivel mundial y el primero en Ecuador.

Ecohydrological approach to restore ancestral "cochas" of Pisaca Hill: Water Sowing and Harvesting in Catacocha, Loja, Ecuador.

ABSTRACT

In the hydrographic micro-basin of the San Pedro Mártir stream, in the Loja province in southern Ecuador, a water, soil and vegetation management system has been carried out since pre-Inca times, in which the cochas and the cutwaters or *tajamares* are constituted essential elements. These small water pounds are designed for Water Sowing and Harvesting (WS&H), i.e., to let water infiltrate into the subsoil and aquifers on high elevations during the rainy season, and to make use of the slow circulation of water in the subsurface before capturing it from rivers and springs on lower altitudes during the dry season. The achieved discharge of water flow contributes to the maintenance of vegetation, increases biodiversity and makes water available for different uses. This work presents main meteorological, hydrological and ecohydrological characteristics of the San Pedro Mártir catchment, and presents work on restoring ancestral knowledge that was subsequently used for recovery and replication of cochas and atajados. In addition, a comparative analysis of the distribution of different types of vegetation is presented in which we evaluate the effects of WS&H on the biota by comparing satellite data of the area before and after the interventions. The restoration of this ancestral WS&H system, in which we counted with support of various local and international institutions and worked in close collaboration with the Autonomous Decentralized Government of the Paltas cantón (municipality), has improved the quality of life and ecological conditions in the surroundings of Catacocha city. Hence, this work presents a successful example of dialogue between scientific and local ecological knowledge, which has been recently recognized by UNESCO's IHP as one of the few Ecohydrology Demonstration Sites in the world, the first one in Ecuador.

INTRODUCCIÓN

Las opciones tecnológicas deben considerar las necesidades de agua tanto de las sociedades como también aquellas que la naturaleza requiere para realizar los procesos evolutivos y ecosistémicos. Este reto también debe integrar la recuperación de los saberes ancestrales. Los antepasados generaron sabiduría que puede ser un complemento para los problemas de gestión de los recursos hídricos y naturales actuales. Se requiere, por lo tanto, de un cambio de paradigma que integre las diferentes ciencias relacionadas a la hidrología, la ecología, la biogeoquímica y la sociedad. De este modo, el enfoque ecohidrológico propuesto dentro del marco del Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la UNESCO, ofrece herramientas para este objetivo (Zalewski, 2007). Así mismo, el diálogo intercultural, presenta metodologías para superar las brechas de comunicación entre el conocimiento científico actual y los saberes ancestrales que forman parte de la cultura de los pueblos (Pérez y Argueta, 2011). Estas herramientas fueron utilizadas para impulsar la restauración de la cocha Pisaca (Catacocha, Ecuador), constituyéndose en un ejemplo de sistema ancestral de Siembra y Cosecha de Agua (SyCA) que ha sido reconocido por su capacidad de proporcionar soluciones a problemas de escasez de agua en zonas montañosas áridas.

Ante la crisis ambiental y climática del "Antropoceno", y la necesidad de que los científicos e ingenieros guíen a la sociedad a una gestión ambientalmente sostenible (Crutzen, 2002), es imperativo generar opciones de bajo costo que permitan facilitar el camino hacia el logro de la Meta 6 sobre agua limpia y saneamiento de los Objetivos de Desarrollo Sostenible de la ONU (UN, 2015).

La recarga artificial de acuíferos mediante infraestructura verde es una alternativa que presenta numerosas ventajas frente a la construcción de reservorios de agua superficial. Como ejemplos, (1)

el agua subterránea reduce las pérdidas de agua por evaporación, (2) el agua almacenada en el subsuelo es menos susceptible a la contaminación (Sprenger et al., 2017), (3) los acuíferos son el principal almacén de agua dulce no congelada del planeta (Gleeson et al., 2016) y, (4) estas características naturales pueden ser mejoradas con intervención humana (Albarracín et al., 2021). Así, la retención de agua de lluvia y de la escorrentía superficial en el subsuelo mediante la construcción de humedales artificiales e infraestructuras sencillas para la infiltración de agua se presentan como Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN), que además han sido utilizadas por muchas culturas a lo largo de la historia (Albarracín et al., 2018; Castro and Fernández, 2007; Martos-Rosillo et al., 2020; Ochoa-Tocachi et al., 2019; WWAP/ONU-Agua, 2018). Muchas de estas prácticas se han mantenido en el tiempo y en la actualidad se presentan como opciones válidas para la adaptación al cambio climático, la resiliencia ante los procesos de desertificación y la mejora del potencial de sostenibilidad de las cuencas hidrográficas.

Los sistemas de SyCA de Iberoamérica son modelos de gestión del agua que utilizan SbN y, a su vez, recuperan conocimientos ancestrales (Martos-Rosillo et al., 2020). En términos generales, la SyCA se caracteriza por el manejo del caudal procedente de la lluvia, de deshielo o de escorrentía para su posterior infiltración en el subsuelo. El agua infiltrada acaba brotando en manantiales, ojos de agua o en el lecho de ríos situados aguas abajo. En algunos sistemas de SyCA, la cosecha se realiza mediante galerías drenantes o pozos profundos. De este modo, se consigue retener el agua en los acuíferos para disponer de ella en los periodos secos. El agua sembrada es posteriormente utilizada para riego, usos domésticos, abrevaderos, etc. (Barberá et al., 2018; Martos-Rosillo et al., 2019, 2020; Ochoa-Tocachi et al., 2019; Yapa, 2013, 2016).

La ecohidrología, vista como una metodología transdisciplinaria de apoyo a la gestión integrada de los recursos hídricos y naturales, enfatiza la necesidad de entender las estrechas interrelaciones entre los aspectos abióticos y bióticos de una cuenca hidrográfica y propone usar este entendimiento

como herramientas de gestión (Acreman, 2001; Baird and Wilby, 1999; McClain *et al.*, 2012; Rodríguez Iturbe, 2000; Zalewski, 2000, 2013; Zalewski *et al.*, 1997). Como disciplina científica, la ecohidrología parte del fundamento de una “doble regulación” entre la hidrología y la biota (Zalewski *et al.*, 1997). A su vez, los principios del enfoque ecohidrológico parten del entendimiento de que el agua es el *driver* o promotor de todas las estructuras bióticas y ecosistémicas moldeadas por años de evolución. Así, la generación de soluciones ecohidrológicas basadas en la naturaleza están enfocadas en mejorar la capacidad de la cuenca hidrográfica para reponerse ante impactos externos (v.g. antrópicos, climáticos, demográficos, etc.), fortaleciendo su potencial de sostenibilidad en términos de agua, biodiversidad, servicios ecosistémicos, resiliencia, el patrimonio cultural y la educación (WBSR+CE, por sus siglas en inglés) en los modelos de gestión (Albarracín *et al.*, 2018; Zalewski, 2013, 2018).

Este trabajo tiene como objetivo presentar el proceso de restauración de la cocha Pisaca y el manejo de la microcuenca de la quebrada San Pedro Mártir, como una solución a la crisis de escasez de agua en la ciudad de Catacocha, en el sur del Ecuador. Como novedad, presentamos los cambios en la cobertura vegetal estacional y en los últimos veinte años en el área próxima a la cocha Pisaca, mediante la utilización del Índice de Vegetación con Ajuste de Suelos (SAVI, por sus siglas en inglés) (Huete, 1988). Además, describimos cómo este proyecto que se denominó “Sembrando Agua para la Vida” y ejecutado por varias instituciones locales e internacionales, es un ejemplo de SyCA y, además, ha sido reconocido como un Sitio Demostrativo de Ecohidrología por UNESCO – PHI.

EL DIÁLOGO INTERCULTURAL EN TORNO AL AMBIENTE, PARA RECUPERAR LOS SABERES ANCESTRALES

El discurso ambientalista moderno, basado en la sostenibilidad en cantidad y calidad de los recursos, no siempre es aceptado por las comunidades pobres que sobreviven de su aprovechamiento diario. Tampoco el sistema de causalidad de su deterioro, basado en indicadores científicos, es compartido por las

comunidades de raíz no occidental. En muchos casos, las explicaciones mágicas, míticas, cíclicas o religiosas tienen mucha más fuerza, porque son parte esencial de su cultura y de su identidad. Por ejemplo, en Paltas, los campesinos explicaban la desaparición de las fuentes de agua, las continuas sequías, la variabilidad de las precipitaciones y la pérdida progresiva de la fertilidad del suelo por el “robo del Torito Cango”, un animal mítico hijo de la diosa montaña Pisaca que cuando mugía hacía llover (Albalá, 1995; Ramón, 2018). Esta explicación conducía a los campesinos a una actitud de resignación y añoranza, en tanto que a los ambientalistas a un arrogante desprecio de las creencias populares. En tales condiciones, se producía un diálogo de sordos, mejor dicho, una incomunicación paralizante.

Una de las salidas posibles a este enorme entrampamiento es el diálogo intercultural (Pérez y Argueta, 2011), porque valora el conocimiento del otro, busca puentes de comunicación, amplía su mirada a otras racionalidades y está dispuesto a construir lo nuevo a partir de la interacción respetuosa. Este nuevo enfoque permitió descubrir que, tras esos mitos considerados ingenuos, se ocultaba un sofisticado sistema ancestral de manejo del agua del pueblo de los paltas. Un conocimiento que fue ocultado, perseguido, despreciado y destruido por el largo proceso colonial y la arrogancia de la ciencia contemporánea (Ramón, 2008, 2015). Los mitos en los Andes no constituyen un mecanismo para disfrazar o deformar la realidad, son construcciones suprahistóricas, y a menudo históricas, que codifican los conocimientos, que deben ser decodificados, descryptados y comprendidos.

Con estas consideraciones, se procedió en la zona a recoger los mitos, cuentos, leyendas y tradiciones en múltiples reuniones, denominadas “mingas”, en donde los cuentistas de todas las edades, hombres y mujeres compartieron sus relatos, tomando como referencia general, los temas del agua, las lluvias, la fertilidad, las sequías. En varias ocasiones se constató que un mismo relato tenía diversas versiones: estaba ambientado en distintas localidades, evocaba a diversos seres míticos, cambiaba en el tiempo incorporando nuevos elementos o desechando otros, es decir, que el propio mito era histórico.

Esta constatación dio lugar a una amplia investigación socio-histórica documental, para buscar, sobre todo, en las fuentes notariales (testamentos, litigios de tierras, títulos de propiedad, visitas de ojos) aspectos del antiguo manejo del agua: allí aparecieron dibujos de “cochas antiguas” (humedales lénticos artificiales) hoy desaparecidos, la existencia de pequeñas represas para controlar la escorrentía (tajamares o tapes), reservorios de agua (pilancones), entre otros. Ello dio lugar a un minucioso trabajo de campo para observar y evaluar los vestigios y aquellas prácticas que aún sobrevivían. También el trabajo lingüístico resultó esclarecedor. Por ejemplo, el nombre de la propia diosa montaña “Pisaca” significaba en kichwa la “perdiz”, un ave muy valorada en la zona, pero también mítica relacionada con el ciclo de las lluvias, e incluso, como una “constelación oscura” llamada Lluthu (Salazar, 2009).

Poco a poco, fue develándose el sistema de manejo de la humedad ancestral de los paltas, los mitos, los vestigios, los dioses tutelares, las obras de manejo, los petroglifos, los tacines, las tallas de piedras, las creencias y las evidencias se fueron alineando en un todo coherente. Como producto de ese intenso diálogo intercultural, fue posible entender que el sistema de manejo incluye, tanto la comprensión y predicción del sistema hidrológico, las formas apropiadas de manejo y adaptación a sus ventajas y riesgos, el desarrollo de una serie de técnicas, la organización del trabajo y la sociedad, así como una cosmovisión de soporte.

Los paltas crearon un sistema de predicción climática, manejado por los chamanes que, apoyados en el consumo de plantas enteógenas, trataban de anticipar los diversos eventos que influyen en la actividad agropecuaria y la vida humana (lluvias, sequías, heladas, granizadas, vientos, inundaciones, movimientos de masa) en el corto, mediano y largo tiempo; y el desarrollo de un conjunto de medidas de organización social y espacial, dispersión del riesgo, adaptación, mitigación, aprovechamiento o incluso mediación con las deidades (Ramón, 2008). El sistema de predicción climática les demandó de un enorme conocimiento de los ciclos hidrológicos, el diálogo y la interpretación de las “señas” complejas y diversas del clima, de elementos cósmicos, meteorológicos, biológicos, sueños y rituales para predecir sus posibles

variaciones, para orientar la acción humana que es proactiva y que puede incidir en cambios singulares y colectivos.

Al entender que el sistema de lluvias era muy variable, que en los Andes Bajos no hay montañas altas con glaciares de altura, que los ríos y quebradas son profundas dificultando el riego convencional, que en estos terrenos escarpados hay una fuerte escorrentía y alta erosión, que los suelos son poco permeables, hay poca infiltración, de manera que las vertientes son pequeñas, superficiales y tienden a secarse, y que existen muchos meses con un sol intenso y vientos fuertes, cuya combinación incrementa notoriamente la evapotranspiración reduciendo la humedad del suelo, construyeron cochas de altura para recolectar agua de lluvia en los meses de altas precipitaciones (Figura 1). Las ubicaron sobre las vertientes, al inicio de la microcuenca, en los sitios de mayor capacidad de infiltración (rocas alteradas y fracturadas); y para estar seguros de que el agua recargada alimente a las vertientes beneficiadas, observaron atentamente en el mes más seco la línea de verdor de ciertas plantas que por estar en una línea de mayor humedad mantienen sus hojas, con lo cual es posible seguir la dirección del flujo subterráneo en este acuífero superficial.

Figura 1.

Petroglifo de la serpiente (culebra o conza) ubicada en Anganuma, Quilanga, Loja. La roca presenta oquedades como cochas posiblemente representando una microcuenca (Ramón, 2015).



Fotografía: César Aguirre

Para mantener la humedad en el suelo cuidaron el bosque de altura y protegieron las vertientes con numerosas plantas reduciendo la erosión y la escorrentía superficial del agua, creando un microsistema húmedo (Ramón, 2008).

Estos bosques de altura servían también para atrapar la humedad de la neblina por interceptación. Para mantener el agua en sus parcelas crearon la huerta agroforestal que combina plantas altas, arbustivas y rastreras, imitando al bosque. Se combinaron hasta 56 especies asociadas en la huerta (alimenticias, forrajeras, medicinales y leñosas, para la construcción), de modo de proteger el suelo del viento y del impacto del sol (Ramón, 2015).

Para controlar la escorrentía construyeron pequeños muros de contención de agua en las quebradas llamados "tajamares". Estos forman pequeñas pozas que detienen los sedimentos, humedecen los bordes favoreciendo el crecimiento de plantas protectoras de las quebradas y el mantenimiento de la biodiversidad (peces, churos, plantas comestibles y medicinales). En las zonas más secas, construyeron terrazas hundidas, que, al guardar la humedad, permiten cultivos en la época seca. Construyeron reservorios de agua llamados pilancones a boca de huerta, y sistemas de riego para los tiempos de pocas lluvias y la intensificación productiva (Ramón, 2019).

Finalmente, integraron al sistema de manejo del agua con el ordenamiento territorial sagrado, calendarios rituales, manejo del poder y relación con el cosmos y los seres sobrenaturales. Organizaron a los ayllus en dos grupos que enfatizaban la complementariedad, arreglos comunitarios que se respetaban, sanciones colectivas a las transgresiones de las normas y reconocimiento a los que mantenían la armonía. Crearon una ritualidad de todo el espacio con alineamientos sagrados que unían a deidades, lagunas, vertientes, sitios rituales con petroglifos. Crearon un calendario agrícola y ritual que organizaba las actividades de la sociedad y de normativas de

respeto y armonía, un discurso cultural, que daba soporte a sus prácticas y tecnologías apropiadas al medio que podían ser manejadas por la comunidad. El ritual intercambiaba la figura tallada de la diosa Pisaca con la figura tallada del dios montaña Congo, siguiendo la línea ritual marcada con los petroglifos. El sistema era completo y evidente, solo faltaban ojos para verlo.

SIEMBRA Y COSECHA DE AGUA EN LOS ANDES

La terminología SyCA es comúnmente utilizada por las comunidades andinas y denota una profunda relación de los habitantes precolombinos con la *yakumama*¹ (Ochoa-Tocachi et al., 2019; Yapa, 2013). Esta cosmovisión ancestral se ha mantenido en el tiempo y encierra la sabiduría indígena de gestión del agua que ha sido implementada en zonas áridas y semiáridas tanto en tierras de altura de los Andes (Albarracín et al., 2018; Ochoa-Tocachi et al., 2019), como en zonas bajas, tal es el caso de los jagüeyes o albarradas de la costa ecuatoriana (Álvarez-Litben, 2021) y los tapes o diques de la península de Santa Elena (Carrión et al., 2018).

Los sistemas de SyCA más comunes en Perú y Ecuador son las qochas o cochas (laguna en quechua y kichwa, respectivamente), también llamadas albarradas, atajados, jagüeyes o pataquis (Martos-Rosillo et al., 2020). Las cochas de infiltración, por lo general, se encuentran ubicadas en depresiones erosivas de origen glaciar y periglacial donde el agua suele quedar retenida de forma natural (Figura 2). La permeabilidad del piso de las cochas permite la infiltración lenta del agua y la consiguiente recarga del acuífero. El tamaño de las cochas es variable, pero su capacidad de almacenamiento de agua superficial es considerablemente grande. Por ejemplo, en Quispillacta, Ayacucho, Perú, la comunidad maneja 102 lagunas artificiales que en conjunto almacenan 1,7 millones de m³ (MINAGRI, 2016).

En muchas ocasiones, la capacidad de almacenamiento de las cochas dentro de la microcuenca se incrementa mediante la construcción de tajamares que son

¹ Yakumama es un vocablo proveniente del idioma Kichwa que significa Yaku=Agua y Mama=Madre (Yapa, 2013).

Figura 2.

Cochas o albarradas en las faldas del monte Pisaca. Arriba: cocha o laguna artificial "Pisaca" (Foto: César Aguirre). Abajo: cochas de comuneros usadas para actividades agrícolas.



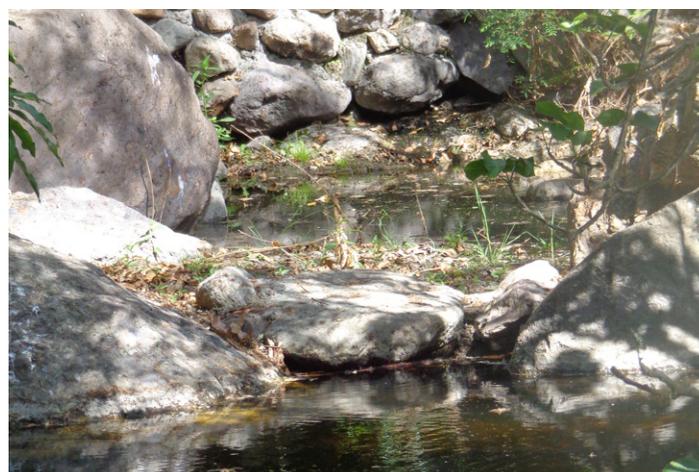
Fotografías: Archivo Municipal de Paltas y Marco Albarracín, respectivamente.

diques artesanales en las quebradas (Albarracín et al., 2021; Martos-Rosillo et al., 2020). Los tajamares o tapes son otro sistema de SyCA presente en el cantón Paltas (Figura 3). Consisten en pequeños muros que se construyen en los cauces principales de algunos arroyos y ríos intermitentes o efímeros, con el objeto de represar el agua durante los periodos de lluvia y

favorecer su infiltración para captarla mediante pozos excavados o galerías de drenaje (Martos-Rosillo et al., 2020). Empero, para fines agrícolas, también se puede captar el agua en los pequeños diques formados aguas arriba en donde además se acumulan sedimentos.

Figura 3.

Tajamares o tapes construidos para ralentizar la escorrentía en las quebradas en el cantón Paltas, Loja, Ecuador



Fotografías: Archivo municipal de Paltas

De esta manera, los sistemas SyCA como las cochas y tajamares construidos en Paltas permiten que el agua infiltrada en el subsuelo durante la época de lluvias esté disponible en períodos de bajas precipitaciones. Aunque no se ha cuantificado esta observación, podemos mencionar otros ejemplos que se han documentado fuera de Ecuador. Así, Ochoa-Tocachi et. al., (2019) indican que mediante las amunas o mamanteos de Huamantanga, Perú, el agua es retenida en promedio por 45 días, con un tiempo de entre dos semanas y ocho meses de permanencia en el acuífero. Así mismo, las zanjas de infiltración construidas por comunidades indígenas en

Perú han logrado disminuir la erosión y la escorrentía en laderas (Locatelli et al., 2020; Somers et al., 2018). Comparativamente, en Europa ha quedado demostrado que las acequias de careo de España permiten recargar agua en los acuíferos de ladera, reteniendo la escorrentía del deshielo en las cuencas hidrográficas en donde se practica (Barberá et al., 2018; Martos-Rosillo et al., 2020). Es importante indicar también que la vegetación, y por ende la biodiversidad, mejoran notablemente en zonas que utilizan sistemas de SyCA en comparación con sitios donde no se los implementa (Albarracín et al., 2018; Martos-Rosillo et al., 2019; Yapa, 2013).

EL ENFOQUE ECOHIDROLÓGICO EN LA GESTIÓN ANCESTRAL DEL AGUA DE LOS PALTAS

La propuesta es que, al entender en profundidad las interacciones entre la hidrología y la biota, estas pueden ser utilizadas como un marco metodológico que permita establecer la forma de aprovechar las propiedades ecosistémicas como herramientas para fortalecer la capacidad de la cuenca hidrográfica para potenciar sus servicios ambientales. Para aplicar el enfoque ecohidrológico se proponen tres principios secuenciales: (1) hidrológico, (2) ecológico, y (3) principio de ingeniería ecológica o ecohidrológico. Durante el desarrollo de los dos primeros principios se identifican las posibles intervenciones necesarias (i.e. SbN) para atender a los problemas identificados. Adicionalmente, con respecto a la mejora del potencial de sostenibilidad de la cuenca, esta se gestiona desde el punto de vista de cinco parámetros multidimensionales: Agua, Biodiversidad, Servicios Ecosistémicos, Resiliencia y Patrimonio Cultural-Educación (WBSR+CE, por sus siglas en inglés) (Más información en Bridgewater, 2018; Zalewski, 2002, 2006, 2018; Zalewski et al., 1997, 2008).

La ecohidrología, como ciencia transdisciplinaria aplicada a la solución de problemas relacionados al agua, la naturaleza y la sociedad, busca incrementar el potencial de sostenibilidad de cuencas hidrográficas, fundamentándose en la estrecha interrelación existente entre procesos hidrológicos, geomorfológicos y biológicos.

Los sistemas de SyCA tienen puntos en común con la ecohidrología y los dos enfoques pueden potenciarse, integrarse y complementarse. Por ejemplo, todos los sistemas de SyCA ponen énfasis en la gestión de caudales para enfrentarse a factores que ponen en riesgo a la seguridad hídrica de sistemas antrópicos. Así, los sistemas de SyCA no solo consiguen mejorar la biodiversidad, incrementar los servicios ecosistémicos, y potenciar la resiliencia

y las capacidades de adaptación al cambio climático, sino que también conservan o recuperan los saberes ancestrales aplicados por muchos años. Por otra parte, la ecohidrología ha desarrollado soluciones innovadoras a problemas como la contaminación de recursos hídricos. Por ejemplo, Sistemas de Biofiltración Secuencial (SBS), utilizados como biotecnologías ecohidrológicas para la mitigación de contaminantes agrícolas no puntuales (Bednarek et al., 2010, 2014; Kiedrzyńska et al., 2017), métodos moleculares y marcadores genéticos para mejorar la calidad del agua (Mankiewicz-Boczek, 2012), uso de trazadores en humedales artificiales para tratamiento de aguas residuales (Headley & Kadlec, 2007), entre otros. En suma, tanto los sistemas de SyCA como la ecohidrología proponen SbN para alcanzar la seguridad hídrica en calidad y en cantidad.

EL SITIO DEMOSTRATIVO DE ECOHIDROLOGÍA PALTAS – CATACOCHA EN LA LAGUNA PISACA

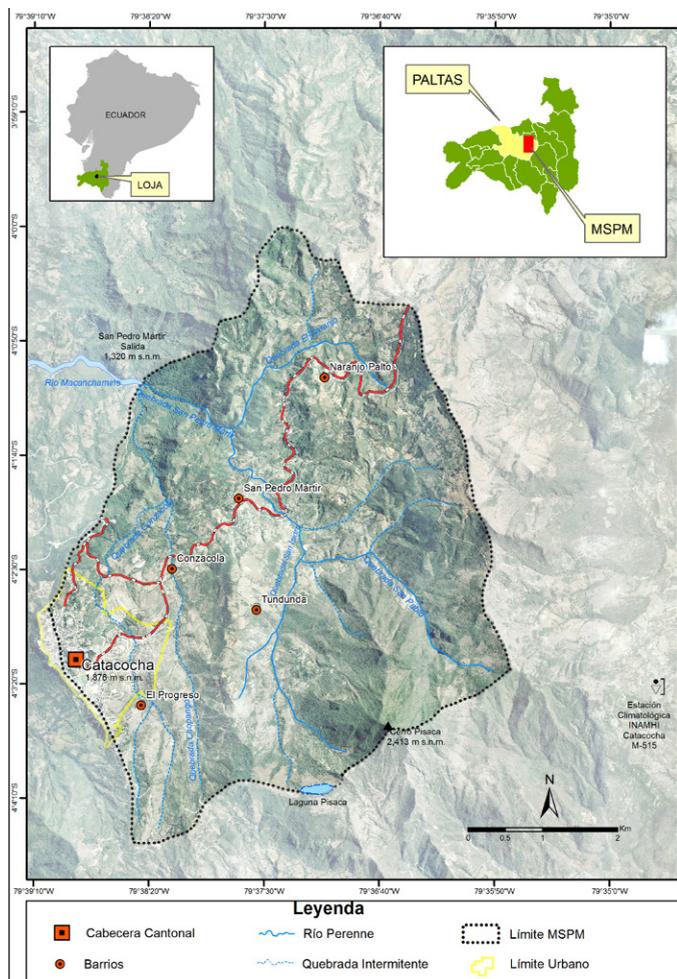
El Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de UNESCO, reconoció al Sitio Demostrativo de Ecohidrología Paltas Catacocha en el año 2018. Como se indicó anteriormente, se trata de una laguna artificial llamada Pisaca a donde se deriva el agua de escorrentía y se colecta el agua de lluvia para retener el flujo hídrico y recargar el acuífero. Esta acción ha mejorado la disponibilidad de agua para abastecimiento a la población y para la agricultura. Además, en el sitio se destaca el rescate de los aspectos culturales para la gestión del agua. A continuación, exponemos el sitio demostrativo de Paltas Catacocha enfocándonos en los aspectos hidrológicos, ecológicos y sobre todo la integración de los saberes ancestrales y patrimonio cultural para encontrar soluciones ecohidrológicas basadas en la naturaleza y mejorar la gestión de los recursos hídricos.

Descripción del sitio

La laguna Pisaca (4°04'05" S, 79°37'11" W) se constituye como el componente central del Sitio Demostrativo de Ecohidrología de Paltas-Catacocha. Se encuentra ubicado en la microcuenca hidrográfica de la quebrada San Pedro Mártir (en adelante:

MQSPM), en el cantón Paltas de la provincia de Loja al sur de Ecuador (Figura 4). Dentro de esta microcuenca, se asienta la ciudad de Catacocha (1876 m s.n.m.) cabecera cantonal de Paltas, con una población aproximada a los 7000 habitantes. La microcuenca abastece de agua a más del 80% de la población.

Figura 4.
Ubicación de la microcuenca San Pedro Mártir (MQSPM) dentro del Cantón Paltas, en la provincia de Loja, Ecuador



La MQSPM es parte de la subcuenca del río Playas, el cual a su vez desemboca en el río Catamayo que forma parte de la cuenca hidrográfica binacional de los ríos Catamayo-Chira, entre Ecuador y Perú. La microcuenca tiene una extensión de 31,48 km² y un cauce principal de 3,25 km de longitud desde la laguna Pisaca hasta su desembocadura en el río Playas. Su dirección va de oriente a occidente y existen varios cursos de agua que alimentan el cauce principal. La pendiente media de la cuenca está alrededor del 12% y no presenta riesgo de inundaciones por crecidas. El rango altitudinal de la MQSPM está comprendido entre 1320 m s.n.m. en la desembocadura y el punto más alto a 2413 m s.n.m., corresponde a la cima del monte Pisaca.

En las faldas del monte Pisaca, se encuentra la laguna artificial del mismo nombre, a 2075 m s.n.m., que se alimenta de un canal construido alrededor del monte Pisaca para derivar el agua de escorrentía en tiempo de lluvias. El fondo de la laguna es permeable, al estar asentada sobre una zona de alteración superficial que afecta al sustrato formado por rocas andesíticas, lo que permite recargar estos acuíferos superficiales y de esta forma aumentar el caudal de base de la quebrada y generar nuevos manantiales aguas abajo.

La laguna Pisaca fue restaurada entre los años 2005 y 2008, en el mismo sitio en donde existía evidencias de la presencia de una cocha ancestral de los aborígenes pre-incas conocidos como los paltas. La cocha había sido desecada entre 1948 y 1958 por un propietario privado con el fin de utilizar el terreno para la agricultura y la ganadería. Esta cocha no habría sido la única existente en la zona, incluso se han encontrado evidencias de que en la ciudad de Catacocha (del kichwa cata=grande y cocha=laguna), existía la laguna más grande de la zona y que databa del tiempo de los paltas. Pero, sobre esa laguna ahora se asienta la ciudad de Catacocha (Albarracín et al., 2018). La desecación de estas lagunas sería una de las principales causas del agotamiento de acuíferos en la zona llevando a restringir la provisión de agua en la ciudad a solamente una hora por día en el año 2000 (GAD Paltas, 2017).

Principio hidrológico

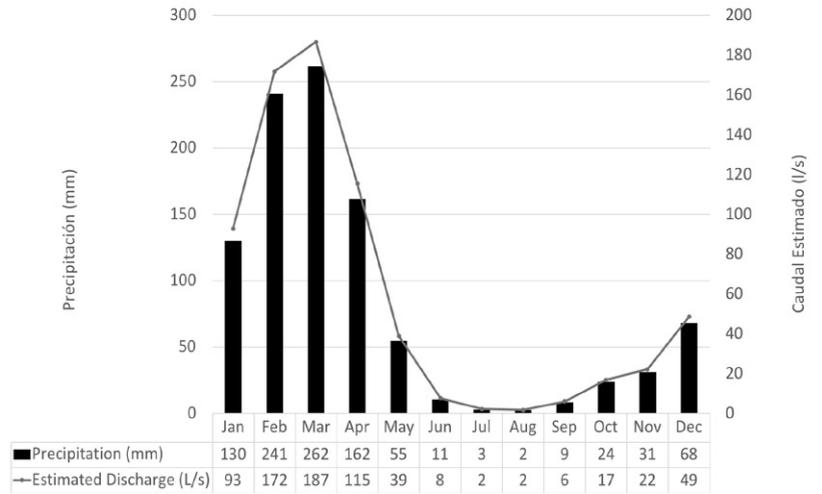
La MQSPM se encuentra en una zona caracterizada por la escasez de agua. Las precipitaciones están influenciadas por las corrientes marinas y las condiciones orográficas. Las corrientes marinas frías de la costa del océano pacífico de América del Sur, que producen un proceso de desertificación que avanza desde el sur al este de Los Andes en Chile y Perú, tienen una fuerte influencia hasta la zona austral occidental del Ecuador (Garreaud, 2009; Ochoa-Tocachi *et al.*, 2019). Con respecto a la orografía, la cordillera Andina presenta una depresión en términos de altitud sobre el nivel del mar. Esta circunstancia orográfica ha producido una microzona de convergencia perpendicular a la Zona de Convergencia Inter-Tropical (ZCIT) (OEA, 1994). Estas condiciones son las principales causantes de que el agua en la zona sea un recurso escaso.

En la MQSPM no se dispone de una red meteorológica, pero existen estaciones cercanas que se han usado para entender su hidrología, tanto en precipitación como en caudal del cauce principal. En la zona, el régimen de lluvias es unimodal. Las precipitaciones se presentan desde diciembre hasta mayo y su pico máximo se produce en marzo y el mínimo en agosto (Figura 5). En promedio, para el periodo 1990-2015, la precipitación fluctuó entre 261 y 2 mm para marzo y agosto, respectivamente (OEA, 1994). Las lluvias pueden manifestarse durante períodos de tiempo muy cortos, acumulando casi la totalidad de la precipitación en pocos días. Igualmente, han existido períodos de sequía que se han prolongado por años. Por ejemplo, de acuerdo a CAN (2009), entre los años 1967 y 1969 se produjo un estiaje que ocasionó una de las mayores migraciones de los pobladores de la provincia de Loja debido a las condiciones extremas de escasez de agua.

El caudal en la quebrada San Pedro Mártir es dependiente de las lluvias. Para obtener datos de caudal en la MQSPM, se utilizó el método racional, con datos de precipitación del período de 1990-2015. El caudal promedio máximo se presenta en el mes de marzo con 187 l/s, mientras que el mínimo en agosto, con 2 l/s (Figura 5).

Figura 5.

Precipitación (mm) y caudal (l/s) en la MQSPM. Periodo de datos 1990-2015.



Fuente: INHAMI www.serviciometeorologico.gob.ec

El principal problema en la zona está relacionado al prolongado periodo de estiaje que se da de mayo a diciembre. Así, considerando que el agua es la fuerza que impulsa la formación de los ecosistemas y la generación de servicios ambientales, es necesario manejar los caudales en la MQSPM y aumentar la capacidad de retención de agua en los acuíferos. Esta situación era bien conocida por los habitantes aborígenes de la zona, quienes manejaban sus recursos hídricos mediante la retención de agua en humedales artificiales (Ramón, 2018). Sin embargo, los saberes ancestrales se perdieron en el proceso de occidentalización producido en el período de la colonia española.

Los acuíferos en la microcuenca han sido poco estudiados y no hemos encontrado información publicada al respecto de aguas subterráneas en la MQSPM. No obstante, existen pozos profundos para extraer agua que se usa de manera doméstica en la ciudad de Catacocha y las comunidades de la zona.

Principio ecológico

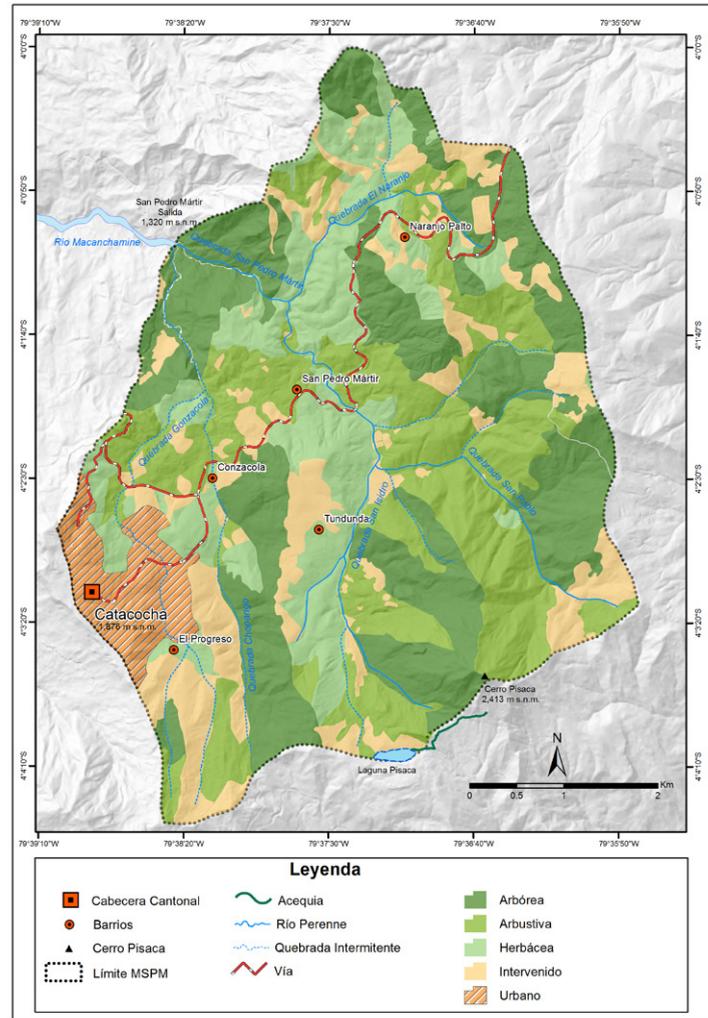
Desde el punto de vista de la evolución, los ecosistemas terrestres se han adaptado a las condiciones climáticas del entorno, principalmente a la disponibilidad de agua, a la temperatura y a la presencia de nutrientes (Baird & Wilby, 1999; Zalewski, 2002). Por lo tanto, la hidrología tiene un efecto en la distribución, estructura y funciones de los ecosistemas, pero también los procesos biológicos del ecosistema tienen un efecto en el ciclo hidrológico (Nuttle, 2002; Zalewski et al., 1997). En la MQSPM, la vegetación dominante es caducifolia, adaptada a la estacionalidad marcada en la zona. Existen dos ecosistemas predominantes (Ministerio del Ambiente, 2013). El más abundante es el bosque semidecíduo montano bajo, y en menor proporción, se presenta el bosque semidecíduo piemontano. Existe adicionalmente una amplia zona intervenida por actividades antrópicas. El uso del suelo y la cobertura vegetal indican que la vegetación nativa predominante es el bosque, ocupando el 32% del total del área de la microcuenca, luego se encuentran la cobertura arbustiva con 27%, herbácea con 19% y los pastos con 15%. Solamente un 5% del territorio de la microcuenca es zona urbana y un 2% se usa para agricultura (Figura 6). En la MQSPM, los ecosistemas originales han sufrido transformaciones que podrían estar afectando a las funciones y ensamblajes de las comunidades bióticas con su biotopo (MAG, 2015).

Principio ecohidrológico

La construcción de albarradas o cochas en la MQSPM tiene como objeto la recarga de acuíferos para almacenar de manera subterránea el agua de lluvia y de escorrentía media a lo largo de la microcuenca. Estas infraestructuras naturales se encuentran principalmente en sitios que se han delimitado posteriormente para conservación y protección de fuentes hídricas. En las áreas contiguas a las albarradas y las quebradas se ha reforestado con plantas nativas e incluso las cochas presentan plantas hidrófilas. Sin embargo, aún no se ha estudiado el efecto del aumento de la cobertura vegetal sobre los flujos de agua, aunque las creencias locales sugieren que las plantas hidrófilas ayudan a mantener la humedad y favorecen la infiltración del agua.

Figura 6.

Cobertura vegetal y uso del suelo en la MQSPM.



Fuente: MAG (2015); Ministerio del Ambiente (2013).

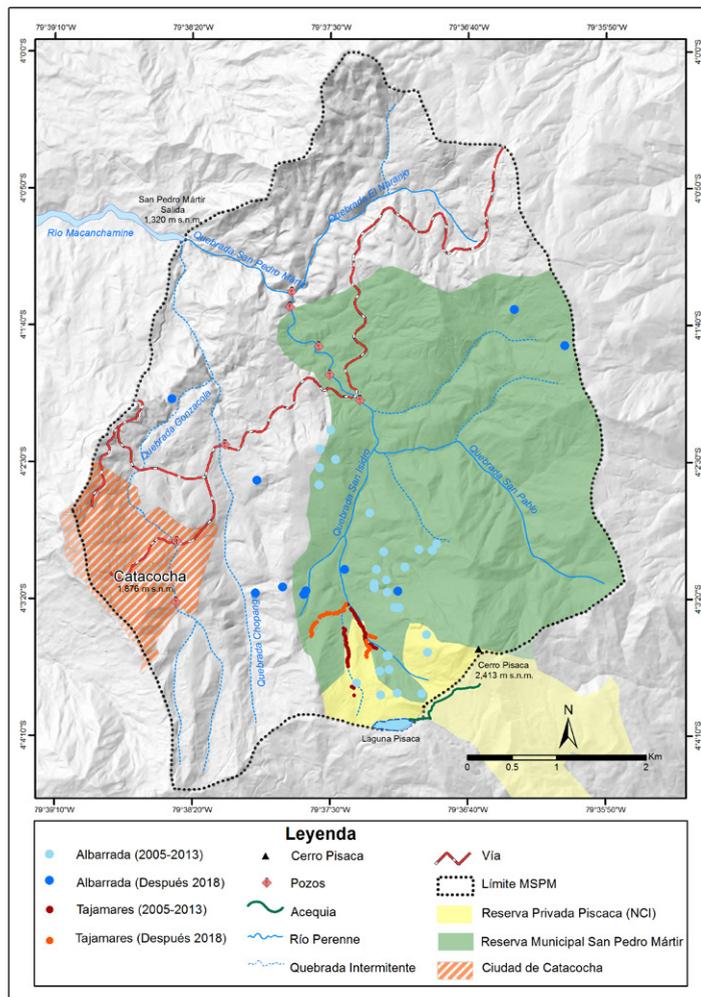
En la figura 7, se puede observar la ubicación de las principales albarradas y tajamares construidos en las laderas del monte Pisaca. Adicionalmente, se observan las áreas de reserva dentro de la microcuenca que se han destinado para protección de fuentes hídricas y conservación de naturaleza.

Desde el inicio de la recuperación de los humedales en el año 2005 hasta el año 2013, en la MQSPM se han construido un total de 28 albarradas. La capacidad total de almacenamiento de agua de las albarradas es de 182.482 m³ con un promedio de 6.517 m³. La albarrada más grande es la denominada como laguna Pisaca y tiene una capacidad volumétrica de 78.422 m³ y la más pequeña tiene una capacidad de 143 m³.

De las 28 albarradas, incluyendo a la Laguna Pisaca, 17 se encuentran en la Reserva Pisaca, propiedad de la ONG Naturaleza y Cultura Internacional (NCI), protegiendo así el 82% del agua almacenada en las albarradas. Las demás cochas se encuentran en propiedades privadas (G. Ramón, comunicación personal, 23 de marzo de 2018). Posteriormente, en el año 2018 se construyeron nuevas albarradas y tajamares, a la vez de dar mantenimiento a las anteriores (ver figura 7).

Figura 7.

Ubicación de albarradas, tajamares y puntos de captación de agua subterránea en la MQSPM. Se observan las reservas destinadas a conservación y protección de fuentes hídricas.



CAMBIOS EN LA VEGETACIÓN DE LA MQSPM

El fundamento de la ecohidrología manifiesta una doble regulación entre la hidrología y la biota (Zalewski, 2013, 2018). De esto se asume que al manipular los procesos hidrológicos se obtendrá un resultado en la biota. En este sentido, los sistemas de SyCA, al enfocarse en el manejo de los recursos hídricos mediante la manipulación del flujo hidrológico, evidencian con el tiempo cambios en las formaciones vegetales circundantes a las áreas intervenidas (Albarracín et al., 2021; Martos-Rosillo et al., 2019).

Con el fin de verificar los posibles cambios en la vegetación, utilizamos imágenes satelitales obtenidas del Departamento Geológico de los Estados Unidos de Norte América, U.S. Geological Survey, USGS, (<https://earthexplorer.usgs.gov/>). Las imágenes fueron comparadas a diferentes escalas y décadas. A escala de la microcuenca se comparó en los años 2000 y 2010 únicamente en la época de lluvias (abril). Por otra parte, a menor escala se realizó el análisis sobre las cercanías a las cochas, pero se comparó información para la época de lluvias (abril) y de estiaje (septiembre) entre los años 2000, 2010 y 2020. Los insumos utilizados se encuentran en la Tabla 1.

Utilizamos el Índice de Vegetación Ajustada al Suelo (SAVI). Este índice combina las reflectancias captadas en el infrarrojo cercano y rojo, los mismos del Índice de Vegetación Normalizado (NDVI), pero con la diferencia de que utiliza un factor de corrección del efecto suelo llamado "línea de suelo". Así, el SAVI corrige el efecto del suelo en el índice NDVI (Gonzaga-Aguilar, 2015).

Este índice genera valores entre -1 y 1, donde el valor negativo corresponde a nubes, agua y nieve; los valores cercanos a cero corresponden a rocas y terreno desnudo; y el valor positivo representa el verdor. El valor por debajo de 0,1 corresponde a rocas, arena o nieve; los valores de 0,2 a 0,3 representan generalmente terrenos con arbustos y prados; mientras que los valores de 0,6 a 0,8 representan alta presencia de bosque y zonas templadas y tropicales (Herrera, 2017).

Tabla 1.

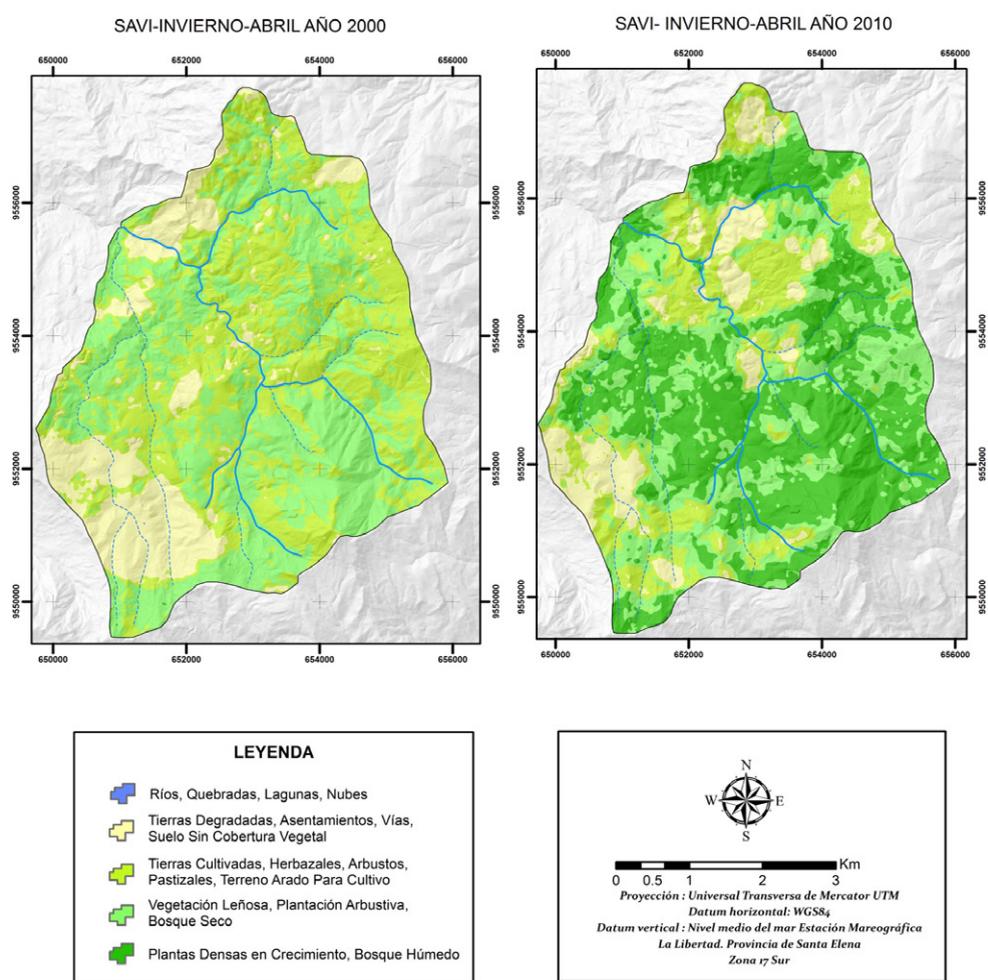
Información técnica de las imágenes satelitales utilizadas para el análisis SAVI.

Satélite	Sensor	Bandas utilizadas	Fecha con respecto a la estacionalidad	
			Verano	Invierno
Landsat 7	ETM+	3 y 4	22 abril 2000	29 septiembre 2000
Landsat 7	ETM+	3 y 4	02 abril 2010	9 septiembre 2010
Landsat 8	OLI/TIRS	4 y 5	21 abril 2020	20 septiembre 2020

Comparando las imágenes satelitales de la MQSPM en la temporada de lluvias (abril) entre los años 2000 y 2010 (Figura 8), se evidencia un incremento en la cobertura vegetal de plantas densas en crecimiento, bosque húmedo.

Figura 8.

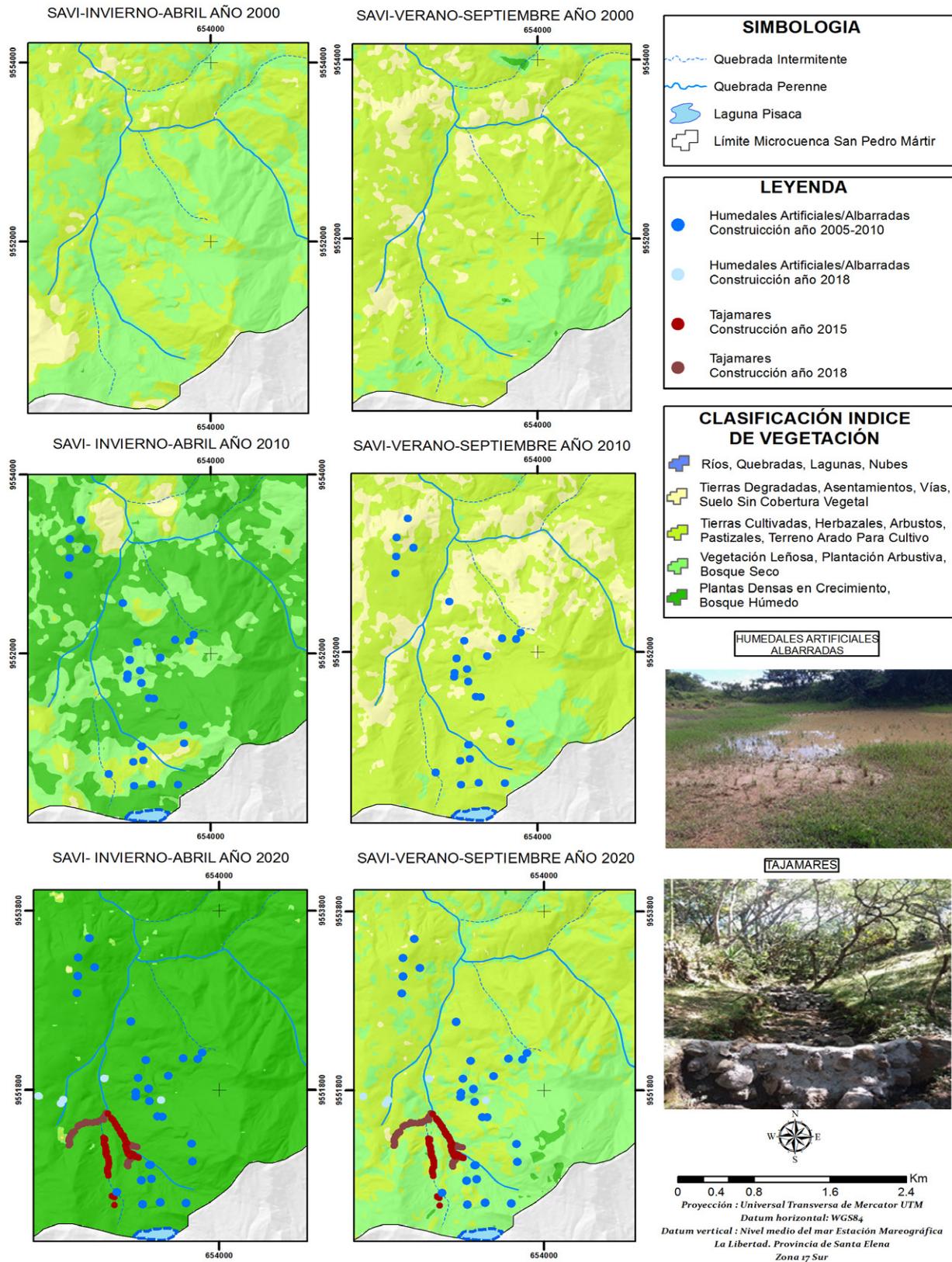
Imágenes satelitales (Landsat 7), comparando los años 2000 y 2010 en época lluviosa en la MQSPM.



Fuente: UGSS (2000-2020) (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

Figura 9.

Índice de Vegetación Ajustado al Suelo (SAVI) de los años 2000, 2010 y 2020 (verano e invierno) para el área de influencia de las cochas y tajamares construidos en la MQSPM.



Fuente: UGSS (<https://earthexplorer.usgs.gov/>)

La vegetación en la microcuenca es de tipo caducifolia, es decir que los árboles pierden sus hojas en las temporadas de poca precipitación y reverdecen en el período de lluvias. En el análisis de vegetación de toda la microcuenca, se utilizaron únicamente las imágenes satelitales provenientes del Satélite Landsat 7, con el objeto de evitar posibles diferencias producidas por las características técnicas y tecnológicas de los satélites y, en ambos casos, se compara en época lluviosa. Mediante la herramienta "Gap-Fill", del software ENVI 5.3, se corrigió el bandeo en la imagen del año 2010 aplicando el método propuesto por el USGS, en el cual se interpolan los píxeles de los bordes hacia el centro del vacío (Velandia Novoa y Rojas Sánchez, 2017).

Por otra parte, comparamos la parte sur de la microcuenca en el área de influencia de las cochas y tajamares construidos entre los años 2005 y 2010 y los construidos a partir de 2018 (Figura 9).

Para un mejor análisis de los valores obtenidos se realizó un proceso de corrección de imágenes satelitales (radiancia y reflectancia), con el fin de precisar mejor los resultados.

Al analizar el SAVI en la MQSPM, en temporada invernal, se observa que en el año 2000, la clasificación Tierras degradadas, Asentamientos, Vías y Suelo sin cobertura vegetal, ocupaba un 17 %. Este porcentaje disminuyó notablemente para los siguientes años; en el año 2010 a 11% y en el año 2020 a 1 %. En cuanto

a la clasificación de Tierras cultivadas, Herbazales, Arbustos, Pastizales y Terreno arado para cultivo, en el año 2000 ocupaba un 40%, mientras que para el año 2010 disminuyó a un 19% y a un 0.55% para el año 2020. Así mismo, la Vegetación leñosa, Plantación arbustiva, Bosque seco, en el año 2000 ocupaba un 43%, mientras que en el año 2010 ocupaba un 28% y en el año 2020 un 1%. Finalmente, la clasificación de Plantas densas en crecimiento y Bosque húmedo, pasó de un 0 % en el año 2000 a un 42% para el año 2010 y a un 97 % al año 2020.

Presumimos que los factores que influenciaron en estos resultados, se deben a que en el año 2000 existió degradación y deforestación de la MQSPM para ampliar la frontera agrícola (CAN, 2009). Esto se evidenció sobre la disponibilidad de caudales de 13.85 l/s a 9.83 l/s.

Claramente se observa una recuperación de la cobertura vegetal arbustiva y arbórea; esto se atribuye a la reconstrucción de las cochas en las faldas del cerro Pisaca a partir del año 2005. Así mismo, en el año 2005 se reforestaron cerca de 80 hectáreas con eucalipto (*Eucalyptus sp.*) y 10 hectáreas con pino (*Pinus sp.*). Para el año 2015 se crea una reserva natural que comprendía la adquisición de 400 hectáreas de la zona del monte Pisaca y la implementación de 125 tajamares en la reserva Pisaca (Ramón, 2014). Finalmente, en el año 2018 se implementaron 9 cochas nuevas y 150 tajamares (GAD Paltas, 2020).



COMENTARIOS FINALES

En algunos de los ejemplos de sistemas de SyCA, se ha constatado un periodo de funcionamiento ininterrumpido por más de mil años. Estos sistemas han permitido superar los drásticos cambios climáticos y sociales acaecidos a lo largo del tiempo. Se trata, por lo tanto, de sistemas de gestión de agua resilientes que pueden servir como ejemplo de adaptación al cambio climático. Además, son herramientas para minimizar los efectos de las sequías y tienen un interés cultural, social y económico indiscutible.

Desde mediados del siglo pasado, la búsqueda de soluciones a los problemas de gestión del agua se ha intentado resolver mediante el uso de infraestructura gris. En todo ese tiempo, el conocimiento ancestral de la naturaleza por parte de las comunidades indígenas y campesinas locales ha sido menospreciado.

Los beneficios aportados por estos sistemas y sus valores tangibles e intangibles han merecido una especial atención y protección desde diferentes

instituciones internacionales como UNESCO. A pesar de esto, estos sistemas ancestrales de manejo de agua se enfrentan a una situación de riesgo. El envejecimiento y la reducción de la población local, las migraciones, el abandono de los sistemas de manejo del agua locales, la minería, entre otras causas, están contribuyendo a reducir de forma drástica la existencia de estos antiguos sistemas de manejo del agua y el suelo. Debemos impedir la interrupción de la transmisión de ese conocimiento intergeneracional y la implantación de nuevas formas de desarrollo no sostenibles.

El sitio demostrativo de Ecohidrología Paltas-Catacocha es un ejemplo que seguir, en el que un sistema de SyCA presenta mejoras en la sostenibilidad de la microcuenca en términos de WBSR-CE. Al entender la hidrología de la zona, se determinó que el prolongado tiempo de sequía (mayo – diciembre) era el principal problema por resolver. Mediante el manejo del caudal y la retención de agua en albardas y tajamares se recargan los acuíferos permitiendo una mayor disponibilidad de agua en el tiempo de estiaje. De esta manera, los servicios ecosistémicos que dependen del recurso agua se incrementan a la vez que se aumenta la resiliencia de la microcuenca y se mitigan los efectos del cambio climático.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecemos al Programa de Máster en Gestión de Recursos Hídricos de la Universidad Politécnica Salesiana de Quito; al Laboratorio de Ecología Tropical y Servicios Ecosistémicos, Departamento de Ciencias Biológicas y Agropecuarias de la Universidad Técnica Particular de Loja; al Gobierno Autónomo Descentralizado del cantón Paltas; a las ONG's COMUNIDEC y Naturaleza y Cultura Internacional. Adicionalmente,

nuestro agradecimiento al Programa Hidrológico Intergubernamental de UNESCO y Fundación Ecohidrológica por su apoyo a la implementación de la ecohidrología en Ecuador. Al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED), por el apoyo financiero a la Red SyCA en Áreas Naturales Protegidas (Grant 419RT0577).

REFERENCIAS

- Acreman, M. C. 2001. *Hydro-ecology: Linking Hydrology and Aquatic Ecology: Proceedings of an International Workshop (HW2) Held During the IUGG 99, the XXII General Assembly of the International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) Held at Birmingham, UK, in July 1999* (Número 266). International Assn of Hydrological Sciences.
- Albalá, L. 1995. *Paltas: Leyendas y Tradiciones*. Casa de la Cultura Ecuatoriana,.
- Albarracín, M., Gaona, J., Chicharo, L. and Zalewski, M. (2018). *Ecohidrología y su Implementación en Ecuador*. EDILOJA.
- Albarracín, M., Ramón, G., González, J., Iñiguez-Armijos, C., Zakaluk, T. and Martos-Rosillo, S. (2021). The Ecohydrological Approach in Water Sowing and Harvesting Systems: The Case of the Paltas Catacocha Ecohydrology Demonstration Site, Ecuador. *Ecohydrology & Hydrobiology*.
- Álvarez-Litben, S. G. 2021. Cultural sustainability and community water management in coastal Ecuador: jagüeyes or albarradas and small dams or detention ponds. *Sustainability in Debate/Sustentabilidade em Debate*, 12(1).
- Baird, A. J., & Wilby, R. L. 1999. *Eco-hydrology: plants and water in terrestrial and aquatic environments*. Psychology Press.
- Barberá, J. A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo, I., Pedrera, A. and Martos-Rosillo, S. 2018. Groundwater dynamics in a hydrologically-modified alpine watershed from an ancient managed recharge system (Sierra Nevada National Park, Southern Spain): Insights from hydrogeochemical and isotopic information. *Science of the total environment*, 640, 874-893.
- Bednarek, A., Stolarska, M., Ubraniak, M. and Zalewski, M. 2010. Application of permeable reactive barrier for reduction of nitrogen load in the agricultural areas — preliminary results. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 10(2), 355-361. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/v10104-011-0007-6>
- Bednarek, A., Szklarek, S. and Zalewski, M. 2014. Nitrogen pollution removal from areas of intensive farming—comparison of various denitrification biotechnologies. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 14(2), 132-141. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2014.01.005>
- Bridgewater, P. 2018. Whose nature? What solutions? Linking Ecohydrology to Nature-based solutions. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 18(4), 311-316. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.ecohyd.2018.11.006>
- CAN. 2009. Sembrando agua. En P. Comunidad Andina de Naciones (Ed.), *Manejo de microcuencas: Agua para la parroquia Catacocha y las comunidades rurales*. (Vol. 4, Número 4, p. 28).
- Carrión, P., Herrera, G., Briones, J., Sánchez, C. and Limón, J. 2018. Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador. *WIT Trans. Ecol. Environ*, 217, 375-386.
- Castro, M. and Fernández, L. 2007. *Gestión Sostenible de Humedales*. Gráfica LOM.
- Crutzen, P. J. 2002. *Geology of mankind: the Anthropocene*. *Nature*, 415, 23.
- GAD Paltas. 2017. *Formulario de Postulación al Premio Verde del Banco del Estado 2017. Plan de manejo de la microcuenca San Pedro Martir y de la reserva Pisaca, como zona de recarga de las fuentes que abastecen de agua para consumo humano a la ciudad de Catacocha*.
- Garreaud, R. D. 2009. *The Andes climate and weather*, *Adv. Geosci.*, 22, 3–11.
- Gleeson, T., Befus, K. M., Jasechko, S., Luijendijk, E. and Cardenas, M. B. 2016. The global volume and distribution of modern groundwater. *Nature Geoscience*, 9(2), 161-167.
- Gonzaga-Aguilar, C. 2015. Aplicación de índices de vegetación derivados de imágenes satelitales para análisis de coberturas vegetales en la provincia de Loja, Ecuador. *Bosques Latitud Cero*, 5(1).
- Headley, T. R., & Kadlec, R. H. 2007. Conducting hydraulic tracer studies of constructed wetlands: a practical guide. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 7(3), 269-282. [https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70110-6](https://doi.org/https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70110-6)
- Herrera, N. 2017. Implementación De Biomodelos Estimativos De La Calidad Ecosistémica En El Nevado Del Cocuy Al Año 2030 Producto Del Retroceso Glaciar. En *Universidad Distrital Francisco José de Caldas*. Universidad Distrital Francisco José de Caldas.
- Huete, A. R. 1988. A soil-adjusted vegetation index (SAVI). *Remote sensing of environment*, 25(3), 295-309.

- Kiedrzyńska, E., Urbaniak, M., Kiedrzyński, M., Józwiak, A., Bednarek, A., Gaęła, I. and Zalewski, M. 2017. The use of a hybrid Sequential Biofiltration System for the improvement of nutrient removal and PCB control in municipal wastewater. *Scientific Reports*, 7(1), 5477.
- Locatelli, B., Homberger, J.-M., Ochoa-Tocachi, B., Bonnesoeur, V., Román, F., Drenkhan, F. and Buytaert, W. 2020. *Impactos de las zanjas de infiltración en el agua y los suelos: ¿Qué sabemos?* Infraestructura Natural para la Seguridad Hídrica, Forest Trends, Lima, Peru.
- MAG. 2015. *Geoportal del Agro Ecuatoriano*.
- Mankiewicz-Boczek, J. 2012. Application of molecular tools in Ecohydrology. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 12(2), 165-170. <https://doi.org/https://doi.org/10.2478/v10104-012-0014-2>
- Martos-Rosillo, S., Durán, A., Castro, M., Vélez, J. J., Herrera, G., Martín-Civantos, J. M., Mateos, L., Durán, J. J., Jódar, J. and Gutiérrez, C. 2020. Ancestral Techniques of Water Sowing and Harvesting in Ibero-America: Examples of Hydrogeoethical Systems. En *Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development* (pp. 489-492). Springer.
- Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J. M., Martínez-Moreno, F. J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A. and Galindo-Zaldívar, J. 2019. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: New insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 578, 124047.
- McClain, M. E., Chicharo, L., Fohrer, N., Gaviño Novillo, M., Windhorst, W. and Zalewski, M. 2012. Training hydrologists to be ecohydrologists and play a leading role in environmental problem solving. *Hydrology and Earth System Sciences*, 16(6), 1685-1696. <https://doi.org/10.5194/hess-16-1685-2012>
- MINAGRI. 2016. *Rumbo a un Programa Nacional de Siembra y Cosecha de Agua: Aportes y reflexiones desde la práctica* (Ministerio de Agricultura y Riego del Perú (ed.)). Bio Partners SAC.
- Ministerio del Ambiente, (MAE). 2013. Sistema de Clasificación de Ecosistemas del Ecuador Continental. En *Subsecretaría de Patrimonio Natural*. Quito.
- Nuttle, W. K. 2002. Eco-hydrology's past and future in focus. *Eos, Transactions American Geophysical Union*, 83(19), 205-212.
- Ochoa-Tocachi, B., Bardales, J., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, J., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., Bièvre, B. D. and Buytaert. 2019. *Contribuciones potenciales de la infraestructura preincaica de infiltración de agua para la seguridad hídrica en los Andes*. 2, 1-20.
- OEA, S. G. 1994. *Plan integral de desarrollo de los recursos hídricos de la provincia de Loja*. Loja: Departamento de Desarrollo Regional y Medio Ambiente.
- Pérez, M. L. and Argueta, A. 2011. Saberes indígenas y diálogo intercultural. *Cultura y representaciones sociales*, 5(10), 31-56.
- Ramón, G. 2008. *Formas ancestrales de almacenamiento de agua en los andes de páramo: una mirada histórica*.
- Ramón, G. 2014. Agua para la alimentación agua para la vida. *COMUNIDEC*, XXXIII(2), 250. http://www.americanbanker.com/issues/179_124/which-city-is-the-next-big-fintech-hub-new-york-stakes-its-claim-1068345-1.html%5Cnhttp://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed/15003161%5Cnhttp://cid.oxfordjournals.org/lookup/doi/10.1093/cid/cir991%5Cnhttp://www.scielo
- Ramón, G. 2015. *Quilanga: Historia y perspectiva*. Casa de la Cultura Ecuatoriana Benjamín Carrión, Núcleo de Loja.
- Ramón, G. 2018. Recuperación de saberes ancestrales de los Paltas para el manejo del agua en Catacocha. En M. Albarracín, J. Gaona, L. Chicharo, & M. Zalewski (Eds.), *Ecohidrología y su implementación en Ecuador* (pp. 134-135). EDIJOJA.
- Ramón, G. 2019. El manejo ancestral de la humedad en el Ecuador antiguo: originalidad y complejidad. En J. M. García & G. Ramón (Eds.), *La vigencia de las prácticas ancestrales para la agricultura en el manejo del agua* (pp. 42-69).
- Rodríguez-Iturbe, I. 2000. Ecohydrology: A hydrologic perspective of climate-soil-vegetation dynamics. *Water Resources Research*, 36(1), 3-9.
- Salazar, E. 2009. *Lluthu: Una perdiz en el Saco de Carbón*.
- Somers, L. D., McKenzie, J. M., Zipper, S. C., Mark, B. G., Lagos, P. and Baraer, M. 2018. Does hillslope trenching enhance groundwater recharge and baseflow in the Peruvian Andes? *Hydrological Processes*, 32(3), 318-331.

Sprenger, C., Hartog, N., Hernández, M., Vilanova, E., Grützmacher, G., Scheibler, F. and Hannappel, S. (2017). Inventario des sites de gestion des aquifères par recharge en Europe: développement historique, situation actuelle et perspectives. *Hydrogeology Journal*, 25(6), 1909-1922. <https://doi.org/10.1007/s10040-017-1554-8>

UN. 2015. *Global Sustainable Development Report*.

Velandia Novoa, O., & Rojas Sánchez, J. 2017. Análisis Multitemporal De La Cobertura Del Bosque Húmedo Tropical En La Amazonía Colombiana 2009-2018 (San Vicente Del Caguán- Cartagena Del Chairá, Caquetá). *Journal of Chemical Information and Modeling*, 110(9), 1689-1699.

WWAP/ONU-Agua. 2018. Soluciones basadas en la naturaleza para la gestión del agua. En *Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos*. UNESCO.

Yapa, K. 2013. Prácticas Ancestrales de Crianza de Agua: una guía de campo. En PNUD (Ed.), *Estrategias para adaptarnos a la escasez de agua*. Reimpresión Edipcentro Cía. Ltda. Edipcentro Cía. Ltda.

Yapa, K. 2016. Nurturing Water: Ancestral Ground Water Recharging in the Americas. 7th RWSN Forum «Water for Everyone», 18.

Zalewski, M. 2000. Ecohydrology-the scientific background to use ecosystem properties as management tools toward sustainability of water resources. *Ecological Engineering*, 16(1), 1-8.

Zalewski, M. 2002. Ecohydrology—The use of ecological and hydrological processes for sustainable management of water resources/Ecohydrologie—La prise en compte de processus écologiques et

hydrologiques pour la gestion durable des ressources en eau. *Hydrological Sciences Journal*, 47(5), 823-832.

Zalewski, M. 2006. Ecohydrology-an interdisciplinary tool for integrated protection and management of water bodies. *Large Rivers*, 613-622.

Zalewski, M. 2013. Ecohydrology: process-oriented thinking towards sustainable river basins. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 13(2), 97-103.

Zalewski, M. 2018. Ecohidrología como un marco para la mejora del potencial de sostenibilidad de cuencas hidrográficas. En M. Albarracín, J. Gaona, L. Chicharo, & M. Zalewski (Eds.), *Ecohidrología y su Implementación en el Ecuador*. (pp. 51-59). EDILOJA.

Zalewski, M. 2007. Ecohydrology in the face of the Anthropocene. *Ecohydrology and Hydrobiology*, 7(2), 99-100. [https://doi.org/10.1016/S1642-3593\(07\)70175-1](https://doi.org/10.1016/S1642-3593(07)70175-1)

Zalewski, M., Harper, D. M., Demars, B., Jolánkai, G., Crosa, G., Janauer, G. A. and Pacini, N. 2008. Linking biological and physical processes at the river basin scale: the origins, scientific background and scope of ecohydrology. En D. M. Harper, M. Zalewski, & N. Pacini (Eds.), *Ecohydrology—Processes, Models and Case Studies*, edited by: Harper, D., Zalewski, M., and Pacini, N., CABI, Oxfordshire (pp. 1-17).

Zalewski, M., Janauer, G. and Jolánkai, G. 1997. Ecohydrology: A New Paradigm for the Sustainable Use of Aquatic Resources. *International Hydrological Programme, Conceptual Background, Working Hypothesis, Rationale and Scientific Guidelines for the Implementation of the IHP-V Projects 2.3/2.4*.



Manejo sostenible del agua: algunos registros de Siembra y Cosecha de Agua en Ecuador

Sustainable water management:
some registers of Water Sowing
and Harvesting in Ecuador



Paúl Carrión-Mero ^{1,2}, **Maribel Aguilar-Aguilar** ¹, **Gianella Bravo-Murillo** ², **Gricelda Herrera-Franco** ^{3,4}

- 1 Centro de Investigaciones y Proyectos Aplicados a las Ciencias de la Tierra (CIPAT), ESPOL Polytechnic University, P.O. Box 09-01-5863 Guayaquil, Ecuador. pcarrion@espol.edu.ec (P.C.-M.) ; maesagui@espol.edu.ec (M.A.-A.)
- 2 Facultad de Ingeniería en Ciencias de la Tierra, ESPOL Polytechnic University, P.O. Box 09-01-5863 Guayaquil, Ecuador. gbravo@espol.edu.ec (G.B.-M.)
- 3 Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Estatal Península de Santa Elena (UPSE), Avda. Principal La Libertad-Santa Elena, La Libertad 240204, Ecuador. grisherrera@upse.edu.ec (G.H.-F.)
- 4 Geo-Recursos y Aplicaciones GIGA, ESPOL Polytechnic University, P.O. Box 09-01-5863 Guayaquil, Ecuador

Manejo sostenible del agua: algunos registros de Siembra y Cosecha de Agua en Ecuador

RESUMEN

El crecimiento poblacional ha generado el incremento en la demanda de agua a nivel mundial. El estrés hídrico por el cual atraviesa el planeta requiere de soluciones enfocadas en la sostenibilidad social, ambiental y económica. La Siembra y Cosecha de Agua (en adelante SyCA) es un conocimiento ancestral ampliamente utilizado como técnica sostenible en el manejo de agua. El objetivo de este trabajo es relatar algunos casos de SyCA en Ecuador, mediante el registro en zonas costeras y andinas para el reconocimiento de su importancia en el abastecimiento de agua en comunidades rurales. La metodología de este trabajo contempla: (i) tipos de estructuras utilizadas en la SyCA en Ecuador (ii) presentación de casos de SyCA en diferentes comunidades del país, (iii) reporte de publicaciones relacionadas a la SyCA en el país, y (iv) análisis de las ventajas de la aplicación de estas técnicas y su relación con la sostenibilidad. Los resultados evidencian que, en Ecuador, la SyCA es un método empleado como solución a los problemas de escasez de agua, asequible y con una eficiencia elevada. En la región costera son frecuentes las albarradas (jagueyes) y los tapes (diques), mientras que en la región andina son más comunes los camellones, diversidad de zanjas u otros. En concreto, estas estructuras que provienen del conocimiento ancestral son amigables con el ambiente, favorecen la conservación del recurso hídrico y promueven el desarrollo de la biodiversidad. Desde el punto de vista de la SyCA, es posible brindar soluciones al manejo de agua basadas en la naturaleza, asequibles y eficientes. En los albores del siglo XXI, las estructuras de SyCA se convierten en un ejemplo y referencia para el desarrollo sostenible.

Sustainable water management: some registers of Water Sowing and Harvesting in Ecuador

ABSTRACT

Population growth has generated an increase in the demand for water worldwide. The water stress that the planet is going through requires solutions focused on social, environmental and economic sustainability. Water Sowing and Harvesting (WS&H) is an ancient knowledge widely used as a sustainable technique in water management. The objective of this work is to report some cases of WS&H in Ecuador through the registry in coastal and Andean areas to recognize its importance in the supply of water in rural communities. The methodology of this work includes (ii) types of structures used in WS&H in Ecuador, (i) presentation of cases of WS&H in different communities of the country, (iii) report of publications related to WS&H in the country and (iv) analysis of the advantages of applying these techniques and their relationship with sustainability. The results show that WS&H is a method used as a solution to the problems of water scarcity, affordable and with high efficiency in Ecuador. In the coastal region, albarradas (jagueyes) and tapes (dikes) are frequent, while in the Andean region, camellones, a variety of ditches and others are more common. Specifically, these structures that come from ancestral knowledge are friendly to the environment, favour the conservation of water resources, and promote the development of biodiversity. From WS&H's point of view, it is possible to provide nature-based, affordable, and efficient water management solutions. Therefore, at the dawn of the 21st century, WS&H structures become an example and reference for sustainable development.

INTRODUCCIÓN

El agua dulce representa solamente el 1,8% del agua disponible en la tierra (Durack, 2015). Desde la década de 1980, se ha registrado un crecimiento anual del 1% en la demanda de agua (Abbott *et al.*, 2019). Sin embargo, estas cifras seguirán en aumento a un ritmo similar hasta 2050 (Mekonnen *and* Hoekstra, 2016). Los principales factores que contribuyen en el incremento de la demanda de agua son el crecimiento poblacional, cambio climático, industrialización, incremento de producción agrícola y degradación ambiental (Karimi-Maleh *et al.*, 2020, 2021). La combinación de todos estos factores ha llevado al planeta a un escenario de estrés hídrico, en el cual dos tercios de la población mundial experimentan escasez severa de agua en épocas particulares del año (Mekonnen y Hoekstra 2016; Waters *et al.* 2016).

Ante los problemas de escasez de agua, la humanidad se ha centrado en creación de estrategias de gestión práctica y sostenible del recurso hídrico (Herrera-Franco *et al.*, 2021; Ross y Chang, 2020; Sivapalan, Savenije y Blöschl, 2012). Principalmente, se ha considerado de gran importancia la participación de la comunidad en la gestión de los recursos hídricos (Dungumar y Madulu 2003; Herrera-Franco *et al.* 2020). A pesar que el nivel de participación es bajo en los países en desarrollo, de acuerdo con Bell (2001), la participación comunitaria permite: i) el surgimiento de experiencias e ideas que contribuyan con soluciones prácticas en la gestión del agua, ii) utilización de conocimiento indígena que permita proteger el medio ambiente y gestionar de forma adecuada los recursos hídricos, y iii) la generación de confianza pública, evitando inconformidad con respecto al manejo de agua entre usuarios y partes interesadas.

Desde el enfoque sostenible del manejo del agua, desde hace miles de años la humanidad ha venido aplicando la denominada Siembra y Cosecha de Agua (SyCA). La Siembra y Cosecha de Agua es un proceso ampliamente empleado por el ser humano, cuyo objetivo es recolectar e infiltrar agua (agua lluvia, escorrentía superficial, agua hipotérmica o subterránea) para recuperar en fechas y/o lugares posteriores. Este proceso rescata el conocimiento ancestral de nuestros antepasados, basados en

técnicas ecológicas y asequibles en la recarga intencional de acuíferos (Martos-Rosillo *et al.*, 2021).

En la Cordillera de los Andes se han aplicado diferentes técnicas de Siembra y Cosecha de Agua, incluso antes de la llegada de los españoles (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2019; Yapa, 2016), y en el sur de España, desde finales de la Edad Media (Martos-Rosillo *et al.* 2019). En las zonas rurales de América Latina, el agua es suministrada de forma parcial o total por el agua subterránea, estimándose una menor cantidad de fuentes de agua en las zonas rurales respecto a las urbanas (Torres-López *et al.*, 2015). Algunos ejemplos de SyCA son: i) Perú con técnicas como qochas, zanjas, amunas y cucha-cuchas, ii) Chile con técnicas como bofedal y acequias, iii) España con técnicas como acequias de careo y zayas (Martos-Rosillo *et al.*, 2021).

En Ecuador, se aplica la SyCA en la región de la costa y en la sierra. Las principales técnicas son las denominadas albarradas (qochas o amunas), camellones, y tapes. En este estudio se presentan algunos casos de Siembra y Cosecha de Agua, mediante el registro en zonas costeras y andinas para el reconocimiento de su importancia en el abastecimiento de agua en comunidades rurales.

En Ecuador, se aplica la SyCA en la región de la costa y en la sierra. Las principales técnicas son las denominadas albarradas (qochas o amunas), camellones, y tapes.



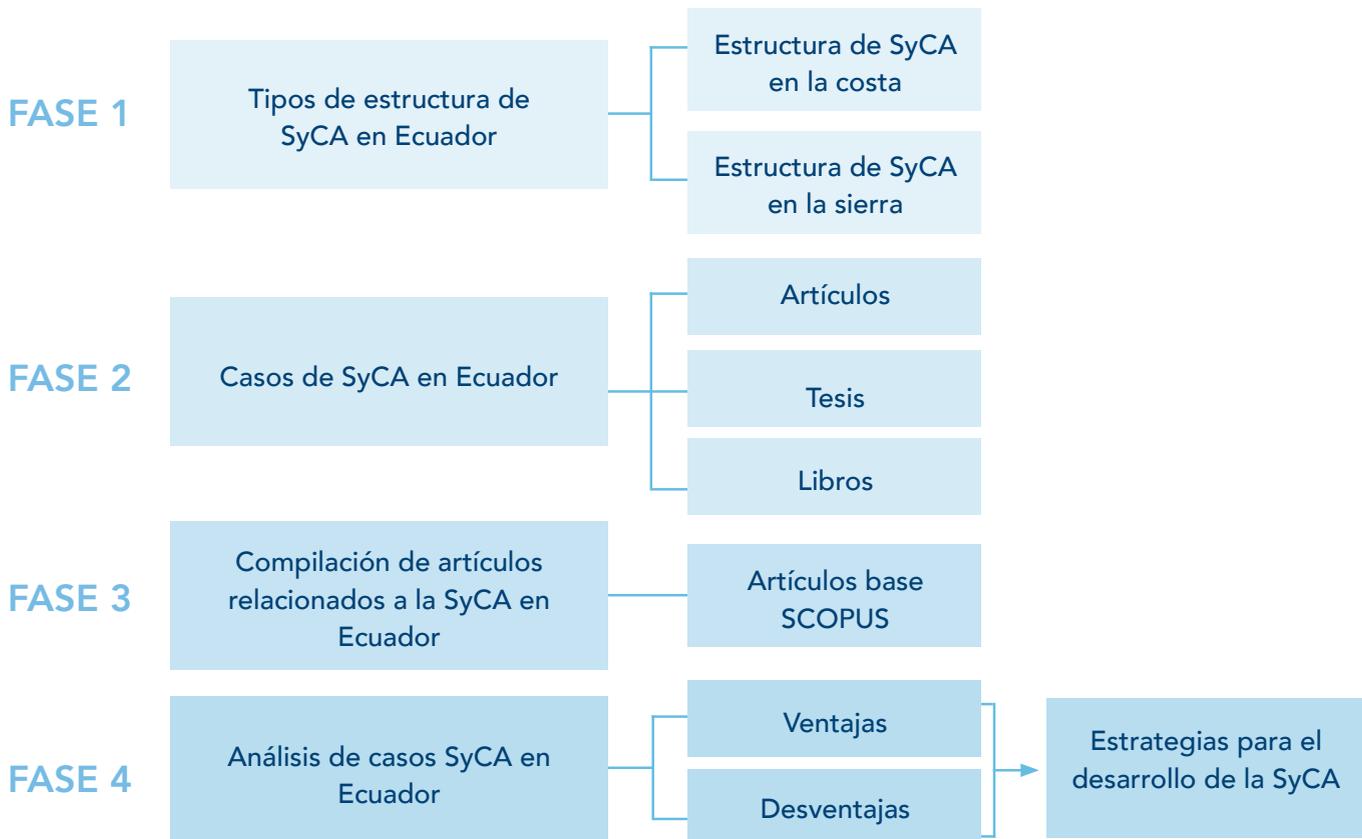
METODOLOGÍA

El proceso metodológico de este estudio comprende cuatro fases: i) tipos de estructuras de SyCA empleados en el país, ii) reporte de casos de SyCA en diferentes comunidades del país, iii) reporte de publicaciones

científicas relacionadas a la SyCA, y iv) análisis de casos de SyCA en Ecuador para el planteamiento de estrategias de desarrollo sostenible (Figura 1).

Figura 1.

Esquema general de metodología.



El proceso se inicia con la recopilación de casos de SyCA en el país y la presentación de las principales técnicas aplicadas en base a información disponible en la web (e.g. tesis, artículos, reportes técnicos, libros), para la definición de casos de aplicación, estructura y funcionamiento. Además, se realizó la compilación de divulgación científica (artículos) de las técnicas empleadas en Ecuador, a través de una revisión sistemática en la base de datos SCOPUS. La información recolectada permitió realizar un análisis de la situación actual de SyCA en el país, sus principales ventajas y desventajas y el planteamiento de estrategias de divulgación y manejo sostenible de la SyCA.

TIPOS DE ESTRUCTURAS SYCA EN ECUADOR

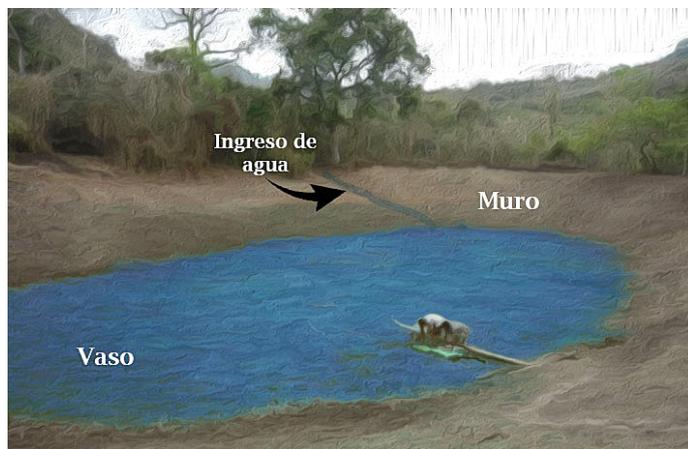
En Ecuador la aplicación de SyCA se desarrolla en la regiones de la costa y de la sierra y sus técnicas varían de acuerdo con el tipo de almacenamiento de agua, condiciones climáticas y geológicas. Yapa (2016) hace una muy buena recopilación de las técnicas ancestrales en la gestión del agua empleadas en Sudamérica. A continuación, se presentan los tipos de técnicas empleadas en el país y su funcionamiento.

Albarradas o jagüeyes

Son estructuras construidas por la población indígena dirigidas a la captación y almacenamiento de agua en áreas donde se apreciaba el escaso recurso hídrico, o periodos de sequía; estas construcciones tienen distintas formas, ya sean circulares o semicirculares (Marcos y Tobar, 2004). La estructura está compuesta por un muro de tierra que retiene el agua, constituido por compactación y cimentación manual o mecanizada de la zona; un vaso que contiene el agua de las precipitaciones y la escorrentía; una zona de entrada de agua la cual orienta el agua superficial hacia el vaso; y un área de desfogue que ayuda a liberar el excedente de agua y evitar el impacto sobre el muro (Álvarez, 2014) (Figura 2). Estas se llenan por medio de acumulación lenta de precipitaciones o aguas que bajan de las elevaciones cercanas. Actualmente en el Ecuador constituyen patrimonio tecnológico, ecológico y cultural de alto valor económico y simbólico (Álvarez and Zulaica, 2015).

Figura 2.

Esquema de una albarrada.



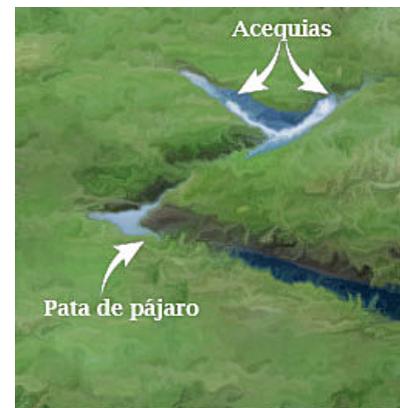
Pata de pájaro (pishku chaqui)

Es una fuente de agua de manera artificial, que por medio de conductores (acequias) forman una pata de pájaro, que se deriva a una conducción principal de modo que el agua cubre toda la parcela, permitiendo dotar a los cultivos de agua. Esta técnica fue adoptada por los hacendados, los agricultores de las partes altas que no tenían agua de riego (Martínez, 2014) (Figura 3).

La distribución de un caudal mayor a uno menor permite disminuir la cantidad de agua donde se manejan caudales no erosivos, cubriendo así todo el terreno de los cultivos con mínimo riesgo de erosión a comparación de un suelo desnudo, pero aun así se recomienda caudales más pequeños, mayormente cuando se hacen riego en laderas con pendientes pronunciadas (Tecnologías Agrícolas, 2018).

Figura 3.

Esquema de una estructura de pata de pájaro.

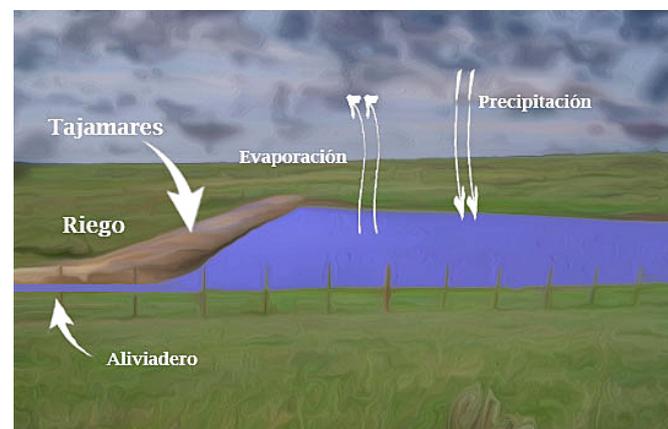


Tajamares o represas

Son obras que consisten en unir dos laderas que se aproximan mediante una cortina de tierra bien apisonada, de manera que detienen el escurrimiento del agua lluvia, formando lagunas. Estos contienen un aliviadero, que es un cauce que elimina los excedentes de agua, y además tiene una forma de extraer el agua para su utilización (García et al., 2012) (Figura 4).

Figura 4.

Esquema de un tajamar.

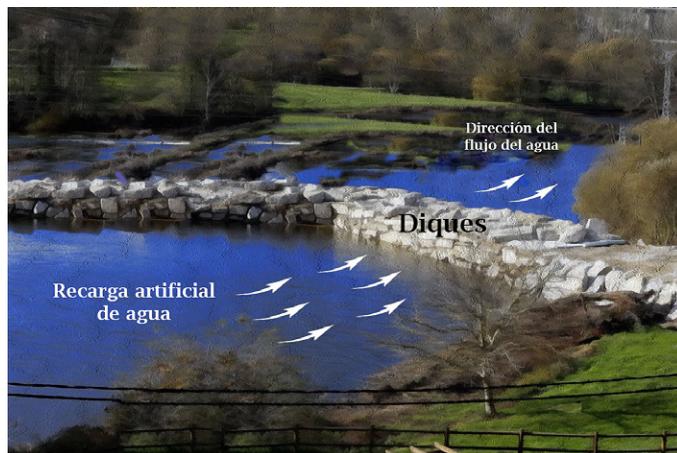


Diques o tapes

Es una técnica ancestral para el cuidado del agua, por medio de una recarga artificial que represa el agua en ciertas zonas del cauce del río para así recuperar el nivel del agua del subsuelo. El dique o tape consiste en un muro de acumulación de rocas y sedimentos en ciertas secciones a lo largo del río que permite represar agua, con objeto de satisfacer las necesidades de la población en época de escasez (Briones *et al.*, 2020) (Figura 5).

Figura 5.

Esquema de dique o tape.



CASOS DE SYCA EN ECUADOR

Provincia Santa Elena

La parroquia de Manglaralto se ubica en la zona semiárida al norte de la provincia de Santa Elena, en la cual el nivel de evapotranspiración es mayor que la precipitación actual (Jiménez *et al.*, 2010). En la zona, los meses de enero a mayo representan la temporada lluviosa, mientras que de junio a diciembre los registros de precipitación son nulos o muy bajos. El ciclo por lo general se ve afectado por la corriente de Humbolt y el fenómeno de El Niño, pasando de temperaturas de 20 °C a 36 °C respectivamente (García-Garizábal, 2017).

La Junta Administradora de Agua Potable Regional de Manglaralto (JAAPMAN) abastece de agua a los habitantes a través de la explotación de los escasos

recursos hídricos subterráneos con la construcción de pozos. El servicio abastece a seis comunidades en total (Manglaralto, Montañita, Río Chico, Cadeate, San Antonio y Libertador Bolívar), sin embargo el crecimiento poblacional y la población flotante (turismo) incrementan la demanda de agua en la zona (Carrión-Mero *et al.*, 2021). El bombeo intensivo y las condiciones climáticas han abatido el nivel freático y han provocado la intrusión de agua de mar en la cuenca (Carrión-Mero *et al.*, 2021). Para resolver el problema de estrés hídrico, la comunidad ha implementado la construcción de tapes o diques artesanales en los ríos que incrementan la recarga del acuífero. Este tipo de técnicas ha permitido abastecer de agua a las personas y controla la intrusión salina. La construcción de los tapes o diques artesanales representa una solución temporal, sin embargo, el diseño artesanal presenta debilidades que provocan fallos en los mismos. Debido a este tipo de problema, en la actualidad la estructura ha evolucionado. La Junta de Agua, junto con la comunidad, construye tapes o diques técnico-artesanales, en los cuales se integra el conocimiento ancestral y el científico mediante los estudios geológicos e hidrogeológicos realizados. Asimismo, se han realizado nuevos diseños para soportar las condiciones del terreno y el caudal del río (Carrión *et al.*, 2018). Actualmente, en la zona existen cinco diques y albarradas que captan el agua lluvia para consumo humano y agricultura (Carrión-Mero *et al.* 2021). De acuerdo con Herrera-Franco y Briones (2020) y Marcos y Tobar (2004), en la provincia de Santa Elena se han registrado 252 albarradas 87 tapes, 16 ciénagas y 9 pozas. En Loma Alta, los comuneros declararon el bosque como reserva y lo utilizaron para atrapar el agua de la niebla (Yapa, 2016).

Provincia Guayas

De acuerdo con Álvarez *et al.* (2005), en la provincia de Guayas, la SyCA es ampliamente aplicada en comunidades rurales con escasos recursos hídricos. En la provincia se han registrado aproximadamente un total de 58 albarradas, distribuidas en diferentes comunidades y parroquias, que almacenan agua en temporadas de invierno y la usan para consumo doméstico y ganadería del sector. Además de las albarradas, también se realizan tapes.

Provincia Manabí

En la zona sur de la provincia de Manabí, se ha detectado una importante presencia de sistemas de albarradas. Las poblaciones hacen uso del conocimiento ancestral para gestionar y cuidar el recurso hídrico. Es importante destacar que en la zona se evidencia la construcción de albarradas gracias a la convivencia entre las propiedades privadas y comunales. En la provincia se han inventariado un total de 53 albarradas y un tape artesanal. La comuna Sacán es la zona con mayor número de albarradas (11) usadas para consumo humano, producción ganadera, agrícola y ladrillera. En general, las albarradas tienen un mantenimiento colectivo, en el cual se aseguran de mantener la calidad del agua y gestionar su uso (Álvarez et al., 2005).

La comuna de Juncos en Manabí, utilizaba pozas prehispánicas en las lomas para la captación de agua de la niebla. Los habitantes construían pequeños canales que recogen las gotas de agua que caen de la vegetación y alimentan las pozas (Yapa, 2016).

Provincia Chimborazo

En la microcuenca del Chimborazo, el recurso hídrico es escaso, generando problemas para el riego en agricultura. Para tratar de solucionar esta situación, los habitantes hacen posible el suministro de agua a través de acequias. Este tipo de estructuras es un sistema utilizado en el riego, en el cual el agua del río o quebrada se redirecciona. Las acequias principales dirigen el agua hacia acequias secundarias, las cuales se dividen en dos mediante el uso de champones formando una "Y" invertida. Luego el agua se dirige a acequias terciarias para finalizar su recorrido por gravedad en el terreno de cultivo (Martínez, 2013; Morán et al., 2018). El paso del agua por estas acequias, excavadas en el terreno y sin revestir, termina alimentando a los acuíferos. También existen propuestas en las que se puede utilizar camellones (Hervas y Tiviano, 2021).

Provincia de Loja

El sector de Paltas Catacocha se ubica en el cantón Paltas de la cuenca San Pedro Mártir de la provincia de Loja. La cuenca abastece más del 80% del agua utilizada para consumo humano y

actividades agrícolas. Los habitantes han construido en las laderas de la montaña de Pisaca una laguna artificial (qocha) que capta la escorrentía superficial que es desviada por un canal construido alrededor de la montaña (Albarracín et al., 2021). El fondo de la laguna es permeable y permite la recarga de los acuíferos superficiales y aumento del caudal de ríos y arroyos. Entre los años de 1948 y 1958 el estanque fue secado por el propietario del terreno con fines agrícolas y ganaderos. Sin embargo, entre el año 2005 y 2008 se restauró su funcionamiento. De acuerdo con Albarracín et al., (2021) existe evidencia que la ciudad de Catacocha fue construida sobre la laguna más grande de la zona, siendo la principal causa de la desecación de cuerpos de agua superficial que conllevaron al agotamiento de acuíferos de la zona (GAD Paltas, 2017).

El sistema de Paltas Catacocha es un ejemplo de rescate de conocimiento ancestral, nombrado un Sitio Demostrativo de Ecohidrología, en 2018, por el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la UNESCO. Posterior a la rehabilitación del sitio, la población ha percibido un incremento en la biodiversidad y disponibilidad de agua para consumo y agricultura (GAD Paltas, 2017).

El sistema de Paltas Catacocha es un ejemplo de rescate de conocimiento ancestral, nombrado un Sitio Demostrativo de Ecohidrología, en 2018, por el Programa Hidrológico Intergubernamental (PHI) de la UNESCO.

Desde el año 2005 al 2013 se han construido 28 albarradas con capacidad promedio de 6.517 m³ de agua recolectada por cada albarrada. En la zona se han designado dos áreas naturales para proteger el recurso hídrico y la biodiversidad. Ante la eficiencia de las albarradas, en la zona se han construido y mantenido 136 tajamares (tapes) que favorecen la recarga de acuíferos. Los habitantes protegen el área y han implementado áreas de reforestación con especies nativas, protección de arroyos y diferentes actividades ecohidrológicas que permiten el correcto manejo del agua (Albarracín et al., 2021).

Provincia Pichincha

La comuna de Guantugloma, perteneciente a la parroquia La Merced, se encuentra a 2800 m de altitud en la montaña Ilaló. La zona se caracteriza por ser semiárida, con lluvias escasas. La principal actividad económica es la agricultura, sin embargo, la escasez hídrica ha ocasionado el abandono de terrenos agrícolas y la disminución en las siembras que se refleja en el nivel de empobrecimiento de la población (Patiño, 2016). Desde el año 2009, con ayuda de la ONG Red Ambiental, se viene desarrollando la SyCA a través de la construcción de pozos que captan el agua lluvia para uso agrícola y consumo humano. Los pozos se cubrían con geomembranas para evitar la filtración del agua recogida. El agua es trasladada a través de canales para posteriormente pasar a un espacio de sedimentación previo a su ingreso al pozo.

La capacidad de almacenamiento de los pozos es de 75.000 litros, con una capacidad de riego de media hectárea de cultivo (Patiño, 2016).

COMPILACIÓN DE ARTÍCULOS RELACIONADOS A SYCA EN ECUADOR

En general, la investigación de SyCA en el país es reciente. Desde el 2018 se han realizado trabajos de investigación publicados como artículos científicos. La mayor parte de estudios realizados se concentran en la región costera, específicamente en la provincia de Santa Elena. Sin embargo, a pesar de que la aplicación de técnicas de SyCA en la región sierra es amplia, el desarrollo de trabajos científicos es muy limitado (Tabla 1).

Tabla 1.

Compilación de artículos relacionados al SyCA en Ecuador.

Artículo	Año de publicación	Zona de Estudio
The Ecohydrological Approach in Water sowing and Harvesting Systems: The Case of the Paltas Catacocha Ecohydrology Demonstration Site, Ecuador (Albarracín et al., 2021)	2021	Catacocha, Provincia de Loja
Design of a Technical-Artisanal Dike for Surface Water Storage and Artificial Recharge of the Manglaralto Coastal Aquifer. Santa Elena Parish, Ecuador (Carrión-Mero et al., 2021)	2021	Manglaralto, Provincia Santa Elena
Applied Geology to the Design of Handcrafted Dikes (Tapes) and its Impact in the Recharge of the Manglaralto Coastal Aquifer, Santa Elena, Ecuador (Briones et al., 2020)	2020	Manglaralto, Provincia de Santa Elena
Management practices for a sustainable community and its impact on development, Manglaralto-Santa Elena, Ecuador (Herrera Franco et al. 2019)	2019	Manglaralto, Provincia de Santa Elena
Participatory socio-ecological system: Manglaralto-Santa Elena, Ecuador (Herrera-Franco et al., 2018)	2018	Manglaralto, Provincia de Santa Elena
Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador (Carrión et al., 2018)	2018	Manglaralto, Provincia Santa Elena
Participatory Process for Local Development: Sustainability of Water Resources in Rural Communities: Case Manglaralto-Santa Elena, Ecuador (Herrera Franco et al., 2018)	2018	Manglaralto, Provincia Santa Elena
Aplicación del conocimiento ancestral mediante albarradas y tapes en la gestión del agua en la provincia de Santa Elena, Ecuador (Herrera-Franco et al., 2020)	2020	Provincia de Santa Elena
Community Management of the Olón Coastal Aquifer, Ecuador, and its Impact on the Supply of Water Suitable for Human Consumption (Herrera-Franco et al., 2020)	2020	Olón, Provincia Santa Elena
Water Sowing and Harvesting (SyCA), ancestral techniques that solve problems of the XXI century (Herrera-Franco et al., 2020)	2020	Ecuador
Ancestral Techniques of Water Sowing and Harvesting in Ibero-America: Examples of Hydrogeoethical Systems (Martos-Rosillo et al., 2021)	2021	Ecuador

ANÁLISIS DE CASOS DE SYCA EN ECUADOR

El empleo de técnicas de rescate de conocimiento ancestral en el país es un método usado como solución al abastecimiento de agua en comunidades rurales que carecen del suficiente recurso hídrico. Como se ha mencionado anteriormente, algunos de los principales métodos empleados son las denominadas albarradas, camellones, tapes o diques, pata de pájaro y pozos con geomembrana. Aplicar la SyCA en el manejo de agua es un método asequible, eficiente y ambientalmente sostenible (Figura 6). Este tipo de sistemas de manejo del agua tiene como objetivo principal almacenar agua en zonas con escasez hídrica para ser usados principalmente en el consumo humano y agricultura.

Desde el punto de vista de la región costera del país, la escasez de agua es un problema común en comunidades rurales en las cuales el acceso a agua potable es limitado o nulo. La SyCA representa una alternativa para su abastecimiento de agua condicionado al clima e hidrología de las zonas. Por ejemplo, Manglaralto y Olón en la provincia de Santa Elena aplican diques o tapes en el represamiento de agua de ríos, sin embargo, debido a las condiciones hidrológicas de cada lugar, la técnica es construida en zonas diferentes a lo largo del río. En el caso de Manglaralto, el tape es construido en la parte baja de la cuenca, específicamente en la ribera del río Manglaralto, zona donde se ubican los pozos y la capa permeable del acuífero es mayor, facilitando el almacenamiento de agua.

En la sierra ecuatoriana, las comunidades usan con mayor frecuencia las denominadas qochas o albarradas, cuya función es almacenar el agua de lluvia y la escorrentía superficial de las montañas para su posterior uso en agricultura y consumo humano. En este caso, las acciones de las comunidades se fundamentan en las condiciones del terreno; la forma más eficiente que han desarrollado consiste en la construcción de canales alrededor de la montaña que conduce el agua hasta la albarrada. Este tipo de sistemas son eficientes en la recarga de acuíferos y su posterior uso para consumo humano y agricultura.

La aplicación de SyCA en el país tiene poca divulgación como método replicable en otras comunidades. Como es conocido, este tipo de técnicas que

Figura 6.

Ventajas y desventajas de la aplicación de SyCA en Ecuador.

VENTAJAS



1. Sistema independiente que no requiere de energía para su operatividad, ideal en comunidades aisladas
2. Solución ambiental y sostenible a los problemas de escases de agua en el país
3. Costo de implementación de técnicas SyCA mucho mas asequibles que obras ingenieriles modernas
4. Gestión adecuada del agua por procesos participativos que incluyen a la comunidad y academia
5. Preservación y restablecimiento de ecosistemas
6. Incremento de la producción agrícola en zonas rurales
7. Abastecimiento de agua para consumo humano
8. Fomenta la consciencia ambiental de la importancia del recurso hídrico

DESVENTAJAS



1. Bajo nivel de conocimiento de SyCA en los profesionales
2. Desconocimiento y apoyo limitado por parte de autoridades gubernamentales
3. Uso inadecuado en agricultura (técnicas de riego no sostenibles)
4. Diseños de técnicas ancestrales de almacenamiento de agua temporales, que de acuerdo al criterio ingenieril dan buen servicio pero se consideran no oportunos
5. Bajo nivel de promoción en comunidades rurales con escasez de agua
6. La cantidad de agua captada depende de los niveles de precipitación que exista en la zona

favorecen el paso y el almacenamiento de agua por los acuíferos depende de muchos factores (geológicos, hidrológicos, ambientales, sociales), sin embargo, puede ser denominada una actividad resiliente ante la necesidad de abastecimiento de agua en

las comunidades rurales del país. Para fortalecer la SyCA en Ecuador es necesario el establecimiento de estrategias de mejora, dentro de las cuales se incluya:

- Implementar un sistema de divulgación de rescate de conocimiento ancestral en la SyCA, que permita a las comunidades rurales del país replicar el método y resolver problemas de abastecimiento de agua.
- Desarrollar alianzas internacionales de cooperación que permitan fortalecer las técnicas empleadas en el país en base a la experiencia de la SyCA en otros países.
- Fortalecer el apoyo gubernamental en iniciativas de rescate de conocimiento ancestral como un método sostenible de abastecimiento limitado de agua.
- Fortalecer los procesos participativos de la comunidad y la academia, para definir técnicas de SyCA responsables con el ambiente y con el mantenimiento respectivo, que asegure una operatividad continua.

CONCLUSIONES

Las técnicas de siembra y cosecha de agua (SyCA) empleadas en el país evidencian una solución ante la escasez de recursos hídricos en la costa y la sierra ecuatoriana. El abastecimiento de agua a través del rescate del conocimiento ancestral para este tipo de comunidades aisladas ha permitido alcanzar en la medida de lo posible un desarrollo sostenible a través de actividades agrícolas y turísticas principalmente.

La SyCA es un procedimiento que hace posible la protección de la naturaleza, la conservación del recurso hídrico y que mejora las condiciones ambientales del territorio. El costo en la aplicación del sistema que usa el conocimiento ancestral representa una alternativa de bajo costo con soluciones temporales en los problemas de escasez de agua.

La eficacia de las técnicas de SyCA en el país está fuertemente relacionada a los procesos participativos, que integran el conocimiento ancestral de las comunidades con la academia para mejorar la disponibilidad de recurso hídrico a las zonas con condiciones climáticas no favorables.

REFERENCIAS

Abbott, B.W., Bishop, K., Zarnetske, J.P., Minaudo, C., Chapin, F. S., Krause, S., Hannah, D.M., Conner, L., Ellison, D., Godsey, S.E., Plont, S., Marçais, J., Kolbe, T., Huebner, A., Frei, R.J., Hampton, T., Gu, S., Buhman, M., Sayedi, S.S., Ursache, O., Chapin, M., Henderson, K.D. and Pinay, G. 2019. Human domination of the global water cycle absent from depictions and perceptions. *Nature Geoscience*, 12 (7), 533–40.

Albarracín, M., Ramón, G., González, J., Iñiguez-Armijos, C., Zakaluk, T. and Martos-Rosillo, S. 2021. The Ecohydrological Approach in Water Sowing and Harvesting Systems: The Case of the Paltas Catacocha Ecohydrology Demonstration Site, Ecuador. *Ecohydrology & Hydrobiology*, 21 (3), 454–66.

Álvarez Litben, R. 2014. *Albarradas. Espacialidad y recurrencia en los sistemas de albarradas localizadas en las provincias de Santa Elena y Guayas*. Master thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador.

Álvarez Litben, S.G. and Zulaica, L. 2015. Indicadores de sustentabilidad en sistemas de albarradas: Aportes Metodológicos. *Letras Verdes. Revista Latinoamericana de Estudios Socioambientales*, (18), 184.

Álvarez, S.G., Bazurco, M., Burmester, M., González, C. and Escobar, P. 2004. *Comunas y comunidades con sistemas de albarradas: descripciones etnográficas*. Abya-Yala, Quito, Ecuador, 529 pp.

Bell, R.G. 2001. The conceptual perspective for public participation. In: *The Proceedings of the Workshop on Good Governance, Public Participation and the Decision-Making Process for Environmental Protection, March 18–19th 2001*. Saitharn Publication House, Bangkok, Thailand.

Briones, J., Campoverde, J., Carrión, P., Fajardo, I., Herrera, G., Malavé, J., Morante, F. and Varas, M. 2020. Geología aplicada al diseño de diques artesanales (tapes) y su incidencia en la recarga del acuífero costero de Manglaralto, Santa Elena, Ecuador. *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, Virtual Edition, 27-31 July, Bogota, DC, Colombia, 1-11.

Carrión-Mero, P., Montalván, F.J., Morante-Carballo, F., Heredia, J., Elorza, F.J., Solórzano, J. and Aguilera, H. 2021. Hydrochemical and isotopic characterization of the waters of the Manglaralto River basin (Ecuador) to contribute to the management of the coastal aquifer. *Water*, 13 (4), 537.

Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., Briones-Bitar, J., Herrera-Borja, P., Chávez-Moncayo, M. and Arévalo-Ochoa, J. 2021. Design of a technical-artisanal dike

- for surface water storage and artificial recharge of the Manglaralto coastal aquifer. Santa Elena Parish, Ecuador. *International Journal of Sustainable Development and Planning*, 16 (3), 515–23.
- Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., Herrera-Franco, G., Jaya-Montalvo, M., Rodríguez, D., Loo-Flores de Valgas, C. and Berrezueta, E. 2021. Community-University Partnership in Water Education and Linkage Process. Study Case: Manglaralto, Santa Elena, Ecuador. *Water*, 13 (15), 1998.
- Carrión, P., Herrera, G., Briones, J., Sánchez, C. and Limón, J. 2018. Practical adaptations of ancestral knowledge for groundwater artificial recharge management of Manglaralto coastal aquifer, Ecuador. *WIT Transactions on Ecology and the Environment*, 217, 375–86.
- Dungumaro, E.W. and Madulu, N.F. 2003. Public Participation in integrated water resources management: The Case of Tanzania. *Physics and Chemistry of the Earth*, 28, 1009–14.
- Durack, P. 2015. Ocean Salinity and the Global Water Cycle. *Oceanography*, 28 (1), 20–31.
- GAD Paltas 2017. *Plan de Manejo de La Microcuenca San Pedro Már- Tir y de La Reserva Pisaca, Como Zona de Recarga de Las Fuentes Que Abastecen de Agua Para Consumo Humano a La Ciudad de Catacocha*. Formulario de Postulación Al Premio Verde Del Banco Del Estado 2017.
- García-Garizábal, I. 2017. Rainfall Variability and Trend Analysis in Coastal Arid Ecuador. *International Journal of Climatology*, 37 (13), 4620–30.
- García Petillo, M., Cánepa, P. and Ronzoni, C. 2012. *Manual para el diseño y la construcción de tajamares de aguada*. Denad Internacional S.A, Montevideo, Uruguay.
- Herrera-Franco, G., Alvarado-Macancela, N., Gavín-Quinchuela, T. and Carrión-Mero, P. 2018. Participatory Socio-Ecological System: Manglaralto-Santa Elena, Ecuador. *Geology, Ecology, and Landscapes*, 2 (4), 303–10.
- Herrera-Franco, G., Bravo-Montero, L., Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F. and Apolo-Masache, B. 2020. Community management of the Olón coastal aquifer, Ecuador, and its impact on the supply of water suitable for human consumption. *Sustainable Development and Planning XI*, 69–81.
- Herrera-Franco, G., Carrión-Mero, P. and Briones, J. 2020. Aplicación del conocimiento ancestral mediante albarradas y tapes en la gestión del agua en la provincia de Santa Elena, Ecuador. *Boletín Geológico y Minero*, 131 (1), 75–88.
- Herrera-Franco, G., Martos-Rosillo, S., Carrión-Mero, P., Morante-Carballo, F., Briones-Bitar, J., Durán, A., Vélez Upegui, J., Castro Lucic, M., Mateos, L., Bardales, J., Peña, F. and Gutiérrez-Ojeda, C. 2020. Water Sowing and Harvesting (SyCA), Ancestral Techniques That Solve Problems of the XXI Century. *Proceedings of the 18th LACCEI International Multi-Conference for Engineering, Education and Technology*, Virtual Edition, 27-31 July, Bogota, DC, Colombia, 1-8.
- Herrera-Franco, G., Montalván-Burbano, N., Carrión-Mero, P. and Bravo-Montero, L. 2021. Worldwide Research on Socio-Hydrology: A Bibliometric Analysis. *Water* 13 (9), 1283.
- Herrera Franco, G., Carrión Mero, P. and Briones Bitar, J. 2019. Management practices for a sustainable community and its impact on development, Manglaralto-Santa Elena, Ecuador. *Proceedings of the 17th LACCEI International Multi Conference for Engineering, Education, and Technology*, Montego Bay, Jamaica, 24-26 July, 24-26.
- Herrera Franco, G., Carrión Mero, P. and Alvarado, N. 2018. Participatory process for local development: sustainability of water resources in rural communities: Case Manglaralto-Santa Elena, Ecuador. In: Leal Filho, W. (ed.), *Handbook of Sustainability Science and Research*. Springer, Cham, 663–76.
- Hervas, E. and Tiviano, I. 2021. *Geología aplicada para la gestión del agua en la comunidad de El Arenal -Volcán Chimborazo –provincia de Bolívar*. Bachelor thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador.
- Jiménez Oyola, S., Carrión Mero, P. and Romero Crespo, P. 2010. Ecuadorian aquifer studied for marine intrusion. *IAEA: International Atomic Energy Agency*, 42 (11), 15–16.
- Karimi-Maleh, H., Ayati, A., Ghanbari, S., Orooji, Y., Tanhaei, B., Karimi, F., Alizadeh, M., Rouhi, J., Fu, L. and Sillanpää, M. 2021. Recent Advances in Removal Techniques of Cr(VI) Toxic Ion from Aqueous Solution: A Comprehensive Review. *Journal of Molecular Liquids*, 329, 115062.
- Karimi-Maleh, H., Karimi, F., Malekmohammadi, S., Zakariae, N., Esmaili, R., Rostamnia, S., Yola, M., Atar, N., Movaghgharnezhad, S., Rajendran, S., Razmjou, A., Orooji, Y., Agarwal, S. and Gupta, V. 2020. An amplified voltammetric sensor based on platinum nanoparticle/polyoxometalate/two-dimensional hexagonal boron nitride nanosheets composite and ionic liquid for determination of n-hydroxysuccinimide in water samples. *Journal of Molecular Liquids*, 310, 113185.
- Karimi-Maleh, H., Kumar, B., Rajendran, S., Qin, J., Vadivel, S., Durgalakshmi, D., Gracia, F., Soto-Moscoco, M., Orooji, Y. and Karimi, F. 2020. Tuning of metal oxides photocatalytic performance using ag nanoparticles integration. *Journal of Molecular Liquids* 314, 113588.
- Karimi-Maleh, H., Shafieizadeh, M., Taher, M., Opoku, F., Kiarri, E., Govender, P., Ranjbari, S., Rezapour, M.

and Orooji, Y. 2020. The role of magnetite/graphene oxide nano-composite as a high-efficiency adsorbent for removal of phenazopyridine residues from water samples, an experimental/theoretical investigation. *Journal of Molecular Liquids*, 298, 112040.

Marcos, J. and Tobar, O. 2004. La investigación arqueológica e histórica de las albardas de la costa. In: Marcos, J. (ed.), *Las Albardas en la Costa del Ecuador: Rescate del conocimiento ancestral del manejo sostenible de la biodiversidad*. CEAA-ESPOL, Guayaquil, Ecuador, 31–126.

Martínez, M. 2014. *Identificación y caracterización de tecnologías campesinas e indígenas en el uso racional del agua, empleadas en sistemas productivos de altura vulnerables a eventos climáticos extremos, en la microcuenca del Río Chimborazo*. Bachelor thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral (ESPOL), Ecuador.

Martínez, Mayra. 2013. *Tecnologías campesinas en el uso racional del agua, empleadas en sistemas productivos de altura vulnerables a eventos climáticos extremos, microcuenca del Río Chimborazo, Ecuador*. Riobamba, Ecuador.

Martos-Rosillo, S., Durán, A., Castro, M., Vélez, J., Herrera, G., Martín-Civantos, J.M., Mateos, L., Durán, J., Jódar, J., Gutiérrez, C., Hermoza, R. and Peña, F. 2021. Ancestral Techniques of Water Sowing and Harvesting in Ibero-America: Examples of Hydrogeoethical Systems. In: Abrunhosa, M., Chambel, A., Peppoloni, S. and Chaminé, H.I. (eds.), *Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development*. Springer International Publication, 489-92.

Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno, F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A. and Durán, J.J. 2019. The Oldest Managed Aquifer Recharge System in Europe: New Insights from the Espino Recharge Channel (Sierra Nevada, Southern Spain). *Journal of Hydrology*, 578, 124047.

Mekonnen, M. M. and Hoekstra, A.J. 2016. Four Billion People Facing Severe Water Scarcity. *Science Advances*, 2(2).

Morán, L., Villanueva, P. and Varillas, O. 2018. *Inventario de Tecnologías de Manejo de Agua Para La Agricultura Familias: Instituto Interamericano de Cooperación Para La Agricultura (IICA)*. Soluciones Sostenibles, Lima, Perú, 120 pp.

Ochoa-Tocachi, B.F., Bardales, J.D., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, J., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., De Bièvre, B. and Buytaert, W. 2019. Potential Contributions of Pre-Inca Infiltration Infrastructure to Andean Water Security. *Nature Sustainability*, 2 (7), 584–93.

Patiño, R. 2016. *Sistematización Del Proyecto Cultivo y Cosecha de Agua de Lluvia de Mujeres Tierra Nueva, Comuna de Guantugloma, Parroquia La Merced Cantón Quito*. Bachelor Thesis, Universidad Politécnica Salesiana, Cuenca, Ecuador.

Ross, A. and Chang, H. 2020. Socio-Hydrology with Hydrosocial Theory: Two Sides of the Same Coin? *Hydrological Sciences Journal*, 65 (9), 1443–57.

Sivapalan, M., Savenije, H.H.G. and Blöschl, G. 2012. Socio-Hydrology: A New Science of People and Water." *Hydrological Processes*, 26 (8), 1270–76.

Tecnologías Agrícolas. 2018. *Cartillas Divulgativas Sobre Manejo Del Riego*.

Torres-López, W., Restrepo-Tarquino, I., Patterson, C., Gowing, J. and Dominguez Rivera, I. 2015. Self-Supply as an Alternative Approach to Water Access in Rural Scattered Regions: Evidence from a Rural Microcatchment in Colombia. *Ingeniería y Universidad*, 20 (1), 175–195.

Waters, C.N., Zalasiewicz, J., Summerhayes, C., Barnosky, A.D., Poirier, C., Gałuszka, A., Cearreta, A., Edgeworth, M., Ellis, E.C., Ellis, M., Jeandel, C., Leinfelder, R., McNeill, J. R., Richter, D.B., Steffen, W., Syvitski, J., Vidas, D., Wapreid, M., Williams, M., Zhisheng, A., Grinevald, J., Odada, E., Oreskes, N. and Wolfe, A.P. 2016. The Anthropocene Is Functionally and Stratigraphically Distinct from the Holocene. *Science*, 351 (6269), 1–10.

Yapa, K.A. 2016. *Prácticas Ancestrales de Crianza de Agua: Una Guía de Campo*. Manthra, comunicación integral, Quito, Ecuador.



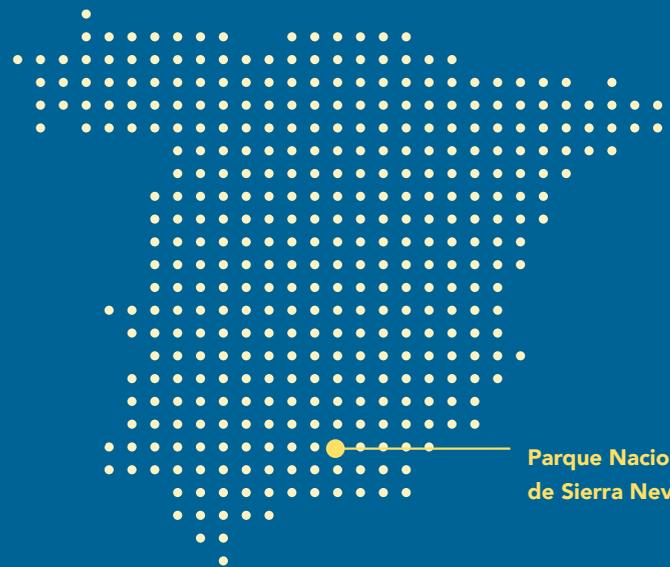


El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España)

Un ejemplo ancestral de gestión integral del agua

Water management in high mountain watersheds of Sierra Nevada National Park (Southern Spain)

An example of ancestral integrated water management



Parque Nacional
de Sierra Nevada

Sergio Martos-Rosillo^{1*}, Antonio González-Ramón¹, Ana Ruiz-Constán¹,
Carlos Marín-Lechado¹, Carolina Guardiola-Albert², Francisco Moral
Martos³, Jorge Jódar⁴ y Antonio Pedrera Parias⁵

1 Instituto Geológico y Minero de España. Urbanización Alcázar del Genil, 4. Granada 18006, s.martos@igme.es, antonio.gonzalez@igme.es, a.ruiz@igme.es, c.marin@igme.es

2 Instituto Geológico y Minero de España. C/Ríos Rosas, 23. Madrid, 28003, c.guardiola@igme.es

3 Universidad Pablo de Olavide de Sevilla; Carretera de Utrera, km 1. Sevilla, 41013, fmormar@upo.es

4 Universidad Politécnica de Cataluña; Campus Nord, Edificio D2, 1-3, Barcelona, 08034, jjb.aquageo@gmail.com

5 Instituto Geológico y Minero de España. Subdelegación de Gobierno, Plaza de España, Torre Norte. Sevilla, 41013, a.pedrera@igme.es

El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España)

Un ejemplo ancestral de Gg

RESUMEN

Sierra Nevada es la principal cadena montañosa del sur de la Península Ibérica y está catalogada como Reserva de la Biosfera (1986), Parque Natural (1989) y Parque Nacional, (1999). Entre sus muchas singularidades de tipo ecológico, geomorfológico y paisajístico, hay otras de tipo hidrológico e histórico-cultural, como la del manejo ancestral del agua que se realiza en la cabecera de sus ríos. Una densa red de canales excavados en la tierra, las acequias de careo, permite derivar el agua de deshielo de la cabecera de los ríos para infiltrarla en la zona alta de las laderas. El agua infiltrada en la zona de alteración de las rocas metamórficas discurre lentamente ladera abajo para alimentar a los ríos y a los manantiales que se usan para abastecimiento y regadío. Este sistema de manejo del agua, implantado desde la conquista árabo-beréber del sur de España, durante el siglo VIII, ha provocado una notable transformación del paisaje, donde las terrazas de cultivo y los pastos coexisten con ecosistemas de alto valor ecológico. En este trabajo se describe la técnica del careo en una cuenca piloto, la cuenca del río Bérchules, estudiada durante los años 2014 y 2015 por el Instituto Geológico y Minero de España. La emigración, el abandono de las tierras de cultivo y, como consecuencia, de las acequias de careo están afectando al régimen de funcionamiento de los ríos, haciendo peligrar el especial equilibrio alcanzado entre el hombre y la naturaleza en Sierra Nevada, tras muchos siglos de convivencia en armonía.

Water management in high mountain watersheds of Sierra Nevada National Park (Southern Spain)

An example of ancestral integrated water management

ABSTRACT

Sierra Nevada, is the main mountain range in southern Iberian Peninsula and has been catalogued as Biosphere Reserve (1986), Natural Park (1989) and National Park (1999). Apart from its ecological, geomorphological and landscape singularities, there are other hydrological, historical and cultural remarkable features, such as the ancestral water management performed at the rivers headwater. A dense network of channels excavated in the ground, the so-called *acequias de careo*, allows the derivation of melting water from of the river waterhead towards the higher zone of the hillsides, where it infiltrates. It slowly flows down through the weathered zone of the metamorphic rocks, until reaching the rivers and springs used for supply and irrigation. This water management system, implemented since the Muslim conquest of southern Spain (VIII century), has led to a remarkable landscape transformation, where agricultural terraces and pastures coexist with ecosystems of high ecological value. This paper describes the *careos* water management technique in a pilot basin, the Bérchules watershed, recently studied during 2014 and 2015 by the Geological Survey of Spain. Migration, the abandonment of cultivated lands and, consequently, of the *acequias de careo* are affecting the dynamics of the rivers, endangering the delicate balance reached between the man and the nature in Sierra Nevada, after many centuries of harmonious coexistence.

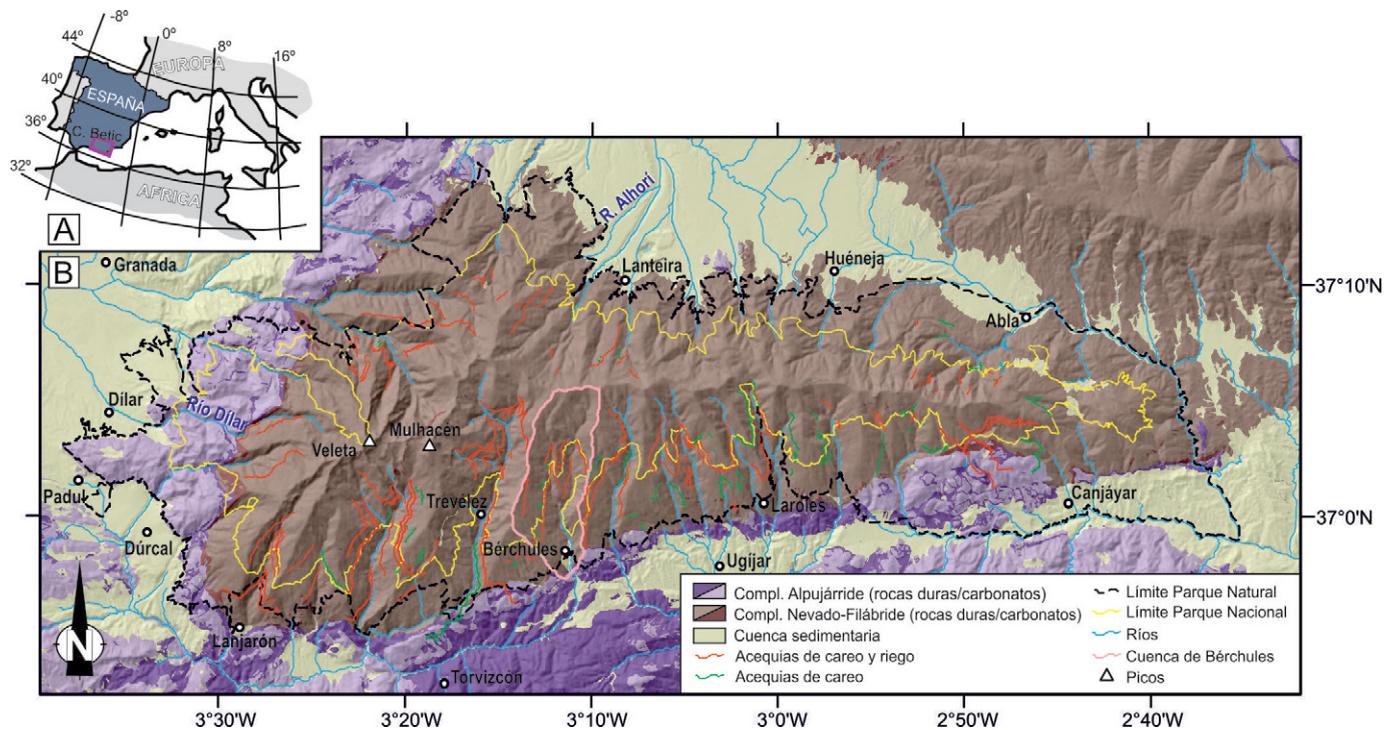
INTRODUCCIÓN

Sierra Nevada es un macizo montañoso que forma parte de la Cordillera Bética y que se sitúa al sureste de la Península Ibérica, en las provincias de Almería y Granada, a escasa distancia del mar Mediterráneo (Figura 1). Se trata de una antifirma con orientación este-oeste, que se extiende a lo largo de 90 km, con una anchura variable entre 15 y 40 km. En su parte central afloran rocas metamórficas, mayoritariamente esquistos, del Complejo Nevado – Filábride, rodeados por materiales carbonáticos y metapelitas del Complejo Alpujárride, ambos deformados por la tectónica alpina (Sanz de Galdeano y López-Garrido, 1998). Esta montaña cuenta con los picos más altos de la Península Ibérica, entre los que destacan el Mulhacén, con 3482 m s.n.m. y el Veleta, con 3366 m s.n.m.

Su gran altitud, su aislamiento, con respecto a otros macizos montañosos, su proximidad al continente africano y su reciente deglaciación contribuyen a que Sierra Nevada constituya una alta montaña mediterránea semiárida especialmente singular (Gómez-Ortiz *et al.*, 2013; 2015). De hecho, esta montaña es un espacio especialmente protegido, declarado Reserva de la Biosfera en 1986, Parque Natural en 1989 y Parque Nacional en 1999. Para hacer compatible la Reserva de la Biosfera con la figura de Parque Nacional y Natural se constituyó como modelo de gestión integrada el Espacio Natural de Sierra Nevada, quedando el Parque Natural (86.266 ha) como zona de amortiguación y transición respecto al área declarada Parque Nacional (85.883 ha). Esta

Figura 1.

Mapa sintético de Sierra Nevada, con los límites del Parque Natural y del Parque Nacional, de la cuenca piloto investigada en el río Bérchules y las acequias de careo y de careo/riego cartografiadas.



labor de conservación ha permitido que el Espacio Natural de Sierra Nevada entrase a formar parte de la *Green List* de la *International Union for Conservation of Nature*, en 2014.

Entre los principales valores ambientales de Sierra Nevada destaca su extraordinaria biodiversidad. Su diversidad vegetal es de las más importantes del Mediterráneo occidental, existiendo más de 2100 especies de plantas vasculares, de las que más de 80 son endémicas (Blanca *et al.*, 1998; Lorite *et al.*, 2007; Brewer *et al.*, 2002). El elevado número de ecosistemas favorece, cómo no, una alta variedad faunística. Entre las casi 300 especies de vertebrados, las aves son el grupo más representado con unas 200 especies. Sin embargo, Sierra Nevada es reconocida por albergar

Entre los principales valores ambientales de Sierra Nevada destaca su extraordinaria biodiversidad.

la mayor población y con mayor variabilidad genética de cabra montés de la Península Ibérica (Granados y Cano-Manuel, 2015). Hay catalogadas más de 18.000 especies de invertebrados, con 300 especies exclusivas de insectos. A estos valores debemos añadir los geomorfológicos. La huella glacial y periglacial, conformada durante las crisis climáticas cuaternarias y durante la Pequeña Edad del Hielo han plasmado su impronta en este relieve. En Sierra Nevada se



Detalle del caudal derivado por la acequia de Mecina del río Grande de Bérchules, en la cara Sur de Sierra Nevada, en Granada (España).. Todo este caudal es utilizado exclusivamente para su recarga en los acuíferos de ladera de esta montaña. El agua infiltrada mantiene manantiales, aumenta el caudal de los ríos en las épocas secas y permite el abastecimiento de la población local y sus actividades agrícolas y ganaderas.
Fotografía: Sergio Martos

desarrollaron los sistemas glaciares más meridionales de Europa. Así, por encima de los 2500 m de altitud destaca la presencia de formaciones glaciares y periglaciares. Hoy en día se pueden observar numerosos circos glaciares, morrenas y glaciares rocosos con cubetas de sobreexcavación convertidas, muchas de ellas, en espectaculares lagunas de alta montaña (Castillo, 2009; Gómez-Ortiz et al., 2013).

No menos importantes que los valores ambientales son sus valores históricos y culturales. Sierra Nevada es una montaña humanizada desde hace miles de años. Existen asentamientos neolíticos, restos de las culturas de los metales, huellas del paso de las culturas fenicia, cartaginense, romana, visigoda y árabe (Martín-Civantos, 2007). Pese al importante número de culturas que han habitado Sierra Nevada, fue la cultura árabe la que más huella dejó. Durante el periodo de Al-Andalus, entre los siglos VIII y XIV, los andalusíes realizaron una notable transformación del paisaje de Sierra Nevada, en especial de su vertiente meridional. Se construyeron innumerables terrazas de cultivo, junto a las cuales se desarrollaron los principales núcleos de población. Para regar estas zonas agrícolas se construyó una densa red de acequias que derivaban el agua de los ríos. Sin embargo, el caudal de los ríos se reducía durante el estiaje, cuando más agua se necesitaba para el riego de las zonas de vega. Para incrementar el caudal de los ríos en verano y para mantener el caudal de los manantiales de abastecimiento, los andalusíes idearon un sistema colectivo de manejo del agua basado en el uso conjunto del agua superficial y subterránea. Este sistema de manejo del agua sigue en funcionamiento a día de hoy, con ciertas modificaciones, en algunas de las cuencas de alta montaña de Sierra Nevada y constituye un ejemplo muy representativo del nuevo paradigma de la Gestión Integral del Agua (GIA) (Vivas et al., 2009). En este trabajo se presenta el ancestral sistema de gestión integral del agua que se realiza en algunas de las cuencas de alta montaña de Sierra Nevada y se describe su eficiencia hidrológica e hidrogeológica en la cuenca piloto del río Bérchules (Figura 1). Esta cuenca ha sido investigada recientemente por el Instituto Geológico y Minero de España, con motivo de un proyecto de investigación hidrológico e hidrogeológico realizado para la Junta de Andalucía (IGME, 2015).

PRINCIPALES RASGOS HIDROGEOLÓGICOS DE SIERRA NEVADA

En Sierra Nevada se distinguen dos grandes conjuntos de materiales acuíferos con un comportamiento claramente diferenciado (Figura 1): los acuíferos en rocas duras del complejo Nevado-Filábride y los acuíferos carbonáticos de las Alpujarras y del Padul. En la parte central, la de mayor altitud, y ocupando un 79 % de la superficie del Espacio Natural, afloran metapelitas del complejo Nevado-Filábride. Estos afloramientos dan lugar a un extenso acuífero en rocas duras (1358 km²), formado por su zona de alteración superficial, a la que, en las zonas más altas de la montaña, se superponen formaciones cuaternarias, fundamentalmente de tipo glaciar y periglaciar. El citado núcleo Nevado-Filábride se encuentra parcialmente rodeado, fundamentalmente al oeste y al sur, por una orla carbonática de materiales acuíferos del complejo Alpujárride. El total de afloramientos carbonáticos alpujárrides dentro del Espacio Natural es de 220 km², es decir un 13 % de su superficie.

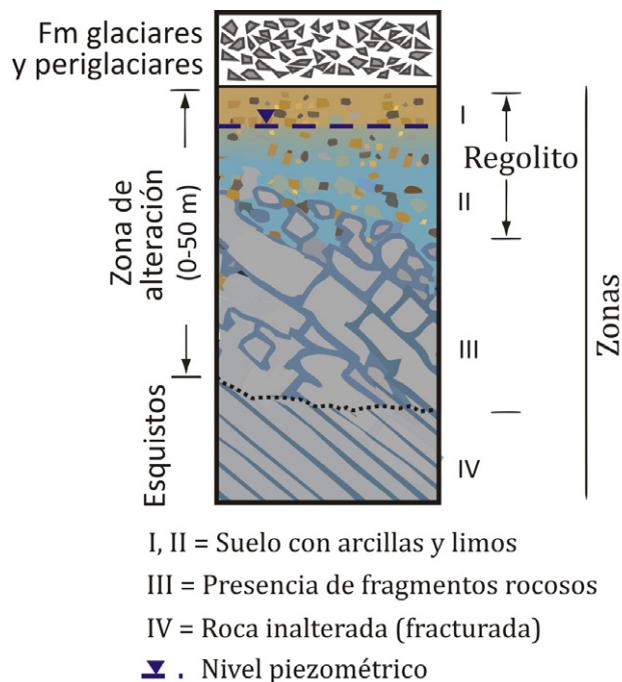
Acuíferos en rocas duras de Sierra Nevada

Sobre los afloramientos de rocas metamórficas de Sierra Nevada suele desarrollarse una capa de alteración permeable. Esta capa comprende una zona de alteración superficial, formada por esquistos meteorizados y disgregados, y una zona fisurada y fracturada, que se prolonga en profundidad hasta llegar a la roca inalterada. Estas dos zonas coinciden con las conocidas como *saprolite* y *saprock*, en la terminología inglesa (UNESCO, 1985, Singhal y Gupta, 2010). Por encima de los 2500 m de altitud, las condiciones climáticas frías condicionan el predominio de la meteorización física por gelifracción, lo que ha permitido el desarrollo de un manto de gelifractos que, con la excepción de las zonas más escarpadas, ocupa casi toda la zona de cumbres. Otros depósitos de derrubios, de ubicación más localizada, son los canchales existentes al pie de los escarpes y los sedimentos glaciares acumulados en la cabecera de los valles más altos. Por debajo de los 2500 m, el aumento de la temperatura determina unas condiciones favorables para los procesos de meteorización química y edafización, lo que parece

producir una disminución de la permeabilidad del manto de alteración, probablemente a causa de la presencia de una mayor fracción arcillosa. Todo este conjunto de materiales configura un acuífero superficial (Figura 2), de reducido espesor (se estiman profundidades máximas de 30-50 m) pero muy extenso, dado que cubre la práctica totalidad de Sierra Nevada.

Figura 2.

Columna litológica sintética del acuífero en rocas duras Nevado Filábride de Sierra Nevada.



El funcionamiento hidrogeológico de este acuífero es diferente según la altitud (Castillo *et al.*, 1996, 1999.; Castillo y Fedeli, 2002; Fedeli y Castillo, 1998; González-Ramón *et al.*, 2015, Martos-Rosillo *et al.*, 2017). La alta permeabilidad del manto de gelifractos, la baja pendiente de las zonas altas de Sierra Nevada, el elevado porcentaje de precipitación en forma de nieve y su lento proceso de fusión, hacen que la práctica totalidad de la escorrentía que se produce en la zona de cumbres se infiltre en el acuífero. Al hacerse menor la altitud, dejan de existir sedimentos glaciares y periglaciares. El acuífero pasa a estar formado, fundamentalmente, por la capa de alteración superficial de los esquistos y aumenta el desarrollo de los suelos y de la vegetación. Se incrementa la evapotranspiración y, además,

disminuye la precipitación media. Todos estos hechos hacen que en la franja altitudinal comprendida entre 1600 y 2000 m s.n.m. la recarga natural del acuífero sea notablemente inferior a la de las zonas altas de Sierra Nevada. Sin embargo, por debajo de los 1600 m de altitud, que es la altitud media de las acequias de careo (Ortiz-Moreno, 2010), la recarga vuelve a aumentar, debido tanto a los careos como a los retornos de riego (Pulido y Sbih, 1995; Martos-Rosillo *et al.* 2015 a y b, Martos Rosillo *et al.*, 2017).

Fedeli y Castillo (1998) hicieron una clasificación de los distintos tipos de manantiales que existen en las zonas altas del acuífero en rocas duras de Sierra Nevada. Esta clasificación se ha complementado en la Figura 3, habiendo definido siete tipos de surgencias en los materiales del Nevado Filábride y dos en los materiales del Alpujárride.

Los manantiales menos inerciales y de mayor caudal son los que se sitúan a mayor cota (manantiales de tipo 1, en la Figura 3), en los bordes inferiores de los cuerpos detríticos glaciares (generalmente morrenas laterales y frontales). Estos se activan durante el deshielo y pueden permanecer en funcionamiento hasta la época de nieves, aunque este hecho no es frecuente (Figura 4a). Por debajo de este tipo de manantiales, otro grupo de menor caudal y un poco más inercial, se relaciona con las inflexiones del terreno en el pie de circos glaciares, cubetas de sobreexcavación y terrazas (manantiales de tipo 2, Figura 3). En estas zonas de cambio de pendiente es frecuente encontrar las lagunas de alta montaña de Sierra Nevada (Castillo, 2009) (Figura 4b). Los coeficientes de agotamiento determinados por Castillo y Fedeli (2002) en los manantiales de la cabecera de las cuencas de los ríos Genil y Monachil presentaban valores comprendidos entre 2,4 y 8 x 10⁻² días⁻¹. Estos resultados son indicativos de una alta permeabilidad, acorde con la naturaleza de los materiales glaciares y periglaciares que drenan.

Por debajo del anterior grupo de manantiales, hasta altitudes de 2000-2200 m s.n.m., aparecen numerosas zonas con una vegetación característica y con pequeñas descargas de agua subterránea, pero que suelen mantenerse desde el deshielo a la época de nieves. A estas zonas se les denomina *borreguiles*, lo que evidencia su tradicional uso ganadero (manantiales de tipo 3 en la Figura 3).

A veces están relacionados con los lóbulos de soliflucción, formándose, también en las cabeceras de los barrancos y en zonas deprimidas de fondos de circo y/o de cambio de pendiente del terreno (Oliva *et al.*, 2009, Fedeli y Castillo, 1998, Castillo y Fedeli, 2002). La vegetación que los coloniza está adaptada en sus zonas centrales a unas condiciones turbosas y de alta saturación en agua, mientras que los pastos son menos hidrófilos en sus bordes. En las zonas de mayor pendiente, en el extremo inferior de los borreguiles suele existir un pequeño manantial. Cuando los borreguiles se forman en zonas de pendiente suave pueden presentar manantiales o zonas de surgencia en la zona central del propio borreguil. La presencia de materiales detríticos finos y el mayor grado de cobertura vegetal hace que estos manantiales presenten una descarga lenta. Durante el estiaje, es posible avistar numerosos borreguiles que descargan sus aguas en la cabecera de los ríos (Figura 4c), permitiendo la existencia de un caudal continuo de especial interés ambiental.

Entre 1600 y 2100 m s.n.m. el número de manantiales y el caudal drenado por los mismos se reduce considerablemente. El acuífero pasa a estar formado solo por la zona de alteración de los esquistos, donde la fracción detrítica es más fina y sobre la que se desarrollan suelos con una cobertera vegetal con unas

importantes exigencias hídricas (fundamentalmente coníferas, matorral, pastos y cultivos de alta montaña). Sin embargo, hasta 1700-1800 m s.n.m. se puede identificar otro grupo de manantiales relacionados con la denudación de las franjas de alteración por erosión fluvial remontante (manantiales de tipo 4 en la Figura 3). En estas áreas más bajas, la rápida incisión fluvial puede desencadenar grandes deslizamientos de roca, en la zona de ruptura de pendiente de los ríos, denominados poyos, en la terminología local, relacionados con el máximo avance glaciar y a los que se asocian manantiales (González-Ramón *et al.*, 2015) (Figura 4d).

Otro tipo de manantiales, también descrito por Castillo y Fedeli (*op.cit*) están asociados a pequeñas descargas de aguas más mineralizadas que se producen a favor de las fracturas (manantiales de tipo 5 en la Figura 3). Estos últimos se pueden encontrar a muy distintas alturas, aumentando su frecuencia cuanto menor es la cota. En este sentido se pueden diferenciar otro tipo de manantiales asociados a fracturas más profundas (manantiales de tipo 6, Figura 3), con aguas de alta mineralización y con anomalías térmicas positivas, como la que pone en contacto a los complejos Alpujárride y Nevado-Filábrides, en el borde sur de Sierra Nevada.

Figura 3.

Esquema sintético con los distintos acuíferos y tipos de manantiales que pueden encontrarse en las laderas de Sierra Nevada. (a) Acuífero en rocas duras (b), acuífero carbonático alpujárride (c), materiales detríticos de relleno de cuencas sedimentarias (Modificado de Fedeli y Castillo, 1998).

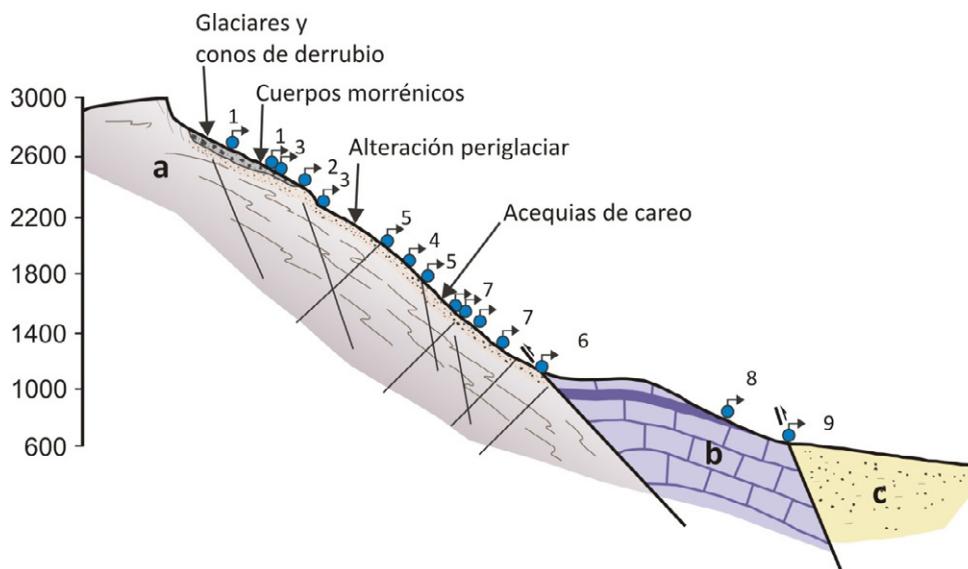


Figura 4.

(a) Grupos de manantiales asociados a depósitos glaciares y periglaciares en el circo del Veleta. (b) Las descargas de agua subterránea al pie de los paredones de la Alcazaba y el Mulhacén se almacenan en la Laguna de la Mosca, (c) Borreguiles en la cabecera del río Lanjarón. (d) Manantial asociado a una fractura generada por deslizamientos de masas de esquistos en la ladera del río Bérchules. (e) Los manantiales del núcleo urbano de Bérchules mantienen su caudal en verano gracias a los careos que se realizan en las acequias.

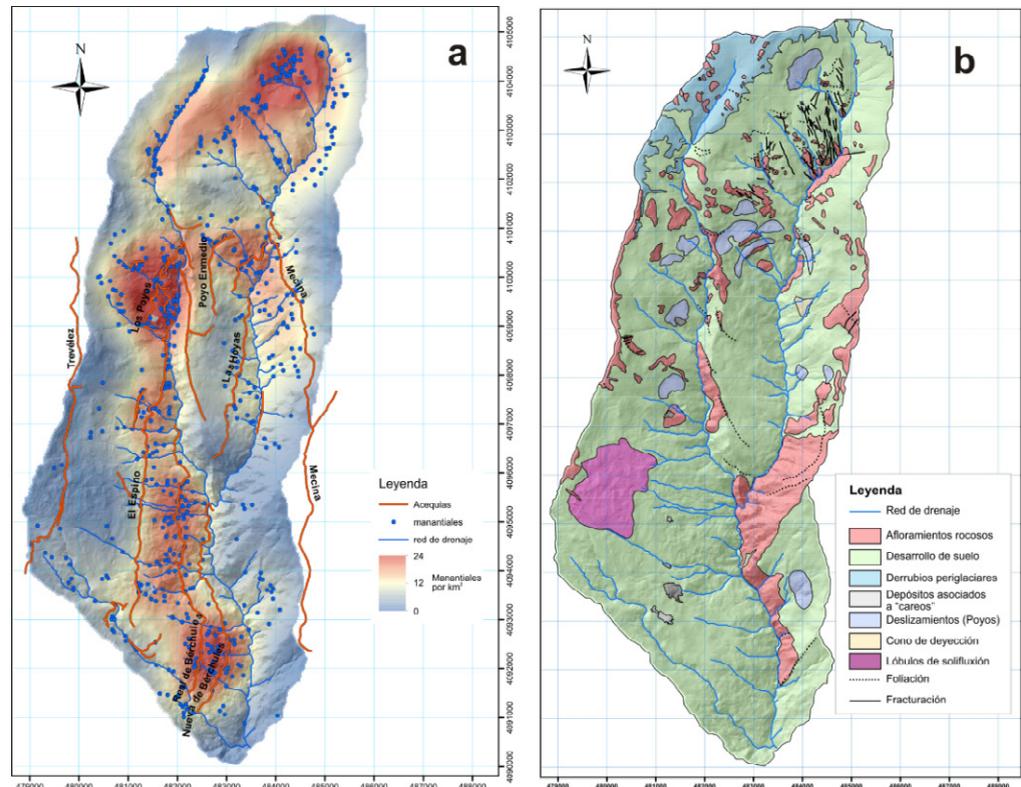


Por debajo de la anterior franja altitudinal el número de manantiales vuelve a aumentar considerablemente (manantiales de tipo 7, Figura 3). Estas surgencias se ubican aguas abajo de las acequias de careo y de riego (Figura 4e), que se disponen a una media de 1600 m s.n.m. (Ortiz-Moreno, 2010). En este sentido, el mapa de distribución de manantiales realizado por González-Ramón *et al.* (2015) en la cuenca del río

Bérchules es bastante ilustrativo (Figura 5). En esta figura se puede observar con nitidez que los mayores valores de densidad de manantiales se relacionan con la franja donde se desarrollan los borreguiles, entre 2200 y 2800 m s.n.m, y con las zonas situadas aguas abajo de las acequias, que en esta cuenca presentan una gran altitud media.

Figura 5.

Mapa de densidad de manantiales y situación de las principales acequias (a); y (b), mapa de formaciones geomorfológicas cartografiadas en la cuenca del río Bérchules (Fuente: González-Ramón et al. 2015).



Las aguas que drenan los manantiales del acuífero en rocas duras de Sierra Nevada son, fundamentalmente, bicarbonatado cálcicas y cálcico –magnésicas, con salinidades inferiores a 300-350 mg/l y temperaturas comprendidas entre 2 y 16 °C (Castillo et al., 1996, 1999). Por su parte, las asociadas al contacto entre el Nevado Filábride y el Alpujárride en la ladera sur de Sierra Nevada son de características muy dispares. Así, en el entorno de Lanjarón existen surgencias con conductividades eléctricas de incluso 2.5000 mS/cm, temperaturas de 25 °C, valores de pH menores de 6 y altas concentraciones de elementos como el hierro, manganeso, cromo, cadmio, níquel y plomo, entre otros (Castillo et al., 1999). Asociadas a otras fracturas de menor entidad, existen numerosos manantiales con aguas ferruginosas, con salinidades comprendidas entre 500 y 1000 mg/l y temperaturas máximas de 20° C (Castillo et al., 1996).

Acuíferos carbonáticos alpujárrides

El otro gran conjunto de acuíferos que se relacionan con Sierra Nevada está formado por carbonatos marinos triásicos, intensamente plegados y deformados, que rodean a la sierra por el sur y especialmente por el oeste y noroeste (Pulido-Bosch, 1980; ITGE, 1999). Al oeste del macizo se encuentra el acuífero de la Sierra de Padul, con una extensión de afloramientos permeables de 135 km² y un volumen de recursos renovables, anuales medios, estimados en 46 hm³ en ITGE (1999). Al sur, los carbonatos triásicos que afloran en la margen derecha del Guadalfeo lo hacen en pequeños retazos, formando acuíferos de poca importancia. Por último, en el alto Andarax, en la denominada Alpujarra almeriense, existe un conjunto notable de afloramientos de carbonatos, gracias a los cuales el río mantiene un flujo de agua permanente

en su cabecera. A este grupo de acuíferos se les denomina acuíferos carbonáticos de la Alpujarra (ITGE, 1990); su extensión se ha cifrado en 60 km² y sus recursos medios renovables se deben aproximar, según Castillo et al. (1996), a 15 hm³/año.

La principal característica que define a estos acuíferos es su elevada compartimentación, debido a la complejidad geológica de su estructura.

La principal característica que define a estos acuíferos es su elevada compartimentación, debido a la complejidad geológica de su estructura. Esto da lugar a la presencia de multitud de manantiales que no suelen presentar grandes caudales medios (ver manantiales de tipo 8 y 9 en la Figura 3). Además, hay otros aspectos que condicionan su funcionamiento hidrogeológico, como la predominancia de mármoles, dolomías o calizas, ya que estas últimas se karstifican con mayor facilidad. En los carbonatos alpujárrides triásicos se da la circunstancia de que los mantos más profundos son los que menos grado de metamorfismo presentan, por lo que suelen estar formados mayoritariamente por calizas, al contrario de lo que ocurre en los mantos superiores. Por otra parte, los mantos más profundos afloran en el contacto con las rocas nevado-filábrides que forman el núcleo de Sierra Nevada, por esta razón suelen localizarse a mayores cotas que el resto de mantos. Esta circunstancia hace que el desarrollo de formas de karstificación superficial (dolinas y lapiaces) sea más común que en el resto de afloramientos y que el agua subterránea circule por ellos a mayor velocidad, dando lugar a manantiales con grandes variaciones de caudal a lo largo del año. Otra peculiar característica consiste en la existencia de gruesas bandas de carbonatos intensamente fracturados, hasta tal punto que la roca ha sido triturada hasta alcanzar el tamaño de grava fina y es fácilmente erosionada, de la misma forma que un sedimento detrítico suelto. A estas rocas se les llama “kikiritas” y adquieren un comportamiento hidrogeológico similar a los acuíferos detríticos porosos, lo que significa que la velocidad de circulación del agua es mucho menor que en un acuífero kárstico y que los manantiales asociados mantienen caudales con pequeñas

variaciones anuales. Los ríos Monachil, Huenes, Dílar, Dúrcal y Torrente atraviesan estos afloramientos de carbonatos, favoreciendo la descarga de aguas subterráneas hacia sus cauces. Sin embargo, la mayor parte de la descarga del agua subterránea relacionada con los acuíferos de carbonatos triásicos de la Sierra de Padul se produce, lateralmente, hacia los acuíferos detríticos de las depresiones de Granada y Padul.

Las aguas drenadas por los carbonatos alpujárrides presentan facies bicarbonatada cálcica a cálcico magnésica, con elevadas concentraciones de sulfatos, en algunos sectores. Su salinidad suele estar comprendida entre 300 y 800 mg/l, y presentan un pH ligeramente básico (Pulido, 1980; Castillo et al., 1996).

LAS ACEQUIAS DE CAREO: ELEMENTOS ESENCIALES DEL ANCESTRAL SISTEMA DE GESTIÓN INTEGRADA DEL AGUA EN SIERRA NEVADA

Para poder abastecer de agua a las poblaciones de Sierra Nevada y para regar los pastos y las terrazas de cultivo construidas en sus abruptas pendientes, fue necesario aumentar el caudal y la duración de los manantiales que surgían por encima de las poblaciones y, sobre todo, aumentar el caudal de los ríos durante el estiaje. Este problema se resolvió durante la época de Al-Andalus mediante la construcción de una extensa red de canales de infiltración, excavados en el terreno sin impermeabilizar, denominados acequias de careo. Se entiende por “carear” el proceso por el que se recolecta el agua de escorrentía de las cabeceras de los ríos, durante la época de deshielo (marzo-junio), para infiltrarla en la zona de alteración de las rocas duras que se desarrolla en las partes altas de las laderas. Parte del agua infiltrada se recupera tiempo después, aguas abajo, disponiendo así del preciado recurso durante la época estival, cuando los ríos de Sierra Nevada ven reducido su caudal drásticamente tras el deshielo. En la Figura 6 se presenta un esquema conceptual del funcionamiento hidrogeológico de la margen derecha del río Bérchules, donde se realizan careos. En este caso, el agua derivada por una acequia de careo (acequia

del Espino) se vierte para su infiltración en una zona denominada Sima de Bérchules. El agua recargada surge, tiempo después, por numerosos manantiales que se generan en la media y baja ladera del valle, además de ser drenada por los arroyos encajados en el acuífero superficial y por el río Bérchules (Martos Rosillo *et al.*, 2017). A mediados de junio, las acequias

de careo dejan de utilizarse y otra extensa red de acequias de riego, situada a menor altitud, comienza a derivar agua de los ríos para el riego de las zonas de cultivo intensivo (Figura 7). Con este procedimiento de uso conjunto de agua superficial y subterránea se optimiza la capacidad de retención/almacenamiento del acuífero en rocas duras de Sierra Nevada.

Figura 6.

Esquema conceptual de funcionamiento hidrogeológico en la ladera de la margen derecha del río Bérchules.

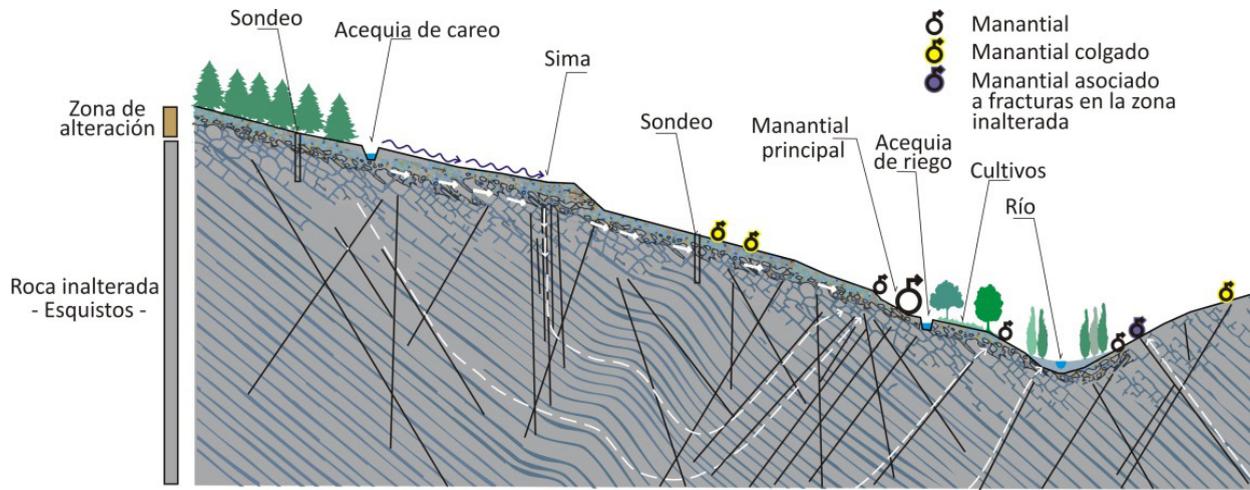
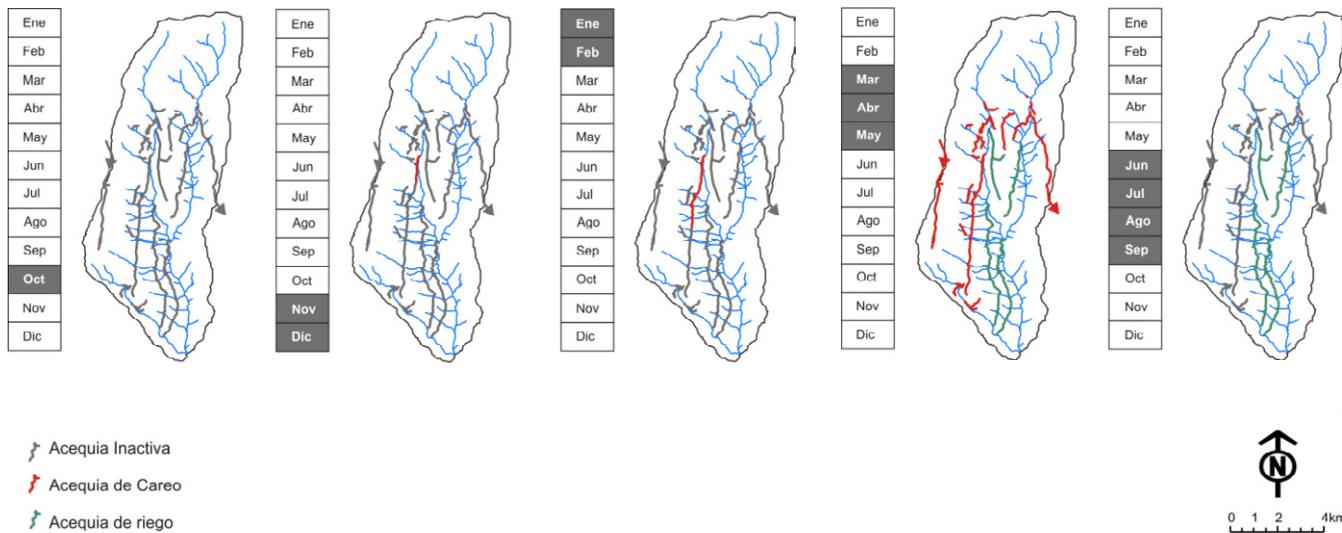


Figura 7.

Esquema de funcionamiento de las acequias de riego y de careo de la cuenca del río Bérchules, durante el año hidrológico 2014-15 (IGME, 2015).



Por su parte, en la Figura 8 se presenta un mapa con las acequias de careo cartografiadas en Sierra Nevada, donde, por el momento, se contabilizan 720 km de acequias de careo y de careo/riego, a los que hay que añadir unos 3.000 km de acequias de regadío. La magnitud de estas cifras pone de manifiesto la importancia que este sistema de manejo del agua tiene en el funcionamiento de los ríos que drenan Sierra Nevada.

Con este sistema se consigue además de un beneficio social (agua de abastecimiento a la población y para riego) un indudable beneficio ambiental. La mayor parte del agua infiltrada por el careo se descarga en los arroyos encajados en el acuífero, contribuyendo a sostener la fauna acuática y la asociada a los bosques de ribera que tapizan estos cauces. Donde se realiza recarga con las acequias de careo conviven parcelas de regadío con zonas de mayor densidad de vegetación natural, lo que da lugar a paisajes culturales, resultado de siglos de una interacción sostenible entre las comunidades campesinas y el medio. En relación con lo anterior, se quiere subrayar que el sistema de manejo del agua que se realiza en Sierra Nevada consiste, en esencia, en el mismo paradigma de gestión del agua que se anhela conseguir en los países más comprometidos con el medio ambiente: la

Gestión Integrada del Agua (GIA). Según la definición del Global Water Partnership (2000), la GIA consiste en un proceso por el que se promueve el desarrollo coordinado y la gestión del agua, el territorio y los recursos relacionados, con el objetivo de alcanzar unos beneficios sociales, económicos y de bienestar equitativos y que no comprometan la sostenibilidad de los ecosistemas vitales (GWP, 2000).

Los beneficios aportados por las acequias de careo y sus valores, tangibles e intangibles, está haciendo que empiece a recibir cierta atención y protección desde diferentes instituciones internacionales; es el caso de la UNESCO, que ha reconocido a las acequias de careo de Sierra Nevada como el primer sitio demostrativo en España de la Red Mundial de UNESCO ECOHYDROLOGY. A pesar de esto, Sierra Nevada se enfrenta a una situación de riesgo. El envejecimiento y la reducción de la población rural, el abandono de los sistemas de regadío tradicional, las repoblaciones forestales inadecuadamente planificadas y la expansión de las zonas de regadío intensivo, auspiciadas por una inadecuada política de modernización de regadíos, están contribuyendo a reducir de forma drástica la superficie de estos ancestrales sistemas de Gestión Integral del Agua.



Detalle de una de las zonas donde se vierte el agua de la acequia de Mecina para su infiltración en los acuíferos de ladera. En estas zonas de gran capacidad de infiltración, denominadas localmente como "calaeros" o "simas", se recarga todo el caudal vertido desde la acequia de careo. Estudios recientes han demostrado que esta forma de manejo del agua tiene más 1200 años de antigüedad en España, existiendo sistemas muy parecidos en Perú, las amunas, para las que se dan citas de 1400 años.
Fotografía: Sergio Martos

REPERCUSIONES HIDROLÓGICAS E HIDROGEOLÓGICAS DEL CAREO

Para comprobar los efectos hidrológicos e hidrogeológicos de la técnica de careo, en la cuenca del río Bérchules, durante el año hidrológico 2014-15 se realizó un seguimiento detallado del caudal del río (Martos-Rosillo *et al.*, 2017) en distintas secciones, así como de las principales acequias de careo y riego de esta cuenca hidrográfica de alta montaña (Figura 8).

Los resultados del trabajo de control foronómico se sintetizan en el esquema que se presenta en la Figura 9. En el año hidrológico estudiado (2014-15) las aportaciones medidas en la estación de aforo fueron de 5,3 hm³. Se trató de un año de tipo seco. Las aportaciones estimadas fueron muy inferiores a la media del periodo 1970-2013, que resultaron de 13,1

Figura 8.

Mapa hidrogeológico del acuífero de Bérchules (a partir de Martos-Rosillo *et al.*, 2015b)

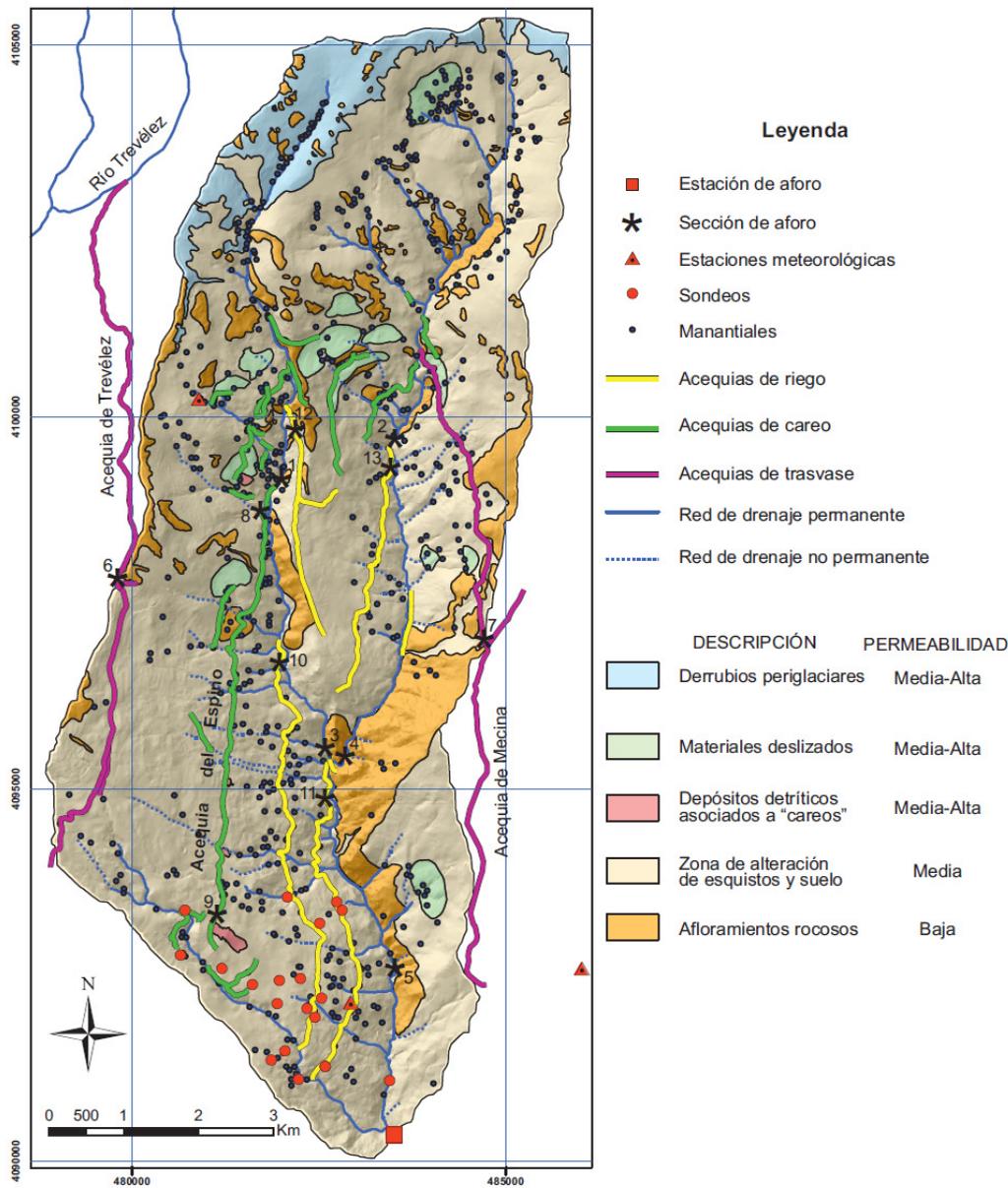
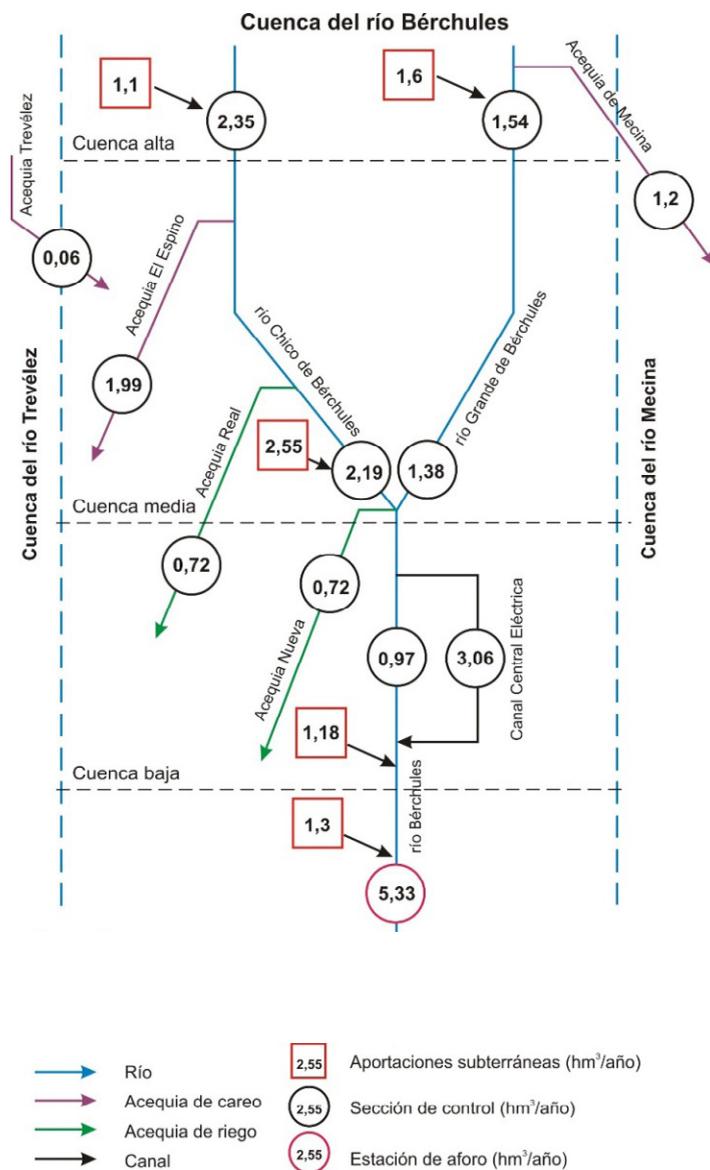


Figura 9.

Esquema hidrológico del río Bérchules, con cifras de aportaciones en hm^3 , correspondientes al año hidrológico 2014-2015.



$\text{hm}^3/\text{año}$ (Jódar et al., 2017). El balance hídrico de la cuenca del año 2014-2015 indica que las entradas del sistema río-acuífero ($7,6 \text{ hm}^3/\text{año}$) se han producido por la recarga de agua (natural y artificial) en el acuífero y las salidas se han repartido entre $1,5 \text{ hm}^3$ para regadío y abastecimiento, y $1,2 \text{ hm}^3$ para su transferencia a la cuenca del río Mecina; el resto, $5,3 \text{ hm}^3$, han discurrido superficialmente por el río Bérchules, aguas abajo de su estación de aforo. La diferencia entre las entradas y las salidas se explicaría por una disminución del volumen de agua almacenado en el acuífero o por un error de cierre del balance.

Otra evidencia de la influencia que el careo tiene en el funcionamiento hidrológico e hidrogeológico del río Bérchules se comprueba al comparar los hidrogramas de la parte alta y de la parte baja de la cuenca. En la Figura 10 se compara el hidrograma de la cabecera del río, que resulta de sumar los caudales medidos en las secciones 1, 2 y 7 (Figura 8) y de compararlos con el hidrograma de la estación de aforo, en la parte baja de la cuenca. En la cabecera, el hidrograma es claramente nival, con un caudal de base muy constante que se ve notablemente incrementado durante la época de deshielo. En la estación de aforo situada en la parte baja de la cuenca, el hidrograma es muy inercial, prácticamente plano durante todo el año hidrológico, pero con un rápido agotamiento relacionado con el inicio de la época de riego.

En relación con lo anterior, en la Figura 11 se compara el hidrograma medio del río Bérchules con el de otros dos ríos de Sierra Nevada donde no se realiza careo o donde éste es de poca entidad. Para comparar los hidrogramas, los datos de caudal se han transformado en unidades de $\text{mm}/\text{día}$, dividiendo las aportaciones por las correspondientes superficies de cada cuenca de recepción. Las cuencas de los tres ríos son muy parecidas, con similares características

Figura 10.

Hidrograma de los tributarios del Bérchules a 2000 m s.n.m. (suma de los caudales medidos en el río Chico, el río Grande y en la acequia de Mecina) frente al hidrograma medido en la estación de aforo (año hidrológico 2014-2015).

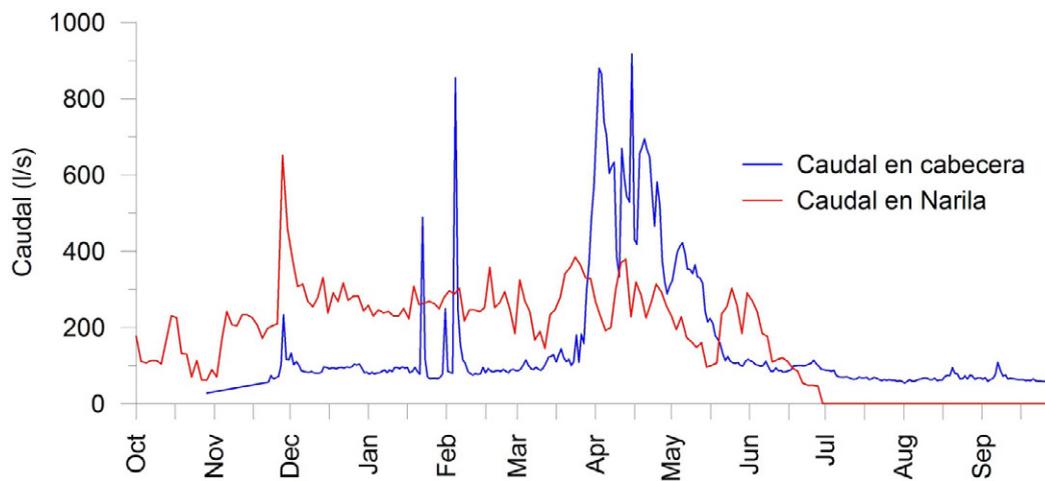
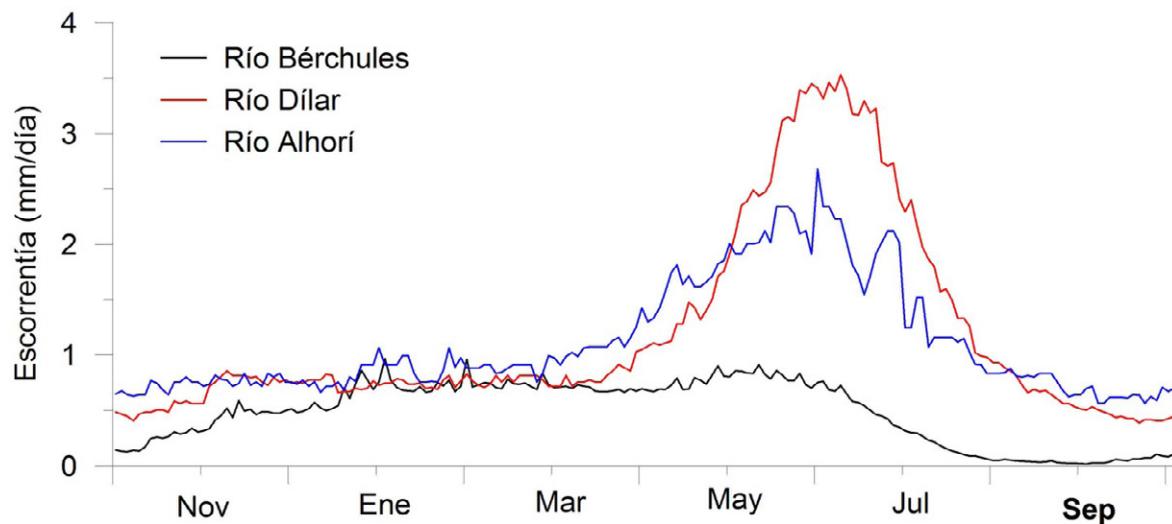


Figura 11.

Hidrogramas medios de los ríos Bérchules (periodo 1970-2013), Alhorí (periodo 1994-2013) y Dílar (periodo 1970-2013).



fisiográficas. En el río Dílar hay varias acequias de careo abandonadas y en el Alhorí hay dos acequias de careo con un uso testimonial. Como se puede comprobar en la figura, la diferencia entre el caudal máximo de deshielo y el caudal de invierno es mayor en los ríos donde no se hace careo. La derivación del agua durante el deshielo por las acequias de careo reduce la entidad del pico nival del hidrograma en las estaciones de aforo situadas aguas abajo de las tomas de las acequias e incrementa la componente subterránea de los hidrogramas por la recarga artificial realizada en los acuíferos. El agua surge posteriormente en estiaje para ser aprovechada en el regadío y el abastecimiento de la población local. Hay que destacar, en el caso del río Bérchules, que el caudal de estiaje se reduce de forma drástica desde mediados junio hasta octubre, debido a que en esta cuenca las principales acequias de riego se ubican aguas arriba de la estación de aforo. Situación que no se produce en el caso de las otras dos cuencas.

CONCLUSIONES

El manejo ancestral del agua que se realiza en Sierra Nevada mediante el sistema de uso conjunto con aguas superficiales y subterráneas, en el que las acequias de careo juegan un papel fundamental, provoca un incremento de la componente subterránea en el hidrograma y modifica sustancialmente su respuesta hidrológica, haciéndola más inercial. En la cuenca piloto investigada, la cuenca del río Bérchules, los hidrogramas de la cabecera del río, claramente nivales, son muy diferentes a los registrados en la estación de aforo, situada aguas abajo. El agua de deshielo es derivada fundamentalmente para su recarga en el acuífero. Otra parte importante es utilizada para riego de pastos y de otras zonas regables. Estas actuaciones hacen que el régimen de caudales del río en la parte baja de la cuenca sea el de un río con un régimen de caudales muy inercial, con una alta componente subterránea.

De igual forma, la recarga mediante las acequias de careo en la cuenca del río Bérchules hace que aguas abajo de las acequias se mantenga un manto de vegetación con unas exigencias hídricas mucho mayores a las que se dan, de forma natural, en otras zonas del sur de Sierra Nevada. Asimismo, el careo

incrementa el caudal de estiaje del río Bérchules y de los manantiales situados aguas abajo, en consecuencia su abandono implicaría una notable disminución de la aportación al río y a las citadas surgencias durante los periodos secos.

Por último, se quiere subrayar que esta técnica de manejo del agua es un ejemplo de enorme capacidad de resiliencia en términos ambientales y sociales. Las zonas de regadío tradicionales de Sierra Nevada, que se mantienen desde de la Edad Media, han superado los cambios climáticos y los drásticos cambios sociales ocurridos durante, al menos, los cinco últimos siglos, por lo que constituyen una herramienta de adaptación al Cambio Climático que permite retrasar los picos de los hidrogramas y aumentar la componente subterránea de los ríos y, por tanto su caudal de base en los periodos secos.

La emigración, el abandono de las tierras de cultivo y, como consecuencia, el de las acequias de careo están afectando al régimen de funcionamiento de los ríos, haciendo peligrar el especial equilibrio alcanzado entre el hombre y Sierra Nevada, tras muchos siglos de convivencia en armonía. Se considera, por tanto, necesario acometer las necesarias actuaciones que permitan mantener este ejemplar sistema de gestión del agua, heredado de nuestros antepasados.

AGRADECIMIENTOS

Parte del presente trabajo se encuadra dentro de los resultados del Servicio de Investigación que el IGME ha realizado a la Agencia de Medio Ambiente y Agua de la Junta de Andalucía, y constituye una contribución al nuevo ciclo de Planificación Hidrológica 2016-2021 de las cuencas intracomunitarias y al Grupo de Investigación RNM-126 de la Junta de Andalucía. Agradecemos la especial ayuda prestada por la Comunidad de Regantes de Bérchules. Asimismo, se quiere agradecer la gran colaboración prestada por Francisco Javier Sánchez Gutiérrez e Ignacio Henares Civantos, del Parque Nacional de Sierra Nevada.

REFERENCIAS

- Blanca, G., Cueto, M., Martínez-Lirola, M. J. and Molero-Mesa, J. 1998. Threatened vascular flora of Sierra Nevada (Southern Spain). *Biological Conservation*, 85, 269-285.
- Brewer, S., Cheddadi, R., De Beaulieu, J. L. and Reille, M. 2002. The spread of deciduous *Quercus* throughout Europe since the last glacial period. *Forest Ecology and Management*, 156, 27-48.
- Castillo, A. 2009. *Lagunas de Sierra Nevada. Todas las lagunas, valle a valle*. Universidad de Granada. Granada. 317 pp.
- Castillo, A. and Fedeli, B. 2002. Algunas pautas del comportamiento hidrogeológico de rocas duras afectadas por el glaciario y periglaciario en Sierra Nevada. *Geogaceta*, 32, 189-191.
- Castillo, A., Cruz-Sanjulián, J.J. and Benavente, J. 1999. Aguas de Sierra Nevada; Aguas de Lanjarón. In: *Lanjarón, paisajes del agua*. Baleario de Lanjarón, Granada. 35-64.
- Castillo, A., del Valle, M., Rubio-Campos, J.C. and Fernández-Rubio, R. 1996. Síntesis hidrogeológica del macizo de Sierra Nevada (Granada y Almería). In: *1ª Conferencia Internacional de Sierra Nevada*, I, 389-417.
- Fedeli, B. and Castillo, A. 1998. Condiciones de surgencia en una cuenca esquistosa de alta montaña (Sierra Nevada; Granada, España). *Geogaceta*, 23, 47-50 pp.
- Gómez-Ortiz, A., Oliva, M. and Salvador, F. 2013. The environmental protection of landscapes in the high semiarid Mediterranean mountain of Sierra Nevada National Park (Spain): Historical evolution and future perspectives. *Applied Geography*, 42, 227-239.
- Gómez-Ortiz, A., Oliva, M., Palacios, D., Salvador-Franch, F., Vázquez-Selem, L., Salvá-Catarineu, M. and De Andrés, N. 2015. The deglaciation of Sierra Nevada (Spain). Synthesis of the knowledge and new contributions. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(2), 409-426 pp.
- González-Ramón, A., Moral-Martos, F., Marín-Lechado, C., Martos-Rosillo, S., Pedrera, A. Ruiz-Constán, A. and Durán Valsero, J.J. 2015. Factores geomorfológicos condicionantes de la hidrogeología de la cuenca alta del río Bérchules (Sierra Nevada, Granada). In: B. Andreo Navarro et al. (eds). *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica*. IGME, 1, 283-294.
- Granados, J.E. and Cano-Manuel, F.J. 2015. Demografía de poblaciones de ungulados silvestres y prevalencia de enfermedades. En: Zamora, R. et al. (eds). *La huella del Cambio Global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*. Junta de Andalucía, 113-117.
- GWP, 2000. Integrated Water Resources Management. [Online] TAC Background Paper. Report number: 4. GWP, Stockholm, Sweden. Available from: www.gwpforum.org/gwp/library/Tacno4.pdf [Accessed April 2013].
- IGME, 2015. *Investigación hidrogeológica de acuíferos de alta montaña sometidos a uso intensivo del agua subterránea. Cabecera del río Bérchules (Sierra Nevada, Granada)*. Centro de documentación del IGME, Madrid. 139 pp.
- ITGE, 1990. *Atlas hidrogeológico de la provincia de Granada*. Diputación de Granada-ITGE, Granada. 107 pp.
- ITGE, 1999. *Plan de integración de los recursos hídricos subterráneos en los sistemas de abastecimiento público de Andalucía. Sectores acuíferos de Padul-La Peza y Albuñuelas*. Centro de documentación del IGME, Madrid.
- Jódar, J., Cabrera, J. A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L. J., Herrera, C. and Custodio, E. 2017. Groundwater discharge in high-mountain watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 593, 760-772.
- Lorite, J., Ruiz-Girela, M. and Castro, J. 2007. Patterns of seed germination in Mediterranean mountains; study on 37 endemic or rare species from Sierra Nevada, SE Spain. *Candollea*, 62 (1), 5-16.
- Martin Civantos, J. M. 2007. *Poblamiento y territorio medieval en el Zenete (Granada)*. Universidad de Granada.
- Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Marín-Lechado, C., Cabrera, J.A. Guardiola-Albert, C., Jodar, J., Navarrete, E., Ruiz-Constán, A. Moral, F., Pedrera, A. Navas, R., López, M. and Durán, J.J. 2017. Las acequias de careo de Sierra Nevada (Sur de España), un sistema de recarga ancestral en acuíferos de alta montaña. In: Óscar Escolero, Carlos Gutiérrez y Edgar Mendoza (eds) *Manejo de la recarga de acuíferos*. 527-563.
- Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Rodríguez-Rodríguez, F., Marín-Lechado, C., Guardiola-Albert, C., Durán Valsero, J.J., Fernández-Ruiz, L., Navarrete-Mazariegos, E., López-Rodríguez, M., Fernández, M., Rodríguez-Rodríguez, M., Bruque, J.M. Ruiz-Constán, A. and Pedrera, A. 2015. ¿Tiene interés hidrológico preservar las acequias de careo de Sierra Nevada? El caso de la acequia de careo de El Espino (río Bérchules, Granada). In: Andreo Navarro, B et al. (eds). *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica*. IGME, 2, 925-936.
- Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, C., Marín-Lechado, C., González-Ramón, A., Villagómez, B., Pelegrina, M., Fernández-Ruiz, L., Durán Valsero, J.J., Navarrete-Mazariegos, E., López-Rodríguez, M., Pedrera, A., Ruiz-Constán, A. and Cabrera, J.A. 2015. Caracterización hidrogeológica y evaluación de la recarga de un acuífero de alta montaña desarrollado en rocas duras, cuenca del río Bérchules, Sierra Nevada, Granada. In: Andreo Navarro et al. (eds). *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica*. IGME, 1, 623-634.

Oliva, M., Gómez-Ortiz, A., Schulte, L. and Salvador, F. 2009. Procesos periglaciares actuales en Sierra Nevada. Distribución y morfometría de los lóbulos de soliflucción. *Nimbus*, 23-24, 133-148.

Ortiz-Moreno, E. 2010. *Actualización, digitalización y georreferenciación de la red de acequias de careo en el Espacio Natural Protegido de Sierra Nevada*. TRAGSATEC-Junta de Andalucía. 131 pp.

Pulido-Bosch, 1980. *Aportación al conocimiento de la hidrogeología de los alpujárrides y sus bordes en el extremo occidental de Sierra Nevada*. Universidad de Granada-Fundación Juan March, 123, 51 pp.

Pulido-Bosh, A. and Sbih, Y. 1995. Centuries of artificial recharge on the southern edge of the Sierra Nevada (Granada, Spain). *Environmental Geology*, 26, 57-63.

Sanz de Galdeano, C. and López-Garrido, A. C. 1998. Nature and impact of the neotectonic deformation in the western Sierra Nevada (Spain), *Geomorphology*, 30, 259-273.

Singhal, BBS and Gupta, RP. 2010. *Applied Hydrogeology of Fractures Rocks*. Second Edition. Springer. 408 pp

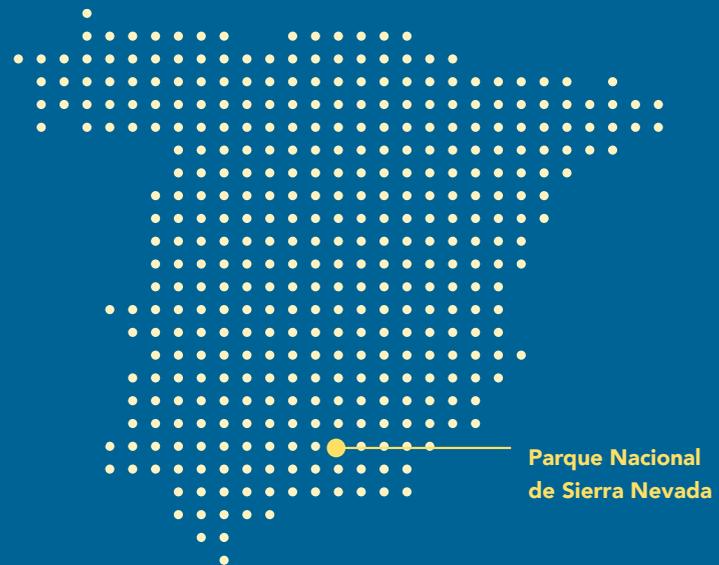
UNESCO. 1985. *Aguas subterráneas en rocas duras*. UNESCO, Paris. 300 pp.

Vivas, G., Gómez-Landesa, E., Mateos, L. and Giráldez, J.V. 2009. Integrated Water Management in an ancestral water sheme in a mountainous area of southern Spain. In: *World Environmental Water Resources Congress*. Kansas City, Missouri, Estados Unidos, 9 pp.



Recarga natural vs. siembra de agua mediante acequias de careo en una cuenca semiárida de alta montaña (Sierra Nevada, España)

Natural vs. ancestral aquifer recharge with careo channels in a semiarid highmountain watershed (Sierra Nevada, Spain)



Parque Nacional
de Sierra Nevada

Jorge Jódar¹, Thomas Zakaluk², Antonio González-Ramón¹, Ana Ruiz-Constán¹, Carlos Marín Lechado¹, Javier Urrutia^{3,4}, Christian Herrera⁴, Javier Lambán¹, Juan José Durán¹, Sergio Martos-Rosillo¹

1 Instituto Geológico y Minero de España, España.

2 Universidad de Granada, Granada, España.

3 HEUMA, 2030. Departamento de Ingeniería de Minas, Universidad de Antofagasta, Antofagasta, Chile

4 Centro de Investigación y Desarrollo de Ecosistemas Hídricos, Universidad Bernardo O'Higgins, Santiago, Chile

Recarga natural vs. siembra de agua mediante acequias de careo en una cuenca semiárida de alta montaña (Sierra Nevada, España)

RESUMEN

Las acequias de careo son estructuras ancestrales de manejo del agua que utilizan Soluciones Basadas en la Naturaleza para recargar los acuíferos en las cuencas del macizo montañoso de Sierra Nevada (España). Estas acequias consisten en canales excavados en el terreno que derivan el agua de deshielo de la cabecera de los ríos para infiltrarla en las partes altas de las laderas. Esta actividad garantiza el recurso hídrico en la época de estiaje que es cuando hay mayor demanda. En el presente trabajo se estudia el papel que juegan las acequias de careo en la cuenca del río Bérchules respecto a la recarga total del acuífero durante el año hidrológico 2014-2015, la cual se ha evaluado en 7,6 hm³. De esta recarga, el 52 % procede de la recarga distribuida generada por la infiltración natural de las aguas meteóricas, mientras que el 48 % restante procede de la infiltración realizada mediante el uso del sistema de acequias de careo, cuestión que pone de manifiesto la eficiencia y la importancia de este ancestral y eficiente sistema de recarga de acuíferos desarrollados en rocas duras.

Natural vs. ancestral aquifer recharge with careo channels in a semiarid highmountain watershed (Sierra Nevada, Spain)

ABSTRACT

Careo channels are ancestral Nature-Based Solutions for water management that are used to recharge aquifers in the watershed of the Sierra Nevada mountain massif (Spain). These handdug channels divert snowmelt from the headwaters of rivers and let it infiltrate into the upper parts of the hill slopes, and by that increase the amount of water resources available during the dry season. Our study investigates the role of this ancestral aquifer recharge practice in the Bérchules watershed by comparing its yield with respect to the total recharge of the aquifer during the 2014-2015 hydrological year. For this purpose, we contrast the total recharge of 7.6 hm³, calculated with an HBV watershed model, with flow measurements we conducted in the main channels of the system during this year. Our results show that 52 % of the total recharge can be accounted to a spatially distributed recharge by natural infiltration of meteoric waters, while the remaining 48 % originate from waters captured and infiltrated by careo channels. The study highlights the efficiency and importance of this ancestral aquifer recharge system developed in hard rocks, which may be replicated in other high mountain watersheds of similar hydroclimatic and geological characteristics.

INTRODUCCIÓN

Sierra Nevada es un macizo montañoso ubicado en el sureste de la Península Ibérica. Cuenta con los picos más altos de toda la península, entre los que destacan el Mulhacén (3482 m s.n.m.) y el Veleta (3398 m s.n.m.). A pesar de su gran elevación la cordillera está totalmente deglaciada, un fenómeno en el que, entre otras causas, ha influido la proximidad del continente africano, la cual impone en este macizo y su entorno unas condiciones climáticas de carácter mediterráneo y semiárido (Gómez-Ortiz *et al.*, 2013; 2015).

Si bien las condiciones hidro-climáticas nunca fueron las mejores para el desarrollo de comunidades permanentes, existen evidencias de ocupación en la zona desde el periodo Neolítico. Sin embargo, no fue hasta el periodo del Al-Ándalus, entre los siglos VIII y XV, cuando los pobladores de Sierra Nevada cambiaron definitivamente el paisaje de la zona, generando una extensa estructura de terrazas de cultivo, especialmente en la vertiente meridional del macizo, entorno a las cuales se desarrollaron los principales núcleos de población permanente aún existentes en la zona (Martín-Civantos, 2007; 2008).

Para satisfacer las demandas hídricas generadas por la actividad agrícola y los asentamientos asociados, se excavó una importante red de acequias con el triple objetivo de (1) transportar y distribuir el agua hacia las zonas de riego, (2) distribuir los excedentes de agua entre distintas cuencas hidrológicas mediante trasvases (3) regular los recursos de las cuencas mediante la recarga del agua, procedente del deshielo, en los acuíferos de las laderas (Martos-Rosillo *et al.*, 2019a). Este sistema de uso y manejo del agua mediante acequias está documentado desde el periodo de la Plena Edad Media (SS. XI-XIII; Martín-Civantos, 2010), y sigue en funcionamiento hoy en día, constituyendo un ejemplo muy representativo del nuevo paradigma de la Gestión Integral del Agua (Vivas *et al.*, 2009) y de lo que ahora se denomina Soluciones Basadas en la Naturaleza para la gestión del agua (Martos-Rosillo *et al.*, 2020).

La cuenca del río Bérchules se encuentra en el sector central de la vertiente Sur de Sierra Nevada, una zona donde se está generando un incremento en la demanda del recurso hídrico debido principalmente a

dos factores: (1) la política ambiental de repoblación forestal con bosque de coníferas que se lleva realizando desde la mitad del S-XX (Jiménez-Olivenza *et al.*, 2015), y (2) la transformación de zonas de agricultura de secano a zonas de riego intensivo de productos hortofrutícolas (Carpintero *et al.*, 2018). Se han realizado varios estudios para caracterizar el balance hidrológico en la cuenca (Martos-Rosillo *et al.*, 2015; 2017; Jódar *et al.*, 2017; 2018), pero todavía no se ha cuantificado cual es la contribución de las acequias de careo en el balance de agua a escala de cuenca hidrológica, siendo éste el principal objetivo del presente trabajo.

Sierra Nevada es un macizo montañoso ubicado en el sureste de la Península Ibérica.

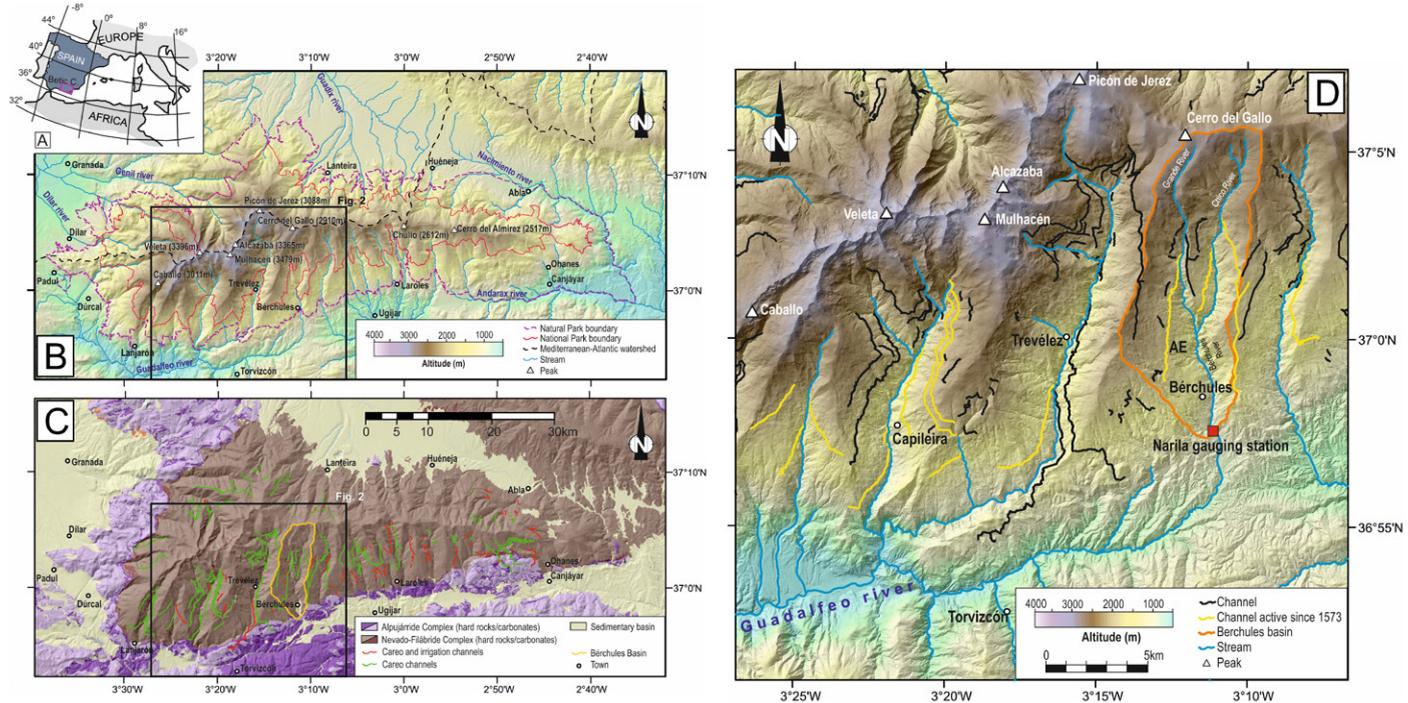
MARCO FÍSICO

La zona de estudio se enmarca en la cuenca del río Bérchules, la cual está ubicada en la cara sur de Sierra Nevada, al suroeste de la Península Ibérica (Figura 1). La altitud de la cuenca varía entre los 2913 m s.n.m. del Cerro del Gallo y los 979 m s.n.m. en la estación de aforo de Narila, ubicada en la salida de la cuenca, donde se dispone de la serie de caudal diario correspondiente al periodo 1970-2015, la cual presenta un caudal de descarga anual promedio de 12.6 hm³/año.

La cuenca del río Bérchules tiene una superficie de 68 km². La red de drenaje principal está formada por el río Grande de Bérchules, el cual tiene 17.3 km de longitud y discurre desde el noreste de la cabecera de cuenca, desde los 2600 m s.n.m. hasta la salida de esta en la estación de aforos de Narila. El río Chico es el afluente del Bérchules de mayor entidad, y también el que nace a mayor altitud, sobrepasando los 2900 m s.n.m. en el noroeste de la cabecera de cuenca. Este afluente confluye con el Río Grande de Bérchules en la parte media de la cuenca.

Figura 1.

(A) Mapa de ubicación general de Sierra Nevada. (B) Mapa físico y ámbito geográfico de los Parques Nacional y Natural de Sierra Nevada. (C) Mapa geológico de Sierra Nevada y sistemas de acequias más relevantes. (D) Cuenca del Río Bérchules donde se incluye la red de drenaje de la cuenca de Bérchules con la estación de aforos de Narila a la salida de la cuenca, y las acequias más relevantes, incluyendo la Acequia del Espino (AE) en el margen derecho de la cuenca (Modificado de Barberá et al., 2018).



La zona de estudio tiene un clima frío, con una estación seca, veranos suaves y frescos. La temperatura (T) media en la estación meteorológica de la Bérchules ubicada en el pueblo de Bérchules (1319 m s.n.m.; Figura 1D) es 13.3 °C (Figura 2A). La precipitación (P) y evapotranspiración potencial (ETP) medias son 677 y 1012 mm/año, respectivamente. P y T presentan una clara dependencia altitudinal en la cara sur de Sierra Nevada (Figura 2B).

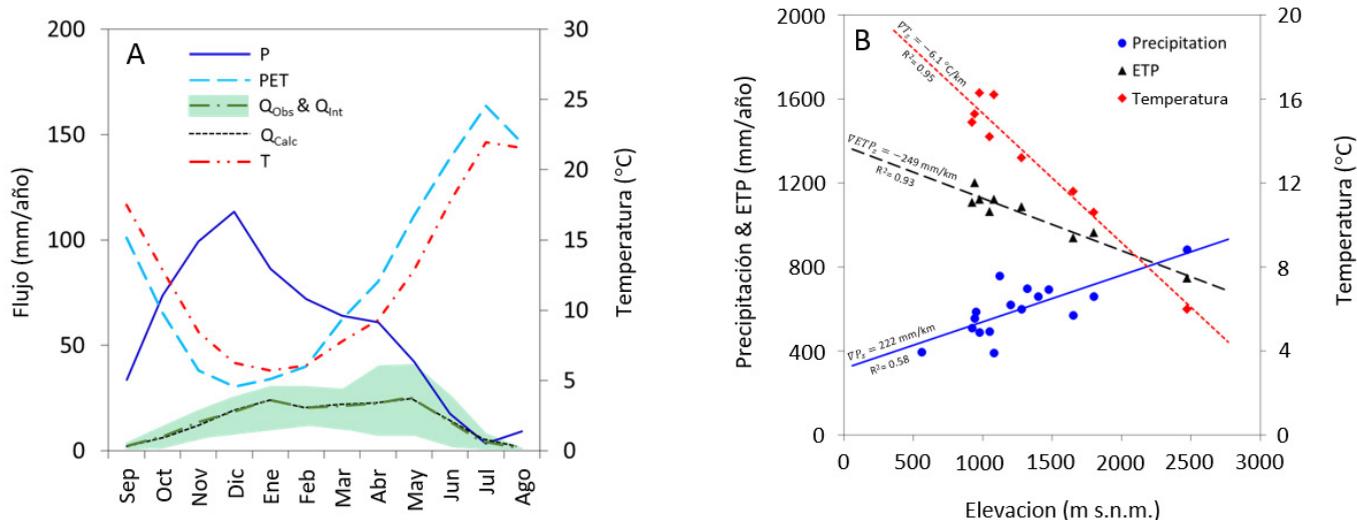
La cuenca del Bérchules se desarrolla sobre materiales poco permeables, principalmente esquistos, de la formación Nevado-Filábride (Figura 1). Esos materiales suelen presentar una capa de alteración permeable que comprende una zona alterada superficial, generada principalmente por meteorización, y una zona fisurada y fracturada, que se prolonga en profundidad hasta llegar a la roca inalterada (Figura 3). Sobre estos materiales, y

Estas acequias tienen como función principal la de infiltrar en el terreno el agua que fluye por ellas.

principalmente, por encima de los 2000 m de altitud, se superponen formaciones cuaternarias, compuestas fundamentalmente por materiales de tipo glaciar y periglacial. El conjunto forma un acuífero de reducido espesor, con profundidades máximas estimadas de entre 30 y 50 m, el cual cubre en su totalidad la cuenca del Bérchules y se extiende prácticamente por todo el ámbito de Sierra Nevada (Martos-Rosillo et al., 2019b).

Figura 2.

(A) Distribución estacional de P, T, ETP, caudal promedio medido en la estación de aforo de Narila (QObs) e intervalo de variación del caudal medido asociado a los percentiles 20 % y 80 % (QInt), y caudal calculado por el modelo HBV (QCalc) (modificado de Jódar *et al.*, 2018). (B) Distribución altitudinal de los valores promedio anuales de P, T, y ETP en la cara sur de Sierra Nevada (modificado de Jódar *et al.*, 2017)



Dada la escasez secular de recursos hídricos en las zonas aledañas a Sierra Nevada, se desarrolló ya desde la época de Al-Ándalus, con el dominio árabe-beréber en el sur de la Península Ibérica del siglo VIII, un eficiente sistema de manejo y gestión del agua (Delaigue, 1995; Martos-Rosillo *et al.*, 2019b). Para ello se construyó una extensa red de canales de infiltración, excavados en el terreno sin impermeabilizar, denominados acequias de careo (Figura 1C). Estas acequias tienen como función principal la de infiltrar en el terreno el agua que fluye por ellas. Atendiendo a su uso, en la cuenca del río Bérchules, se pueden diferenciar tres tipos de acequias de careo (Figura 3):

→ **Acequias de careo:** Son acequias usadas exclusivamente para recargar el agua que fluye por ellas, actividad que se localmente denomina careo. Infiltran agua tanto a lo largo de su recorrido como en zonas concretas, denominadas simas, donde se vierte el agua de la acequia para su infiltración. El agua recargada procede de la escorrentía de las cabeceras de los ríos, la cual se capta desde principios de otoño (octubre) hasta el final de la época de deshielo (junio), si bien estas fechas pueden variar en función de la meteorología del año hidrológico.

→ **Acequias de careo y riego:** Son acequias que se usan tanto para carear (octubre - junio), como para regar (julio - septiembre) los cultivos de las zonas de vega, los cuales ocupan una superficie aproximada de 2.7 km² (~ 4 % de la superficie de la cuenca del río Bérchules; Carpintero *et al.*, 2018) y se desarrollan aguas abajo de las acequias. El riego de estas zonas se hace mediante la técnica tradicional del riego por inundación y más recientemente, mediante riego localizado.

→ **Acequias de careo y transvase de agua intercuenas:** Son acequias que se usan tanto para carear en la cuenca donde se genera el recurso (cuenca origen) como en la cuenca aledaña hacia donde se transporta el agua (cuenca destino). El reparto del tiempo de careo entre las cuencas de origen y destino es parejo durante los meses de otoño e invierno. A partir del mes de abril y hasta el final de la época de deshielo (junio) este reparto es de 3/7 y 4/7 para las cuencas de origen y destino, respectivamente. A partir de junio, normalmente a partir del equinoccio de verano, el agua se queda en su totalidad en la cuenca de origen.

En la cuenca del Bérchules existen 19 acequias principales, con una longitud total de 57.45 km (Figura 1D). El total de acequias dedicadas exclusivamente al careo suman 21 km de longitud, siendo la más importante la acequia de El Espino. Esta comienza con una pequeña presa de derivación del cauce del río Chico de Bérchules a 1998 m s.n.m., en la parte alta de la cuenca (Figura 3A). Este desvío se conoce localmente como “toma”, y se controla de manera manual, periódicamente, el caudal que circula por ella (Figura 3B) para garantizar que no toda el agua que fluye por el río aguas arriba de la toma se derive hacia la acequia, y se permita que, pasada la toma, fluya por el río al menos el caudal ambiental. Esta acequia tiene una longitud de unos 7 km, con una anchura media de 1.5 m, presenta una pendiente promedia del 6.8 %. La acequia pasa por algunas simas, en las que la capacidad de infiltración del terreno es más elevada, y por las que se vierte parte del agua que transporta la acequia. La acequia del Espino termina en la sima de Bérchules a cota 1820 m s.n.m. (Figura 3C), la cual consiste en una superficie

cubierta de pasto, de escasa pendiente, que cubre un área de 32328 m², y que se caracteriza por presentar un sustrato con una alta capacidad de infiltración (Martos-Rosillo et al., 2019b). De hecho, en este punto se acaba infiltrando toda el agua que le llega por la acequia, incluyendo puntas de caudal de 390 L/s medidas durante el año hidrológico 2014 y 2015, que implican tasas de infiltración superiores a 1 m/día.

La descarga del acuífero juega un papel muy relevante en la respuesta hidrodinámica de la cuenca. De hecho, el agua subterránea representa el 95 % de la descarga total de la cuenca (Jódar et al., 2017; 2018), y esto queda reflejado en la forma plana que presenta el hidrograma promedio (Figura 2A). En la cuenca del río Bérchules se han inventariado 609 manantiales (9 manantiales/km²), de los que el 95 % presentan caudales inferiores a 0.2 L/s agotándose, la mayoría de ellos, durante el periodo de estiaje (Martos-Rosillo et al., 2015). Un importante número de manantiales se ubica en las partes más altas de la cuenca (Figura 4A), y se asocian a cambios en la pendiente del terreno

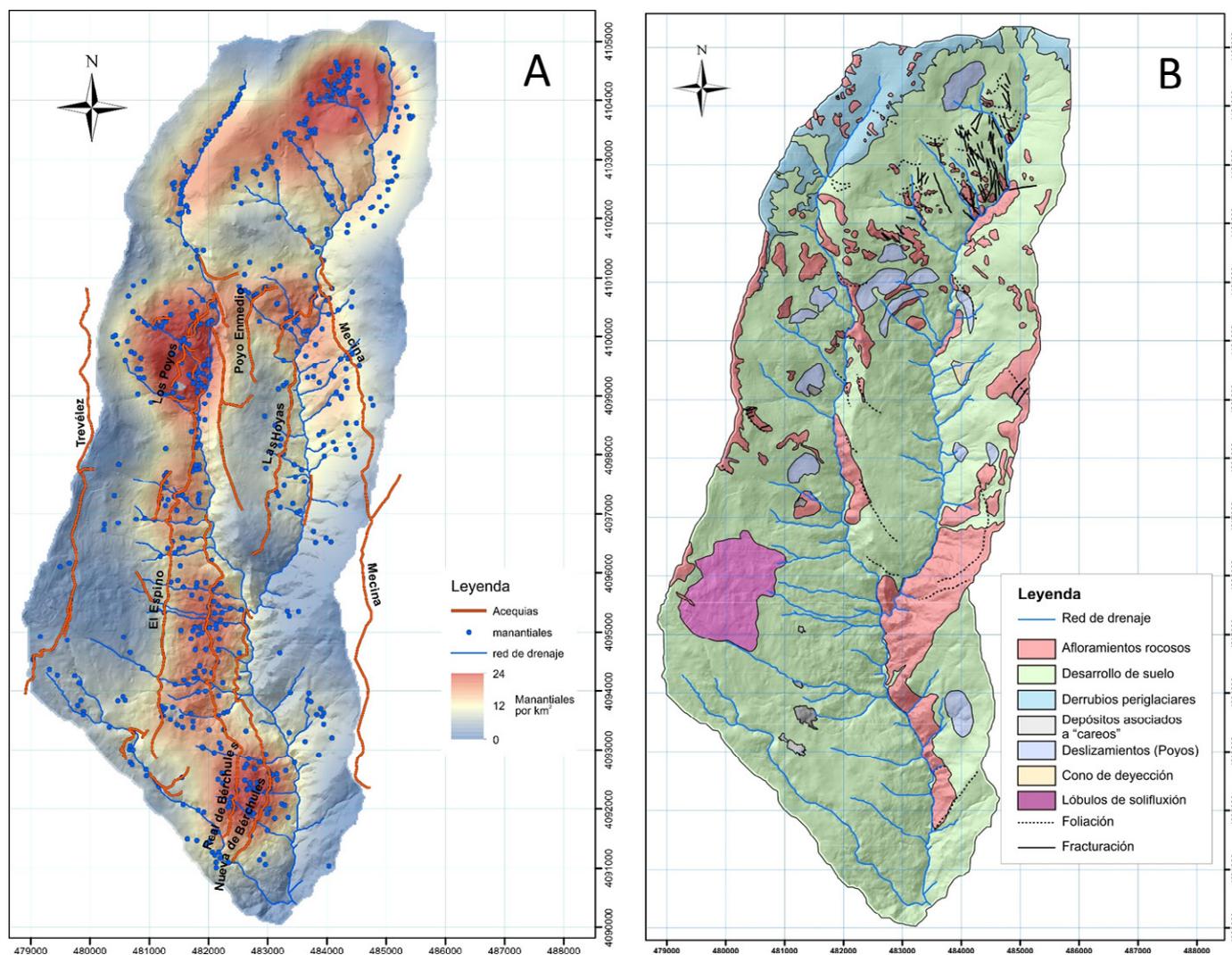
Figura 3.

Esquema sintético con los distintos acuíferos y tipos de manantiales que pueden encontrarse en las laderas (A) Esquema de la cuenca del río Bérchules donde se indica el tipo de acequias existentes. Los puntos “a” y “b” se corresponden con la toma y la sima terminal de la acequia del Espino, respectivamente, y el punto “d” con la toma de la acequia de Mecina. (B) Acequero activando el desvío del río en la toma de la acequia del Espino. (C) Foto de la sima terminal de la acequia del Espino.



Figura 4.

(A) Mapa de densidad de manantiales y situación de las principales acequias. (B) mapa de las formaciones geomorfológicas cartografiadas en la cuenca del río Bérchules.



o a la disminución del espesor de los materiales periglaciares presentes allí (Figura 4B). En el resto de la cuenca existe una clara relación entre la posición de las acequias y la de los manantiales (González-Ramón *et al.*, 2015). Las acequias condicionan tanto la distribución espacial de los manantiales como

su caudal de descarga. Esto afecta por tanto el funcionamiento hidrogeológico del sistema, ya que el funcionamiento de las acequias modifica las zonas de descarga natural del acuífero, incrementando la inercia del sistema y el número de surgencias y, por ende, el caudal de descarga en las laderas.

MÉTODOS

Evaluación de la recarga total mediante el modelo HBV

El modelo HBV (Bergström, 1976) es un modelo conceptual de precipitación-escorrentía empleado en modelización de cuencas hidrológicas. En su base el modelo contiene un balance hídrico comprendido como:

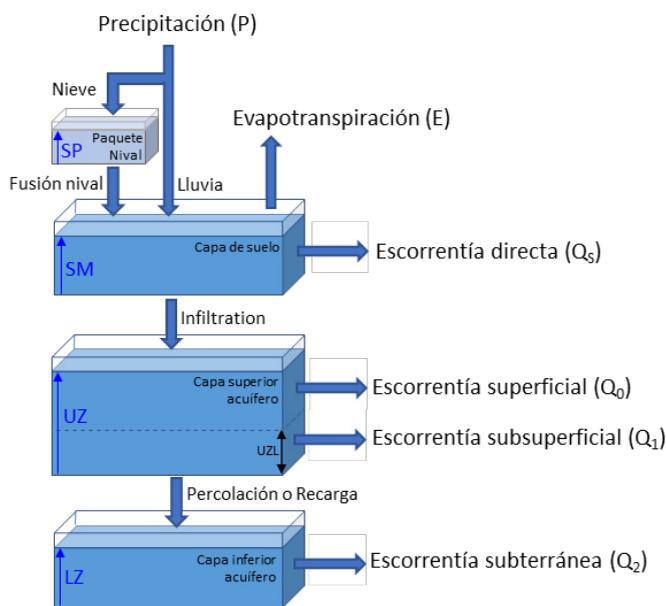
$$P - E - Q = \frac{d}{dt} (SP + SM + UZ + LZ)$$

donde P [LT-1] es la precipitación incluyendo agua en forma de lluvia y nieve, E [LT-1] es la evapotranspiración, Q [LT-1] es la escorrentía, SP [L] es el agua almacenada en forma de nieve, SM [L] es la humedad de suelo, y UZ [L] y LZ [L] representan las aguas subterráneas del flujo hipodérmico y de la zona saturada (flujo de base), respectivamente.

El modelo HBV proporciona la descarga diaria de una cuenca hidrológica a base de series de precipitación y temperatura diaria y permite calcular la recarga

Figura 5.

Esquema general del modelo HBV.



a la zona saturada. Consta de cuatro módulos o rutinas principales: un módulo de nieve, un módulo de humedad del suelo, un módulo de respuesta subterránea y por último un módulo de estimación de escorrentía (Figura 5).

El modelo procesa la precipitación como lluvia o nieve según una temperatura umbral predeterminada. Si entra como nieve, el módulo de nieve computa su acumulación o fusión dependiendo igualmente de la temperatura diaria. La combinación de precipitación y fusión de nieve entra al módulo de humedad de suelo donde se calcula la escorrentía directa (Q_s) y donde se distingue entre la recarga del suelo por infiltración directa y la contribución a la humedad potencial del suelo (Seibert, 2005). En este módulo también se calcula la evapotranspiración potencial mediante una función lineal de la humedad del suelo (Seibert, 2005). El módulo de respuesta subterránea transforma el agua excedente del módulo de humedad de suelo a escorrentía. Para tal fin conecta dos reservorios conectados en serie con una tasa de percolación constante. El reservorio superior genera escorrentía superficial y subsuperficial (i.e., Q₀ y Q₁, respectivamente; Figura 5), mientras que el reservorio inferior juega el papel de acuífero generando escorrentía subterránea (i.e., Q₂; Figura 5). Por lo tanto, la recarga del acuífero (i.e. flujo de agua que alcanza el reservorio inferior) está limitada por la tasa de percolación entre los dos reservorios y coincide en régimen estacionario con el valor de Q₂. En el módulo de estimación de escorrentía, entran los tres componentes de escorrentía (i.e., Q₀, Q₁ y Q₂) y se suman para calcular la escorrentía total (Q_T) en el punto de salida de la cuenca hidrológica. Una descripción detallada del modelo HBV se presenta en Bergström (1992; 1995) y Seibert (1999).

El modelo HBV dispone de módulo de calibración automático utilizando un algoritmo genético (Seibert, 2000) para imitar la evolución de escorrentía en la cuenca. La concordancia entre escorrentía observada (Q_{obs}) y simulada (Q_{sim}) se evalúa a base de la eficiencia Reff [-] (Nash and Sutcliffe, 1970). Para evaluar la incertidumbre de los parámetros estimados para el modelo HBV aplicado en la cuenca del río Bérchules, en Jodar et al. (2018) se aplicó un análisis de Monte Carlo, mediante el que se minimizó el

coeficiente de eficiencia Reff, después de simular la respuesta hidrodinámica de la cuenca con HBV, utilizando para ello 50000 conjuntos independientes de parámetros de entrada para el moldeo HBV.

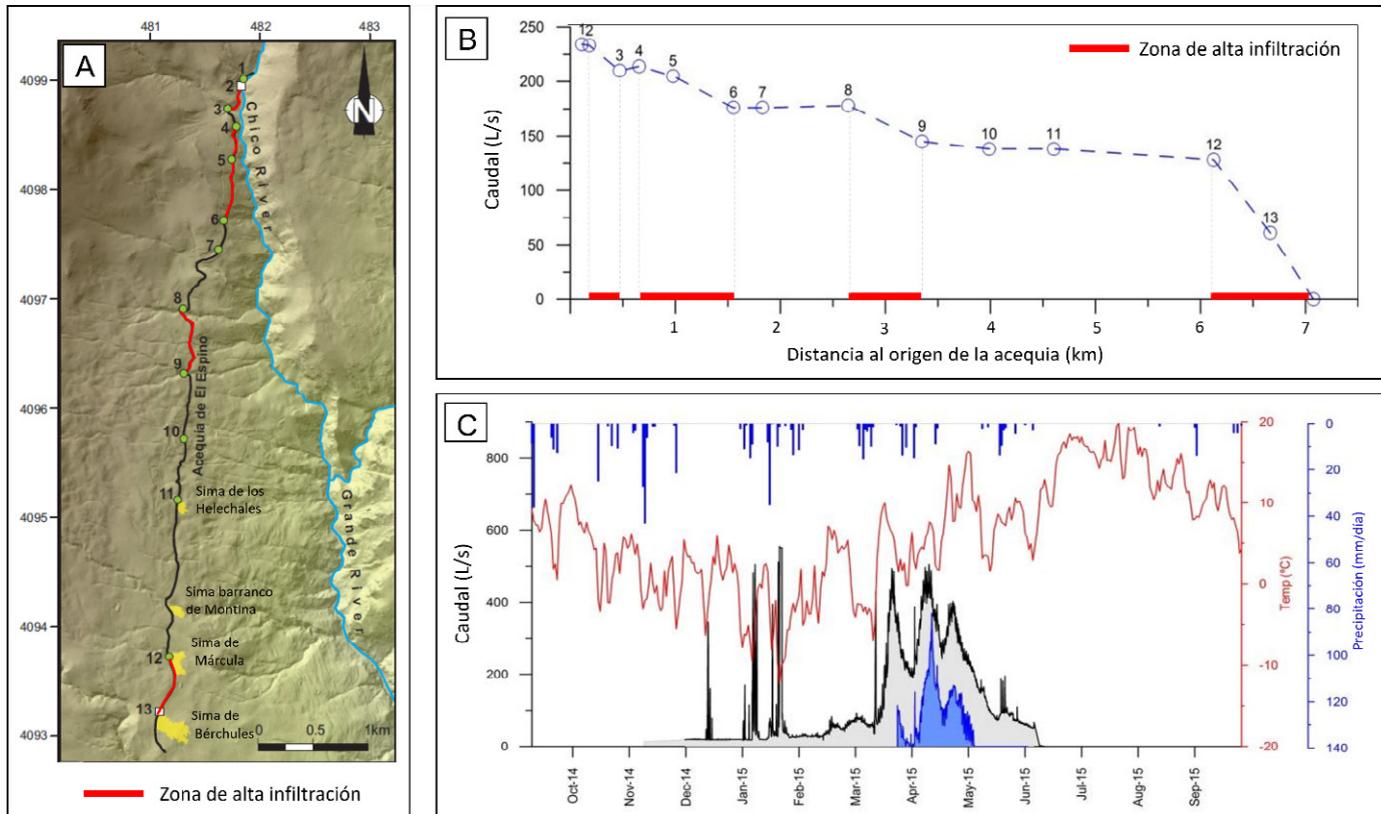
Evaluación de la recarga artificial mediante las acequias de careo.

Con objetivo de evaluar el agua recargada mediante el sistema de acequias en los materiales acuíferos que afloran en la cuenca del río Bérchules, durante el año hidrológico 2014-2015 se midió el caudal que fluye por las acequias de transvase de Trevélez y de Mecina, en las acequias de riego Real y Nueva y en la acequia de careo de El Espino (Figura 4A), donde, además, se ha caracterizado su capacidad de infiltración a lo largo de todo su recorrido.

Para medir tanto el caudal de agua infiltrado en la acequia de El Espino como el vertido desde la acequia e infiltrado en la sima de Bérchules se han instrumentado con una sonda capacitiva automática Odyssey® los puntos de control 2 y 13 (Figura 6A), los cuales se ubican justo pasada la toma de la acequia y antes de la sima terminal de Bérchules, respectivamente. Esta sonda mide la altura de la lámina de agua en una sección del cauce, permitiendo conocer con una frecuencia horaria el caudal de agua que fluye por ambos puntos. Para transformar esta altura de la lámina de agua en caudal, se midió, a lo largo de un año, y con una frecuencia aproximadamente mensual, el caudal circulante a través de la sección de la acequia mediante un micromolinete C2 10.150 OTT®, haciendo los cálculos mediante el método área-velocidad.

Figura 6.

(A) Esquema de la acequia del Espino. Los puntos numerados indican dónde se realizan medidas de caudal. Las manchas amarillas indican las simas, y los tramos en rojo indican las zonas más permeables de la acequia. (B) Caudales medidos en diferentes puntos seleccionados a lo largo de la acequia (mapa panel A) el día 28 de abril de 2015. Los tramos en los que se infiltra más agua están marcados en rojo y se corresponden con los tramos más permeables de la acequia marcados en el mapa del panel A. (C) Caudales medidos durante el año hidrológico 2014-2015 en la acequia, justo pasada la toma (punto 2) y justo antes de la sima terminal (punto 13).



Con objeto de medir la capacidad de infiltración de la acequia del Espino se realizaron aforos diferenciales a lo largo de trece puntos localizados a lo largo de la acequia (Figura 6A). La Figura 6B muestra el caudal medido en las secciones de control a lo largo de la acequia para el día 28 de abril del 2015. Se puede observar cómo los tramos más permeables de la acequia se corresponden con aquellos en los que la variación de caudal entre el punto inicial y final del tramo es mayor. En la Figura 6C se muestran los hidrogramas, de los puntos de control 2 y 13, correspondientes al año hidrológico 2014-2015.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Resultados del modelo HBV

La calibración del modelo HBV, correspondiente al periodo 1970-2014 (Jódar *et al.*, 2018) permite reproducir la respuesta hidrodinámica de la cuenca (Figura 7) y por ende la escorrentía promedio de la cuenca en la estación de aforo del río Bérchules (Figura 2A), lo cual es fundamental desde una perspectiva de la gestión de los recursos hídricos. Como resultado de la calibración se estima la descarga anual media de la cuenca en 13.25 hm³/año (periodo 1970-2014). El hidrograma promedio presenta un retraso temporal y un caudal de base elevado con respecto al comportamiento esperado en una cuenca hidrogeológica desarrollada en materiales de baja permeabilidad y con un régimen hidroclimático, a priori, pluvio-nival. Este comportamiento se explica considerando en la descarga total de la cuenca un porcentaje elevado de descarga subterránea. En este sentido, para este periodo 1970-2014 la recarga promedio del acuífero estimada por el modelo es de 12.59 hm³/año, lo que supone un 28 % de la precipitación media en la cuenca (667 mm/año), y un 95 % de la descarga total del sistema hidrológico (Jódar *et al.*, 2018). Valores de componente subterránea algo inferiores a los medidos aquí se han observado excepcionalmente en cuencas de alta montaña de los Andes, en donde el sustrato está formado, en su práctica totalidad, por materiales muy permeables de alteración glacial, con ratios de descarga subterránea respecto la descarga total del 72 % (Sommers *et al.*, 2019), del 77 % (Saber *et al.* 2019) y del 80 % (Baraer *et al.*, 2015). Así mismo, en el Himalaya, se alcanzan valores máximos del 77 % (Williams *et al.*,

2016). En la cuenca del río Bérchules, la mayoría de los afloramientos permeables se corresponden con materiales alterados, principalmente esquistos. Aquí, la alta componente subterránea del hidrograma está claramente influenciada, como se muestra más adelante, por la recarga artificial que se produce mediante las acequias de careo.

Con el modelo HBV calibrado para el periodo 1970-2014 se ha procedido a simular la respuesta hidrodinámica de la cuenca hasta septiembre de 2015, extendiendo para ello las series de datos hidroclimáticos de entrada al modelo HBV. La precipitación para el año hidrológico 2014/15 es de 509 mm, lo que supone una reducción del 24 % respecto a la precipitación anual promedio en la cuenca de Bérchules. De manera análoga, la descarga total de la cuenca para este periodo es de 5.3 hm³ que se corresponde con una reducción del 60 % de la descarga anual promedio. Esto subraya el estrés hidroclimático experimentado en la cuenca durante el año hidrológico 2014/15. No obstante, durante este periodo, el modelo HBV obtiene una recarga de 112 mm (7.62 hm³). que se corresponde con el 22 % de la precipitación registrada en la cuenca para este periodo. Aquí cabe indicar que la práctica totalidad del agua meteórica que se generó en la cabecera del río Bérchules durante el año hidrológico 2014/15 fue derivada hacia las acequias de careo infiltrándose en su totalidad.

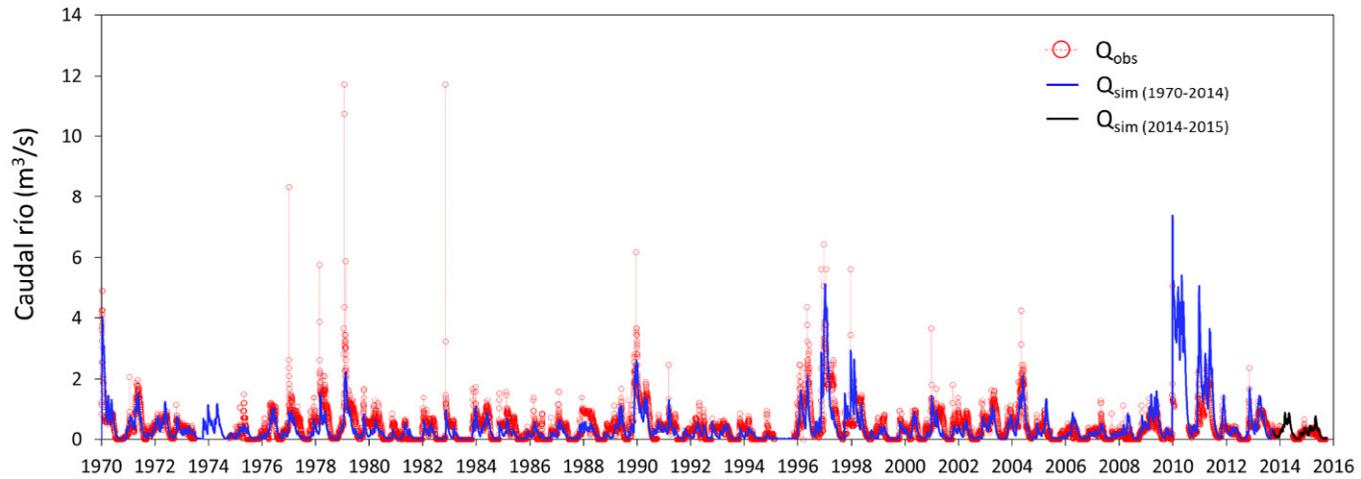
Recarga artificial mediante las acequias

Entre el 1 de abril y el 15 de mayo de 2015, el volumen total de agua derivado por la toma hacia la acequia de El Espino, y por ende infiltrada, ha sido de 1.99 hm³. El 82 % (1.64 hm³) de este volumen se ha infiltrado directamente a lo largo de la acequia, mientras que el 18 % (0.34 hm³) restante se ha infiltrado en la sima de Bérchules, que se encuentra en la zona terminal de la acequia de El Espino (Figura 6A).

De igual modo, durante el año hidrológico 2014-2015, el volumen total transferido desde la cuenca del Trevélez a la cuenca del Bérchules a través de la acequia de Trevélez ha sido de 0.06 hm³. El escaso volumen trasvasado se debió a la rotura de la acequia en varios tramos antes de llegar a la cuenca del río Bérchules. Con todo, este volumen se ha infiltrado

Figura 7.

Caudal observado y caudal modelado con HBV en la estación de aforo de Narila correspondiente al periodo 1970-2015.



en su totalidad en la cuenca del Bérchules. Por otro lado, el caudal derivado desde el río Bérchules a la acequia de trasvase de Mecina ha sido de 1.2 hm³. Teniendo en cuenta el reparto de agua de careo entre la cuenca del Bérchules y la del Mecina, se obtiene un volumen infiltrado en la cuenca del Bérchules de 0.57 hm³. Además, para el año hidrológico en cuestión, el volumen de agua derivado desde el río hacia las acequias de riego Real y Nueva ha sido en total de 1.44 hm³. Para estimar la recarga que producen las acequias de riego, al volumen inyectado en las acequias de riego hay que restarle el volumen de agua consumido por los cultivos. Teniendo en cuenta que la campaña de riego ocupa el periodo de julio a septiembre, y que la evapotranspiración promedio de los cultivos de huerta para este periodo ha sido calculada en 5 mm/día de media (Carpintero *et al.*, 2018), se obtiene que la evapotranspiración detrae un volumen total al agua de riego de 0.40 hm³, luego la recarga asociada a las acequias de riego se estima del orden de 1.04 hm³.

Teniendo en cuenta todos los volúmenes de agua careados en la cuenca del Bérchules por las acequias del Espino (1.99 hm³), Trevélez (0.06 hm³), Mecina (0.57 hm³), Real y Nueva (1.04 hm³) durante el año hidrológico 2014-2015, se obtiene un volumen total de recarga al acuífero de 3.66 hm³. Este volumen

equivale al 70 % del agua que circuló por el río en la estación de aforo (5.3 hm³) y al 48 % de la recarga total estimada para este periodo (7.62 hm³), luego la recarga natural (i.e., difusa) del acuífero equivale al 52 % de la recarga total. Hay que subrayar que, una parte importante del agua recargada con las acequias de careo ha contribuido a incrementar el almacenamiento de agua subterránea en los materiales acuíferos de la cuenca del río Bérchules, de tal modo que, con esta ancestral forma de manejo del agua se consigue que el agua “sembrada” constituya una parte importante de la “cosecha” del siguiente año hidrológico.

Las cifras presentadas en este artículo ponen de manifiesto que es posible utilizar sistemas que emplean Soluciones Basadas en la Naturaleza para mejorar la gestión de los recursos hídricos, y que estos podrían ser de interés en muchas cuencas mediterráneas de alta montaña, como las que se encuentran en el Pirineo, los Montes Atlas (Marruecos), el Monte Etna (Italia), Alpes Dináricos (Croacia), Montes Taurus (Turquía), Cordillera Líbano (Líbano), Sierra Nevada (EE.UU) o en Los Andes (América del Sur), donde un método similar de recarga mediante acequias, denominadas localmente amunas (Escolero *et al.*, 2017), se viene realizando de manera ancestral desde antes de la llegada de los españoles en el siglo XV (Ochoa-Tocachi *et al.*, 2019).

CONCLUSIONES

La cuenca del río Bérchules se ubica sobre rocas metamórficas, fundamentalmente esquistos del complejo Nevado-Filábride. Estos materiales son, a priori, poco permeables. Sin embargo, los procesos de alteración glacial y periglacial que se dan en las zonas más altas, más los procesos de meteorización que afectan al resto de la cuenca conforman un acuífero somero con un gran interés hidrogeológico, en el que la población local ha sabido retener los recursos excedentarios de invierno y primavera aprovechando la reducida velocidad de circulación del agua por subterránea por estos acuíferos en pendiente. Para retener el agua en los acuíferos en pendiente, el agua derivada de la cabecera de los ríos, mediante las acequias construidas en la época de Al-Ándalus, se infiltra en la parte alta de las laderas, y esta descarga lentamente a través de manantiales y el río, dado que estos acuíferos suelen descargar hacia los cauces de primer orden.

La respuesta del hidrograma medio anual de este río es la de un río conectado con un acuífero muy inercial y no la de un río de alta montaña, que debería mostrar un régimen de funcionamiento nival o en todo caso pluvio-nival. Este hecho pone de manifiesto la alta eficiencia del sistema de manejo del agua ancestral que se realiza en esta cuenca hidrológica. La derivación del agua de la cabecera de los ríos y su infiltración por las acequias más los retornos de riego terminan descargando lentamente en el río, eliminándose el pico nival en las cuencas de Sierra Nevada donde se practica esta forma de manejar el agua.

La investigación hidrogeológica llevada a cabo en esta cuenca hidrológica ha permitido demostrar que la recarga se produce mediante dos procesos diferentes: (1) una recarga natural y distribuida asociada a la infiltración en el terreno de las aguas meteóricas (agua de lluvia y fusión nival), y (2) una recarga artificial y concentrada producida a lo largo de las acequias por las que se hace fluir el agua con este fin. En el año hidrológico 2014-2015, la recarga natural distribuida y la recarga artificial supusieron el 52 % y el 48 %, respectivamente, de la recarga total del sistema hidrogeológico, la cual se estima en 7.62 hm³.

AGRADECIMIENTOS

Parte del presente trabajo se encuadra dentro de los resultados del Servicio de Investigación que el IGME realizó, entre 2014 y 2016, a la Agencia de Medio Ambiente y Agua de la Junta de Andalucía. Los autores agradecen al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) por el apoyo financiero de la red "Siembra y Cosecha del Agua en Áreas Naturales Protegidas (419RT0577). Este trabajo también constituye una contribución al Grupo de Investigación RNM-126 de la Junta de Andalucía y al proyecto de Excelencia de la Junta de Andalucía «Sistemas históricos de manejo de agua y servicios ambientales de regulación hídrica. Eficiencia y multifuncionalidad en el contexto de cambio global y cambio climático» Ref. P18-RT-3836 (Convocatoria 2018 de proyectos I+D+I PAIDI). Se agradece la especial ayuda prestada por la Comunidad de Regantes de Bérchules y la colaboración del Parque Nacional de Sierra Nevada, así como los datos meteorológicos e hidrológicos facilitados por AEMET y por la REDIAM.



Acequeros repartiendo el agua de la acequia de Mecina (Granada, Sur de España)

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Baraer, M., McKenzie, J., Mark, B. G., Gordon, R., Bury, J., Condom, T., and Fortner, S. K. 2015. Contribution of groundwater to the outflow from ungauged glacierized catchments: A multi-site study in the tropical cordillera Blanca, Peru. *Hydrological Processes*, 29(11), 2561–2581.
- Barberá, J.A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo, I., Pedrera, A., Martos-Rosillo, S. 2018. Groundwater dynamics in a hydrologically-modified alpine watershed from an ancient managed recharge system (Sierra Nevada National Park, Southern Spain): insights from hydrogeochemical and isotopic information. *Science of the Total Environment*, 640–641, 874–893.
- Bergström, S. 1976. *Development and Application of a Conceptual Runoff Model for Scandinavian Catchments*, SMHI Hydrology, Reports RHO, No.7, Norrköping, Sweden, 134 pp.
- Bergström, S. 1992. *The HBV Model – Its Structure and Applications*, SMHI Hydrology, Report RH, No. 4, Norrköping, Sweden, 35 pp.
- Bergström, S. 1995. The HBV model. In: Singh, V.P. (ed.), *Computer Models of Watershed Hydrology*. Water Resources Publications, Highlands Ranch, Colorado, USA, 443-476.
- Carpintero, E., González-Dugo, M.P., Jódar, J., and Martos-Rosillo, S. 2018. Use of canopy coefficients obtained from satellite data to estimate evapotranspiration over high mountain Mediterranean watersheds. *Proceedings of the International Association of Hydrological Sciences*, 380, 23-28.
- Delaigue, M.C. 1995. La red de acequias de la Alpujarra Alta. In: *El agua en la agricultura de Al-Ándalus*. Lunweg y Legado Andalusi, Barcelona, Spain, 143-150.
- Escolero, O., Gutiérrez, C., Mendoza, E. 2017. *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mexico, 978 pp.
- Gómez-Ortiz, A., Oliva, M. and Salvador, F. 2013. The environmental protection of landscapes in the high semiarid Mediterranean mountain of Sierra Nevada National Park (Spain): Historical evolution and future perspectives. *Applied Geography*, 42, 227-239.
- Gómez-Ortiz, A., Oliva, M., Palacios, D., Salvador-Franch, F., Vázquez-Selem, L., Salvá-Catarineu, M. and De Andrés, N. 2015. The deglaciation of Sierra Nevada (Spain). Synthesis of the knowledge and new contributions. *Cuadernos de Investigación Geográfica*, 41(2), 409-426.
- González-Ramón, A., Moral-Martos, F., Marín-Lechado, C., Martos-Rosillo, S., Pedrera, A. Ruiz-Constán, A. and Durán Valsero, J.J. 2015. Factores geomorfológicos condicionantes de la hidrogeología de la cuenca alta del río Bérchules (Sierra Nevada, Granada). In: Andreo-Navarro, B., López-Geta, J.A., Ramos-González, G., Durán-Valsero, J.J., Carasco-Cantos, F., Vadillo-Pérez, I., Jiménez-Gavilán, P. (eds), *El Agua en Andalucía. El agua, clave medioambiental y socioeconómica*. Instituto Geológico y Minero de España, 1, 283-294.
- Jiménez-Olivenza, Y., Porcel-Rodríguez, L., Caballero-Calvo, A., Bonet, F.J. 2015. Evolución de los usos del suelo en Sierra Nevada en los últimos 50 años y cambios del paisaje. In: Zamora, R., Pérez-Luque, A.J., Bonet, F.J., Barea, Azcón J.M., Aspizua, R. (eds.), *La huella del Cambio Global en Sierra Nevada: Retos para la conservación*. Consejería de Medio Ambiente y Ordenación del Territorio, Junta de Andalucía, 54-56.
- Jódar, J., Cabrera, J.A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L.J., Herrera, C., Custodio, E. 2017. Groundwater discharge in high-mountain watersheds: a valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of The Total Environment*, 593-594, 760-772.
- Jódar, J., Carpintero, E., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Cabrera-Arrabal, J.A., Navarrete-Mazariegos, E., González-Ramón, A., Lambán, L.J., Herrera, C., González-Dugo, M.P. 2018. Combination of lumped hydrological and remote-sensing models to evaluate water resources in a semi-arid high altitude ungauged watershed of Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of the Total Environment*, 625, 285-300.
- Martín-Civantos, J.M. 2007. *Poblamiento y territorio medieval en el Zenete (Granada)*. Universidad de Granada.
- Martín-Civantos, J.M. 2008. Arqueología medieval y recursos naturales: notas para la Arqueología del Paisaje. In: Martín-Civantos, J.M. (Ed.), *Arqueología Medieval y Medio Ambiente*. Alhulia, Granada, Spain, 17–40.
- Martín-Civantos, J.M. 2010. Las aguas del río Alhama de Guadix y el sistema de careos de Sierra Nevada (Granada) en época medieval. In: Jiménez-Puertas and Mattei, L. (Ed.), *El paisaje y su dimensión arqueológica. Estudios sobre el Sur de la Península Ibérica en la Edad Media*. Alhulia, Granada, Spain, 79–111.
- Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, C., Marín-Lechado, C., González-Ramón, A. Villagómez, B., Pelegrina, M., Fernández-Ruiz, L., Durán-Valsero, J.J., Navarrete-Mazariegos, E., López-Rodríguez, M., Pedrera, A., Ruiz-Constán, A. and Cabrera, J.A. 2015. Caracterización hidrogeológica y evaluación de la recarga de un acuífero de alta montaña desarrollado en rocas duras, cuenca del río Bérchules, Sierra Nevada, Granada. In: Andreo-Navarro, B., López-Geta, J.A., Ramos-González, G., Durán-Valsero, J.J., Carasco-Cantos, F., Vadillo-Pérez, I., Jiménez-Gavilán, P. (eds), *El Agua en Andalucía. El agua, clave medioambiental y socioeconómica*. Instituto Geológico y Minero de España, 1, 623-634.
- Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Marín-Lechado, C., Cabrera, J.A. Guardiola-Albert, C., Jódar, J., Navarrete, E., Ruiz-Constán, A. Moral, F., Pedrera, A. Navas, R., López, M. and Durán, J.J. 2017. Las acequias de careo de Sierra Nevada (Sur de España), un sistema de recarga ancestral en acuíferos de alta montaña. In: Escolero, O.,

Gutiérrez, C., Mendoza, E. (eds.), *Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque hacia Latinoamérica*. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua, Jiutepec, Mexico, 527-563.

Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Guardiola-Albert, C., Moral Martos, F., Jódar, J., Pedrera-Parias, A. 2019a. El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España). Un ejemplo ancestral de Gestión Integral del Agua. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4), 729-742.

Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno, F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Durán, J.J. 2019b. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: new insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 578, 124047.

Martos-Rosillo, S., Durán, A., Castro, M., Vélez, J. J., Herrera, G., Martín-Civantos, J. M., and Peña, F. 2020. Ancestral Techniques of Water Sowing and Harvesting in Ibero-America: Examples of Hydrogeoethical Systems. In: Abrunhosa, M., Chambel, A., Peppoloni, S., Chaminé, H.I. (eds.), *Advances in Geoethics and Groundwater Management: Theory and Practice for a Sustainable Development*. Advances in Science, Technology & Innovation (IEREK Interdisciplinary Series for Sustainable Development). Springer, Cham, 489-492.

Nash, J., Sutcliffe, J.V. 1970. River flow forecasting through conceptual models part I - a discussion of principles. *Journal of Hydrology*, 10 (3), 282-290.

Ochoa-Tocachi, B.F., Bardales, J.D., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, R., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., De Bièvre, B., Buytaert, W. 2019. Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. *Nature Sustainability*, 2, 584-593.

Saberi, L., McLaughlin, R. T., Crystal Ng, G. H., La Frenierre, J., Wickert, A. D., Baraer, M., and Mark, B. G. 2019. Multi-scale temporal variability in meltwater contributions in a tropical glacierized watershed. *Hydrology and Earth System Sciences*, 23(1), 405-425.

Seibert, J. 1999. Regionalisation of parameters for a conceptual rainfall-runoff model. *Agricultural and Forest Meteorology*, 98-99, 279-293.

Seibert, J. 2000. Multi-criteria calibration of a conceptual runoff model using a genetic algorithm. *Hydrology and Earth System Sciences*. 4 (2), 215-224.

Seibert, J., 2005. *HBV Light Version 2. User's Manual*. Uppsala University, Department of Earth Science, Hydrology, Uppsala, Sweden.

Somers, L. D., McKenzie, J. M., Mark, B. G., Lagos, P., Ng, G. C., Wickert, A. D. and Silva, Y. 2019. Groundwater buffers decreasing glacier melt in an Andean watershed—But not forever. *Geophysical Research Letters*, 46, 13016-13026. <https://doi.org/10.1029/2019GL084730>

Vivas, G., Gómez-Landesá, E., Mateos, L., Giráldez, J.V. 2009. Integrated Water Management in an ancestral water scheme in a mountainous area of southern Spain. *World Environmental Water Resources Congress 2009*, Kansas City, MO, USA, 1-9.

Williams, M. W., Wilson, A., Tshering, D., Thapa, P., and Kayastha, R. B. 2016. Using geochemical and isotopic chemistry to evaluate glacier melt contributions to the Chamkar Chhu (river), Bhutan. *Annals of Glaciology*, 57(71), 339-348. <https://doi.org/10.3189/2016AoG71A068>



Influencia de las acequias de careo en la composición hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas

El caso de la cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Sur de España)

“Acequias de careo” influence on groundwater hydrochemical and isotopic composition

The case of the Bérchules river basin (Sierra Nevada, south of Spain)



Parque Nacional de
Sierra Nevada

Ana M. Molina Rojas¹, Antonio González Ramón², Barberá, J.A.³, Manuel Peregrina del Río⁴, A. Beatriz Villagómez Antequera⁴, Miguel Ángel Díaz Puga⁴ y Sergio Martos Rosillo²

¹ Alumna del Máster en Ciencias y Técnicas de la Calidad del Agua Universidad de Granada, España. anamolinarojas@hotmail.com

² Instituto Geológico y Minero de España (IGME, CSIC). Urb. Alcázar del Genil, 4. Edf. Zulema bajo. 18006 Granada (España). antonio.gonzalez@igme.es; s.martos@igme.es

³ Centro de Hidrogeología (CEHIUMA), Facultad de Ciencias, Universidad de Málaga, Campus de Teatinos, s/n, 29071 Málaga, España. jabarbera@uma.es

⁴ Consejería de Agricultura, Ganadería, Pesca y Desarrollo Sostenible. manuel.pelegrina@juntadeandalucia.es, antoniab.villagomez@juntadeandalucia.es, miguel.diaz.puga@juntadeandalucia.es

Influencia de las acequias de careo en la composición hidroquímica e isotópica de las aguas subterráneas

El caso de la cuenca del río Bérchules (Sierra Nevada, Sur de España)

RESUMEN

En el sur de Sierra Nevada (España), el manejo del agua ancestral realizado por las acequias de careo es fundamental para el suministro de agua, tanto al abastecimiento de las poblaciones como al regadío. Se han estudiado las características de las aguas de una de estas cuencas en las que se realiza este manejo del agua, la cuenca del río Bérchules, a partir de datos procedentes de 45 muestras recogidas en manantiales entre julio y septiembre de 2019. Estos datos han permitido clasificar las aguas subterráneas según tres aspectos principales: sus facies hidroquímicas, la litología de las zonas de surgencias, y el hecho de encontrarse o no bajo la influencia de acequias de careo. Se observa una relación entre el tiempo de residencia del agua y su composición hidroquímica, si bien las aguas que han tenido contacto con materiales alpujárrides presentan mayor mineralización. Por otra parte, se aprecia una incipiente contaminación por nitratos en los manantiales que surgen en el entorno de áreas con cultivos intensivos. Los datos isotópicos muestran una uniformidad en la mayoría de los manantiales, con valores más ligeros que los que les corresponderían, debido a la influencia ejercida por la infiltración en las acequias de careo, cuyas aguas proceden del deshielo en las cotas más elevadas de la cuenca.

“Acequias de careo” influence on groundwater hydrochemical and isotopic composition

The case of the Bérchules river basin (Sierra Nevada, south of Spain)

ABSTRACT

In Sierra Nevada (Southern Spain), the ancestral surface water management achieved by irrigation canals, locally known as *acequias de careo*, play a major role for supplying the local population and irrigated crops. Data from 45 samples of springs, collected between July and September of 2019, has been used in this study to analyze the hydrochemical and isotopic characterization of groundwater in the high mountain basin of Bérchules. Results suggest that samples can be classified under three main aspects: hydrochemical facies, lithology of the water upwelling points and its relationships with the *acequias de careo*. A relationship is found between groundwater residence time and hydrochemical composition, though waters in contact with carbonate rocks of the Alpujarride Complex show the highest level of mineralization. It is also identified an emerging increase in the concentration of nitrates in the groundwater surrounding the crops in intensive agricultural areas. Isotopic analyses show uniformity in most of the spring samples, with lighter values than those corresponding to them due to the influence exerted by the infiltration in the *acequias de careo*, whose waters come from ice melting in the upper part of the basin.

INTRODUCCIÓN

Los ríos de Sierra Nevada presentan un acusado régimen pluvio-nival y son esenciales para el abastecimiento de agua a la población asentada en sus laderas y para la actividad agrícola que sustenta su economía (Jódar *et al.*, 2017). Esto es especialmente importante en la ladera sur, en la comarca de las Alpujarras, debido a una climatología menos favorable y menores precipitaciones que en la ladera norte. El manejo del agua en esta zona es esencial. Durante siglos se ha ido desarrollando un eficaz sistema de gestión que aún el uso de aguas superficiales y subterráneas mediante la infiltración del agua en los acuíferos superficiales por las denominadas “acequias de careo”. Se trata de canales artificiales, con longitudes kilométricas que transportan el agua de deshielo desde la cabecera de los ríos hacia zonas favorables, donde es infiltrada lentamente, aprovechando las capas de alteración de las rocas metamórficas que constituyen el substrato (Pulido-Bosch y Sbih, 1995). El agua infiltrada alimenta manantiales aguas abajo que aumentan el caudal de los ríos y el de las acequias de riego, permitiendo el suministro de agua potable a la población y el desarrollo de la actividad agrícola en época de estiaje.

El objetivo de este artículo es múltiple, en primer lugar se pretende caracterizar las aguas que discurren por la cuenca del río Bérchules desde los puntos de vista hidroquímico e isotópico, como modelo general de lo que ocurre en la ladera sur de Sierra Nevada. Por

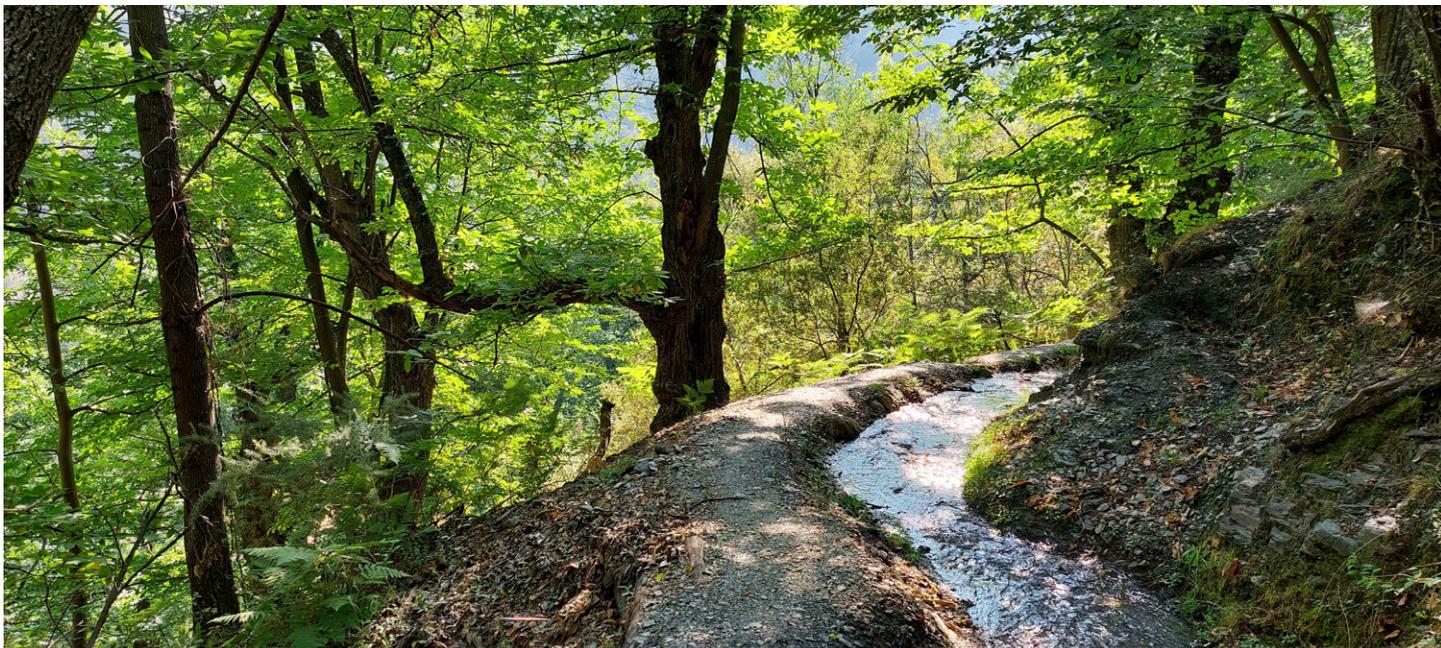
otra parte, se pretende estudiar el comportamiento hidrogeológico de los materiales que constituyen los acuíferos superficiales donde el agua es infiltrada y cuál es la influencia que ejercen las acequias de careo y las zonas de cultivos en la calidad del agua.

DESCRIPCIÓN DE LA ZONA DE ESTUDIO

La cuenca del río Bérchules se localiza en la vertiente sur de Sierra Nevada, y está ocupada en su totalidad por el término municipal de Bérchules (Granada). Tiene una morfología alargada de dirección norte-sur con una superficie de 67,6 km². Su altitud media es de 1970 m s.n.m, con cotas comprendidas entre 1000 m s.n.m en la parte meridional y 2900 m s.n.m en su cabecera.

El río Bérchules tiene un régimen pluvio-nival, con caudales máximos entre enero y mayo y mínimos entre julio y septiembre. Su caudal medio es aproximadamente de 13,1 hm³/año, de modo que la contribución de las aguas subterráneas supone hasta el 90% del total del caudal (Jódar *et al.*, 2017).

Desde el punto de vista geológico, se localiza en la Zona Interna del orógeno Bético-Rifeño, en el complejo Nevado-Filábride. Está formada por una



secuencia metasedimentaria con un basamento paleozoico recubierto por una cobertera, de edad Mesozoica y más reciente, con intercalaciones de rocas ígneas y sedimentarias metamorizadas de edad Jurásica. Todos estos materiales están afectados por un metamorfismo que llega a ser de alta presión y temperatura intermedia desde el Eoceno al Mioceno (Puga *et al.*, 2017).

El complejo Nevado-Filábride tiene unos 1000 m de espesor y está formado en su mayor parte por esquistos grafitosos feldespáticos con intercalaciones de cuarcitas. La principal estructura de deformación consiste en una foliación muy penetrativa con un buzamiento general hacia el N-NE, que condiciona la suave inclinación de las laderas occidentales de los valles, paralelas a la esquistosidad (González-Ramón *et al.*, 2015).

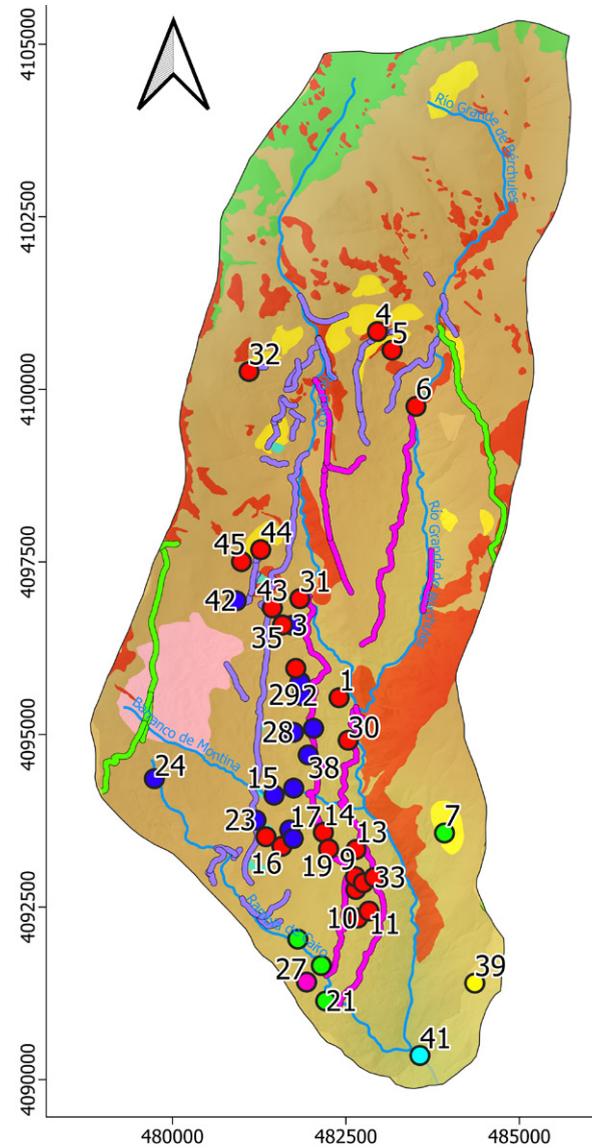
La cuenca del Bérchules se encuentra casi por completo sobre micaesquistos del Nevado-Filábride, aunque al sur, en la parte baja, afloran materiales cuaternarios superpuestos a filitas, cuarcitas y rocas carboníticas del complejo Alpujárride.

El horizonte más superficial de los esquistos y los depósitos de formaciones recientes que se acumulan sobre la zona de alteración dan lugar al acuífero superficial de Bérchules (Martos-Rosillo *et al.*, 2015). En la mayor parte de la cuenca (51,3 km²), los micaesquistos están recubiertos por una zona de alteración con una permeabilidad media, en la que se favorece la formación de suelo. En su cabecera, existen otras zonas de mayor permeabilidad constituidas por afloramientos de derrubios periglaciares (3,4 km²) y de depósitos asociados a deslizamientos de ladera (2 km²), localmente denominados "poyos" (Fig. 1). Una vez infiltrada en estos terrenos, el agua pasa a almacenarse en la zona de esquistos alterada (Martos-Rosillo *et al.*, 2017) o surge por pequeños manantiales que favorecen la formación de "borreguiles", zonas utilizadas para pastos del ganado ovino.

Las acequias de careo presentes en la zona se encargan de dirigir el agua desde la cabecera de los ríos hasta áreas más permeables con el fin de recargar los acuíferos (Pulido-Bosch y Sbih, 1995), y favorecer su salida en puntos de interés. Entre los meses de marzo y julio, cuando tiene lugar el deshielo de las nieves en cotas altas, el agua es transportada por estas

Figura 1.

Mapa de formaciones superficiales de la cuenca del río Bérchules. Modificado de Martos-Rosillo *et al.*, 2019.

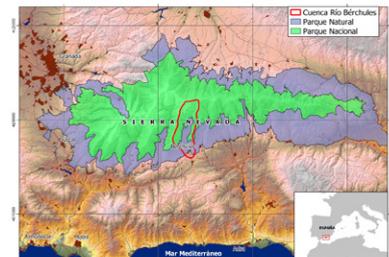


LEYENDA

- Red de drenaje
- Puntos de muestreo**
- Grupo 1A
- Grupo 1B
- Grupo 2A
- Grupo 2B
- Grupo 3A
- Grupo 3B

- Red de acequias**
- Acequia de riego
- Acequia de careo
- Acequia de trasvase

- Formaciones**
- Afloramientos rocosos
- Cono de deyección
- Depósitos asociados a careos



- Derrubios periglaciares
- Deslizamientos Poyos
- Lóbulos de soliflucción
- Zona de alteración de esquistos y suelo

acequias (Fig. 2a y 2b) hasta descargar de manera intencionada en lugares de infiltración preferencial o simas (Espín et al., 2010). El agua comienza a circular en profundidad y se produce la recarga artificial de los acuíferos de la zona, permitiendo el afloramiento de aguas a menor altitud para ser utilizadas en el abastecimiento humano o uso agrícola, evitando así la sequía estival. De esta forma se logran varios objetivos: i) alimentar a la vegetación instaurada en las laderas, para favorecer el crecimiento de los pastos, ii) retardar el tránsito del agua a su paso por el medio subterráneo para mantener durante el estiaje el caudal de los manantiales situados en cotas más bajas, iii) aprovechar la capacidad de transporte de los acuíferos para alcanzar zonas de riego (Fig. 2c, 2d y 2e) e iv) incrementar la baja concentración en sales del agua subterránea para mejorar su calidad como agua de abastecimiento a la población (Pulido-Bosch y Sbih, 1995; Martos-Rosillo et al., 2015).

El río Bérchules tiene un régimen pluvio-nival, con caudales máximos entre enero y mayo y mínimos entre julio y septiembre.

METODOLOGÍA

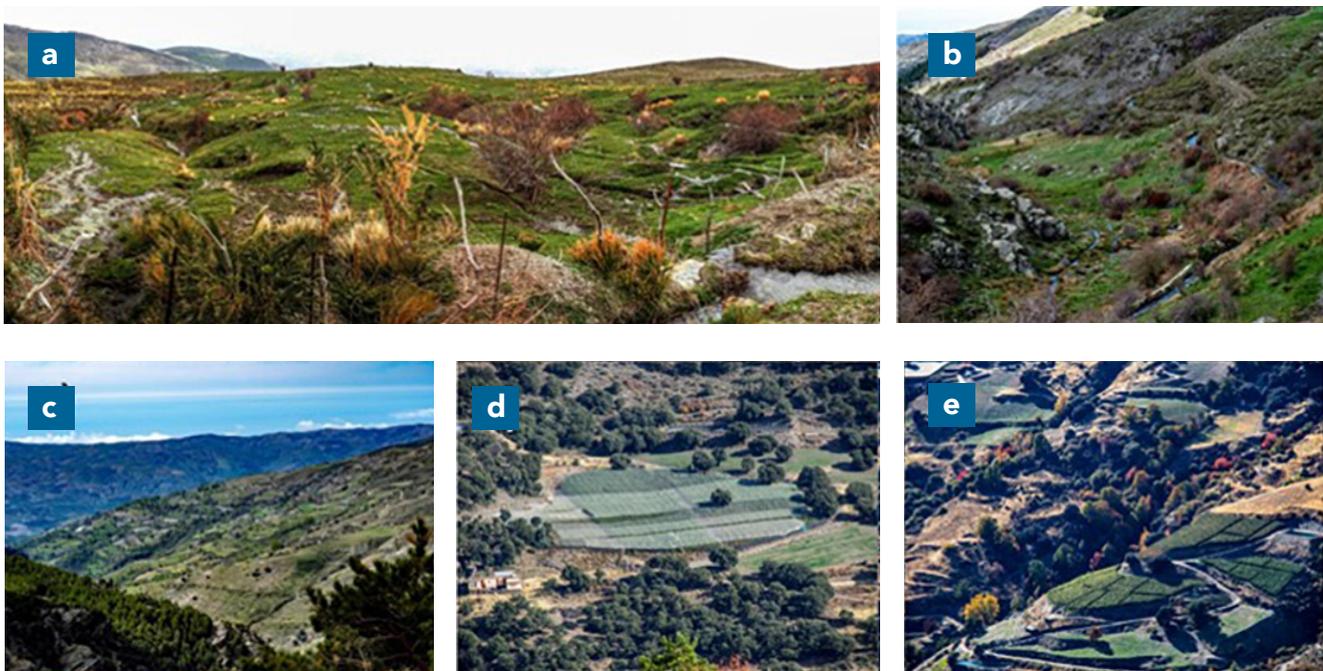
La campaña de recogida de muestras se realizó entre los meses de julio y septiembre de 2019. Se recogieron 45 muestras de agua en la cuenca del Bérchules, en puntos de descarga de las aguas subterráneas. El agua se recogió en botes de borosilicato oscuro (125 ml) con tapones de rosca, llenándose completamente para evitar atrapar burbujas de aire en el interior. Se tomaron dos muestras por punto, una para análisis físico-químico y otra para isótopos estables.

Los análisis han sido realizados en el laboratorio del Centro de Estudios Hidrogeológicos de la Universidad de Málaga en el marco de la Unidad Asociada entre dicha universidad y el IGME. Las concentraciones de los componentes químicos mayoritarios (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- y SO_4^{2-}) disueltos en las aguas, se determinaron por cromatografía iónica de alta presión (HPIC; METROHM® Compact 881 IC Pro), con una precisión de $\pm 2\%$.

Los isótopos ambientales $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las aguas se midieron usando un analizador láser de isótopos: PICARRO™ CRDS L2120-i para isótopos O y H. Los

Figura 2.

a) Aguas careadas para su infiltración en la sima de Bérchules. b) Río Chico de Bérchules y toma de la Acequia del Espino, principal acequia de careo. c) Ladera derecha de la Cuenca del río Bérchules y superficies cultivadas. d) Plantación de tomates Cherry. e) Plantaciones de habichuelas.



datos de isótopos para $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ se refieren al estándar V-SMOW (Vienna-Standard Mean Ocean Water), de la Agencia Internacional de la Energía Atómica (AIEA). La precisión de las medias de isótopos fue de $\pm 0.1\text{‰}$ para $\delta^{18}\text{O}$ y $\pm 1\text{‰}$ para $\delta^2\text{H}$.

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

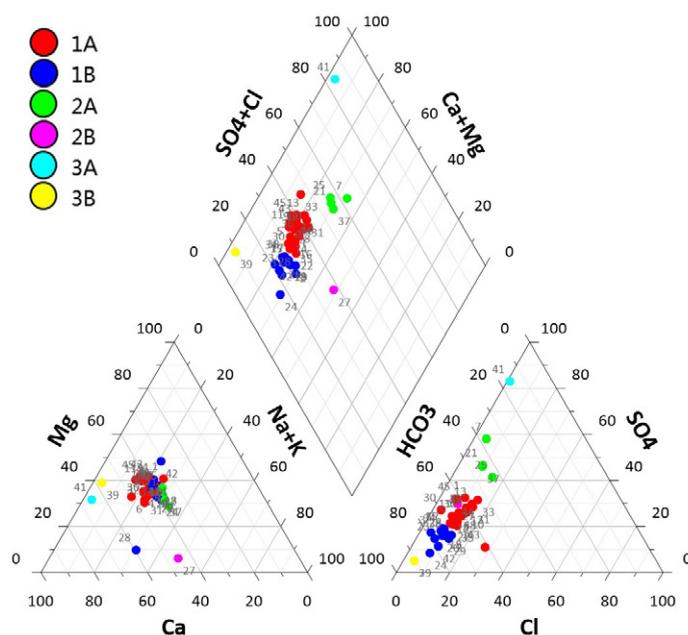
Caracterización hidroquímica

Las aguas de la cuenca del río Bérchules presentan una mineralización débil, con valores de conductividad eléctrica (CE) inferiores a $250\ \mu\text{S}/\text{cm}$, a excepción de las muestras nº 41 de Fuente Narila ($354\ \mu\text{S}/\text{cm}$) y nº 39 de Minilla ($1990\ \mu\text{S}/\text{cm}$), que se encuentran en cotas bajas de la cuenca.

En la figura 3 se representa la distribución de facies hidroquímicas de las aguas analizadas en un diagrama de Piper. De las 43 muestras, 38 tienen hidrofacies bicarbonatada cálcico-magnésica y las 5 restantes sulfatada o clorurada cálcico-magnésica. Se observa una evolución, especialmente bien marcada en el contenido de aniones, que ha servido de base para su diferenciación en grupos.

Figura 3.

Diagrama de Piper de las 43 muestras de agua estudiadas.



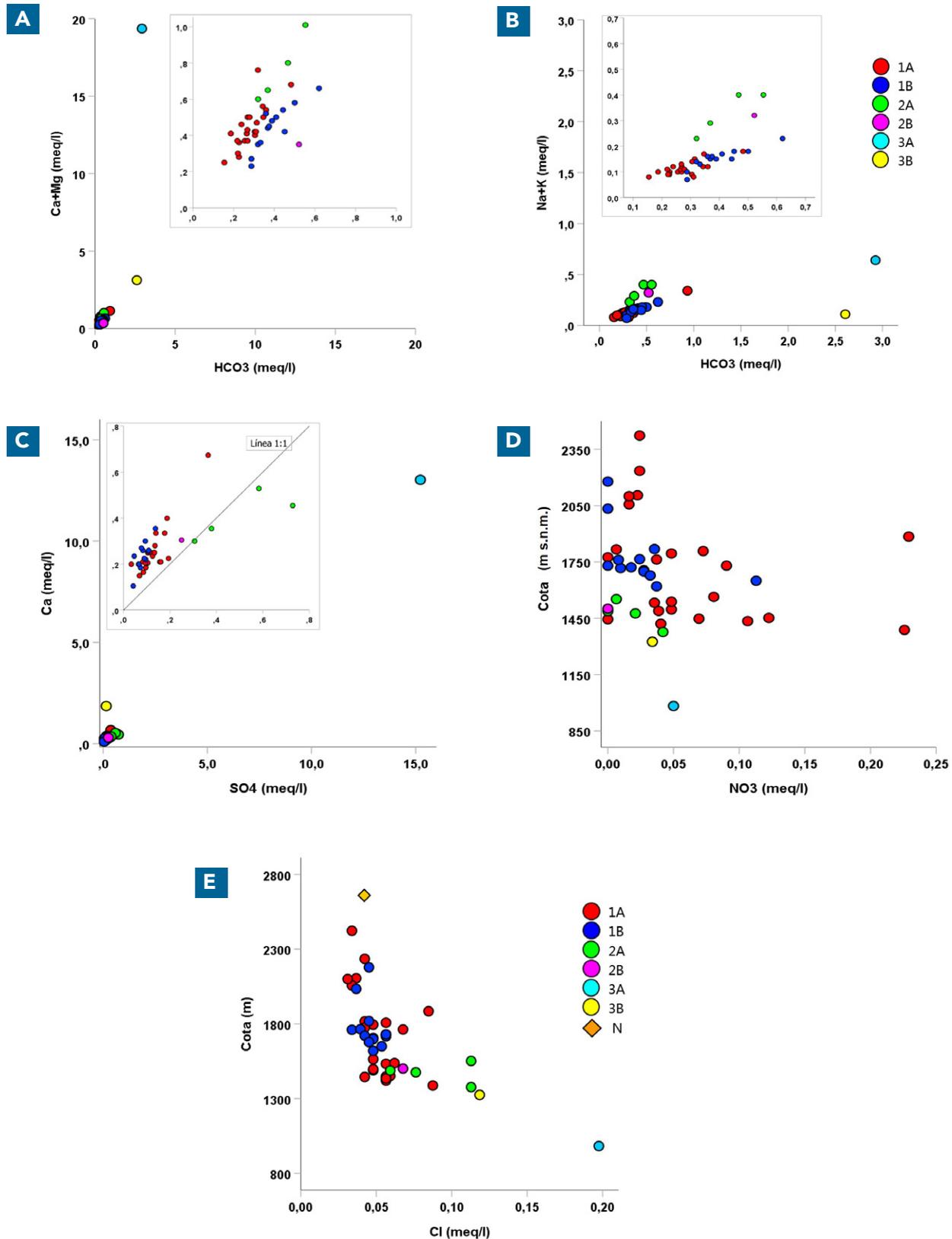
A partir de análisis bivariantes se han estudiado las variables de mayor interés y que mejor correlación entre si presentan. Se observan correlaciones positivas entre el HCO_3^- y los cationes Na^+ , Ca^{2+} y Mg^{2+} (Fig. 4A y 4B). La evolución de estos iones parece relacionarse con un mayor tiempo de contacto del agua con el suelo y la roca, lo que provoca un incremento general de la mineralización. El Mg^{2+} procedería de la disolución de filosilicatos (biotita y clorita), mientras que el Na^+ y Ca^{2+} estarían relacionados con la disolución de plagioclasas sódicas y cálcicas. Se encuentran valores bajos de HCO_3^- en todas las muestras ($9\text{-}57\ \text{mg}/\text{l}$), a excepción de las nº 39 y 41 (grupo 3). En estas últimas se observa un aporte extra de HCO_3^- , procedente de la disolución de las rocas carbonáticas del complejo Alpujárride. Se puede interpretar que, en general, el HCO_3^- procede de la oxidación de materia orgánica, lo que justifica las bajas concentraciones observadas en la mayoría de las muestras.

También se ha analizado la relación entre el SO_4^{2-} y el Ca^{2+} (Fig. 4C). Existe cierta linealidad entre ambos iones, aunque se observa un exceso de Ca^{2+} con respecto al SO_4^{2-} . El contenido en SO_4^{2-} provendría en su mayoría por el aporte de agua de lluvia y su posterior concentración en el suelo debida a la evaporación. La interacción con sulfuros metálicos que rellenan fracturas puede ser otra de las fuentes. Además, también podría haber aportes por su uso en agricultura intensiva. El subgrupo 4B, tiene un contenido en SO_4^{2-} similar a la mayoría de muestras, aunque presenta una concentración de Ca^{2+} seis veces mayor, procedente de la disolución de carbonatos alpujárrides. Por el contrario, el subgrupo 3A presenta niveles de SO_4^{2-} y Ca^{2+} extremos, comparados con el resto de las muestras debido a su relación con yesos presentes en los tramos de filitas alpujárrides.

La creciente concentración de NO_3^- al disminuir la altitud (Fig. 4D) puede tener su origen en la descomposición de materia orgánica en las zonas bajas, donde existe un mayor desarrollo del suelo. Sin embargo, se alcanzan mayores concentraciones de las producidas naturalmente, por lo que ese exceso de nitrato debe proceder del aporte por fertilizantes usados en las actividades agrícolas. Las muestras con las concentraciones más altas se sitúan en la zona meridional de la cuenca, justo donde se localizan las áreas de cultivos de regadío y secano cercanas a los núcleos urbanos de Bérchules y Alcútar.

Figura 4.

Representación de relaciones iónicas estudiadas. A) $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ vs. HCO_3^- . B) $\text{Na}^+ + \text{K}^+$ vs. HCO_3^- . C) Ca^{2+} vs. SO_4^{2-} . D) cota vs. NO_3^- . E) cota vs. Cl^- .



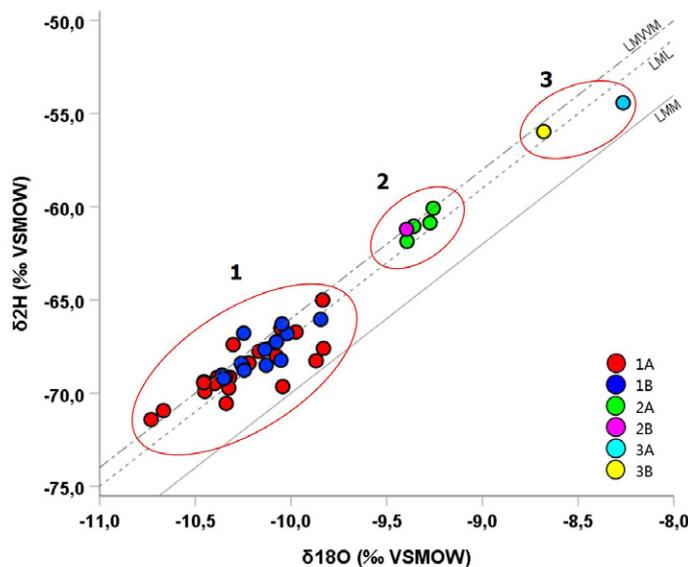
En el caso del cloruro, se observan unas concentraciones muy bajas en cotas altas, resultantes del aporte procedente únicamente del agua de lluvia, ya que coinciden con el intervalo de valores de deposición atmosférica de cloro (1,5 – 2 mg/l) descritos en la cuenca del río Bérchules por Barberá et al. (2018) representado por el punto N (Figura 4). Su evolución creciente se puede justificar por la posterior concentración por evaporación del agua en el suelo al circular aguas abajo en la cuenca.

Caracterización isotópica

Los isótopos ambientales tienen valores para el $\delta^{18}\text{O}$ comprendidos entre -10,73 y -8,26 (‰ VSMOW); y entre -71,42 y -54,41 (‰ VSMOW) para el $\delta^2\text{H}$. Estos valores se han representado junto a la línea meteórica mundial (LMM), la línea meteórica del Mediterráneo Occidental (LMWM) y la línea meteórica local (LML) (Barberá et al., 2018) (Fig. 5).

Figura 5.

Relación entre el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ de las muestras de agua de la cuenca del río Bérchules (‰ VSMOW). Línea meteórica mundial (LMM): $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 10\text{‰}$ (Craig, 1961). Línea meteórica local (LML): $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 12,4\text{‰}$. Línea meteórica del Mediterráneo Occidental (LMWM): $\delta^2\text{H} = 8 \cdot \delta^{18}\text{O} + 14\text{‰}$ (Celle et al., 2001).



Se han diferenciado 3 grupos de aguas según sus valores isotópicos, de forma similar a los diferenciados a partir del diagrama de Piper (Fig. 3). El grupo 1 incluye el 84% de las muestras y se caracteriza por tener el contenido isotópico más ligero, con valores inferiores a -9,8‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -65‰ de $\delta^2\text{H}$. Corresponden a las aguas muestreadas a las cotas más altas y a los manantiales de cotas inferiores localizados por debajo de las acequias de careo y de los puntos de recarga de estas acequias (simas) en la margen derecha del río Bérchules. El grupo 2, está formado por aguas más pesadas, con valores isotópicos que varían entre -9,40‰ y -9,26‰ para el $\delta^{18}\text{O}$, y entre -61,85‰ y -60,07‰ para el $\delta^2\text{H}$. Se incluyen en este grupo aguas de manantiales con una cota media de 1480 m s.n.m. que no se ven influenciados por las acequias de careo.

El grupo 3 lo componen aguas con el contenido isotópico más pesado, superiores a -8,68‰ de $\delta^{18}\text{O}$ y -55,96‰ de $\delta^2\text{H}$. Se trata de manantiales situados a cotas bajas, inferiores a 1350 m s.n.m., no influenciados por acequias, y que se localizan en materiales alpujárrides en la zona próxima a la salida de la cuenca. Representarían aguas cuya composición isotópica no ha sido alterada por la influencia de las aguas infiltradas en las acequias de careo.

En condiciones naturales, existe una fuerte relación entre el $\delta^{18}\text{O}$ y la cota (Fig. 6), de modo que la composición isotópica disminuye con la altitud. Esto se atribuye a la progresiva condensación del vapor atmosférico, que se produce cuando las masas de aire ascienden por las laderas y se enfrían como consecuencia de la expansión adiabática. Los isótopos pesados del vapor de agua se condensan y precipitan antes, en cotas bajas. El vapor residual que sigue ascendiendo, apenas contiene isótopos pesados y son abundantes los más ligeros, que son los que precipitan con las lluvias a mayores altitudes.

Se puede determinar el origen de las aguas según su contenido isotópico mediante la observación de la diferenciación de las muestras por grupos. El grupo 1 reúne muestras, que a pesar de estar recogidas a distintas cotas, tienen un contenido isotópico similar y más ligero que el resto, lo que indica que son aguas precipitadas en cotas más elevadas, en buena parte

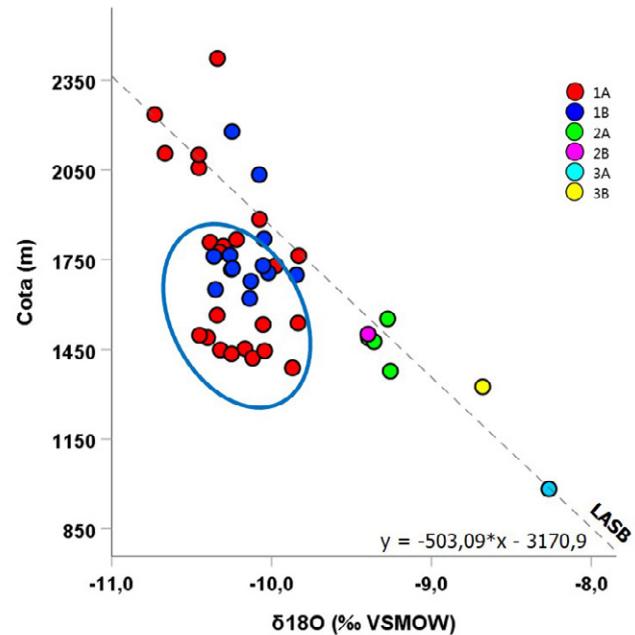
transportadas e infiltradas en cotas más bajas por las acequias de careo. Este proceso de recarga artificial tiende a homogenizar el contenido isotópico.

Los grupos 2 y 3 muestran los valores isotópicos más pesados, ya que quedan fuera de la zona de influencia de los careos y se relacionan con aguas precipitadas a menor altitud. Las aguas no influenciadas por las acequias (Fig. 6) son las únicas que se alinean con la Línea Isotópica de las Aguas Subterráneas para la cuenca del Bérchules (LASB), definida por Barberá et al. (2018) que indica un gradiente isotópico altitudinal de $-0,17\text{‰}/100\text{ m}$ para las aguas subterráneas de la cuenca del Bérchules.

Las acequias de careo presentes en la zona se encargan de dirigir el agua desde la cabecera de los ríos hasta áreas más permeables con el fin de recargar los acuíferos (Pulido-Bosch y Sbih, 1995), y favorecer su salida en puntos de interés.

Figura 6.

Relación entre la cota (s.n.m.) y el contenido de $\delta^{18}\text{O}$ (‰ VSMOW). La envolvente ovalada indica las muestras de agua influenciadas por la recarga artificial provocada por las acequias de careo



Análisis de componentes principales

Se utilizan para el análisis de componentes principales (ACP) las diferentes variables hidroquímicas medidas (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} , Cl^- , NO_3^- , SO_4^{2-} , CE, $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$) en las 43 muestras existentes (Tabla 1). La aplicación del ACP, determina la existencia de 3 componentes principales que explican el 92,64% de la varianza total (Figura 7).

El primer factor extraído explica gran parte de la varianza, el 70,54%, y muestra una alta influencia de las variables SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} , CE y una influencia moderada del HCO_3^- , ordenados de manera descendente y en sentido positivo. El componente 1 se podría explicar cómo el factor que representa los procesos de interacción roca-agua, producida por la disolución de los minerales de la capa de alteración de los esquistos al ir desplazándose hacia cotas más bajas de la cuenca.

Figura 7.

Representación de las cargas de los componentes principales de las variables.

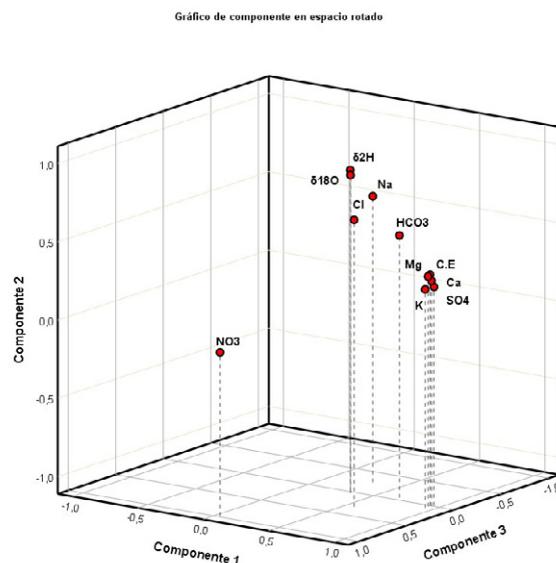


Tabla 1.

A) Tabla de la varianza explicada para cada componente y selección de componentes principales con autovalores mayores que 1. B) Cargas de los componentes principales extraídos. Método de extracción: análisis de componentes principales. Método de rotación: Varimax con normalización Kaiser.

Comp.	Varianza total explicada					
	Autovalores iniciales			Sumas de cargas al cuadrado de la extracción		
	Total	% de varianza	% acumulado	Total	% de varianza	% acumulado
1	7,760	70,541	70,541	7,760	70,54	70,541
2	1,379	12,537	83,078	1,379	12,53	83,078
3	1,052	9,564	92,642	1,052	9,56	92,642
4	0,503	4,569	97,210			
5	0,197	1,789	98,999			
6	0,062	0,564	99,564			
7	0,027	0,250	99,813			
8	0,019	0,172	99,985			
9	0,002	0,014	99,999			
10	9,2E-5	0,001	100,000			
11	-3,5E-16	-3,1E-15	100,000			

	Componente		
	Componente		
	1	2	3
SO_4	0,949	0,287	-0,013
Ca	0,943	0,329	0,006
K	0,936	0,284	0,062
Mg	0,931	0,359	0,024
CE	0,930	0,366	0,002
HCO_3	0,658	0,566	-0,050
$\delta^{18}\text{O}$	0,292	0,933	-0,036
$\delta^2\text{H}$	0,342	0,922	0,030
Na	0,567	0,723	0,302
Cl	0,291	0,717	-0,274
NO_3	0,034	-0,065	0,979

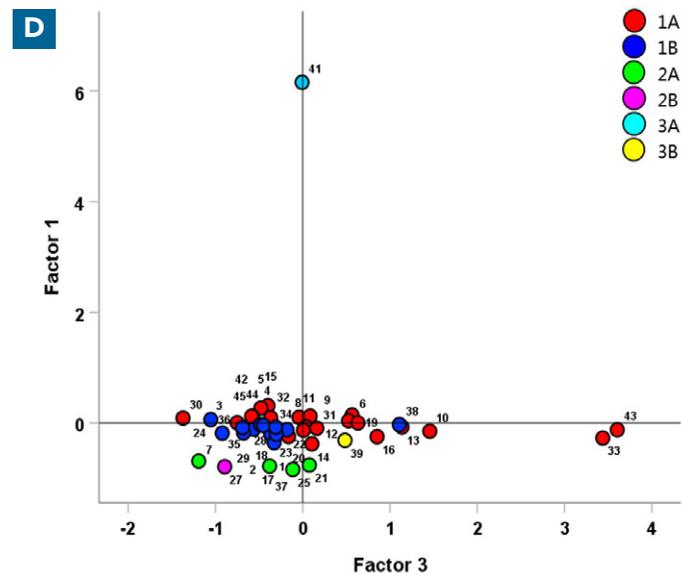
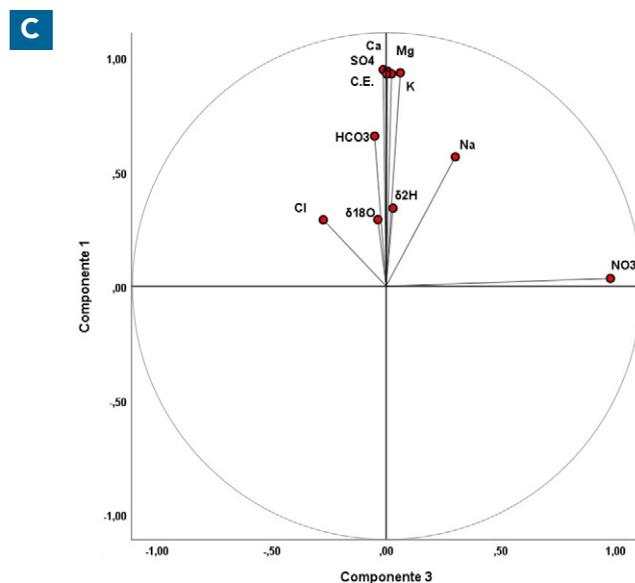
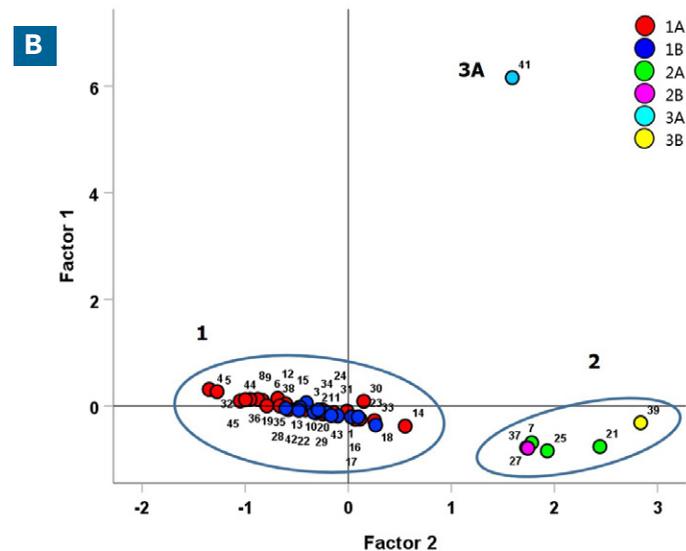
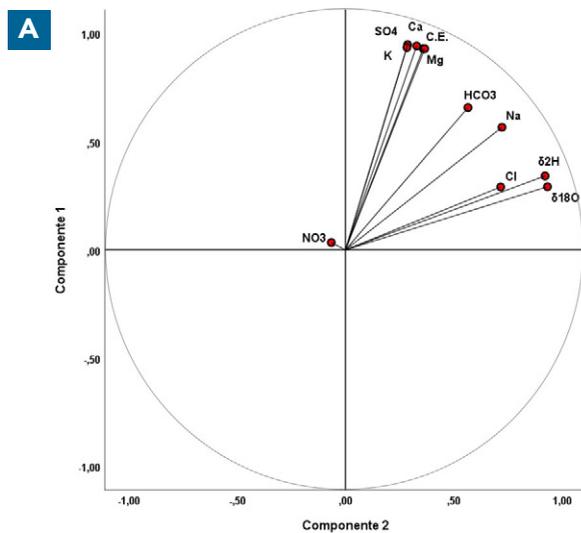
El segundo componente principal explica el 12,54% de la varianza y está influenciado por $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$, Na^+ y Cl^- en sentido positivo. El componente 2 se podría relacionar con el efecto de la altitud. Se produciría una disminución del contenido isotópico de $\delta^{18}\text{O}$ y $\delta^2\text{H}$ hacia cotas más altas por influencia de la disminución de la temperatura, favoreciendo la condensación. Esta influencia de la altitud también alargaría el tiempo de tránsito del agua hacia cotas inferiores, aumentando así las concentraciones iónicas de Na^+ y Cl^- .

El tercer componente explica el 9,56% de la varianza total, y tiene una fuerte influencia del NO_3^- , que podría asociarse a la contaminación antropogénica proveniente principalmente de fertilizantes agrícolas de los cultivos cercanos.

La representación de los componentes principales 1 y 2 (Fig. 8A), muestra como las variables SO_4^{2-} , Ca^{2+} , K^+ , Mg^{2+} y CE se agrupan en torno al componente 1, mientras que las variables $\delta^{18}\text{O}$, $\delta^2\text{H}$ y Cl^- , y en

Figura 8.

Representación de las cargas de los factores de los componentes 1-2 (A), y 1-3 (C). Representación de las puntuaciones de las muestras para los factores 1-2 (B), y 2-3 (D).

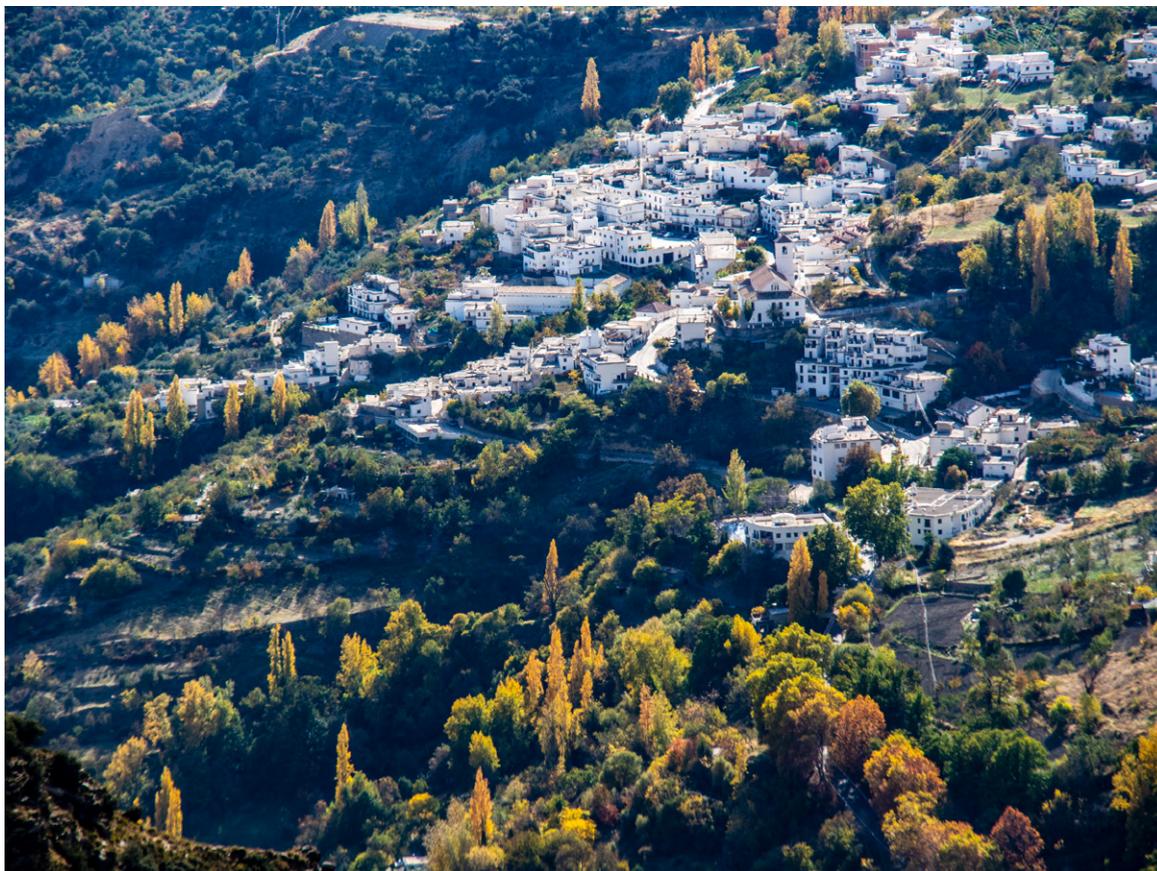


menor medida el Na^+ y HCO_3^- , se agrupan en torno al componente 2. El NO_3^- queda alejado de los componentes 1 y 2 al no tener relación con las variables que los definen. La representación en el plano de las puntuaciones de los factores 1 y 2, que explica el 83,09% de la varianza, permite clasificar las aguas en 3 tipos similares a los obtenidos anteriormente, aunque con una diferente agrupación en la muestra que define el subgrupo 3B (Fig. 8B).

El grupo 1 es el más numeroso e incluye las aguas de los manantiales de cotas altas de la cuenca y de los que están bajo la influencia de las acequias de careo. La segunda agrupación la forman las muestras pertenecientes al grupo 2 y al subgrupo 3B, que corresponden a muestras de cotas medias que no están relacionados con las acequias. Por último, la tercera agrupación la compone el subgrupo 3A que está compuesto por la muestra de Minillas (nº41), la de menor altitud de la cuenca. A excepción del subgrupo 3A, todas las muestras se distribuyen a lo largo del eje del factor 2, lo que indica la importancia

de la evolución de la mineralización de las aguas desde las cotas más elevadas hacia las más bajas. El grupo 1 es muy compacto, debido a la gran influencia de las acequias de careo, que tienden a uniformizar la composición iónica de las muestras. La agrupación 2 es más heterogénea, pues, al contrario que en el grupo 1, sus aguas tienen orígenes diferentes y un contenido iónico mayor debido al mayor tiempo de contacto con la roca. El subgrupo 3A se relaciona con ambos factores en mayor medida que el resto de las muestras, aunque lo hace sobre todo con el factor 1. Es la muestra con mayor contenido iónico de todas las analizadas, principalmente por relacionarse con materiales alpujárrides y situarse a la salida de la cuenca.

En el gráfico de los componentes principales de los factores 1 y 3 (Fig. 8C) se observa que todas las variables se agrupan alrededor del factor 1, a excepción del NO_3^- , que tiene una fuerte relación con el componente 3.



Estampa otoñal de uno de los pueblos de la Alpujarra granadina, que sustentan su abastecimiento y su economía en las técnicas milenarias de recarga artificial provocada por las acequias de careo.

Los factores 1 y 3 (Fig. 8D) explican el 80,1% de la varianza total. El factor 3 solo proyecta información sobre el contenido en nitrato, por lo que muestra el proceso de contaminación agrícola en la zona de estudio. Las muestras 33 y 43 se encuentran alejadas del resto, indicando un alto contenido en nitrato. Las muestras con mayor presencia de nitrato son aquellas que se encuentran en áreas agrícolas, próximas a los núcleos urbanos o cerca de las zonas con cultivos intensivos de tomate cherry y habichuelas, los más frecuentes en la cuenca del Bérchules (Fig. 9).

La muestra del grupo 3A se encuentra muy influenciada por el factor 1, ya que es la que mayor contenido en sales presenta, aunque no se relaciona con el factor 3 debido a su bajo contenido en nitrato. La mineralización de esta muestra está fuertemente condicionada por su elevado contenido en sulfato, posiblemente procedente del contenido en yesos diseminados en las filitas y en los carbonatos alpujárrides.

CONCLUSIONES

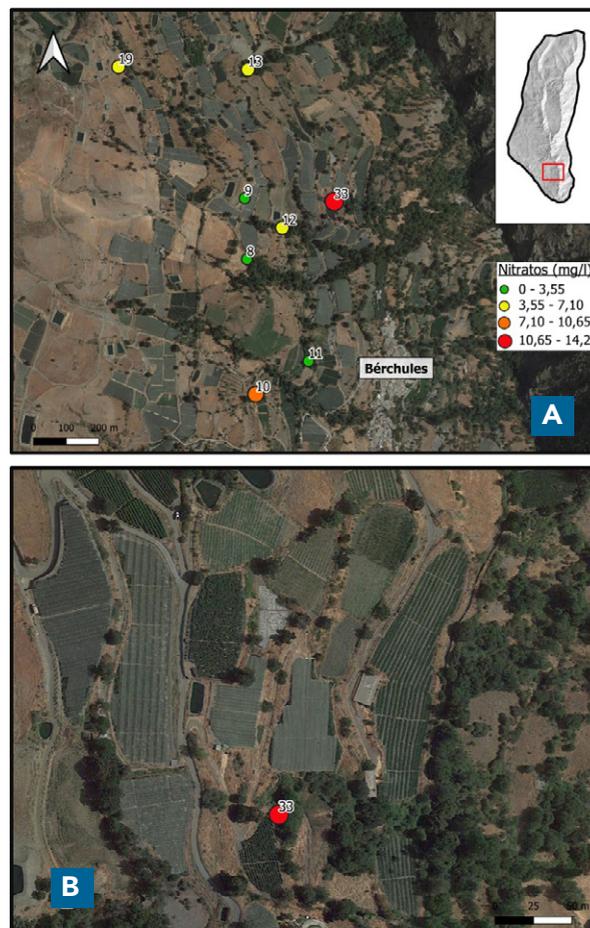
Los resultados hidroquímicos e isotópicos han permitido clasificar las aguas en tres grupos principales.

Se han identificado los principales procesos que actúan en las aguas subterráneas de la cuenca, y que determinan su comportamiento hidroquímico, como son la interacción agua-suelo-roca, el efecto de la altitud y la contaminación agrícola.

Se ha comprobado la influencia que las acequias de careo tienen sobre las aguas subterráneas de la cuenca del río Bérchules, a partir del efecto homogeneizador en la composición de las aguas analizadas. Las muestras recogidas en cotas altas presentan una gran similitud en su composición a aquellas aguas de altitudes medias en la margen derecha, debido a la mezcla de aguas infiltradas por las acequias de careo.

Figura 9.

A) Localización en Google Earth (fecha 08/08/2019) y concentración de nitrato (mg/l) de muestras situadas en zonas agrícolas junto a Bérchules. B) Detalle de los cultivos de tomate cherry y habichuelas verdes.



AGRADECIMIENTOS

Este trabajo es una contribución a la Red "Siembra y Cosecha del Agua" del Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED).

REFERENCIAS

Barberá, J.A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo, I., Pedrera, A. and Martos-Rosillo, S. 2018. Groundwater dynamics in a hydrologically-modified alpine watershed from an ancient managed recharge system (Sierra Nevada National Park, Southern Spain): Insights from hydrogeochemical and isotopic information. *Science of the Total Environment* 640-641: 874-893.

Celle, H., Travi, Y. and Blavoux, B. 2001. Isotopic typology of the precipitation in the Western Mediterranean region at three different time scales. *Geophysical Research Letters* 28: 1215-1218.

Craig, H. 1961. Isotopic Variations in Meteoric Waters. *Science* 133: 1702-1703.

Espín, R., Ortiz, E. and Guzmán, J.R. 2010. *Manual del acequero: parques nacional y natural de Sierra Nevada*.

González-Ramón, A., Martos, F.M. and Marín, C. 2015. Factores geomorfológicos condicionantes de la hidrogeología de la cuenca alta del Río Bérchules (Sierra Nevada, Granada). *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica, Serie Hidrogeológica y Aguas Subterráneas*, pp. 2832-94.

Jódar, J., Cabrera, J.A., Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Lambán, L.J., Herrera, C., Custodio, E. 2017. Groundwater discharge in high-mountain

watersheds: A valuable resource for downstream semi-arid zones. The case of the Bérchules River in Sierra Nevada (Southern Spain). *Science of The Total Environment* 593-594: 760-772.

Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Marín-Lechado, C., Cabrera, J., Guardiola-Albert, C., Jódar, J., Navarrete, E. et al. 2017. Las acequias de careo de Sierra Nevada (sur de España), un sistema de recarga ancestral en acuíferos de alta montaña. In: *Manejo de la Recarga de Acuíferos*, 527-563.

Martos-Rosillo, S., Guardiola-Albert, S., Marín-Lechado, S., González-Ramón, A., Villagómez, B., Peregrina, M., Fernández, L. et al. 2015a. Caracterización hidrogeológica y evaluación de la recarga de un acuífero de alta montaña desarrollado en rocas duras. Cuenca del río Bérchules. Sierra Nevada. Granada. 2015b. In: *El Agua en Andalucía. El agua clave medioambiental y socioeconómica, Serie Hidrogeológica y Aguas Subterráneas*, 623-634.

Puga, E., Díaz de Federico, A., Fanning, M., Nieto, J. M., Rodríguez Martínez-Conde, J. Á., Díaz Puga, M. Á., Lozano, J.A., Bianchini, G. Natali, C. and Beccaluva, L. 2017. The Betic ophiolites and the Mesozoic evolution of the Western Tethys. *Geosciences*, 7(2), 31.

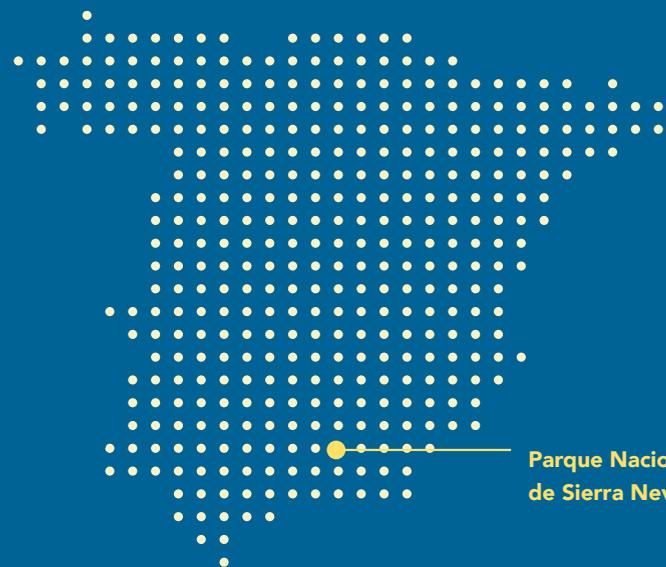
Pulido-Bosch, A. and Sbih, Y. B. 1995. Centuries of artificial recharge on the southern edge of the Sierra Nevada (Granada, Spain). *Environmental Geology*, 26(1), 57-63.



En la ladera sur de Sierra Nevada las aguas de deshielo son derivadas por una extensa red de acequias para infiltrar y fertilizar sus resacas laderas, con una ancestral y modélica gestión que consigue retardar su salida de las cuencas hidrográficas y permite su utilización en los periodos más secos.

Siembra y Cosecha de Agua en las Alpujarras: acequias de careo y de riego en la cuenca del río Trevélez

Water Sowing and Harvesting in the Alpujarras: "careo" and irrigation ditches in the Trevélez river watershed



Parque Nacional
de Sierra Nevada

Nicolás A. Oyonarte¹, Helena Gómez-Macpherson², Sergio Martos-Rosillo³, Antonio González-Ramón⁴, Luciano Mateos⁵

1 Agencia de Gestión Agraria y Pesquera de Andalucía, c/ Hermanos Machado 4, 04004 Almería, España. Email: nicolas.oyonarte@juntadeandalucia.es

2 Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Alameda del Obispo, 14004 Córdoba, España. Email: helena.gomez@ias.csic.es

3 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Urb. Alcázar del Genil 4, Edificio Zulema Bajo, 18006 Granada, España. Email: s.martos@igme.es

4 Instituto Geológico y Minero de España, CSIC, Urb. Alcázar del Genil 4, Edificio Zulema Bajo, 18006 Granada, España. Email: antonio.gonzalez@igme.es

5 Instituto de Agricultura Sostenible, CSIC, Alameda del Obispo, 14004 Córdoba, España. Email: luciano.mateos@ias.csic.es

Siembra y Cosecha de Agua en las Alpujarras: acequias de careo y de riego en la cuenca del río Trevélez

RESUMEN

La gestión del agua en las Alpujarras tiene origen medieval. En la cuenca del río Trevélez, la gestión tradicional es integrada. En la parte alta de la cuenca, buena parte del caudal de escorrentía de la primavera, proveniente de la fusión de la nieve, se desvía desde barrancos a acequias de careo, cuya función es la recarga de acuíferos superficiales. Así, se almacena el agua temporalmente, regulando el caudal del río, de modo que en verano tenga agua suficiente para desviarla a acequias de riego en la cuenca media y baja. En esto consiste la Siembra y la Cosecha de Agua que este capítulo describe. Por un lado, se presentan aforos del agua desviada a acequias de careo, cuantificando su efecto regulador del río. Por otro lado, se hace un balance de agua de la acequia de Busquístar, una de las acequias principales de riego en la cuenca del río Trevélez. En ese balance de agua, se consideran los flujos que redundan en producción agrícola y otros, debidos a la filtración de agua en la acequia, que proveen servicios ecosistémicos. Los segundos crean biodiversidad y paisaje, vivificando bosques de ribera a lo largo de la acequia y contribuyendo adicionalmente a la regulación del curso bajo del río Trevélez. Se trata, por tanto, de varias Soluciones integradas Basadas en la Naturaleza, que condujeron a una revisión del concepto de eficiencia del riego, considerando el efecto escala y los servicios ecosistémicos como usos beneficiosos.

Water Sowing and Harvesting in the Alpujarras: "careo" and irrigation ditches in the Trevélez river watershed

ABSTRACT

Water management in the Alpujarras has medieval origins. In the Trevélez river watershed, traditional management responds to the concept of integrated water resources management. In the upper the watershed, a significant part of the spring runoff flow, coming from the melting of the snow, is diverted from ravines to "careo" ditches, whose function is to recharge shallow aquifers. Thus, the water is stored temporarily, regulating the flow of the river, so that in summer it has enough water to divert it to irrigation ditches in the middle and lower watershed. This is the Water Sowing and Harvesting that this chapter describes. On the one hand, flow measurements at the head of the water diverted to "careo" ditches is presented, quantifying its regulating effect on the river. On the other hand, a water balance of the Busquístar ditch, one of the main irrigation ditches in the Trevélez river basin, is made. In this water balance, the flows that result in agricultural production and others that provide ecosystem services are considered. The latter create biodiversity and landscape, supplying with seepage water to riparian forests along the ditch and contributing to the regulation of the lower course of the Trevélez River. These are, therefore, several integrated Nature-Based Solutions, which led to a review of the concept of irrigation efficiency, considering, first, the scale effect, and, second, the benefit of the various ecosystem services.

INTRODUCCIÓN

Desde que empezaron a construirse en la Edad Media, las redes de acequias de las Alpujarras, además de su función esencial en el regadío, también tienen otras funciones igualmente importantes: la regulación del agua y la creación y mantenimiento de paisajes. Con las acequias se aprovecha, reutiliza y desvía el agua del deshielo, recargando artificialmente acuíferos superficiales (Pulido-Bosch y Ben Sbih, 1995; Barberá *et al.*, 2018; Martos-Rosillo *et al.*, 2019) siguiendo un proceso de Siembra y Cosecha de Agua: siembra, pues recarga acuíferos, y cosecha, pues estos acuíferos desaguan en manantiales, arroyos y ríos, manteniendo su caudal en periodos de lluvias escasas.

Estas acequias de origen medieval son Soluciones Basadas en la Naturaleza, es decir, soluciones que se inspiran en la naturaleza y son de escaso impacto, infraestructuras de sistemas productivos que brindan además beneficios ambientales, sociales y económicos (Comisión Europea, 2020). Las Soluciones Basadas en la Naturaleza como estas acequias de tierra de las Alpujarras están adaptadas localmente, aunque afectan a la totalidad del sistema (por ejemplo, a la cuenca de un río), aportando biodiversidad y utilizando los recursos naturales eficientemente.

Este tipo de solución choca con el concepto de modernización del regadío, entendido casi exclusivamente como el cambio de canales por tuberías, y ajeno a funciones del agua de riego como las indicadas arriba, ya que considera como “pérdida de agua” toda aquella que no es utilizada directamente por los cultivos. De hecho, el Fondo Europeo Agrícola de Desarrollo Rural de la Unión Europea establece que una inversión en la mejora de una instalación de riego, o de cualquier infraestructura asociada al riego, será subvencionable si supone un “ahorro de agua” mínimo de entre el 5 % y el 25 % (Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2013). La aplicación de esta regla a los regadíos con acequias de tierra de La Alpujarras implica que, o bien dispondrán difícilmente de ayudas públicas para su mantenimiento o mejora, o bien han de cambiar toda su infraestructura de riego y perder otras funciones relevantes del agua, tal como se describe en este trabajo.

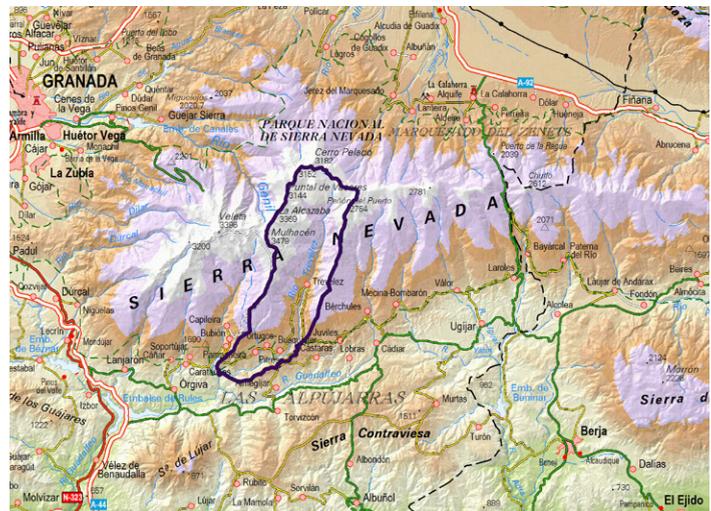
El objetivo de este estudio es analizar las diferentes funciones del agua de riego y su contribución a la mejora del medio natural en los antiguos sistemas de acequias de tierra. Se revisa el concepto de eficiencia del riego y se recomiendan orientaciones de las políticas para mejorar el riego y mantener las redes de distribución de agua respetando los criterios de Soluciones Basadas en la Naturaleza. El caso de estudio es el sistema de la acequia de Busquístar, en la cuenca del río Trevélez, Sierra Nevada. Este sistema se cita en los Libros de Apeo de 1572-1575 (Delaigue, 1995), lo que da testimonio escrito de su existencia desde la Alta Edad Media, periodo en el que estas tierras eran trabajadas por los andalusíes.

LOS CAMINOS DEL AGUA EN LA CUENCA DEL RÍO TREVÉLEZ

La acequia de Busquístar toma el agua del río Trevélez. La cuenca de este río (Fig. 1), afluente del Guadalfeo, es la más grande de la ladera sur de Sierra Nevada. La parte más baja de la cuenca está a 430 m s.n.m., y la más alta es la cumbre del Mulhacén, 3478 m s.n.m. Casi el 70% de la cuenca está ambientalmente protegida como Parque Natural o Parque Nacional.

Figura 1.

Localización de la cuenca del río Trevélez, en Sierra Nevada (España)



El relieve de la cuenca es muy pendiente y las rocas son casi en su totalidad esquistos muy poco permeables. Tan solo se almacena agua en la parte más superficial (acuíferos superficiales), que ha sido alterada por la acción de antiguos fenómenos glaciares y periglaciares, por la meteorización y por la acumulación de arrastres por las precipitaciones. La ladera oeste tiene menos pendiente y más suelo, por lo que allí se concentran las zonas de cultivo.

En las cumbres, la superficie es muy rocosa y la vegetación muy escasa. Los suelos son más bien pobres y en la cuenca alta están ocupados por pastos, matorral disperso y de poco porte y manchas de repoblaciones de pino. En la parte media y baja abundan los bosques de robles y encinas, existiendo también pastos y matorral, y son frecuentes los regadíos en el lado oeste. El lado este, mucho más rocoso y empinado, está ocupado principalmente por matorral, con algunas manchas de pinos y otras mayores de encinas y robles.

Como ocurre en el clima mediterráneo, las lluvias son casi nulas en verano, excepto alguna tormenta, y las más frecuentes e intensas ocurren entre octubre y marzo. La variación de las lluvias de un año a otro es muy alta. En la cuenca del río Trevélez la altura tiene una gran influencia en las precipitaciones, que varían desde unos 500 mm en la parte más baja hasta más de 1000 mm en las cumbres. Además, se estima que dos tercios de la precipitación, por encima de los 2000 metros, se produce en forma de nieve.

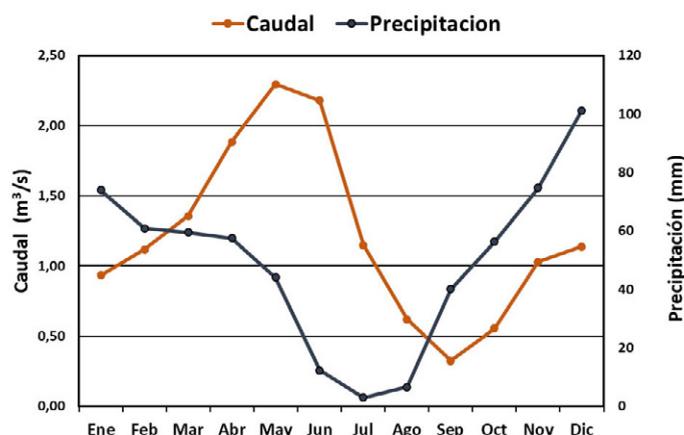
En la cuenca del río Trevélez la altura tiene una gran influencia en las precipitaciones, que varían desde unos 500 mm en la parte más baja hasta más de 1000 mm en las cumbres.

Esta nieve tiene un papel fundamental en la disponibilidad de agua ya que se acumula en las cumbres hasta la época de deshielo, para, posteriormente, infiltrarse en su práctica totalidad en los acuíferos superficiales, cuestión que retarda, de forma considerable, la salida del agua de la cuenca. En la localidad de Trevélez hay una estación de aforo

del caudal del río. A partir de los datos diarios de caudal entre diciembre de 1995 y mayo de 2014, se calculó el caudal medio diario de cada mes. También se disponía de la lluvia diaria promediada para la parte de la cuenca aguas arriba de la estación de aforo durante el mismo periodo, datos que se compararon con el caudal del río (Fig.2). Se observó que hay desfase entre el caudal y la precipitación. La lluvia aumenta desde septiembre hasta diciembre y va disminuyendo hasta mayo, llegando a valores muy bajos en verano. En cambio, el mayor caudal se da en mayo y junio, y, aunque en verano es bastante más bajo, es significativo, con una media de 325 l/s en septiembre. Este desfase revela el papel de la nieve acumulada, el paso del agua de deshielo por los acuíferos superficiales, donde la velocidad de circulación es mucho más lenta que cuando lo hace por un cauce superficial, así como la influencia de un tipo particular de acequias que se describen a continuación.

Figura 2.

Caudal medio mensual en la estación de aforo del río Trevélez y precipitación media mensual en la cuenca aguas arriba de la estación.



Siembra: las acequias de careo y otras acequias de tierra

En la parte alta de Sierra Nevada, aproximadamente por encima de 2000 m s.n.m., abundan acequias que toman el agua de los barrancos y la conducen, incluso, durante kilómetros hasta pastos y prados que

se riegan, o la trasvasan a cuencas vecinas. Son las llamadas “acequias de careo” (Figs. 3 y 4). Su función principal no es necesariamente el riego de estos prados, sino la recarga de los acuíferos superficiales asociados a la zona de alteración de los esquistos que afloran en la parte más elevada de Sierra Nevada (Martos-Rosillo et al., 2019a). La recarga es bien conocida por la población local, tanto es así, que a las zonas donde se vierte el agua para su infiltración se las denomina “simas”. Aunque actualmente algunas de las acequias de careo están perdidas, en la cuenca del río Trevélez se mantienen en uso prácticamente todas, y su manejo se ha caracterizado tras recorrerlas en múltiples ocasiones y tras conversaciones con ganaderos que las utilizan. A menor altura, otras acequias de tierra también recargan acuíferos mientras conducen el agua de barrancos o del río a pequeños regadíos hortofrutícolas y de prados (Fig. 5).

Figura 3.

Acequia de careo Las Lagunas.



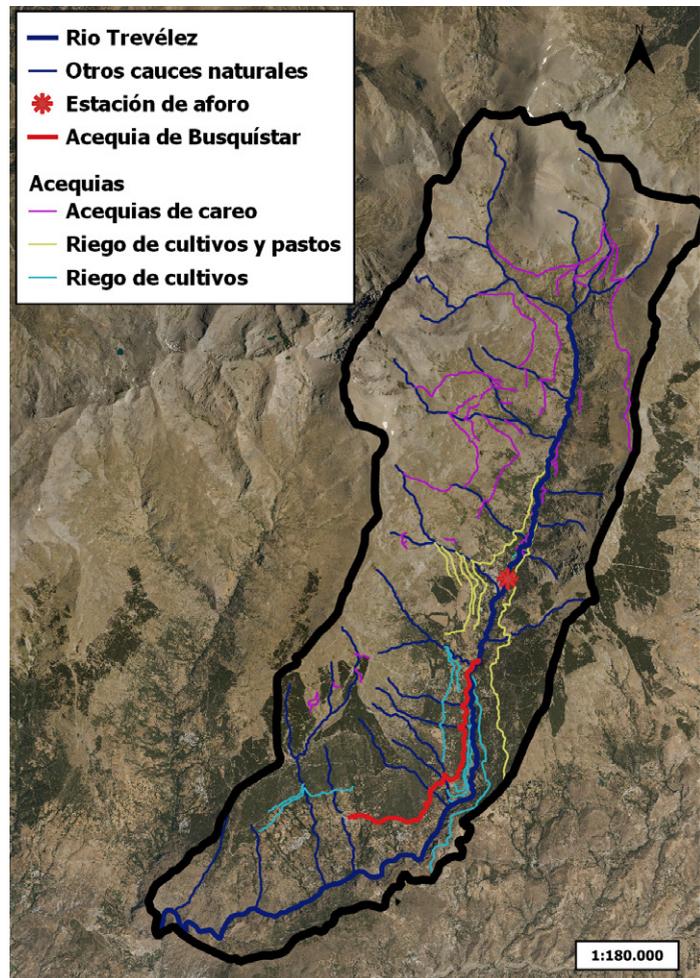
Figura 4.

Otras acequias de careo. Al fondo a la derecha, se aprecia la traza de la acequia de Bacaes por los pequeños prados bajo ella.



Figura 5.

Hidrología de la cuenca del río Trevélez, con las acequias y su función.

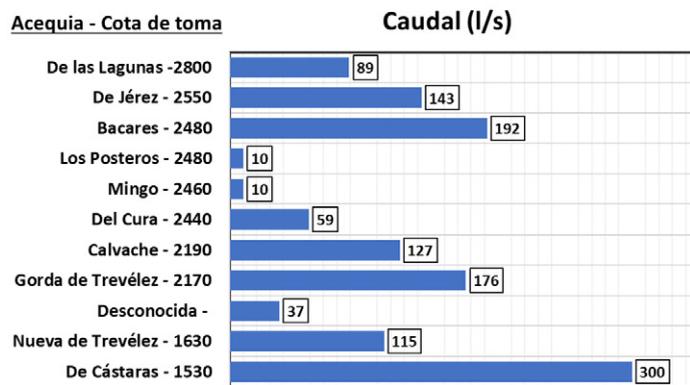


Una vez finalizada la época de lluvias y el deshielo, el río Trevélez aún mantiene su caudal durante julio, agosto y septiembre, caudal que se explica por la función de las acequias de careo y otras acequias de tierra provocando el paso del agua por los acuíferos superficiales que a lo largo del verano van desaguando en manantiales, arroyos y al propio río (Barberá et al., 2018; Martos-Rosillo et al., 2019b). Esto permite que aguas abajo de las acequias el caudal del río, barrancos y manantiales se mantenga lo suficiente para permitir la existencia de otros regadíos y vegetación de ribera.

La importancia de esta función de las acequias se puede ver en la figura 6, donde se muestra el caudal medido en junio de 2019 en las tomas de 9 acequias de careo, con toma por encima de los 2000 m s.n.m., y dos de tierra, con tomas a cotas inferiores, destinadas al riego de cultivos y pastos.

Figura 6.

Caudales medidos en junio de 2019 en 11 acequias de la cuenca del río Trevélez.



El caudal total fue de 1258 l/s, lo que representó el 150% del agua circulante por el río medido el mismo día en el que se midió el caudal de las acequias, y el 50% del caudal medio del río en el mes de junio. El agua que se desvía mediante estas acequias es una proporción importante de la que más tarde, durante el verano, va a pasar a circular por el río, tras su paso, sosegado, por los acuíferos superficiales. Por tanto, el agua sembrada por las acequias de careo es la que, durante el verano, van a poder captar las acequias de riego, situadas a menor cota.

Cosecha: la Acequia de Busquístar

La acequia de riego de Busquístar toma el agua del río Trevélez, aguas abajo de la localidad del mismo nombre. Los actuales estatutos u ordenanzas, que recogen los derechos de agua y el funcionamiento de la Comunidad de Regantes de la Acequia Gorda Real de Busquístar, Pórtugos y Ferreirola son de 1952, pero existe una versión de 1770. La superficie con derechos de agua en la acequia de Busquístar es de 242 ha de banales repartidas en tres municipios (Busquístar, Pórtugos y La Taha), a una altitud de entre 900 y 1300 m. La tierra de regadío pertenece a 800 agricultores, que forman la comunidad de regantes.

La longitud de la acequia es de 8400 m, con una pendiente muy baja, yendo desde los 1320 m s.n.m en la toma del río hasta los 1305 m s.n.m. en la localidad de Pórtugos, donde finaliza. Es de tierra

en todo su recorrido, excepto en algunos pequeños tramos hormigonados donde se perdía una gran parte de su caudal sin ningún beneficio (por ejemplo, en los primeros 125 m tras la toma). La vegetación de ribera (plantas acuáticas, pastos, matorrales y árboles altos) flanquea la acequia en toda su longitud.

La acequia discurre unos 6500 metros hasta que se encuentra el primer partidor, donde comienza la distribución del agua a su zona de riego. Este partidor divide el agua en cuatro partes iguales mediante cuatro vertederos (Fig. 7) y una de ellas abastece al ramal que riega el primer sector. Dos sucesivos partidores, el primero con tres vertederos iguales y el segundo con dos, aseguran que el agua se reparta equitativamente en un total de cuatro sectores de riego. Además, algunos agricultores tienen derecho a una toma directa de la acequia. Cada sector contribuye a una cuarta parte de los gastos, que consisten en la contratación de dos acequeros durante el periodo de cultivo y la limpieza y el mantenimiento anual antes del inicio de la campaña de riego.

Figura 7.

Primer partidor de cuatro vertederos iguales. Fin del tramo de conducción e inicio del tramo de distribución.



Durante la temporada de riego, el agua rota dentro de cada uno de los cuatro sectores. Hasta hace unas décadas se regaba día y noche, pero actualmente una balsa en cada sector almacena agua durante la noche para ser utilizada durante el día. De esta forma, 16 agricultores pueden regar simultáneamente con agua de la acequia.

Además de las fincas que toman el agua directamente de la acequia y sus ramales, existe lo que se denomina localmente el “riego indirecto” de fincas que toman el agua de manantiales que manan bajo ella. Los regantes entienden que estos manantiales se alimentan de filtraciones de la acequia y retornos de riego. Sin embargo, los regantes indirectos no forman parte de la comunidad de regantes ya que la mayoría de ellos se encuentran en la periferia inferior de la zona regable.

Según sus estatutos, la comunidad puede tomar agua del río desde febrero a octubre. Pero desde hace un par de décadas, por iniciativa de la comunidad de regantes y con la aprobación de la autoridad del agua y del Parque Nacional, el agua corre por la acequia también desde noviembre a enero. Se entiende que el caudal continuo durante todo el año contribuye a la infiltración, a incrementar la reserva de agua y a facilitar el mantenimiento de la acequia.

Cosecha de agua productiva: cultivos de riego de la acequia de Busquístar

El interés principal de la acequia de Busquístar, es de suponer que, desde su origen, es el riego de sus 242 hectáreas con derechos de agua. Actualmente, 53 de estas hectáreas se cultivan con hortalizas con destino a mercados nacionales a internacionales (Fig. 8), a través del potente sector de comercialización hortofrutícola del sureste español. Entre estas hortalizas domina el tomate tipo cherry, aunque también se cultivan en menor medida calabacín, judía verde y pepino. Otras 32 hectáreas están ocupadas por olivo y algunos frutales, 12 hectáreas por cultivos de forraje y otras 12 son pequeños huertos para autoconsumo. Hay 133 ha que están semiabandonadas, ocupadas por pastos descuidados. En los bordes de las parcelas cultivadas hay higueras, almeces, castaños, nogales y otros árboles. El riego localizado se utiliza en hortalizas y una parte de los olivos y frutales, mientras

Figura 8.

Cultivo de tomate cherry en la zona de riego de la Acequia de Busquístar.



que se utilizan aspersores móviles para el riego de algunos forrajes. También se sigue utilizando el riego por superficie, aunque en proporción decreciente. Asociadas al riego por goteo se han construido balsas más grandes que las tradicionales. Un aspecto negativo de la extensión de los cultivos hortícolas en otras zonas de las Alpujarras son las explanaciones que destruyen antiguos balates. Afortunadamente, esta práctica no se observa en la zona de riego de la acequia de Busquístar, aterrizada en bancales de origen inmemorial.

En los años 60 y 70 del siglo pasado, cuando la mecanización de la agricultura en España hizo que se abandonara la agricultura de montaña, se produjo un serio despoblamiento de las Alpujarras, que afectó también a los municipios de la acequia de Busquístar. Sin embargo, un proceso contrario está ocurriendo ahora. El cultivo de hortalizas rentables ha incentivado que propietarios que en su momento emigraron, o sus descendientes, hayan retornado durante las crisis de 2008 y de la COVID (2020). También han retornado “románticos de vuelta”, en palabras del presidente de la comunidad de regantes, refiriéndose a emigrantes que con esta nueva oportunidad prefirieron cambiar

El cultivo de hortalizas rentables ha incentivado que propietarios que en su momento emigraron, o sus descendientes, hayan retornado durante las crisis de 2008 y de la COVID (2020).

un modo de vida urbano e industrial por otro rural. Esta nueva horticultura está ofreciendo una oportunidad para que los jóvenes tengan otras posibilidades distintas de la emigración, no sólo por poder obtener cultivos rentables en sus parcelas, también por la posibilidad del desarrollo de negocios ligados al mercado de bienes y la mayor demanda de mano de obra. Las oportunidades si no, se reducirían al turismo, con el empobrecimiento cultural que ello supone.

Por otro lado, este *boom* viene a veces asociado a grandes movimientos de suelo y eliminación de estructuras asentadas poniendo en riesgo recursos y paisaje. La política pública debería favorecer esta nueva agricultura, pero debería ir por delante de los promotores y poner las bases para evitar estos riesgos. Algunos aspectos donde debería intervenir son: 1) no permitir nuevos regadíos en parcelas que tradicionalmente no tuvieran derechos de agua, 2) regular la transformación de infraestructuras para la distribución y almacenamiento de agua, 3) regular el manejo del suelo, lo que incluye la conservación de terrazas y de pequeños muros de mampostería que, sin tener continuidad, reducen la pendiente y disminuyen la erosión y 4) incentivar la creación de comunidades de regantes de segundo orden, que agrupasen al menos a todas las de una cuenca, para dar continuidad a la gestión integrada del agua y las acequias de la cuenca.

El primer punto impediría la extensión del regadío por encima de los recursos disponibles, considerando que el agua tiene otras funciones además del riego de los cultivos, como se verá a continuación. Los puntos 2) y 3) tienden a la conservación del suelo y la diversidad de la vegetación y el paisaje. El 4) promueve la gobernanza inteligente para la sostenibilidad de la región.

Otras cosechas de agua: servicios ecosistémicos de la acequia de Busquístar

Además del riego, la acequia de Busquístar tiene otras funciones que no suelen tener en cuenta las autoridades y los expertos en el manejo del agua de riego, pero son bien conocidas por la población local. La vegetación a lo largo de la acequia y otros tramos que se benefician del agua infiltrada desde ella crean paisajes, dando variedad, densidad y verdor al entorno.

Las masas vegetales, tanto la beneficiada por la infiltración desde la acequia como la existente por encima de ella y no beneficiada por esa infiltración, se compararon mediante un índice llamado NDVI. Este índice se obtiene de imágenes de satélite y oscila entre valores algo inferiores a 0 para superficies de agua, estructuras artificiales, roca o nieve, hasta valores en torno a 0,6 para bosques templados y 0,8 para bosques tropicales. Para su estudio, primero creamos dos franjas a lo largo de la acequia, de 10 y 150 metros por encima de ella. Se supuso que la vegetación existente en la franja de 10 metros se beneficia de la infiltración de la acequia, y la existente en los 140 metros por encima de la franja anterior es la vegetación sin influencia de la acequia. El valor promedio del NDVI en la franja de 10 m influida por la infiltración desde la acequia fue de 0,66, frente a un valor promedio de 0,51 de la franja de 10 a 150 m, que estimamos que no recibe agua de ella. Estos valores indican que la vegetación ribereña de la acequia tiene mayor porte y es más espesa y verde que la que no está afectada por la acequia. Lo anterior se aprecia claramente en el recuadro de la figura 9, donde se ha hecho una composición de color asociada a valores del NDVI. También se observa en color natural en la figura 10. Y esto aun cuando la acequia, en buena parte de su recorrido, atraviesa bosques de robles y encinas o matorral denso, como se observa en las mismas figuras.

El beneficio del que se habla en el párrafo anterior no es sólo en términos de masa vegetal. La vegetación a lo largo de la acequia reflejó una gran diversidad, variando las comunidades vegetales a lo largo de los tramos estudiados. Al recorrer la acequia diferenciamos ocho comunidades de plantas ribereñas a lo largo de

Figura 9.

Trazado y zona de riego de la acequia de Busquístar. En recuadro, composición en color según valores del NDVI de un área alrededor de la acequia.

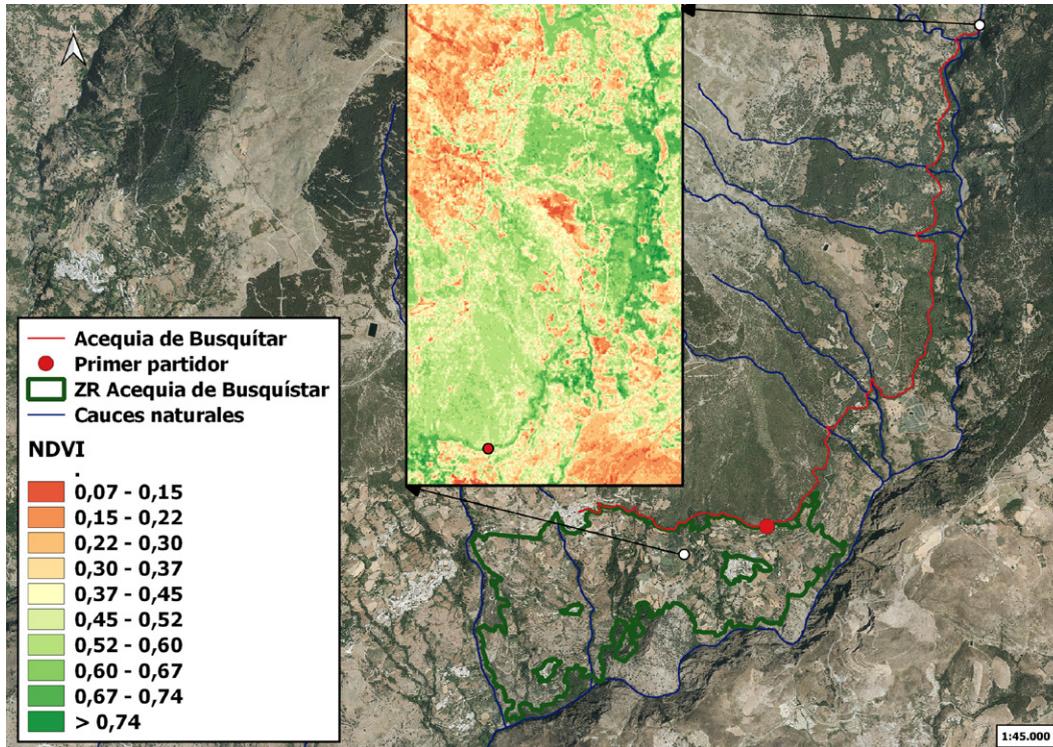


Figura 10.

Tramo de la acequia de Busquístar, distinguible por el mayor porte de su vegetación ribereña, en relación con la vegetación natural que la rodea.



la misma, comunidades que quedan caracterizadas por la especie predominante, la estructura del dosel y un NDVI medio (Tabla 1). En todas las comunidades se encuentran plantas herbáceas, acuáticas y algas. Las comunidades de flora dominadas por el bosque de galería de alisos y castaños tienen el NDVI más

alto (0,72 y 0,76 respectivamente), seguidas por las dominadas por el bosque de galería de robles y la asociación de sauces y otros árboles de gran porte (0,63 y 0,61 respectivamente). Las comunidades de plantas ribereñas menos densas tienen un NDVI menor de 0,45.

Tabla 1.

Descripción de comunidades ribereñas de la acequia de Busquístar. NDVI para cada comunidad en una franja de 10 metros alrededor de la acequia.

Abierta agrícola

Árboles (la mayoría cultivados), grupo de chopos y arbustos aislados junto a la acequia.

NDVI=0,45



Abierta forestal

Árboles y arbustos aislados junto a la acequia

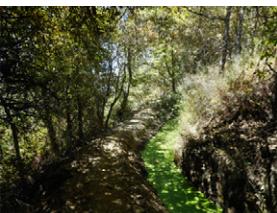
NDVI=0,41



Fronda spp

Fronda continua de árboles y arbustos junto a la acequia

NDVI=0,57



Seto de mimbre

Seto de mimbre de altura media dominante, junto a otras especies

NDVI=0,59



Mimbre & otros

Dominan mimbres adultas; otros árboles de gran porte y arbustos junto a la acequia.

NDVI=0,61



Galería de robles

Robles de gran porte y escasos árboles de otras especies junto a la acequia, a modo de bosque de galería

NDVI=0,63



Galería de castaños

Castaños de gran porte y algún ejemplar de mimbre junto a la acequia, a modo de bosque de galería

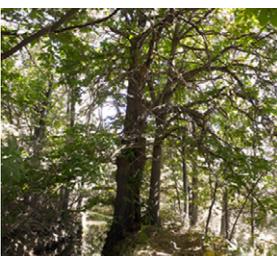
NDVI=0,66



Galería de alisos

Aliseda junto a la acequia, a modo de bosque de galería. Algún ejemplar de otras especies

NDVI=0,72



Además de su influencia en la vegetación, la infiltración desde la acequia se suma también a la recarga de acuíferos debida a las acequias de careo de las partes altas de la cuenca, así como de otras acequias de tierra para riego. Los conocimientos centenarios y las prácticas locales entienden que los caudales de retorno, intencionados o no, contribuyen a la existencia durante el verano de un caudal en el río que permite el riego.

EFICIENCIA DEL RIEGO EN LA ACEQUIA DE BUSQUÍSTAR

El 23 de julio y el 3 de septiembre de 2017 se midió el caudal de la acequia en las cercanías de la toma y en el primer partidor. Las necesidades de agua de los cultivos se calcularon según el método de la FAO (Allen *et al.*, 1998), y con el mismo método se calcularon las de la vegetación influida por la acequia. La diferencia entre el agua disponible y la consumida por los cultivos u otra vegetación son los retornos (agua que termina recargando a los acuíferos superficiales y finalmente descarga en el río), concretamente el agua infiltrada en la acequia fuera del alcance de las raíces, en las parcelas regadas, en la zona de riego, o en conjunto acequia - parcelas - zona de riego, según la escala que se considere.

Los caudales medidos en la cabecera de la acequia los dos días fueron 191 y 178 L/s respectivamente (Tabla 2). La diferencia relativamente pequeña entre ambos caudales indica que la recarga por las acequias de careo y otras acequias de tierra aguas arriba mantuvo suficiente caudal en el río para prolongar la temporada de riego hasta septiembre.

El caudal medido en el primer partidor el 23 de julio fue 97 L/s. Esto supone que entre la toma y el primer partidor (tramo de conducción de 6470 m) se infiltraron 94 L/s, aproximadamente la mitad del caudal en cabecera. El caudal restante continuó por la acequia para ser repartido a los cuatro ramales que salen a lo largo de los 3140 m del tramo de distribución que empieza en el primer partidor.

En el tramo de conducción, el consumo de agua de la vegetación de la franja influida por la acequia (ETflora) fue de 47 L/s. En el tramo de distribución este consumo fue de 6 L/s. El consumo de agua de los cultivos (ETc) en la zona de riego fue de 67 L/s. De esta forma, el

23 de julio la acequia de Busquístar contribuyó a la recarga del acuífero superficial (retornos) con 47 y 24 L/s en los tramos de conducción y distribución respectivamente (Tabla 2). Los resultados obtenidos el 3 de septiembre de 2017 fueron muy parecidos, con la sola diferencia que la evapotranspiración fue menor y los retornos mayores.

Tabla 2.

Balance de agua en la acequia de Busquístar. Todos los valores en litros por segundo. ETc: consumo de agua de los cultivos. ETflora: consumo de agua de otra vegetación alimentada por la acequia. Retornos: agua infiltrada por debajo del alcance de las raíces.

23 de junio, 2017

Toma		1^{er} Partidor		
191		97		
Infiltración: 94		ETc	ETflora	Retornos
ETflora	Retornos	67	6	24
47	47			

El concepto clásico de eficiencia considera que toda el agua que no es utilizada por los cultivos, o destinada al lavado de sales del suelo u otros usos imprescindibles para el cultivo, es una pérdida de agua. Con este concepto, por ejemplo, la eficiencia en el tramo de conducción (desde la toma al primer partidor) sería de 51% el 23 de julio, y de 47% el 3 de septiembre. También con este concepto clásico, la eficiencia global para el sistema acequia (acequia - ramales de distribución - parcelas regadas) sería de 35% el 23 de julio y el 23% el 3 de septiembre, con la disminución de eficiencia entre ambas fechas debida al menor consumo del agua de los cultivos y el aumento de los retornos en la última de ellas. Los expertos en el manejo del agua de riego que siguieran este concepto clásico de eficiencia la considerarían bajísima y propondría medidas para aumentarla, reduciendo la "pérdida de agua". Por ejemplo, podrían proponer el entubado de la acequia para que no se perdiera la mitad del agua en el tramo de conducción.

Pero el concepto clásico de eficiencia no considera otras funciones del agua que no sea el riego de los cultivos. Nosotros proponemos como más adecuado un concepto de eficiencia que considera todos los usos beneficiosos del agua (Burt *et al.*, 1997). La cuestión, por tanto, es concretar exactamente qué se entiende por un uso beneficioso. La producción de cultivos es el principal uso beneficioso, pero la recarga de acuíferos, el incremento de la biodiversidad y la creación de paisajes culturales también pueden ser valoradas por la sociedad, y contribuyen al mantenimiento de otros sectores económicos como el turismo. Entonces, si el mantenimiento de la vegetación ribereña de la acequia también se considera un uso beneficioso del agua, la eficiencia global del sistema acequia pasaría al 63% el 23 de julio y al 42% el 3 de septiembre. Además, si el alcance del análisis se extendiese a la cuenca baja del río Trevélez, parte de los retornos de agua de la acequia, de la zona de riego y de las parcelas deberían considerarse como un volumen de agua almacenada bajo el terreno en acuíferos superficiales para un uso beneficioso aguas abajo. Si se supone que la mitad de estos retornos pudiera recuperarse para un uso beneficioso aguas abajo, la eficiencia global del sistema acequia aumentaría hasta el 77% y el 59% en las dos fechas para las que se ha realizado el balance de agua. Hay que tener en cuenta que esta estimación es muy conservadora, dado que la práctica totalidad del retorno recarga al acuífero superficial y este termina descargando toda esa recarga en los cauces de primer orden situados aguas abajo de los bancales de riego.

El concepto de eficiencia propuesto por Burt *et al.* (1997) es más aplicable a situaciones diversas. En el caso de la acequia de Busquístar, conduce a resultados diferentes de los obtenidos por el concepto clásico. Pero, por ejemplo, en el caso de una zona muy modificada por los cultivos y/o el desarrollo urbano o industrial, donde queden pocos restos de vegetación natural que mantener, o donde los retornos del riego acaben en acuíferos profundos (con un alto coste energético para recuperar el agua) o salinizados, los resultados obtenidos con el concepto de eficiencia propuesto se aproximaría mucho al clásico, al considerar como usos beneficiosos exclusivamente el riego de los cultivos o los asociados a ese riego.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen al Programa Iberoamericano de Ciencia y Tecnología para el Desarrollo (CYTED) por el apoyo financiero de la red “Siembra y Cosecha de Agua en Áreas Naturales Protegidas (419RT0577)”.

Agradecemos al personal de la Comunidad de Regantes de la Acequia Gorda o Real de Busquístar, Pórtugos y Ferreirola, y en particular a su presidente Modesto Alonso, su disponibilidad y amabilidad facilitando información que ha hecho posible este trabajo.

REFERENCIAS

Allen, R.G., Pereira, L.S, Raes, D., Smith, M., 1998. Crop evapotranspiration. Guidelines for computing crop water requirements. FAO Irrigation and Drainage Paper No. 56, Rome, Italia.

Barberá, J.A., Jódar, J., Custodio, E., González-Ramón, A., Jiménez-Gavilán, P., Vadillo, I., Pedrera, A., Martos-Rosillo, S. 2018. Groundwater dynamics in a hydrologically-modified alpine watershed from an ancient managed recharge system (Sierra Nevada National Park, Southern Spain): Insights from hydrogeochemical and isotopic information. *Science of the Total Environment* 640, 874–893.

Burt, C.M., Clemmens, A.J., Strelkoff, T.S., Solomon, K.H., Bliesner, R.D., Hardy, L.A., Howell, T.A., Eisenhauer, D.E., 1997. Irrigation performance measures: efficiency and uniformity. *Journal of Irrigation and Drainage Engineering* 123, 423-442.

Comisión Europea, 2020. Nature-based solutions. https://ec.europa.eu/info/research-and-innovation/research-area/environment/nature-based-solutions_en (visitado el 22 Noviembre 2021).

Delaigue, M.C. 1995. La red de acequias de la Alpujarra Alta. In: *El agua y la agricultura en Al-Andalus*. Lunwerg Editores, S.A, 143-143.

Martos-Rosillo, S., González-Ramón, A., Ruiz-Constán, A., Marín-Lechado, C., Guardiola-Albert, C., Moral Martos, F., Jódar, J., Pedrera-Parias, A. 2019a. El manejo del agua en las cuencas de alta montaña del Parque Nacional de Sierra Nevada (Sur de España). Un ejemplo ancestral de Gestión Integral del Agua. *Boletín Geológico y Minero*, 130 (4), 729-742.

Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A , González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno,

F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., 2019b. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: New insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology* 578, 124047.

Parlamento Europeo y Consejo de la Unión Europea, 2013. Regulation (EU) No 1305/2013 of the European Parliament and of the Council of 17 December 2013 on support for rural development by the European Agricultural Fund for Rural Development (EAFRD) and repealing Council Regulation (EC) No 1698/2005. *Official Journal of the European Union* 20.12.2013, 347–548.

Pulido-Bosch, A., Ben Sbih, Y., 1995. Centuries of artificial recharge on the southern edge of Sierra Nevada (Granada, Spain). *Environmental Geology* 26, 57-63





Técnicas ancestrales de cosecha de agua de lluvia en México

Ancestral rainwater harvesting techniques in Mexico



Carlos Gutiérrez Ojeda

Técnicas ancestrales de cosecha de agua de lluvia en México

RESUMEN

La recolección y almacenamiento de agua de lluvia para uso doméstico ha sido una práctica común en Mesoamérica desde la antigüedad, ya sea en almacenamientos subterráneos o a cielo abierto. Las obras hidráulicas que se utilizaron en el centro y sur de México y gran parte de Centroamérica (antigua Mesoamérica), permitieron la captación, conducción, almacenamiento y distribución de agua para los usos domésticos e irrigación, principalmente. Las obras casi siempre tuvieron más de una función y se vincularon con más de un tipo de agua utilizada (lluvia, manantial, escurrimientos, etc.) La diversidad de soluciones técnicas empleadas por los pueblos prehispánicos mesoamericanos para aprovechar los recursos hidráulicos disponibles, les permitió enfrentar diversas condiciones ambientales encontradas en la región: desde la aridez en valles como el de Tehuacán hasta condiciones de humedad extrema observadas en las tierras mayas. La llegada de los españoles a Mesoamérica representó toda una "revolución tecnológica" en materia hídrica. En este trabajo se describen las aguadas, chultunes, y jagüeyes, obras hidráulicas utilizadas en el México prehispánico para almacenar agua de lluvia o de escurrimiento, así como las galerías filtrantes cuya presencia en territorio mexicano es controvertido ya que algunos investigadores le atribuyen un origen prehispánico.

Ancestral rainwater harvesting techniques in Mexico

ABSTRACT

Rainwater harvesting and storage for domestic use has been a common practice in Mesoamerica since ancient times, whether in surface or underground storage. The hydraulic structures that were used in central and southern Mexico and much of Central America (former Mesoamerica), allowed the collection, conduction, storage and distribution of water for domestic uses and irrigation, mainly. The structures had more than one function and were linked to more than one type of water used (rain, spring, runoff, etc.) The diversity of technical solutions used by the prehispanic people allowed them to face various environmental conditions found in the region: from aridity in valleys such as Tehuacán to extreme humidity conditions observed in the Mayan lands. The arrival of the Spanish in Mesoamerica represented a "technological revolution" in water issues. This work describes the aguadas, chultunes, and jagüeyes, hydraulic structures used in the Mexico pre-Hispanic to store rain or runoff water, as well as the infiltration galleries whose presence in Mexican territory is controversial since some researchers attribute them a pre-Hispanic origin.

INTRODUCCIÓN

La recolección y almacenamiento de agua de lluvia para uso doméstico ha sido una práctica común en Mesoamérica desde la antigüedad, ya sea en almacenamientos subterráneos o a cielo abierto. El agua se recolectaba a través de canales y acequias, utilizando el agua rodada o desde los techos de viviendas y edificios, para posteriormente conducirla por medio de canoas, troncos de madera o canalitos a los depósitos. De acuerdo a Conagua (2009), el agua se almacenaba en recipientes de barro, enterrados o en superficie, así como en pilas o piletas de barro, cal y canto, piedra, excavados en el suelo, recubiertos o no con piedra o argamasa y estuco (Conagua, 2009).

Dentro de los tipos de obras hidráulicas que se utilizaron en el centro y sur de México y gran parte de Centroamérica (antigua Mesoamérica), se encuentran las siguientes (Conagua, 2009):

- ➔ Captación, conducción, almacenamiento y distribución de agua para usos domésticos, de aguas pluviales, perennes superficiales y subterráneas.
- ➔ Conducción, control y drenaje de aguas pluviales para evitar inundaciones.
- ➔ Conducción y drenaje de aguas de desecho ("negras") de las poblaciones rurales y urbanas.
- ➔ Provisión de agua para la irrigación agrícola.
- ➔ Control, aprovechamiento y desagüe de zonas lacustres y pantanosas.
- ➔ Recreación y ritualidad.

Las obras casi siempre tuvieron más de una función y se vincularon con más de un tipo de agua utilizada (lluvia, manantial, etc.).

Los almacenamientos subterráneos domésticos más antiguos se ubican en San José Mogote (1000 a.C.) y Tierras Largas (1000-900 a.C.), Oaxaca (Joyce y Stanish, 2006). Los chultunes o cisternas mayas, vitales para los asentamientos prehispánicos y actuales en la Península de Yucatán, constituyen otro vivo ejemplo de los depósitos subterráneos utilizados en la región (Zapata, 1982).

Los almacenamientos subterráneos domésticos más antiguos se ubican en San José Mogote (1000 a.C.) y Tierras Largas (1000-900 a.C.), Oaxaca (Joyce y Stanish, 2006).

Respecto a los depósitos a cielo abierto, destacan los jagüeyes por su amplia distribución y uso en las zonas áridas y semiáridas de las regiones centrales y sur de México. Los jagüeyes son muy versátiles ya que pueden ser construidos o adaptados a las hondonadas naturales, se ubican en lomeríos o cerca de cerros, y reciben agua de lluvia y los escurrimientos que provienen de los cerros y techos circundantes (Conagua, 2009).

La diversidad de soluciones técnicas empleadas por los pueblos prehispánicos mesoamericanos para aprovechar los recursos hidráulicos disponibles, les permitió enfrentar diversas condiciones ambientales encontradas en la región: desde la aridez en valles como el de Tehuacán hasta condiciones de humedad extrema observadas en las tierras mayas (Joyce y Stanish, 2006).

De acuerdo a Joyce y Stanish (2006) las soluciones técnicas empleadas por los pueblos mesoamericanos en materia hidráulica, se puede resumir de la siguiente forma:

"... el agua se condujo y se desalojó por medio de canales de tierra, de argamasa (cal y arena) y de cal y canto (estuco) excavados o sobre acueductos fundados en terraplenes; por canales de piedra o barro ensamblados o pegados, con o sin tapa, o por canales portátiles de madera (troncos ahuecados), pencas de maguey u otros materiales. El agua se guardó, se condujo y canalizó con presas; las primeras, almacenadoras; las segundas, temporales o efímeras, hechas con tierra, piedras, estacas, césped, ramas y arena. El agua se almacenó temporalmente para formar lagunas con una doble función: agrícola y de cría de plantas y

animales acuáticos. El agua se represó y separó en compartimentos con diques o calzadas-dique y, simultáneamente, se canalizó y drenó por medio de alcantarillas y compuertas para conseguir el control de los niveles estacionales en lagos y humedales (para hacer posible el asentamiento, el cultivo, la navegación, el acceso a agua para beber y la “cría” de productos biológicos acuáticos). El agua se captó y almacenó en la superficie o en el subsuelo para dar de beber a la población por medio de cisternas y otros depósitos; asimismo, se buscó en el subsuelo mediante pozos para abastecer a pueblos y ciudades y para irrigar. El agua se encaminó y guardó temporalmente para amainar su fuerza y proteger a las poblaciones. Los conductos del agua se cerraron y abrieron con compuertas formales, o bien, temporalmente con materiales del entorno inmediato (lodo, piedras, ramas). Al agua excedente de presas, depósitos u otros se le daba salida por vertedores de demasías. En la agricultura, el agua se distribuía inundando la parcela con derramaderos, o bien por medio de canales, zanjas, bordos, surcos, camellones, pozas, cajetes, terrazas y metepantles (bancales).”

La llegada de los españoles a Mesoamérica representó toda una “revolución tecnológica” en materia hídrica que vino acompañada de cambios por la sustitución de herramientas y materiales de madera y piedra por otros de metal, así como la introducción de máquinas y animales de trabajo, aunque la mayoría de los sistemas hidráulicos prehispánicos fueron inicialmente utilizados por los españoles sin mayores modificaciones (Joyce y Stanish, 2006). Dentro de las

obras hidráulicas que llegaron del viejo continente se encuentran las galerías filtrantes, a las cuales se les conoce también como qanats, que pudieron ser introducidas a la península Ibérica por los reinos islámicos/árabes para el riego y consumo humano.

CHULTUNES Y AGUADAS MAYAS

La península de Yucatán se caracteriza por su fisiografía plana, con cerros de menos 500 m s.n.m. y suelo constituido principalmente por una secuencia de sedimentos calcáreos de origen marino del Terciario Reciente. El subsuelo presenta un marcado carácter kárstico, producto de la disolución de las rocas (caliza, dolomita, yeso y halita), y por la infiltración del agua de lluvia (Bahuer et al, 2011). El proceso kárstico ha formado con el tiempo los cenotes y cavernas subterráneas característicos de la Península. Desde el Preclásico, los asentamientos mayas supieron cómo aprovechar el agua subterránea acumulada en el subsuelo (Rojas, 2009).

La geología kárstica de la península y la falta de corrientes superficiales de agua hizo que algunas comunidades mayas se asentaran cerca de los cenotes, conocidos localmente como d'zonot o sumideros (Peña y Levi, 1989), a través de los cuales tenían acceso al agua subterránea durante las épocas de sequía en las que el agua de lluvia escaseaba. Ciudades como Chichen Itzá contaban con este tipo de obras (cenote Xtoloc).

Adicionalmente, los mayas utilizaron otros tres tipos de obras hidráulicas: las aguadas, los chultunes y los pozos (Figura 1).

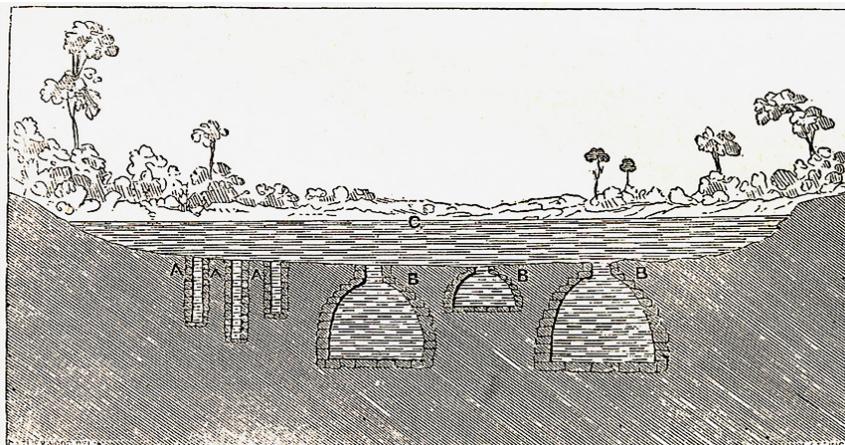
Los pozos también fueron utilizados por los mayas para acceder al agua del subsuelo. Ejemplo de ello es el pozo de Komchén, construido durante el periodo Preclásico medio (700 a. C. aproximadamente), en una zona donde el nivel freático es somero por lo que no tuvieron que excavar demasiado (Rojas, 2009).

La restricción en la disponibilidad de agua en la Península, necesaria para su sobrevivencia, ocasionó el declive de la población maya e incluso su extinción antes de la llegada de los españoles. Las sequías ocasionaron también hambrunas entre la población (SDAR, 2016).



Figura 1.

Pozos (A), chultunes (B) y aguadas (C), (tomado de Rojas, 2009).



Los pozos también fueron utilizados por los mayas para acceder al agua del subsuelo.

Aguadas

En las regiones donde no se podía tener acceso al agua subterránea a través de los cenotes, los mayas construyeron aguadas o chultunes para el almacenamiento del agua de lluvia con el fin de contar con agua durante las épocas secas, que duraban de 4 a 6 meses (Peña y Levi, 1989).

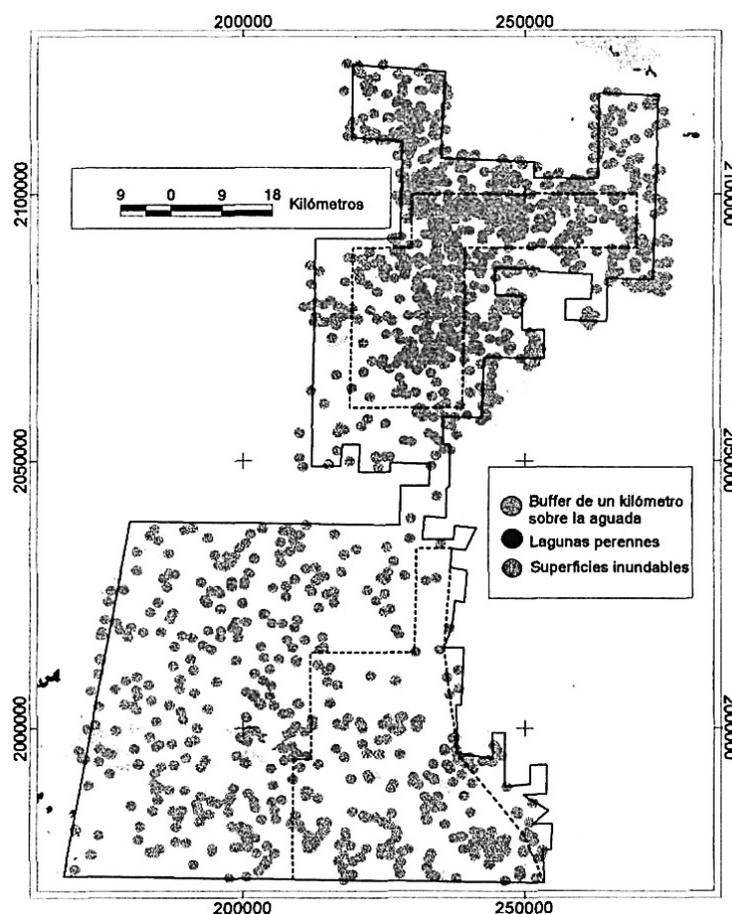
Las aguadas o acal en maya, consisten en depresiones naturales formadas por el hundimiento local de las calizas, las cuales fueron utilizada para captar el agua de lluvia para su uso en los períodos de escasez (Peña y Levi, 1989). La adaptación de las depresiones incluye el recubrimiento del fondo con estuco, la construcción de bordes y caminos de acceso, así como su mantenimiento y desazolve (Rojas, 2009).

La zona sur de la península registra una mayor humedad que la zona norte, por lo que las aguadas son menos abundantes; sin embargo, presentan una mayor superficie y en general son perennes ya que conservan la humedad durante el estiaje. La disponibilidad de agua superficial acumulada en las aguadas fue un factor determinante en el proceso colonizador de la selva (García Gil, 1997).

Con base en el análisis de suelo, topografía, geología y vegetación García et al. (2002) identificaron 1353 aguadas o dolinas (pequeñas depresiones de disolución kárstica) detectadas en la reserva de la biósfera de Calakmul, ubicado al sur de la Península de Yucatán (Figura 2).

Figura 2.

Distribución de aguadas o dolinas en la Reserva de la Biosfera de Calakmul (tomado de García et al., 2002).



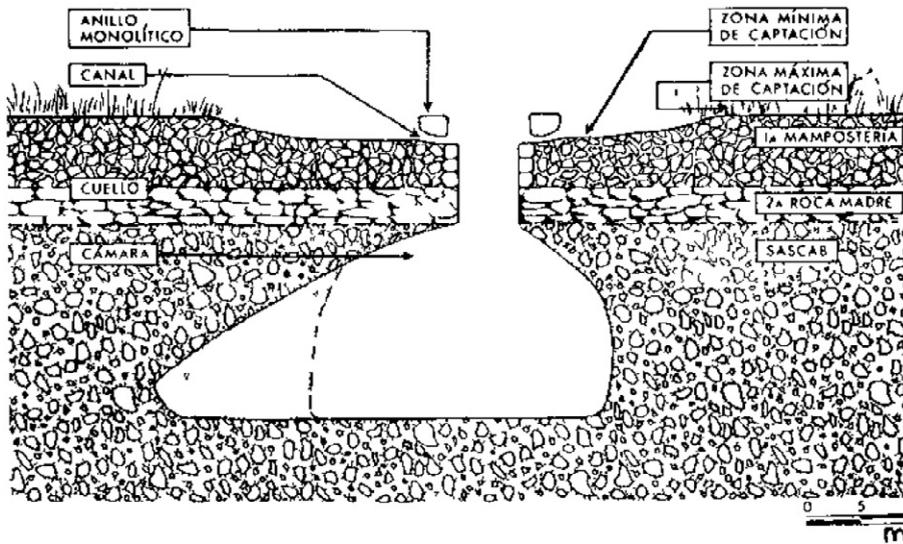
Chultunes

Por su parte los chultunes consisten en oquedades excavadas en el suelo o sobre plataformas o terrenos nivelados y su función es captar, almacenar y conservar las aguas pluviales (Escalante, 2007). Su nombre en maya significa "piedras para lluvia" y sus componentes esenciales son: el área de captación, la boca, el cuello y la cámara (Peña y Levi, 1989) (Figura 3).

Los chultunes fueron construidos en regiones de la Península donde no había cenotes, aguadas o ríos para el suministro al agua.

Figura 3.

Componentes de los chultunes (tomado de Peña y Levi, 1989).



Los chultunes fueron construidos en regiones de la península donde no había cenotes, aguadas o ríos para el suministro al agua. Su número por localidad dependía de la población en cada sitio (Escalante, 2007).

De acuerdo a Peña y Levi (1989), la construcción de los chultunes tuvo ligeras variaciones de una región a otra. En general, se empieza con el retiro de la capa vegetal para posteriormente perforar y atravesar la roca madre hasta alcanzar el estrato de caliza arenosa que es donde se excava la cámara o cuerpo del depósito y cuyas paredes son impermeabilizadas con un recubrimiento de estuco y en ocasiones contienen representaciones de animales acuáticos, como ranas (Escalante, 2007). Entre la superficie del terreno y la roca madre se ubica en su parte superior el cuello del chultún, el cual funciona como muro de contención.

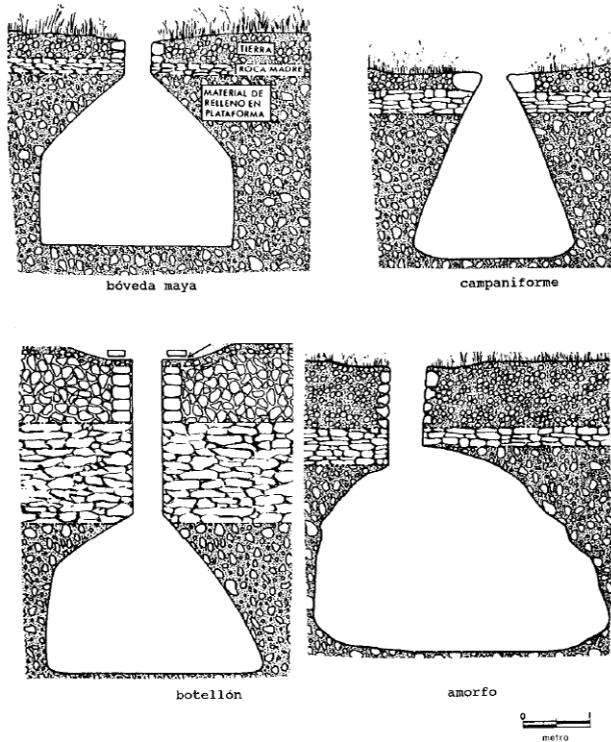
La boca por su parte, puede tener forma circular (90 cm de diámetro) o rectangular de donde sobresalen en ocasiones, cuatro canales por donde entra el agua al depósito.

La zona de captación del agua de lluvia en los chultunes consiste de un piso aplanado de estuco de alrededor de cinco metros de diámetro el cual tiene varios círculos concéntricos de piedra utilizados para retener los sedimentos y filtrar el agua de impurezas. El agua de lluvia también era colectada en los techos de los templos y chozas y conducida mediante canales de madera hasta la zona de captación (Rojas, 2009).

Se han identificado cuatro tipos de forma de los chultunes, en especial al sur de la Sierrita de Ticul (Peña y Levi, 1989): campana, botellón, amorfo y bóveda maya (Figura 4).

Figura 4.

Tipos de forma de los chultunes (tomado de Peña y Levi, 1989).



Los mayas utilizaron los chultunes para el suministro de agua a poblaciones pequeñas o familias, debido a que para su construcción se requería de una tecnología accesible para todos. Algunas comunidades indígenas de la península siguen utilizando a la fecha este método de cosecha de agua de lluvia.

Las comunidades mayas asentadas en Dzibilchaltún, Uxmal, Edzná, Chichén Itzá, Kabah y Tulum deben su progreso en buena medida a la captación del agua de lluvia y al aprovechamiento del agua almacenada en los chultunes (Rojas, 2009).

De acuerdo a Ballén et al., (2006) las comunidades mayas del siglo X a.c. asentadas al sur de Oxkutzcab, Yucatán, se abastecían de agua para la población y el riego mediante chultunes que colectaban el agua en un área de 100-200 m² y un diámetro de 5 m aproximadamente (Figura 5).

En importantes ciudades mayas del Clásico y Postclásico como Chichén Itzá, Edzná, Kabah, Chacmultún, Uxmal y otras más, aún es posible observar los chultunes (Rojas, 2009) (Figura 6).

Figura 5.

Esquema de un chultún utilizado por los mayas (tomado de Ballén et al., 2006).

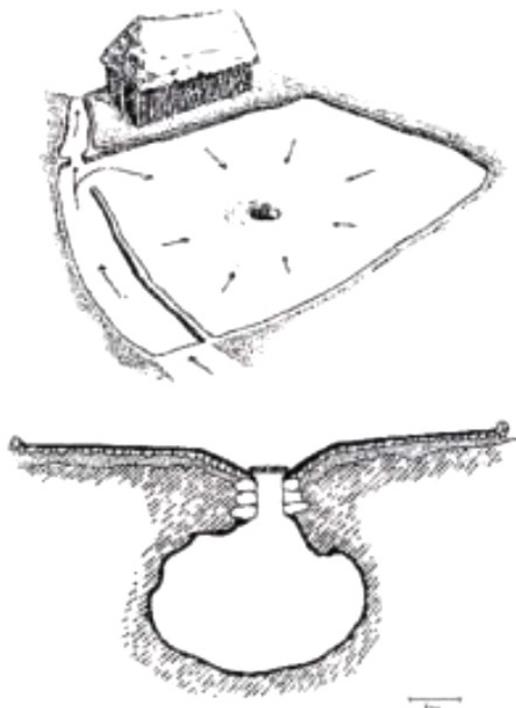


Figura 6.

Chultún localizado en Chichen Itzá, Yucatán (tomado de Rojas, 2009).



Jagüeyes

El control de los escurrimientos provocados por la lluvia, así como su encauzamiento hacia un sitio donde se pudiera almacenar para su posterior uso, fue una de las opciones de captación de agua de lluvia utilizadas en el México prehispánico; para ello construyeron obras hidráulicas que permitieron el control, transporte y distribución del agua ya sea para consumo humano o el riego (Galindo et al., 2008).

Dentro de los depósitos de agua de lluvia a cielo abierto destacan los jagüeyes (Conagua, 2009), los cuales fueron muy comunes en las zonas áridas y semiáridas del centro y sur de México, debido a la dificultad de encontrar otra fuente de agua para su suministro como los pozos, debido a niveles freáticos profundos o suelos poco permeables.

De acuerdo con Sagarpa (2017), “los jagüeyes, también conocidos como balsas, embalses, estanques, cajas de agua, aljibes, trampas de agua o bordos de agua, es el termino genérico que se emplea para designar a depresiones del terreno o pequeñas y medianas presas artificiales, que permiten almacenar el agua proveniente de los escurrimientos superficiales y destinarla a fines pecuarios, o a suplir las necesidades humanas. El vocablo jagüey es de origen taíno (Diccionario de palabras indígenas del

Caribe) y significa balsa, zanja o pozo lleno de agua, en el que abreva el ganado”. Los jagüeyes también eran llamados amanalli que en náhuatl significa alberca o estanque (Galindo et al., 2008) (Figura 7).

Así, el objetivo de los jagüeyes era captar, almacenar y regular la distribución del agua para suplir las necesidades humanas del medio rural, principalmente el pecuario, mediante el aprovechamiento de escurrimientos en áreas de captación menores a 50 ha (Sagarpa, 2017). En localidades con suministro de agua deficiente, el agua de los jagüeyes se usaba también en los quehaceres domésticos (Galindo et al., 2008).

Para su construcción, los antiguos pobladores del México prehispánico aprovecharon o acondicionaron las hondonadas naturales ubicadas en terrenos cercanos a cerros o lomeríos (Conagua, 2009).

De acuerdo a Hernández y Herrerías (2004), los pobladores del valle de Tehuacán construyeron sus casas alrededor de los jagüeyes o tlaquilacáxtil, los cuales recibían los escurrimientos provenientes de los cerros cercanos. El agua era utilizada para satisfacer tanto las necesidades de la población como de los animales. El mantenimiento de los jagüeyes se

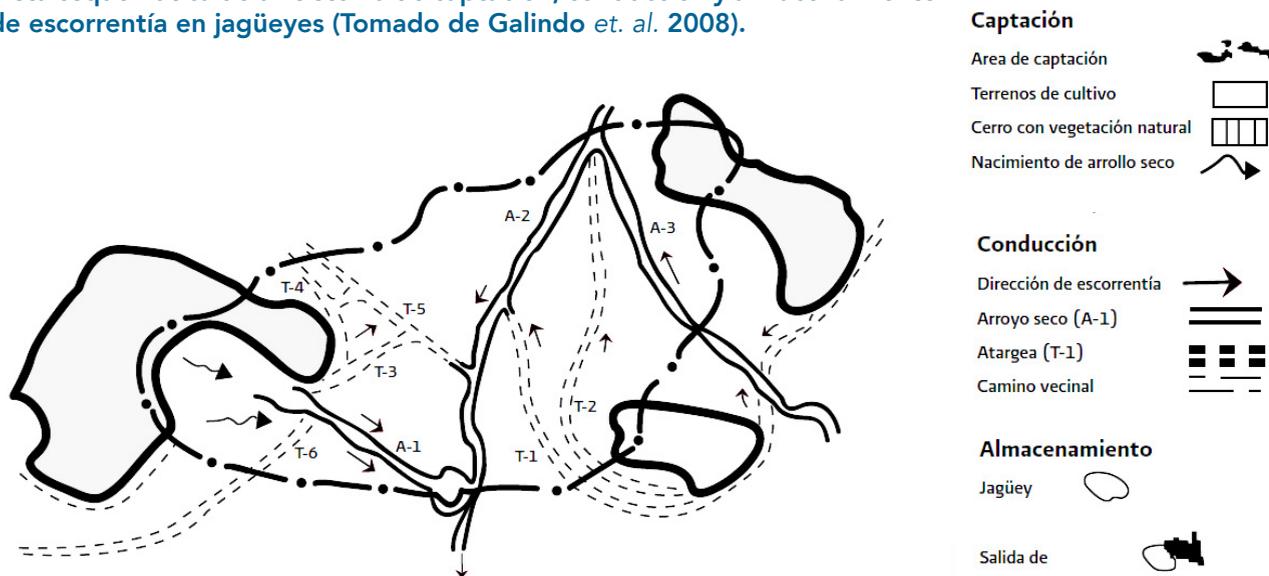
Figura 7.

Jagüey Santiago, en Singuilucan, estado de Hidalgo (tomado de Galindo et. al. 2008).



Figura 8.

Vista esquemática de un sistema de captación, conducción y almacenamiento de escorrentía en jagüeyes (Tomado de Galindo *et. al.* 2008).



realizaba cada año durante el periodo de secas, para lo cual cada familia tenía que excavar en el fondo de jagüey para extraer el azolve y colocarlo sobre el borde para incrementar la capacidad de almacenamiento.

Las componentes que integran un sistema de captación de agua de lluvia en jagüeyes, en regiones de poca precipitación (menos de 500 mm/año) son: una zona de captación, obras de conducción y el jagüey u obra de almacenamiento (Galindo *et al.*, 2008) (Figura 8).

La zona de captación incluye las laderas de los cerros o lomeríos cercanos cubiertos por vegetación natural de la región y las parcelas que drenan los excedentes del riego hacia las obras de conducción.

Las obras de conducción por su parte tienen la finalidad de concentrar y transportar el escurrimiento desde las laderas y/o parcelas hacia la obra de almacenamiento para lo cual se utilizan los arroyos naturales o canales de llamada excavados en las laderas o entre parcelas.

Los jagüeyes son depósitos de agua cóncavos, con profundidad media de 8 m, extensión de hasta 2 ha y donde el nivel del agua varía en función del régimen de lluvias por lo cual pueden ser permanentes o temporales. El agua almacenada en los jagüeyes debería ser retenida por al menos cuatro meses de la época de estiaje (Sagarpa, 2017).

En muchas regiones áridas y semiáridas de México se sigue utilizando aún esta técnica de captación, conducción y almacenamiento del agua de lluvia debido a los beneficios que presenta (Sagarpa, 2017):

- Contribuyen a mantener el suministro de agua, especialmente en la época de estiaje
- Son de bajo costo
- Mejoran la eficiencia en el uso de agua de lluvia
- Mejoran el entorno
- Las estructuras son sencillas de construir y los materiales necesarios son adaptables a las condiciones particulares de cada sitio
- No requiere conocimientos técnicos avanzados para su manejo y administración
- El agua almacenada se distribuye por gravedad y de manera controlada.

Dentro de las principales desventajas se encuentran el disponer de una superficie necesaria para formar el cuerpo de agua y el área de captación para la colecta de agua de lluvia, además de que el almacenamiento del agua depende directamente de las lluvias.

SISTEMAS DE COSECHA DE AGUA EN EL VALLE DE TEHUACÁN

De acuerdo a Hernández y Herrerías (2004), a la región de valle de Tehuacán se le reconoce como la cuna de la agricultura y el riego en Mesoamérica debido a que los naturales que habitaron la región, del año 800 al 150 a.C. (fase Santa María), descubrieron la agricultura de riego al manejar el agua de lluvia, construir presas, terrazas escalonadas y canales al suroeste del valle. La construcción de la presa de Purrón y el canal Santa María marcan el inicio de la agricultura de riego en Mesoamérica hace 2750 años, siendo el Purrón la presa más antigua encontrada hasta a la fecha. Vestigios de ambas construcciones aún se conservan en el valle de Tehuacán.

Además de retener el agua de lluvia mediante presas, los antiguos pobladores del valle utilizaron la técnica de las terrazas para retener los suelos y el agua en las parcelas de siembra. Las parcelas fueron construidas con piedras superpuestas y de las que existen múltiples evidencias en todo el valle (Figura 9).

Figura 9.

Terrazas utilizadas para retener el suelo y agua (Cortesía del programa Agua para Siempre, Alternativas y Procesos de Participación Social A.C., Tehuacán Pue, México; Hernández y Herrerías, 2004a).



La llegada de los españoles al continente americano significó un parteaguas en los sistemas de aprovechamiento del agua prehispánicos del Valle; la división de la propiedad de la tierra en haciendas ocasionó la inutilización de los sistemas de canales utilizados para la agricultura.

En contraste, durante la época Colonial se aportaron nuevas técnicas como las galerías filtrantes, bimabaletes, entarquinamiento y acueductos de arco, las cuales fueron adoptadas por los pueblos de Mesoamérica y permitieron mejorar los rendimientos y ampliar la frontera agrícola (Palerm, 2004).

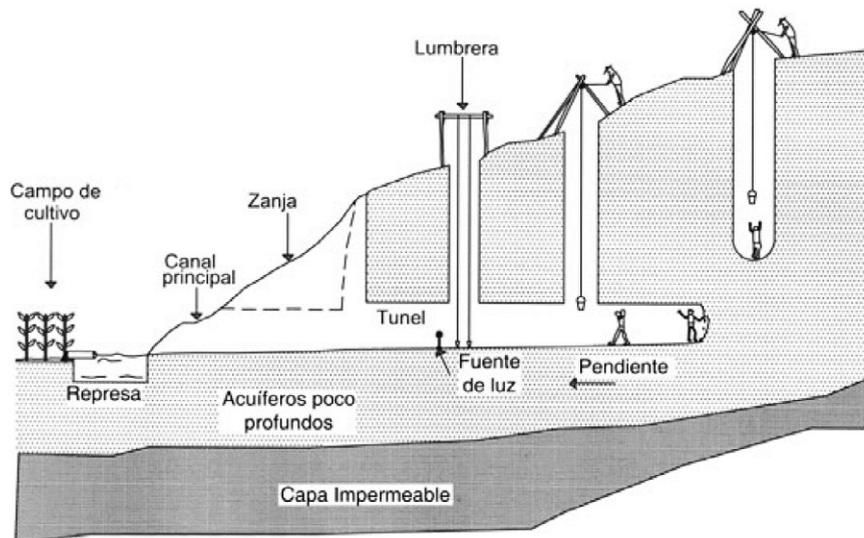
Galería filtrante

La galería filtrante es una técnica utilizada para captar agua subterránea mediante un túnel excavado en el interior de los estratos geológicos permeables; el túnel tiene una ligera pendiente para conducir el agua por gravedad hasta la superficie del terreno y cuenta con lumbreras o pozos verticales dispuestos a intervalos regulares para su construcción, iluminación, ventilación y mantenimiento. Este tipo de obras permiten obtener agua sin la necesidad de utilizar sistemas de bombeo - electricidad por lo que resultan ser adecuados para las poblaciones rurales (Joyce y Stanish, 2006; Hernández y Herrerías, 2004) (Figura 10).

Su origen se remonta a Persia (siglo VII a.C.) y de ahí se difundió la técnica a Mesopotamia y Egipto (550-331 a. C.), Siria y Jordania (64 a.C. a 660 d.C.), norte y oeste de Europa, y durante las invasiones árabes al Norte de África, Chipre, Sicilia y España (Martínez, 2005). Las galerías filtrantes fueron utilizadas para el abastecimiento urbano y agrícola, y a pesar de ser una técnica antigua aún sigue utilizada en diversas regiones de México, Latinoamérica y Europa (Palerm, 2004).

Figura 10.

Galerías filtrantes utilizadas para extraer agua del subsuelo (Diagrama de David Herrerías, cortesía del programa Agua para Siempre, Alternativas y Procesos de Participación Social A.C. Tehuacán Pue, México; Hernández y Herrerías, 2004).



Las galerías filtrantes son conocidas en diversas regiones del mundo con distintos nombres: qanat, foggara (en árabe), fuqara, minas de agua, etc.

Las galerías filtrantes son conocidas en diversas regiones del mundo con distintos nombres: qanat, foggara (en árabe), fuqara, minas de agua, etc. En México se les conoce como apantles con tragaluces, pozería, galería filtrante o galería (Tehuacán, Puebla); tajos, socavones o fuques (Parras, Coahuila); picos (Tecamachalco, Puebla); etc. Mientras que en el norte de Chile son conocidas como picas y en Perú como pukios (Palerm, 2004).

Las galerías filtrantes permiten alumbrar aguas subterráneas (Palerm, 2004) presentes en:

- ➔ Abanicos aluviales - construcción con técnicas mineras
- ➔ Cauces de ríos con el fin de captar aguas subálveas
- ➔ Excavaciones de túneles y su profundización siguiendo un manantial previamente existente
- ➔ Socavones contruidos para desaguar minas.

Su presencia en territorio mexicano es controvertido ya que algunos investigadores le atribuyen un origen prehispánico (Seele, 1969), mientras que otros atribuyen su introducción durante el periodo colonial (Creek, 1973).

Los campesinos del valle de Tehuacán se apropiaron del conocimiento para su construcción y manejo, y a la fecha siguen construyendo galerías filtrantes con herramientas sencillas y se utilizan principalmente para el riego (Martínez, 2005). La técnica se arraigó a tal grado en la región que a la fecha existen más de ochenta en operación (Palerm, 2004) y constituyen el sistema de riego más importante en el valle bajo (Hernández, 2004). Son operadas mediante sofisticados sistemas de organización social denominados "sociedades de agua" cuyos socios son principalmente campesinos que se dedican a la agricultura en la región (Palerm, 2004).

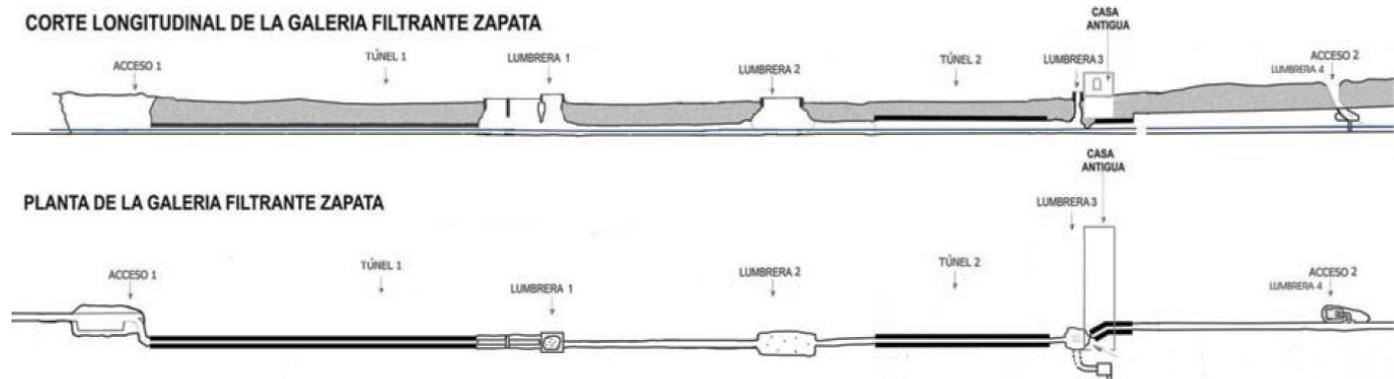
El Valle de Tehuacán ha sido señalado como el centro de difusión de la tecnología de las galerías filtrantes al resto del país (Palerm, 2004), a través de los grupos de tlaxcaltecas, las órdenes religiosas y los sistemas de haciendas que se desplazaron durante su expansión del centro hacia el norte de México (Creek, 1973). De acuerdo a Blásquez (1957), este sistema de captación fue utilizado por primera vez en Tehuacán por los frailes franciscanos a raíz de la conquista.

Su presencia en Parras, estado de Coahuila, norte de México, se debió a la comunidad tlaxcalteca, que fundó el pueblo en 1598 durante la época colonial.

De acuerdo a Martínez (2005), existen 14 galerías filtrantes en Parras, de las cuales 11 siguen en uso y 3 dejaron de funcionar (Figura 11):

Figura 11.

Galería filtrante Zapata en Parras, Coahuila (tomado de Martínez, 2005).



De acuerdo a Palerm (2004) existen galerías filtrantes en las siguientes regiones de México:

Puebla

- Valle de Tehuacán, 80 en uso
- Acatzingo-Tepeaca, 150
- Valsequillo-Tecamachalco, 139

Coahuila

- Parras-Viesca varias
- Charcos de Risa y Tres Manantiales

Jalisco

- Ex-Hacienda La Venta del Astillero
- Guadalajara
- Tala y Etzatlán
- San Luis Potosí,
- Hacienda del Peñasco
- Hacienda de Pardo

Nuevo León

- arroyo Santa Catarina
- Monterrey
- San Jerónimo

Querétaro

- Querétaro

Zacatecas

- Concepción del Oro

EL PROGRAMA "AGUA PARA SIEMPRE"

El panorama en el valle de Tehuacán a principios de los 1980s era el siguiente: la erosión de los montes, provocado por la acción combinada de la deforestación y el sobrepastoreo, provocó la disminución del volumen de recarga a los acuíferos de la región. Lo anterior, en conjunto con el incremento en la extracción del agua subterránea se tradujo en el abatimiento de los niveles del agua, la sobreexplotación de los recursos hídricos subterráneos y la disminución de los caudales de las galerías filtrantes y pozos profundos.

A raíz de una investigación desarrollada por Hernández y su grupo se concluyó que era necesario emprender un programa de regeneración de barrancas y cuencas, por lo que en 1988 dieron inicio al programa "Agua para siempre", con el fin de resolver las causas que originaron dicha problemática, aprovechando también el hecho de que los campesinos aún conservan su cultura hidráulica tradicional (Hernández, 2004).

El programa consistió en la construcción de un sistema que incluye obras y acciones de reforestación, para el control del escurrimiento y la erosión en cerros, para propiciar la infiltración del agua en lomas, valles y barrancas para la recarga de los acuíferos, así como obras de extracción y aprovechamiento del agua infiltrada, utilizando tecnologías o prácticas conocidas por la población campesina local, con el fin de regenerar la cuenca en forma sostenible a largo plazo (Hernández y Herrerías, 2004a) (Figura 12).

De acuerdo a Hernández (2004), la combinación de técnicas de captación del agua de lluvia, almacenamiento, distribución, potabilización, uso eficiente y reciclamiento de agua, han permitido

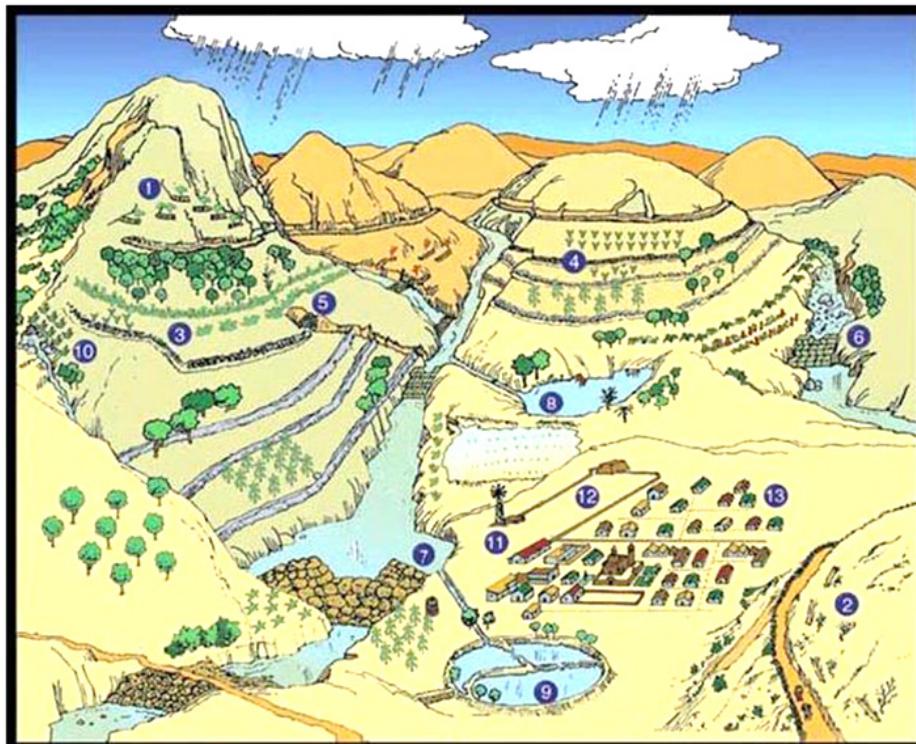
solucionar en gran medida el problema de la escasez del agua, así como dotar de agua a la población del valle para satisfacer sus diversas necesidades.

El programa "Agua para siempre" ha obtenido abundantes frutos gracias al equipo interdisciplinario que lo integran: profesionistas, técnicos, administradores y campesinos.

La regeneración de suelos, agua y vegetación, así como la construcción de 7500 obras han permitido la recarga de los acuíferos que alimentan a pozos y manantiales, mejorando las condiciones de vida de más de 200.000 personas de la región al alcanzar un alto umbral de seguridad hídrica.

Figura 12.

Regeneración de la cuenca mediante el programa "Agua para Siempre" (Diagrama de Hugo S. Herrerías, cortesía del programa Agua para Siempre, Alternativas y Procesos de Participación Social A.C. Tehuacán Pue, México; Hernández y Herrerías, 2004a).



1. Zanja trinchera para reforestación,
2. Anillos de captación de escurrimientos,
3. Bordos a nivel con barreras vivas,
4. Terrazas niveladas para siembra,
5. Retén de piedra acomodada,
6. Presa de gaviones para filtración,
7. Presa de almacenamiento de agua,
8. Aguajes para abrevadero y riego auxiliar,
9. Jagüey para abrevadero,
10. Recarga de manantiales,
11. Sistema alternativo de bombeo,
12. Sistema de distribución de agua,
13. Saneamiento con digestores

REFERENCIAS

Ballén, J.A. Galarza, M.A. and Ortiz R.O. 2006. Historia de los sistemas de aprovechamiento de agua lluvia. VI SEREA. Seminario Iberoamericano sobre Sistemas de Abastecimiento Urbano de Agua. Joao Pessoa, Brasil.

Conagua, 2009. *Semblanza Histórica del Agua en México*. Comisión Nacional del Agua. noviembre de 2009.

Escalante, R.M. 2007. Chultunes, ejemplo ancestral maya en el aprovechamiento del recurso pluvial. *Vertientes. Revista de comunicación interna de la Comisión Nacional del Agua*. Año 13, No 13, 5 julio 2007. ISSN 1405-2881.

Galindo, E.E. Palerm, J. Tovar, S.J.M. and Rodarte, G.R. 2008. Tecnología hidráulica y acciones comunitarias para la captación de agua de lluvia en jagüeyes. *Boletín del Archivo Histórico del Agua*.

García, G.G. Palacio, P.J.L. and Ortiz P.M.A. 2002. Reconocimiento geomorfológico e hidrográfico de la Reserva de la Biosfera Calakmul, México. *Investigaciones Geográficas. Boletín del Instituto de Geografía (48)*, 7-23

Hernández, G.R. 2004. Programa "Agua para Siempre" – Tehuacán Pue. México, abril 2004.

Hernández, G.R. and Herrerías G.G. 2004a. *Tecnologías de Regeneración de cuencas para la obtención de Agua: El programa "Agua para Siempre, Alternativas y procesos de Participación Social A.C.* Tehuacán Pue. México, abril 2004.

Hernández, G.R. and Herrerías G.G. 2004b. *Evolución de la tecnología hidro-agro-ecológica mesoamericana desde su origen prehistórico: El valle de Tehuacán, Pue. México, Alternativas y procesos de Participación Social A.C.* Tehuacán Pue. México, junio 2004.

Joyce, M. and Stanish Ch. 2006. *Agricultural Strategies*. Los Ángeles, Institute of Archaeology - University of

California, Los Ángeles. In: "Cotsen Advanced Seminar". Marcus, Joyce and Charles Stanish (eds.).

Martínez, G.C.C. 2005. *Aportaciones para el estudio de la obra hidráulica del pequeño riego, Parras de la Fuente, Coahuila, México*. Tesis de maestría en ciencias. Colegio de Postgraduados Campus Montecillo, Texcoco, Edo. de México.

Palerm, V.J. 2004. Las galerías filtrantes o qanats en México: introducción y tipología de técnicas. *Filtrating galleries or qanats in México: introduction and typology of techniques. Agricultura, sociedad y desarrollo*. julio-diciembre 2004.

Peña, S. and Levi, E. 1989. *Historia de la hidráulica en México: Abastecimiento de agua desde la época prehispánica hasta el Porfiriato*. Serie Divulgación IMTA-IIUNAM.

Rojas, R.T. 2009. *Cultura hidráulica y simbolismo mesoamericano del agua en el México prehispánico*. José Luis Martínez Ruiz y Daniel Murillo Licea (eds). Jiutepec, Morelos: Instituto Mexicano de Tecnología del Agua/ Centro de Investigaciones y Estudios Superiores en Antropología Social. 305 pp. ISBN 978-697-7563-06-8.

Sagarpa, 2017. *Diseño y construcción de Jagüeyes*. Segunda Edición. México. noviembre 2017. Secretaría de Agricultura, Ganadería, Desarrollo Rural, Pesca y Alimentación.

Torres, H.C.R. 2019. La captación del agua de lluvia como solución en el pasado y el presente. *Ingeniería Hidráulica y Ambiental*. Vol. XL, No. 2, 125-139

Zapata, P.R.L. 1982. *Los chultunes, Sistemas de captación y almacenamiento de agua pluvial*, México. INAH (Colección Científica 182). Zapata Peraza, Renée Lorelei.





Sistema comunitario de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano en la región indígena Mazahua, México

Rainwater harvesting community system for human consumption in the Mazahua indigenous region, Mexico



Manuel Anaya-Garduño¹ y Aurora Pérez-Hernández²

1 Colegio de Postgraduados. Km 36.5 Carretera México Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56227, anayam@colpos.mx

2 Red Temática en Sistemas de Captación del Agua de Lluvia. Km 36.5 Carretera México Texcoco, Montecillo, Texcoco, Estado de México, México. CP. 56227, ayllam07@gmail.com

Sistema comunitario de captación y aprovechamiento del agua de lluvia para consumo humano en la región indígena Mazahua, México

RESUMEN

En México, 69,5% de su población indígena vive en condiciones de pobreza y 27,9% en pobreza extrema. El pueblo originario Mazahua es uno de los más numerosos en el estado de México y, como muchos grupos indígenas, presenta grandes problemas por la escasez del agua. En el año 2015, la Fundación Pro Zona Mazahua contactó al Colegio de Postgraduados, para solicitarle el diseño de un proyecto de captación del agua de lluvia para consumo humano, debido a que la mala calidad de agua que consumían estaba causando serios problemas en la población y la muerte de niños por enfermedades gastrointestinales. En el año 2006, se habilitó el sistema comunitario de captación y aprovechamiento del agua de lluvia, el cual tuvo como objeto dotar de agua segura a una población de 2600 habitantes, que consistió en un área de captación del agua de lluvia revestida con geomembrana de PVC, un sedimentador y una cisterna con capacidad de almacenamiento de 3500 m³; además, se construyó un local en el cual se instaló el tren terciario de purificación del agua de lluvia, la cual se envasaba en garrafones de 19 litros para su posterior distribución y dotación de dos garrafones por familia por semana. Se ofrecieron talleres de participación comunitaria para explicar el objeto del proyecto y para capacitar a personal local sobre el manejo y mantenimiento de los diversos componentes del sistema comunitario de captación y aprovechamiento del agua de lluvia. A la fecha, este proyecto ha beneficiado a los habitantes de la comunidad Mazahua, promoviendo la conciencia ambiental por más de 15 años.

Rainwater harvesting community system for human consumption in the Mazahua indigenous region, Mexico

ABSTRACT

In Mexico, 69.5% of its indigenous population lives in conditions of poverty, 27.9% in extreme poverty. The Mazahua indigenous people are one of the most numerous in the State of Mexico and, like many indigenous groups, present great problems due to the scarcity of water. In 2015, the Fundación Pro Zona Mazahua contacted the Postgraduate College to request the design of a Rainwater Harvesting project for human consumption, because the poor quality of the water they were consuming was causing serious problems in the population and death of children from gastrointestinal diseases. In 2006, the rainwater harvesting community system was enabled, which aimed to provide safe water to a population of 2 600 inhabitants, which consisted of a rainwater catchment area lined with PVC geomembrane, a sediment trap and a cistern with capacity 3 500 m³ of storage; In addition, a place was built in which the tertiary rainwater purification train was installed, which was packaged in 19-liter jugs for later distribution and provision of two jugs per family per week. Community participation workshops were offered to explain the purpose of the project and to train local personnel on the management and maintenance of the various components of the rainwater harvesting project. To date, this project has benefited the inhabitants of the Mazahua community, promoting environmental awareness for more than 15 years.

OBJETIVO Y ZONA DE ESTUDIO

El objetivo de las actuaciones llevadas a cabo en las comunidades Mazahua de México ha sido el de dotar de agua segura para consumo humano con el fin de reducir la mortandad infantil y promover alternativas de desarrollo comunitario.

La región mazahua está situada en la parte noroeste del Estado de México, así como en una pequeña área del oriente del estado de Michoacán. Actualmente, el pueblo mazahua constituye el pueblo originario más numeroso en el estado de México, aproximadamente 133 mil hablantes de la lengua, lo que representa el 42.3% de la población indígena del estado (INEGI, 2020).

Los municipios en donde habitan los grupos originarios Mazahua son: Almoloya de Juárez, Atlacomulco, Donato Guerra, El Oro, Ixtapan del Oro, Ixtlahuaca, Jocotitlán, San Felipe del Progreso, San José del Rincón, Temascalcingo, Valle de Bravo, Villa de Allende, Villa Victoria y Zitácuaro en Michoacán; siendo los municipios de San Felipe del Progreso, Ixtlahuaca y Atlacomulco los que concentran la mayor parte de esta población (CEPEDIEM, 2020), razón por la cual se seleccionó al municipio de San Felipe del Progreso como representativo de los ecosistemas y usuarios asociados aguas abajo (Martos-Rosillo et al., 2020).

PROBLEMÁTICA

La situación en la que viven gran parte de estos habitantes se caracteriza por la carencia de servicios básicos, como agua potable, servicio sanitario, caminos en condiciones precarias. También deficiencias en vivienda y espacios educativos de nivel medio y superior, entre otros (CEPEDIEM, 2020).

En la cosmovisión del grupo originario Mazahua, el agua es un poderoso elemento fundamental tanto para la vida material como espiritual, ligada necesariamente a la actividad humana. La relación que estas comunidades tienen con el agua parte de los procesos organizativos, comunitarios y sociales, las fiestas, ceremonias y los ritos que las personas realizan para incentivar su llegada a la Madre Tierra.

De igual forma, para los Mazahuas, el agua debe cuidarse no solo porque es un fruto sagrado, sino porque es el elemento esencial que forma parte de los fenómenos de la Madre Tierra y las actividades humanas. Así, “la tierra, y el agua que hay en ella, son entes vivos que reaccionan ante la conducta de los hombres”, por lo que no deben ser maltratados (Mazabel y Mendoza, 2012).

La escasez de agua en comunidades Mazahua se remonta a muchos años. Tire (2013) menciona que el sistema Cutzamala (trasvase de agua a la zona metropolitana de la ciudad de México) ha generado tensiones en los territorios indígenas mazahuas por las restricciones en el acceso al agua y afectaciones en su calidad.

Debido a la mala calidad del agua disponible en la ranchería La Soledad del municipio de San Felipe del Progreso se detectaron serios problemas de salud en la población infantil, la gastroenteritis causó muertes y alertó a la Fundación Pro Zona Mazahua, quienes buscaron soluciones a este creciente problema. Los directivos de la fundación se dirigieron al Colegio de Postgraduados para se presentaran propuestas de solución, por lo cual se nombró a un grupo de académicos para visitar la región Mazahua y hacer las propuestas factibles sobre proyectos de aprovechamiento del agua de lluvia.

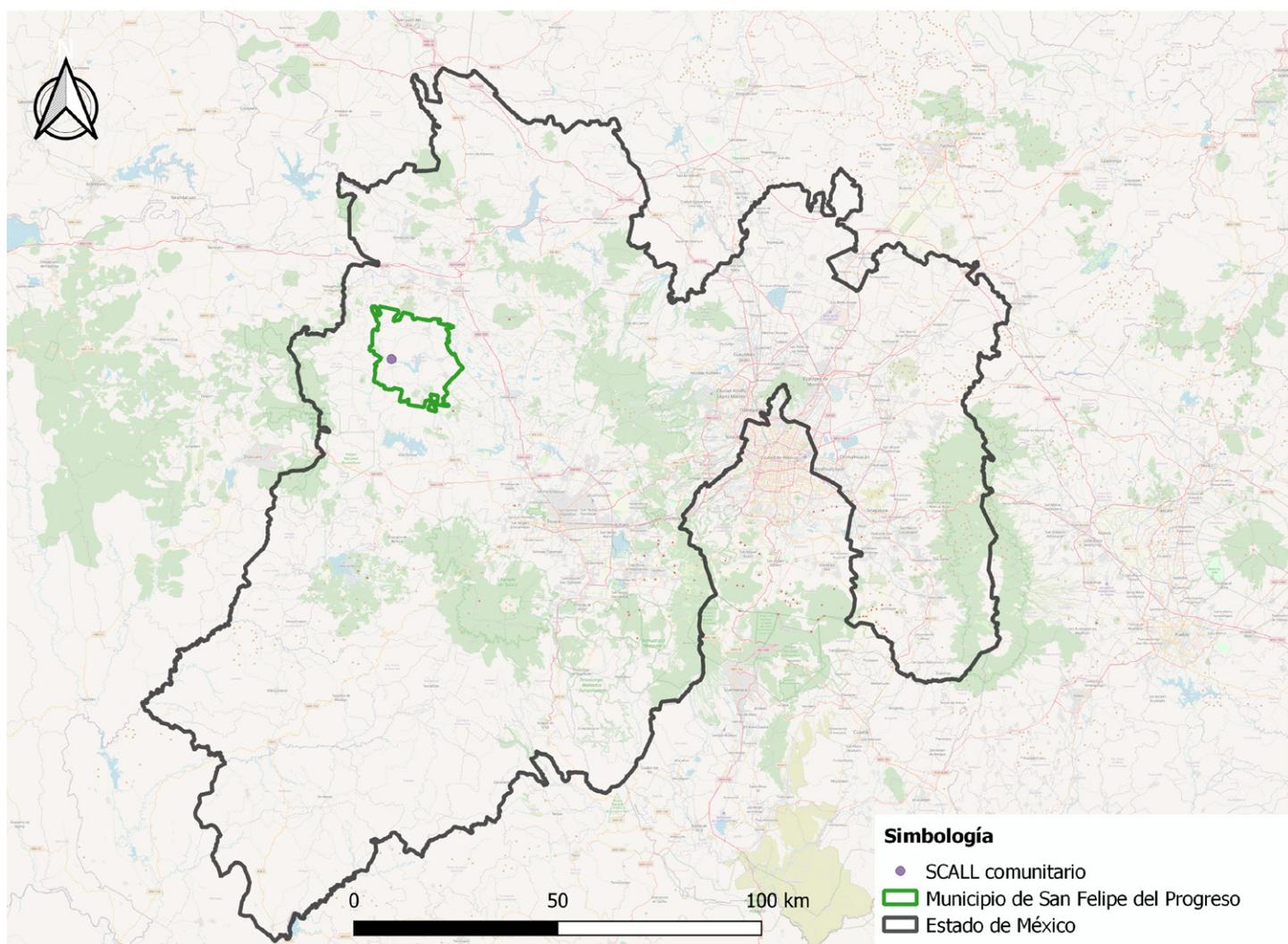
MACRO Y MICRO LOCALIZACIÓN

En el año 2006, el grupo académico del Colegio de Postgraduados diseñó y dirigió la habilitación del primer Sistema Comunitario de Captación del Agua de Lluvia (SCALL) para consumo humano en México. El sitio seleccionado para establecer el SCALL se localizó en la ranchería La Soledad, ubicada en la zona poniente del municipio de San Felipe del Progreso, estado de México, en las coordenadas geográficas 19°38'55.91" latitud N y 100° 2'0.17" longitud O (Figura 1), en una zona catalogada como de baja susceptibilidad a la inestabilidad de laderas, generación de flujos, hundimientos y deslizamientos (CENAPRED, 2020).

El Sr. Wilfrido Garduño cedió en comodato una superficie de una hectárea para establecer el proyecto SCALL en una ladera erosionada e improductiva, con una pendiente del 15%.

Figura 1.

Ubicación del SCALL comunitario de los Mazahua.



METODOLOGÍA

El SCALL se diseñó para una población de 2600 habitantes, con una dotación diaria de agua para consumo humano de 2,4 litros, de acuerdo a la recomendación de la Organización Mundial de la Salud, lo que supone 187,2 m³ de agua al mes. El área de captación fue una ladera desprovista de vegetación con una superficie de 4067 m², la cual fue recubierta

con geomembrana de PVC de 1,2 mm con el objeto de lograr un coeficiente de escurrimiento de 0,9 (Figura 2). Para disminuir la presencia de sólidos en la cisterna de almacenamiento se habilitó un sedimentador de 242 m³ y se construyó una cisterna para el almacenamiento del agua de lluvia de 3500 m³.

Figura 2.

Vista lateral del SCALL comunitario Mazahua.



De acuerdo a la metodología del Programa de Captación del agua de lluvia del Colegio de Postgraduados, el primer paso, una vez definido el uso y la demanda de agua, fue realizar el análisis de la precipitación pluvial mensual histórica (Figura 3). En este análisis se consideró la lluvia como potencialmente aprovechable (Precipitación Pluvial Neta, PPN) a aquella mayor a 40 mm mensuales (línea roja punteada). Para este proyecto, el cálculo de la PPN consideró una eficiencia de captación del 85%

y un coeficiente de escurrimiento de 0,9, asignado a materiales como la geomembrana de PVC (Anaya, 2011; FAO, 2013; Anaya, 2020). Cabe mencionar que de mayo a octubre, la calidad del agua de lluvia es muy alta, debido a que la atmósfera se encuentra limpia y libre de contaminantes atmosféricos, lo cual lleva a la recomendación de iniciar la captación y aprovechamiento del agua de lluvia a partir del mes de mayo, en la región de las poblaciones de origen Mazahua.

Figura 3.

Gráfica de precipitación pluvial mensual histórica en San Felipe del Progreso, Estado de México



El sedimentador y la cisterna de almacenamiento fueron recubiertos con geomembrana de PVC de 1,5 mm en piso y paredes, para evitar las pérdidas de agua por filtración y techados con geomembrana de PVC de 1,2 mm para evitar la evaporación (Juan, 2006), además del menor tiempo de instalación. Hernández (2005) menciona que una cisterna recubierta con geomembrana resulta de cuatro a cinco veces menos costosa que una de concreto.

Planta purificadora del agua de lluvia

Para garantizar agua segura a la comunidad Mazahua, se instaló una planta purificadora en un local de 100 m² (Figura 4). El tren de tratamiento se definió una vez realizado el análisis de calidad de varias muestras de agua de lluvia en la zona y con base en la NOM-127-SSA1-1994, que establece los límites permisibles de calidad y los tratamientos de potabilización y purificación del agua para uso y consumo humano. Los valores fuera de la norma los presentaron los TDS, dureza y turbidez, por lo que se seleccionó un sistema que contara con equipo de suavización y ósmosis inversa (Juan, 2006).

La planta purificadora se diseñó con una capacidad de abastecimiento para 6 000 habitantes con una dotación de 2,4 litros por día, pero inicialmente trabajó a un 41% de su capacidad; 328 garrafones de 19 litros por turno de ocho horas, mensualmente 9853 garrafones, equivalentes a 187 m³ de agua de lluvia purificada (Juan, 2006).

Figura 4.

Vista frontal de la purificadora del agua de lluvia y garrafones con etiqueta para su distribución, con la marca Mazahua.



Análisis económico

El costo de habilitación del SCALL comunitario fue de dos millones de pesos. El costo de los sistemas de captación es alto por la inversión inicial, pero se compensa por el bajo costo por metro cúbico de agua (López, 2017). Considerando una amortización a 10 años, el costo sería de \$200.000/año y solamente de \$77/persona/año.

El estudio económico de la planta purificadora se presenta a continuación (Juan, 2006):

Los costos de producción sumaron \$375 585,00, los gastos de administración y ventas correspondieron a los sueldos de un chófer, un ayudante y un contador, así como los gastos de papelería ascendieron a \$169 635,00. Por lo tanto para el año cero se tendrían costos totales de \$545 220,00, considerando 102 336 garrafones en el año, el precio del garrafón de 19 litros sería de \$5,33.

La inversión inicial se calculó en \$1 413 435,92, considerando \$1 241 435,92 de activos fijos (maquinaria y equipo, equipo de distribución, equipo de oficina, obra civil, garrafones e imprevistos) y \$172 000,00 de activos diferidos (elaboración de estudios y proyecto, constitución de la empresa y contratos por el servicio de energía eléctrica). De acuerdo al cálculo de depreciación y amortización se estimaron cinco años para recuperar la inversión inicial.

Respecto al capital de trabajo, la cantidad mínima que se necesitaría para iniciar la producción de agua de lluvia purificada en un total de \$94 262,66, considerando garrafones, envases, sellos, etiquetas para el primer mes de labores y gastos en electricidad, materiales indirectos, mano de obra, distribución y servicios. Con el cálculo del punto de equilibrio se estimó que la planta purificadora alcanza su punto de equilibrio con un volumen de producción del 41% de su capacidad, equivalente a \$499 524,68 en ventas.

El análisis económico con inflación y una producción constante hasta el quinto año y a los costos de producción se propuso un precio de venta de \$11 pesos el garrafón de 19 litros de agua purificada, teniendo un VNP (Valor Presente Neto, $i=8.0$ equivalente a cetes a 28 días y un 4% al riesgo) de \$913 919.20 indicando

que el proyecto es viable, además la TIR (Tasa Interna de Retorno) > TMAR (Tasa Mínima Aceptable de Rendimiento) lográndose pagar la inversión total de activos en el cuarto año de instalación.

Manejo y empoderamiento del SCALL

El SCALL se habilitó con un enfoque social, de impacto comunitario, la limpieza del área de captación y el lavado del sedimentador y cisterna de almacenamiento se realizan periódicamente, a través de faenas con la participación de hombres, mujeres y jóvenes.

Figura 5.

Mantenimiento del área de captación del agua de lluvia, con trabajo comunitario.



Desde que inició la construcción del SCALL se mantuvo constante comunicación con los representantes de las comunidades, así como talleres de participación comunitaria (Figura 6); la administración del SCALL fue determinada en una de estas sesiones por comités.

Figura 6.

Taller de participación comunitaria en la planta purificadora Mazahua.



Calidad del agua de lluvia

La calidad del agua purificada se mantiene con el monitoreo periódico de la Secretaría de Salud. Todos los parámetros evaluados indican valores muy bajos, comparados con los límites establecidos por la NOM-127-SSA1-1997, «Salud ambiental, agua para uso y consumo humano-límites permisibles de calidad y tratamientos a que debe someterse el agua para su potabilización».

La Tabla 1 se compara la calidad del agua de lluvia con los parámetros que establece la norma.

A partir de este proyecto de carácter detonador, se establecieron proyectos productivos en huertos de traspatio y producción de hortalizas bajo invernadero con sistema de riego con agua de lluvia, cisternas familiares de ferrocemento para proveer de agua potable a las familias; además, obras de conservación de suelo y agua para el mejoramiento del entorno ecológico, económico y la integración social. Estos proyectos se llevaron a otras entidades federativas (Guerrero, Oaxaca, Chiapas y Campeche).

Impacto social, cultural y ambiental

Martínez (2016) concluyó en su estudio Sistemas de captación y aprovechamiento de agua de lluvia y nivel de conciencia ambiental en la comunidad Mazahua que las actitudes, preocupación y acciones

pro-ambientales de familias beneficiadas con SCALL se desarrollaron después de la intervención de la Fundación Pro Zona Mazahua con el proyecto y prototipos de SCALL en las comunidades de San Felipe del Progreso, San José del Rincón y Acambay, del estado de México.

La comunicación jugó un papel importante para esta trascendencia, debido a que la mayoría de las familias beneficiadas tienen la confianza de preguntar a los técnicos de la Fundación sobre alguna duda acerca de su SCALL.

Se evidenció el desarrollo de mayores conocimientos acerca de la calidad y uso del agua de lluvia, además de demostrar tener mayor interés en cuidar el medio ambiente, no solamente a nivel de ideas y creencias, si no también a nivel de actitudes y acciones ambientales. Como menciona Sadd (2000), el simple proceso de incorporar nueva tecnología en un entorno trae consigo un proceso de aprendizaje, el cual fue aprovechado por las familias beneficiadas gracias a la intervención de los técnicos de la Fundación, que no solamente instruyeron a los habitantes al uso del SCALL, sino que además los habitantes se empoderaron de los proyectos y se apropiaron del concepto del entorno ecológico; lo anterior reforzó la cosmovisión de pueblos originarios en relación al agua y el cuidado de la Madre Tierra.

Este proyecto SCALL es pionero a nivel internacional, ya que considera la captación y aprovechamiento del agua de lluvia, en primera instancia para consumo humano, lo cual permite que el SCALL tenga un gran impacto social, cultural, técnico y ambiental

en comunidades con alta vulnerabilidad social, haciéndolo recomendable para diversas regiones donde las comunidades originarias indígenas sufren la escasez de este vital líquido.

Tabla 1.

Parámetros del agua de lluvia y valores guía de la OMS, para agua potable.

Parámetros	Unidades	Lluvia muestra (México)	OMS
Límites de calidad			Valores guía
Año		2015	1995
Organismos Coliformes totales	UFC/100ml (NMP/100ml)	17	0
E coli o coliformes fecales u organismos termotolerantes	UFC/100ml (NMP/100ml)	2	0
Color	UC Pt/Co	<1	15
Olor	Agradable	Agradable	sin
Sabor	Agradable	Agradable	-
Turbiedad	UTN	<1	5
Aluminio	mg/l	0.035	0.2
Arsénico	mg/l	0.002	0.05
Bario	mg/l	0.009	0.7
Cadmio	mg/l	<0.0048	0.005
Cianuro (como CN ⁻)	mg/l	<0.02	0.07
Cloro residual libre	mg/l	nd	0.2-1.5
Cloruro (como Cl ⁻)	mg/l	<2	250
Cobre	mg/l	<0.16	2
Cromo total	mg/l	<0.0052	0.05
Dureza (CaCO ₃)	mg/l	2	500
Fierro	mg/l	1.06	0.3
Fluoruros	mg/l	<0.2	1.5
Manganeso	mg/l	<0.74	0.15
Mercurio	mg/l	<0.001	0.001
Nitratos (como N)	mg/l	0.37	10
Nitritos (como N)	mg/l	2.39	0.05
Ph (Potencial de hidrógeno)	Unidad	6.39	6.5-8.5
Plomo	mg/l	0.005	0.025
Sodio	mg/l	0.298	200
Sólidos disueltos totales	mg/l	<23	1000
Sulfatos (como SO ₄ ⁼)	mg/l	<5	400
Sustancias activas al azul de metileno (SAAM)	mg/l	0.22	0.5
Zinc	mg/l	<0.16	5

Fuente: Hernández, B.R.M (2016) citada en Anaya (2017)

CONCLUSIONES

Los talleres de capacitación, con participación comunitaria sobre los proyectos SCALL, conllevan al empoderamiento por parte de la comunidad, sobre todo cuando es aceptada y evaluada como un proyecto de gran trascendencia para el desarrollo integral de la población y mejoramiento del entorno ecológico.

Los SCALL promueven el acceso al agua segura, motor de desarrollo que induce el regreso de aquellos pobladores que emigraron a los Estados Unidos de América y otros países, por falta de agua, alimentos y recursos económicos.

Los SCALL son altamente competitivos, satisfacen la demanda de agua en cantidad, calidad y en forma continua, lo cual repercute en el desarrollo sostenible de las comunidades rurales originarias con alta vulnerabilidad social

Es recomendable que los países de Iberoamérica establezcan programas nacionales sobre captación y aprovechamiento del agua de lluvia, para diversos usos (consumo humano, uso doméstico, producción agropecuaria en traspatio, producción agrícola en condiciones de temporal, recarga de acuíferos y uso industrial).

REFERENCIAS

Anaya, G.M. 2011. *Captación del agua de lluvia: solución caída del cielo*. Biblioteca básica de agricultura. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, Estado de México. 130 pp.

Anaya, M. G. 2017. *Aprovechamiento del agua de lluvia. Calidad, cantidad y abastecimiento continuo para diversos usos*. bba Biblioteca Básica de Agricultura. Colegio de Postgraduados, Texcoco, México.

Anaya, G.M., et al. 2020. *Aguas atmosféricas. Fuente alternas para diversos usos en Iberoamérica*. Colegio de Postgraduados. Montecillo, Texcoco, México, 216 pp. 20/08/202. <http://www.captaciondelluvia.org/wp-content/uploads/2021/03/Aprovechamiento-de-las-aguas-atmosf%C3%A9ricas-como-fuentes-alternas.pdf>

Consejo Estatal para el Desarrollo Integral de los Pueblos Indígenas (2020). *Estadística*. Secretaría de Desarrollo Social del Estado de México. 09/08/2021 <https://cedipiem.edomex.gob.mx/estadistica>

FAO, (Organización de las Naciones Unidas para la Alimentación y la Agricultura). 2000. *Manual de captación y aprovechamiento del agua de lluvia experiencias en América Latina*. <http://www.fao.org/3/ai128s/ai128s00.pdf>

FAO. 2013. *Captación y almacenamiento de agua de lluvia. Opciones técnicas para la agricultura familiar en América Latina y el Caribe*. Santiago, Chile. 272 pp.

Hernández, M. F. 2005. *Captación de agua de lluvia como alternativa para afrontar la escasez del recurso. Manual de capacitación para la participación comunitaria*. GEM TIES

cuencas sanas y modos de vida sustentable. Series de manuales de capacitación. 21 pp.

INEGI (2013). *Panorama sociodemográfico de México*. Censo de Población y Vivienda 2020. <https://www.inegi.org.mx/app/biblioteca/ficha.html?upc=702825197889>

Juan, M. J. 2006. *Captación y purificación de agua de lluvia para consumo humano*. Tesis para obtener el título de Maestría en Ciencias, Colegio de Postgraduados. 97pp.

Mazabel y Mendoza. 2012. *Diversidad cultural y gestión del agua: lecciones desde una región mazahua del Estado de México*. Revista de Antropología Experimental, (12) 395-408 <http://revista.ujaen.es/huesped/rae/articulos2012/30mazabel12.pdf>

Martínez P. I. R. 2017. *Sistemas de captación del agua de lluvia y la generación de conciencia ambiental en la comunidad mazahua, Estado de México*. Tesis de Grado <http://www.captaciondelluvia.org/wp-content/uploads/2018/09/tesis.pdf>

López H. et al. 2017. *Diseño de sistemas de captación del agua de lluvia: alternativa de abastecimiento hídrico*. Revista Mexicana de Ciencias Agrícolas, vol. 8, núm. 6, agosto-septiembre, 2017, pp. 1433-1439. <https://www.redalyc.org/pdf/2631/263153306016.pdf>

Sadd, M. (2000). *Development through Technology Transfer. Creating new organisational and cultural understanding*. Ed. Intellect. USA



Amunas: infraestructura Preincaica de mejora de infiltración de agua para la seguridad hídrica de los Andes

Amunas: Pre-Inca infiltration enhancement infrastructure for Andean water security



Boris F. Ochoa-Tocachi^{*1,2,3}, Javier Antiporta^{2,4}, Juan Diego Bardales⁵, Katya Pérez², Vivien Bonnesoeur^{2,4}, Francisco Román^{2,4} Gena Gammie⁶ y Wouter Buytaert^{1,2}

1 Imperial College London, Londres, Reino Unido

2 Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA), Lima, Perú

3 ATUK Consultoría Estratégica, Luis Pasteur y Copérnico, Cuenca, Ecuador

4 Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, Lima, Perú

5 Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, Lima, Perú

6 Forest Trends, Washington DC, Estados Unidos

* boris@atuk.com.ec

Amunas: infraestructura Preincaica de mejora de infiltración de agua para la seguridad hídrica de los Andes

RESUMEN

En los Andes tropicales, las culturas preincaicas desarrollaron tecnologías de Siembra y Cosecha de Agua basadas en la naturaleza para manejar riesgos asociados a largas estaciones secas y sequías en climas naturalmente extremos. Estas tecnologías están ganando atención en los últimos años como parte de soluciones potenciales para la seguridad hídrica. Sin embargo, aún la evidencia científica acerca de sus posibles contribuciones hidrológicas a escala de cuenca es limitada. En este estudio presentamos los resultados de la evaluación de un sistema ancestral de Siembra y Cosecha de Agua, conocido como amunas, de 1400 años de antigüedad. Las amunas son sistemas de mejoramiento de infiltración de agua en los suelos, que se utilizan para desviar agua de arroyos en las cabeceras de cuencas de montaña sobre sus laderas durante la estación de lluvias, con el fin de mejorar el rendimiento hídrico y la longevidad de manantiales naturales ubicados pendiente abajo. Encontramos que el agua infiltrada es retenida durante un promedio de 45 días antes de resurgir a la superficie, lo cual confirma la capacidad del sistema para contribuir a los caudales de la estación seca. También, modelamos el potencial de escalar estos sistemas hacia las cabeceras de cuenca de la ciudad de Lima, y encontramos que esto podría desviar y retardar potencialmente $99 \times 10^6 \text{ m}^3$ al año de agua e incrementar los caudales de la estación seca en 7,5% en promedio. Estos efectos serían un complemento crítico para las soluciones de ingeniería gris convencionales para la seguridad hídrica de urbes metropolitanas desérticas como Lima.

Amunas: Pre-Inca infiltration enhancement infrastructure for Andean water security

ABSTRACT

In the tropical Andes, pre-Inca cultures developed nature-based Water Sowing and Harvesting practices to manage risks associated to long dry seasons and droughts in naturally extreme climates. These technologies are drawing attention recently as part as potential solutions for water security. However, the scientific evidence about their expected hydrological contributions at catchment scale is limited. In this study, we present the evaluation results of an ancient Water Sowing and Harvesting system, known as amunas, which is 1400-year-old. Amunas are soil water infiltration enhancement systems that are used to divert water from streams in the headwaters of mountain catchments to their hillslopes during the rainy season, with the aim of improving the water yield and longevity of natural springs located downslope. We found that infiltrated water is hold during an average period of 45 days before resurfacing, which confirms the capacity of the system to contribute to dry season flows. We also modelled the capacity of scaling these systems to headwaters of the catchments that supply water to Lima and found that they could potentially deviate and delay up to $99 \times 10^6 \text{ m}^3 \text{ yr}^{-1}$ of water and increase dry season flows in 7.5% on average. These effects would be a critical complement to conventional grey engineering-based solutions for water security in dessert metropolitan cities such as Lima.

INTRODUCCIÓN

La fuente de agua para la región costera del Perú, incluyendo Lima, proviene de los ríos andinos, los cuales se caracterizan por tener un régimen muy estacional de caudales. Esto implica grandes déficits de agua durante la estación seca y excedentes durante la estación de lluvias que no son fácilmente captados y almacenados. Por ejemplo, Lima experimenta actualmente un déficit de agua de aproximadamente 43 millones de metros cúbicos durante la estación seca (mayo a noviembre), y depende de una capacidad de almacenamiento artificial total de aproximadamente 330 millones de metros cúbicos. Además, el recurso hídrico existente está sometido a un fuerte estrés producto de la creciente variabilidad del clima, el cual es multiplicado por el efecto de actividades humanas, en particular la degradación del suelo y los cambios de uso de la tierra (Ochoa-Tocachi et al., 2016, Bonnesoeur et al., 2019).

La fuente de agua para la región costera del Perú, incluyendo Lima, proviene de los ríos andinos, los cuales se caracterizan por tener un régimen muy estacional de caudales.

Esta situación exige que se replanteen las estrategias actuales para incrementar la seguridad hídrica. Las limitaciones de las soluciones convencionales basadas en infraestructura «gris», como presas y reservorios artificiales, se están haciendo evidentes: implican inversiones a largo plazo, con costos altos e irrecuperables y requieren de planificación e implementación complejas. Además de ello, las incertidumbres en las proyecciones futuras de lluvia y disponibilidad hídrica complican el diseño de grandes infraestructuras fijas con una vida útil prolongada.

Frente a ello, hay mayor interés por el aprovechamiento de la infraestructura natural, incluyendo la implementación de Soluciones Basadas en la Naturaleza o la llamada infraestructura «verde». Estas intervenciones pueden ser implementadas gradualmente, ajustadas después de su implementación, y pueden brindar varios beneficios que las hacen compatibles con la adaptación al

cambio climático. En este sentido, los resultados que se describen en la investigación “Contribuciones potenciales de la infraestructura preincaica de infiltración de agua para la seguridad hídrica en los Andes” (Ochoa-Tocachi et al., 2019) muestran que el desarrollo de alternativas que integran elementos de prácticas ancestrales, modernas, y Soluciones Basadas en la Naturaleza pueden salvaguardar la seguridad hídrica.

La adopción de Soluciones Basadas en la Naturaleza es particularmente alta en Latinoamérica, con intervenciones en cuencas y esquemas de protección de fuentes de agua naturales que buscan optimizar la variedad de servicios ecosistémicos de manera flexible y rentable. No obstante, la evidencia cuantitativa sobre los efectos de estas intervenciones en los procesos hidrológicos es aún limitada. Esta evidencia es necesaria para incorporar estas intervenciones en una estrategia de gestión de recursos hídricos eficaz a escala de cuenca. Particularmente, los sistemas preincaicos de mejoramiento de la infiltración de agua están recibiendo cada vez mayor atención por parte de organizaciones conservacionistas y por responsables de formulación de políticas. A estos sistemas se les conoce localmente como «mamanteo» –de amamantar– o «amunas» –palabra quechua para retener (Apaza et al., 2006; Ávila, 2012).



HALLAZGOS

La investigación estudió el efecto que pueden tener los sistemas preincaicos de infiltración de agua a dos escalas: en una comunidad de la sierra de Lima, y el potencial escalamiento de estos sistemas para toda la parte alta de la cuenca del río Rímac que abastece de agua a la ciudad de Lima.

Uno de los últimos sistemas preincaicos de infiltración de agua que aún se conservan está ubicado en la comunidad agropastoril de Huamantanga (Provincia de Canta), sobre una elevación de 3300 m.s.n.m., en los Andes Centrales peruanos (Gutiérrez, 2018). La comunidad depende de los caudales estacionales de las quebradas para sus actividades de sustento

locales que consisten en la crianza de ganado para la producción de queso y la agricultura con riego para subsistencia. El sistema de infiltración consiste en captar agua durante la estación de lluvias (por encima de los 3800 m.s.n.m.) usando acequias y canales para llevarla hasta zonas previamente identificadas donde se infiltra en el suelo. Al ingresar al suelo, el agua se desplaza lentamente para aflorar posteriormente en manantiales (ojos de agua o puquios) y arroyos, pendiente abajo. El agua retardada por un tiempo de retención subsuperficial más prolongado incrementa el rendimiento y permanencia de los manantiales durante los meses secos.

Figura 1.

Modelo conceptual del sistema preincaico de mejoramiento de infiltración de aguas. Características del sistema: canales de enrutamiento (1 y 2), canales de infiltración (3 y 4), laderas de infiltración (5), manantiales (6), y balsas (7). Los puntos de inyección (IT) y de muestreo (MT) de trazadores están marcados de manera esquemática en el diagrama.

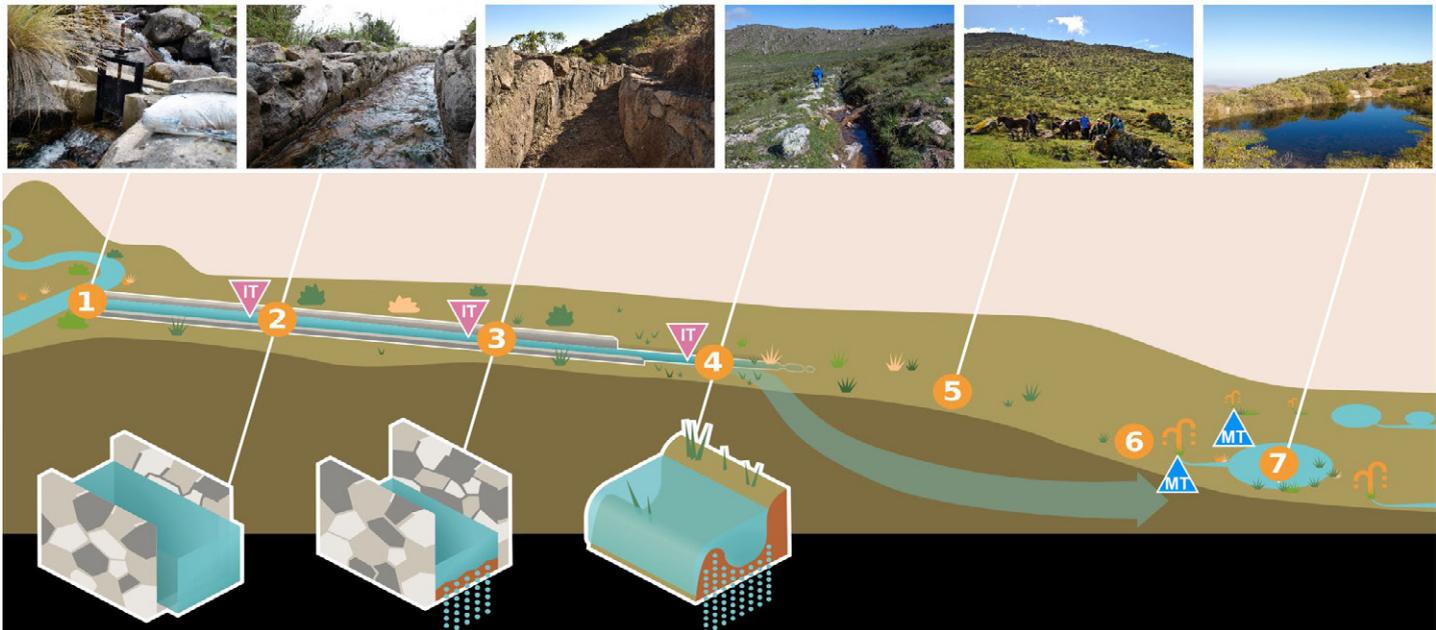


Figura 2.

Elementos del sistema de amunas.



Canales de enrutamiento



Canales de infiltración



Laderas de infiltración



Manantiales



Balsas

El sistema preincaico de infiltración de agua en la comunidad de Huamantanga está diseñado para incrementar el agua disponible para riego durante la estación seca y consta de los siguientes elementos (Figura 2);

Canales de enrutamiento: estructuras de dos tipos: (1) canales largos que desvían los caudales de quebradas hacia canales de infiltración y laderas, y (2) canales cortos que direccionan el agua excedente hacia balsas u otros cursos de agua abajo.

Canales de infiltración: transportan el agua hacia las laderas de infiltración, permitiendo de manera simultánea la infiltración hacia el subsuelo.

Laderas de infiltración: áreas rocosas o pedregosas que reciben agua de los canales, distribuyéndola en el campo, usando efectivamente el suelo como un reservorio natural de agua, y a la vez retardando su salida.

Manantiales: o manantes, que generalmente se forman de manera natural y cuyos volúmenes son acrecentados por el agua infiltrada que sale nuevamente a la superficie.

Balsas: cuerpos de agua pequeños (cada uno con un volumen aproximado de 300 metros cúbicos) que se emplean para regular el flujo de agua a través del sistema de infiltración. Sirven para dos propósitos: (1) almacenar agua para el acceso directo, (2) e incrementar aún más la infiltración de agua subsuperficial.

Durante la investigación se inyectó un trazador colorante en un canal de enrutamiento e infiltración aguas arriba y se monitoreó su aparición o resurgencia en manantiales aguas abajo, usando muestreadores de carbón activado. El experimento reveló una clara conectividad hidrológica entre el canal y los manantiales, con un tiempo de retención medio del trazador colorante que varía entre 2 semanas y 8 meses, con un promedio de 45 días. Estos resultados muestran que el sistema puede almacenar agua durante la estación de lluvias de manera eficiente

y recuperarlo durante parte de la estación seca, y se encontró que el sistema de infiltración en Huamantanga puede incrementar el caudal natural de los cursos de agua en la estación seca entre 3% y 554%.

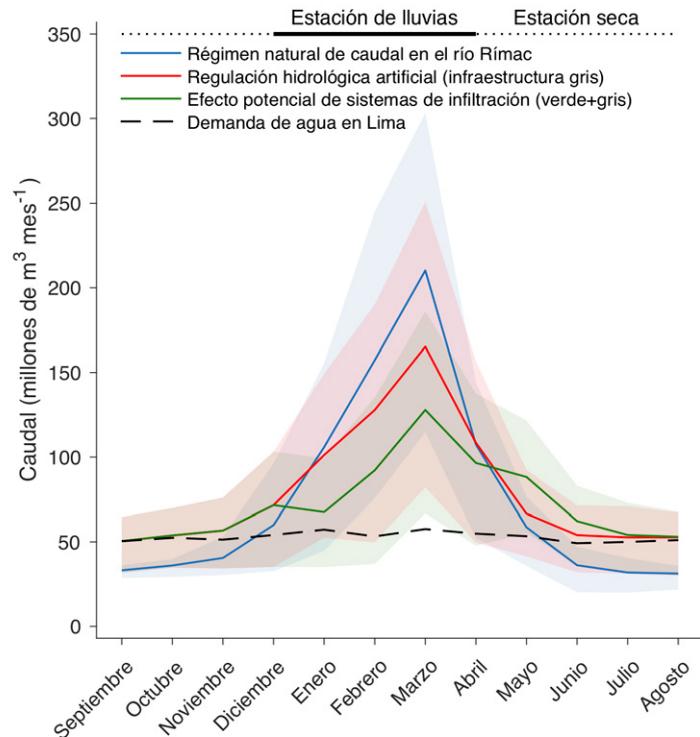
Sin embargo, para la escala de una ciudad como Lima, este sistema sigue siendo pequeño. Es por esto que este estudio continuó con investigar el efecto que se tendría al replicar o escalar este tipo de sistemas en las principales áreas de fuentes de agua para Lima, en la cuenca hidrográfica del río Rímac. La Figura 2 muestra el régimen de caudal del río Rímac, representado a través de líneas (caudal promedio) y de áreas sombreadas (variabilidad interanual usando los percentiles 5 y 95 de caudales mensuales). La línea negra entrecortada representa la demanda de agua total de agua en la ciudad de Lima (aproximadamente 50 millones de metros cúbicos por mes).

En el periodo comprendido entre 1921 y 1960, el río Rímac no tenía ningún tipo de infraestructura hidráulica para captación o almacenamiento de agua. Esto se ve representado en que su régimen hidrológico natural (línea azul) tiene picos de caudal altos en la temporada de lluvias y caudales base bajos en la temporada seca.

Desde 1960, se comenzó a construir infraestructura gris en la cuenca a través de presas, reservorios, trasvases y otros tipos de obras civiles. El efecto de esta infraestructura gris se observa en cambios en la regulación hidrológica de la cuenca (línea roja), es decir, reducción del excedente de agua en la estación húmeda e incremento de caudal en la estación seca (Figura 2). El efecto potencial de escalar la infraestructura preincaica de infiltración de agua se ha combinado con el efecto de la infraestructura gris existente (línea verde). Los excedentes de caudal durante los meses de lluvia pueden ser desviados hacia sistemas de infiltración, los cuales liberarían el agua lentamente, haciéndola disponible durante los meses de la estación seca aguas abajo.

Figura 3.

Contribuciones potenciales de la infraestructura preincaica de infiltración para el abastecimiento de agua de Lima.



Límites de políticas actuales

¿Qué significa esto para la seguridad hídrica? La restauración de un canal de infiltración en Huamantanga ha aumentado el interés en la infraestructura natural para la seguridad hídrica en la región. Los resultados de la investigación muestran que la revaloración del conocimiento indígena, sus prácticas y sistemas, puede complementar opciones de ingeniería para contribuir al principal desafío de abastecer de agua a grandes poblaciones urbanas en ambientes hidrológicamente variables y áridos; con ello mejorar su seguridad hídrica y su resiliencia climática.

La ley sobre Mecanismos de Retribución por Servicios Ecosistémicos (Ley No. 30215, 2014), emitida por el Ministerio del Ambiente de Perú, brinda el marco legal y establece intervenciones permisibles en las cuencas hidrográficas.

También coloca especial énfasis en la integración del conocimiento científico e indígena, que incluye la rehabilitación de infraestructura de Siembra y Cosecha de Agua como los sistemas de infiltración descritos.

También coloca especial énfasis en la integración del conocimiento científico e indígena, que incluye la rehabilitación de infraestructura de Siembra y Cosecha de Agua como los sistemas de infiltración descritos. Por esta razón, la Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento de Perú, SUNASS, actualmente está incentivando y apoyando los servicios de agua pública de Lima y otras ciudades para complementar la infraestructura de ingeniería tradicional con soluciones basadas en la naturaleza para la protección de fuentes de agua naturales. Los servicios de agua en el Perú han respondido con el diseño y la implementación de una cartera de intervenciones en cuencas que está financiada por una tarifa de agua regulada por la SUNASS.

Esto ha dado lugar a una creciente necesidad de cuantificar los beneficios hidrológicos potenciales de estas prácticas e identificar explícitamente a los beneficiarios como un prerrequisito para combinar la infraestructura gris y verde, y para optimizar la relación costo-beneficio en el contexto del abastecimiento de agua y la resiliencia a sequías. Dados los niveles actuales de estrés hídrico en la cuenca, las cantidades estimadas representan una contribución crítica para el abastecimiento de agua de Lima y otras ciudades costeras. El incremento del caudal base durante la estación seca puede hacer que la infraestructura civil existente sea más eficiente e incrementar su capacidad para amortiguar períodos cortos de sequía. Esto podría permitir satisfacer una mayor demanda de agua con la misma infraestructura. Además, en este estudio se asumió una tasa de recuperación de solamente un 50%, pero esta podría ser mayor a escala regional, en comparación con la escala local, dado que parte del agua puede volver a salir a la superficie posteriormente aguas abajo y recargar los acuíferos en la costa que podrían ser explotados.

CONCLUSIONES

Nuestros resultados confirman que el sistema mejora eficazmente la infiltración de agua en las laderas de las cuencas andinas para alcanzar manantiales aguas abajo. Estimamos un tiempo de retención medio de 45 días, con un rango de entre 2 semanas y 8 meses, lo cual muestra que el sistema puede ser utilizado para incrementar la disponibilidad hídrica a escala comunitaria durante la estación seca.

Estos efectos son los que buscaban los habitantes ancestrales de estas comunidades con su uso original, el cual es ampliar la estación húmeda exitosamente y permitir un periodo de producción agrícola más prolongado para los agricultores locales. Sin embargo, su potencial para mejorar el abastecimiento de agua a escala regional era hasta ahora desconocido.

Consideramos que es posible escalar estos sistemas, que normalmente son utilizados a escala local, para abarcar áreas mayores y producir impactos a escala regional. Esta réplica o escalamiento tiene varios desafíos, incluyendo el social. Los sistemas preincaicos de siembra y cosecha de agua que han sobrevivido, lo han hecho porque han estado conectados a las tradiciones de las comunidades locales. El escalamiento de estos sistemas no puede ser solamente a nivel de la infraestructura física, sino además de las dinámicas sociales que estos representan.

Estimamos que escalar estos sistemas en el río Rímac para dotar de agua a Lima, puede desviar e infiltrar aproximadamente el 35% del caudal de la estación húmeda de toda la cuenca del río Rímac (198 millones de metros cúbicos por año), recuperando 99 millones de metros cúbicos por año aguas abajo, lo cual incrementaría los volúmenes de caudal durante la estación seca de la cuenca en 7,5% en promedio y en hasta 33% durante los primeros meses secos.

Para ser más efectivos, estos sistemas deben ser combinadas con otras soluciones de almacenamiento clásicas de ingeniería para incrementar la seguridad hídrica para los usuarios rurales y urbanos aguas abajo. Tal combinación puede incrementar su relación costo-beneficio y el rendimiento, particularmente, para superar episodios más largos de sequía.

Los sistemas de infiltración tendrán que ser parte de una estrategia de gestión de agua más integral. Ello incluye la conservación de pastizales y rotación de ganado, protección de cabeceras, prácticas de Siembra y Cosecha de Agua, construcción de terrazas en zonas climáticas más bajas para agricultura sostenible y control de la erosión, acueductos para extraer y transportar agua subterránea en la región costera y sistemas de irrigación con canales de tierra para incrementar la recarga de los acuíferos y promover la eficiencia en el uso de agua.

Es necesario evidenciar la importancia de la valorización del conocimiento y prácticas tradicionales y la gran brecha de conocimiento en este tema que aún

existe. Se debe solventar la necesidad de continuar realizando investigaciones similares a la realizada en este estudio con investigación de monitoreo clave en zonas de fuentes de agua. Un ejemplo claro de esto es la Iniciativa Regional de Monitoreo Hidrológico de Ecosistemas Andinos (iMHEA) (Ochoa-Tocachi et al., 2018).

Dada la presión actual del estrés hídrico, este estudio brinda la evidencia científica necesaria para escalar la infraestructura ancestral, cuestionando así la preconcepción de que las tradiciones de manejo de agua local están desactualizadas y reforzando el aprovechamiento de la infraestructura natural para la seguridad hídrica.

REFERENCIAS

Ávila, J. 2012. *El Sistema de Infiltración Hídrica para el Mamanteo de Huamantanga*. Alternativa NGO.

Apaza, D., Arroyo, R. and Alcencastre, A. 2006. *Las Amunas de Huarochirí, Recarga de Acuíferos en los Andes. Gestión Social del Agua y Ambiente en Cuencas*.

Bonnesoeur, V., Locatelli, B., Guariguata, M.R., Ochoa-Tocachi, B.F., Vanacker, V., Mao, Z., Stokes, A., Mathez-Stiefel, S.-L. 2019. Impacts of forests and forestation on hydrological services in the Andes: A systematic review. *Forest Ecology and Management*, 433, 569–584. <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.11.033>

Gutiérrez, O. F. 2018. *Huamantanga: Tierra Fecunda, Heroica y Legendaria*. Orlando Francisco Gutiérrez Reymundo.

Ochoa-Tocachi, B.F., Bardales, J.D., Antiporta, J., Pérez, K., Acosta, L., Mao, F., Zulkafli, Z., Gil-Ríos, J., Angulo, O., Grainger, S., Gammie, G., De Bièvre, B. and

Buytaert, W. 2019. Potential contributions of pre-Inca infiltration infrastructure to Andean water security. *Nature Sustainability*, 2, 584–593. <https://doi.org/10.1038/s41893-019-0307-1>

Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., De Bièvre, B., Célleri, R., Crespo, P., Villacís, M., Llerena, C.A., Acosta, L., Villazón, M., Gualpa, M., Gil-Ríos, J., Fuentes, P., Olaya, D., Viñas, P., Rojas, G., Arias, S., 2016. Impacts of land use on the hydrological response of tropical Andean catchments. *Hydrological Processes*, 30, 4074–4089. <https://doi.org/10.1002/hyp.10980>

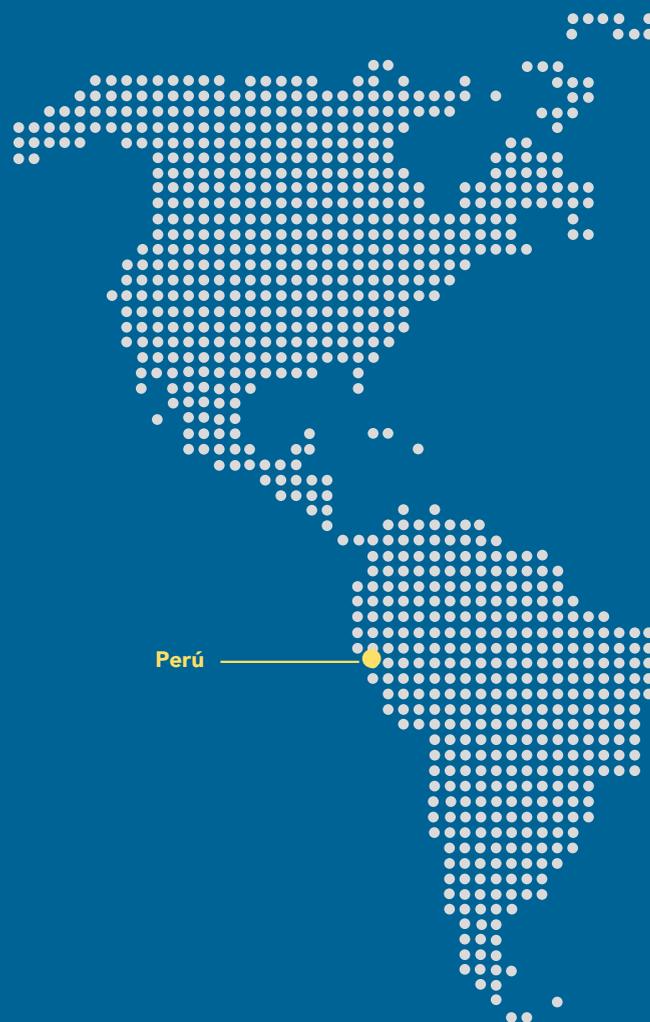
Ochoa-Tocachi, B.F., Buytaert, W., Antiporta, J., Acosta, L., Bardales, J.D., Célleri, R., Crespo, P., Fuentes, P., Gil-Ríos, J., Gualpa, M., Llerena, C., Olaya, D., Pardo, P., Rojas, G., Villacís, M., Villazón, M., Viñas, P., De Bièvre, B. 2018. High-resolution hydrometeorological data from a network of headwater catchments in the tropical Andes. *Scientific Data*, 5, 180080. <https://doi.org/10.1038/sdata.2018.80>





El estado actual de las experiencias ancestrales de siembra y cosecha del agua en Perú

The current state of the ancestral experiences of planting and harvesting water in Peru



Dimas Apaza-Idme¹, Fluquer Peña², Víctor Bustinza³, Teófilo Zamalloa⁴ y Brenda Vilca¹

- 1 Hidroandes Consultores S.A.C, Av. La Molina 2045 Sol de la Molina Lima, Dapaza@hidroandes.com.pe, Bvilca@hidroandes.com.pe
- 2 Superintendencia Nacional de Servicios de Saneamiento, Av. Bernardo Monteagudo 210-216, Magdalena del Mar – Lima; Fpena@sunass.gob.pe
- 3 Pacc Perú - Helvetas Perú, Av., Ricardo Palma 857, Miraflores – Lima; peru@helvetas.org, Bustinzavic@yahoo.com
- 4 Marenass Perú, Plaza Tamburco s/n Abancay, Apurímac - Perú; T.zamalloa@gmail.com

El estado actual de las experiencias ancestrales de siembra y cosecha del agua en Perú

RESUMEN

La Siembra y la Cosecha del Agua (SyCA) es el procedimiento mediante el cual el ser humano recolecta agua de precipitación y escorrentía para ser infiltrada en el subsuelo, para sembrarla y poder recuperarla tiempo después (cosecha), en la descarga de los manantiales, pozos, galerías y arroyos, contribuidos con agua infiltrada previamente. Este término fue acuñado en Perú, país en el que este tipo de prácticas está muy extendido entre la población local. En este trabajo se presentan algunos sistemas ancestrales de recarga de acuíferos. Se trata de cuatro experiencias de SyCA; dos localizadas en los andes centrales de Lima, practicadas en zonas de alta montaña, en acuíferos fracturados volcánicos y otras dos, en la región sur de Cuzco, desarrolladas sobre acuíferos sedimentarios y suelos clásticos de superficie. La siembra del agua practicada mediante las amunas (canales excavados en el terreno que discurren desde las laderas altas hacia los valles bajos) permiten infiltrar el agua captada durante la época de lluvias. El agua recargada surge meses después, mediante los manantiales y arroyos situados a media ladera. El tercer caso, se ubica en la cuenca Checa - Descanso, en la Región de Canas - Cuzco, al sur del país donde se capta agua pluvial para recargar los acuíferos de subsuelo mediante qochas (pequeñas lagunas que retienen agua de escorrentía mediante la construcción de unos diques de cierre, con el objeto de almacenar agua y aumentar la recarga del acuífero). Por último, en la región de Espinar - Cuzco, una altiplanicie rodeada por montañas donde afloran acuíferos detríticos superficiales, se practica un sistema de SyCA en el que se combinan atajos o atajados, (diques de piedra y tierra que se construyen perpendicularmente al flujo de los cauces con caudal intermitente). Todos estos sistemas de SyCA, probablemente preincaicos e incaicos, han sido recuperados e investigados por entidades estatales e instituciones privadas de Perú, destacando un planteamiento hidráulico similar al de otros sistemas de SyCA remotos, como es el caso de las acequias de careo de Sierra Nevada, en España.

The current state of the ancestral experiences of planting and harvesting water in Peru

ABSTRACT

The Water Sowing and Harvesting (WS&H) is the procedure in which the human being collects precipitation and runoff water to be infiltrated into the subsoil, to sow it and be able to recover it later (harvest), in the discharge of the springs, wells, galleries and streams, contributed with previously infiltrated water. This term was coined in Peru, a country in which this type of practice is widespread among the local population. In this work, presents some ancestral aquifer recharge systems. These are four WS&H experiences, two located in the central Andes of Lima, practiced in high mountain areas in volcanic fractured aquifers, and two in the southern region of Cuzco practiced in sedimentary aquifers and clastic surface soils. The water sowing practiced by means of the amunas, consists of some channels dug in the ground that run from the high slopes concentrated in the low valleys, which allow the water captured during the rainy season to infiltrate. The recharged water emerges months later, through the springs and streams located in the middle of the slope. The third case, is located in the Checa - Descanso basin, in the Canas - Cuzco Region in the south of the country, this captures rainwater to recharge the subsoil aquifers through qochas, it consists of small lagoons that retain runoff water through construction closing dikes, in order to store water and increase the recharge of the aquifer. Finally, in the Espinar - Cuzco region, it is a plateau surrounded by mountains, where surface detrital aquifers surface where a WS&H system is practiced in which shortcuts or shortcuts are combined, being stone and earth dikes that are built perpendicular to the flow of the channels with intermittent flow. All these WS&H systems, probably pre-Inca and Inca, have been recovered and investigated by state entities and private institutions in Peru, highlighting a hydraulic approach similar to that of other remote WS&H systems, as is the case of the irrigation ditches in Sierra Nevada, in Spain.

ANTECEDENTES

En las regiones alto-andinas de Perú, los efectos del cambio climático ya son evidentes. Como ejemplo, la evolución temporal de la precipitación media anual en la región Cuzco, correspondiente al período 1994 – 2008, presenta una marcada pendiente negativa, a razón de -12 mm/año (SENAMHI-PACC, 2011). Por su parte, la temperatura media muestra una tendencia creciente, a razón de 0,01 a 0,04°C por año. En el período entre 1965 y 2005, la temperatura media aumentó de 0,4 a 1,6°C (SENAMHI-PRAA, 2009). Estos cambios ya están afectando al sistema productivo y a los ecosistemas de alta montaña de estas regiones. Además, al cambio climático, se añade el efecto antrópico. La degradación de praderas naturales, el sobrepastoreo e incendio de pastizales, son los factores negativos que se suman a los climáticos y que afectan de forma evidente, reduciendo la recarga natural de los acuíferos de alta montaña.

La larga tradición del culto al agua de la cultura Inca y las precedentes, y su conocimiento hidrológico e hidráulico, queda patente en sus abundantes vestigios

arqueológicos muy visitados. Son los sistemas de captación de las surgencias de las Pacchas de Tambomachay, los Andenes de Tipón, los Adoratorios de Machupicchu, los famosos acueductos y orconas de Nazca (drenes y pozos en espiral), los Waru Waru del Titicaca, los Patapatas, Qochas o Mamaqochas, Pakaquis, entre otros.

La constante preocupación de los pobladores antiguos y de los actuales, promovidos por la escasez de recursos hídricos, propiciaron el desarrollo de metodologías de recarga artificial de acuíferos, como: Amunas de Huarochiri y los Mamanteos de Huamantanga, o a la construcción de las qochas de infiltración, sistemas que hoy se vienen recuperando, replicando y poniendo en valor, como eficientes sistemas de recarga artificial de acuíferos. En este trabajo, se presentan algunas experiencias de Perú (Fig. 1), que tratan sobre la implementación de sistemas ancestrales de recarga artificial de acuíferos, practicados secularmente por los pobladores de los Andes peruanos.

Figura 1.

Situación de las zonas donde se realiza SyCA.



LAS AMUNAS DE HUAROCHIRÍ

Introducción

Las amunas son unos canales excavados en el terreno, diseñados para derivar el agua de escorrentía generada en las quebradas e infiltrarla en la parte alta de las laderas, formadas por rocas duras, para que surja tiempo después, a través de las fuentes y descargas hacia las quebradas situadas a menor altitud. Las amunas fueron desarrolladas por la cultura Inca durante el siglo XIV y algunas de ellas todavía se encuentran en funcionamiento (GSAAC, 2006). La infiltración que se produce en las amunas permite aumentar la recarga y retener mayor cantidad de agua en los acuíferos, de la que se produciría en forma natural, consiguiendo que las fuentes mantengan caudales más altos durante en la temporada de estiaje, cuando la demanda es máxima.

Uno de los sitios, donde esta técnica de Siembra y Cosecha de Agua fue aplicada es en las montañas de Huarochirí, en la cuenca alta de Lurín y Rímac, departamento de Lima (Fig. 2). Sus beneficios son reconocidos, ya que sin este sistema de manejo del agua no sería posible la agricultura de riego en la zona. Esta situación obligó a los pobladores a mantener, año tras año, una férrea organización que todavía persiste en la actualidad, el Ayllu (origen Quechua), hoy denominadas comunidades.

De forma análoga en España, los primeros proyectos de recarga ancestral se remontan a la época árabe, cuando construyeron “los careos alpujarreños” que, aún a la fecha, siguen funcionando en Sierra Nevada (Pulido y Sbih, 1996; Martos-Rosillo et al., 2019) construidos sobre afloramientos de rocas metamórficas que son rocas de baja capacidad de infiltración.

Figura 2.

Situación de las amunas de Huarochirí.



Descripción del sistema

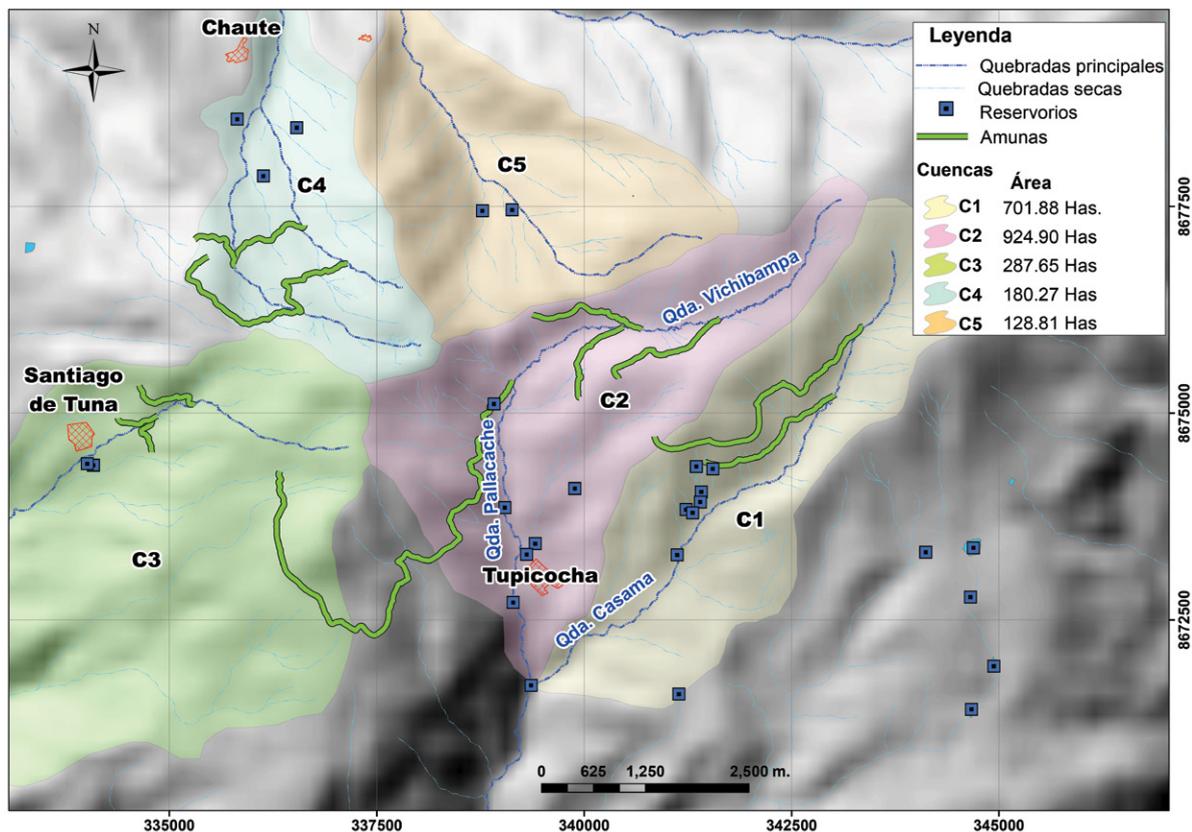
Este ancestral sistema de recarga artificial de acuíferos consiste en la captación de agua de escorrentía que discurre en los cursos intermitentes en la estación húmeda, mediante una toma que deriva el agua hacia unas zanjas (acequias) excavadas en el terreno, a nivel, que se conducen por las laderas de montaña hacia afloramientos rocosos permeables, donde se vierten para su infiltración, preferentemente en suelos pedregosos, o afloramientos de roca fracturada. Estas amunas se ubican en las partes altas de las laderas, donde se generan las escorrentías en la temporada húmeda. Las primeras lluvias restituyen la humedad del suelo y luego alimentan el flujo base superficial de los riachuelos estacionales, los que representan la fuente de suministro para las amunas. Las amunas se localizan encima de los manantiales y áreas de cultivo con riego individual o comunal, localizado en la parte

media y baja de la montaña, que aprovecha el agua infiltrada mediante las amunas y que surge tiempo después, por los manantiales con caudal permanente contribuido por esta práctica.

En la captación de agua de tormenta para las amunas se distinguen dos modalidades; la primera son captaciones parciales localizadas en las quebradas secas con crecidas frecuentes y descargas excedentes hacia el cauce natural. Se aplica en los casos de quebradas con arrastre de sólidos y gran caudal de avenida. Sin embargo, el segundo caso utiliza pequeñas cuencas o cuando el lecho del cauce es rocoso con poco arrastre de sólidos, donde se aplica la captación con azud, de manera tal que ingresa toda el agua de escorrentía. La mayoría se encuentran deterioradas y otras vienen reduciendo su longitud por falta de mantenimiento y/o discrepancias en el reparto de aguas de recarga (Fig.3).

Figura 3.

Áreas tributarias para la captación de escorrentías y longitud de las amunas.



La distribución del agua de recarga se realiza de forma progresiva en tramos de unos 100 m, que van descargando hacia laderas rocosas o pedregosas. Otra forma es descargar es al final de las acequias, en áreas permeables, mediante pequeños canales laterales de forma radial (Fig. 4), denominados “campos de extensión”. Para facilitar el paso de los animales y caminos se construyeron pequeñas canoas, a manera de puentes de piedra en arco, que se pueden observar esporádicamente.

Figura 4.

a) Bocatoma lateral en cauce, b) bocatoma de concreto, c) amunas de derivación para el vertido del agua en laderas, que se repite cada 100 m, d) reservorio



Entre las amunas más conservadas tenemos la de Chaute. Esta comunidad le da gran importancia, ya que es una de sus pocas fuentes que sostiene la producción agrícola de frutas en la región.

Atendiendo a los usos, se diferencian dos tipos de amunas: aquellas que sirven para incrementar el caudal de los manantiales para regadío, principalmente durante los meses más secos, y aquellas que garantizan el caudal de los manantiales para abastecimiento de agua potable de poblaciones como Tupicocha, Santiago de Tuna, Chillca y Chaute.

Las amunas de las montañas de Huarochirí se localizan distribuidas en cuatro quebradas contiguas, con

suficiente área de recepción para generar agua de escorrentía (Tabla 1).

Los cultivos se practican en los andenes con muro de enrocado acondicionado a la pendiente del terreno, práctica muy utilizada por la cultura Inca, que permite aprovechar eficientemente el agua de riego.

Las aguas recargadas se utilizan para abastecer pequeños sistemas de riego en ladera, con canales de piedra y reservorios circulares de tamaño variable, cuya fuente son los manantiales de descarga a diferentes niveles de la ladera. El abastecimiento doméstico se lleva a cabo mediante la captación de manantiales; muchos de ellos tienen relación directa con el agua de recarga mediante amunas.

Los cultivos se practican en los andenes con muro de enrocado acondicionado a la pendiente del terreno, práctica muy utilizada por la cultura Inca, que permite aprovechar eficientemente el agua de riego.

Caracterización hidrogeológica

Los acuíferos utilizados para la recarga mediante las amunas se desarrollaron sobre extensos afloramientos de roca volcánica: tobas andesíticas, riolitas, riolodacitas pardo amarillentas, si bien, en la parte inferior de la montaña también afloran rocas sedimentarias, y tobas volcánicas del Terciario Medio-Superior (Figura 5). Predominan las riolitas, andesitas y dioritas con una moderada capacidad de almacenamiento y constituyen un medio fisurado con flujo subterráneo por discontinuidades: fracturas, fisuras y juntas de estratificación. La capacidad transmisiva de estos terrenos está ligada a la frecuencia y la densidad de sus fracturas de dimensión centimétrica, de considerable transmisividad y capacidad de almacenamiento. En estas áreas, las surgencias se sitúan frecuentemente sobre fracturas de dirección N-S y N 60° E, con buzamiento hacia el 80° SE.

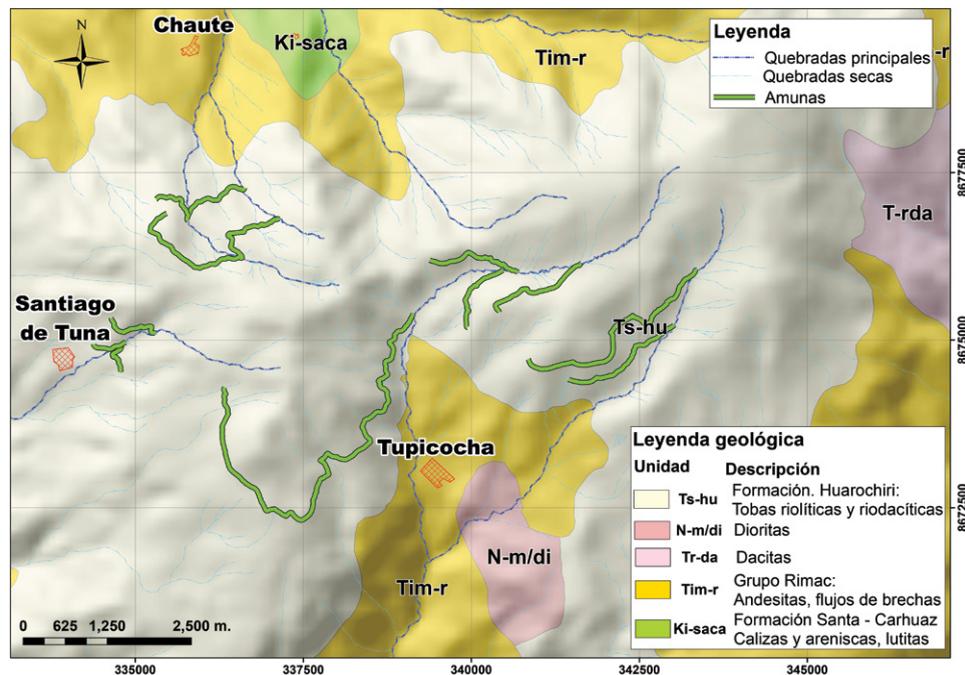
Tabla 1.

Características de las amunas identificadas. Fuente: GSAAC, 2006.

Quebrada	Amunas	Coord. WGS 84		Long. (km)	Cuenca tributaria (has)	Caudal (l/s)	Distrito
		Este	Norte				
Casama, Cosanche	Sansari	343360	8676041	4180	3.6	341.4	San Andrés de Tupicocha
	Omacachi	343030	8675243	4030	1.97	2142.9	
Ausuri, Chullaca	Chullaca	341635	8676142	4194	1.67	267.2	130
	Marcajay	340693	8676010	4016	1.54	146.9	
	Ausurí	340471	8676040	3973	1.22	38.3	
Aqueche	Tampucaya	339140	8675405	3724	4.45	631.8	Santiago de Tuna
	Chinchiwaca	335294	8675090	3387	0.93	267.2	
	Aqueche	334795	8674899	3205	0.55	18.3	
	Mentirosa	334863	8674970	3228	0.6	24.2	
Laja Laja	Llancacanchi	335763	8676863	3418	0.68	27.9	Chaute
	Chaute	335788	8676751	3431	1.2	31.1	
	Chilca	336598	8676234	3669	2.1	109	
	Laja Laja	336598	8676234	3669	1.2	192.9	

Figura 5.

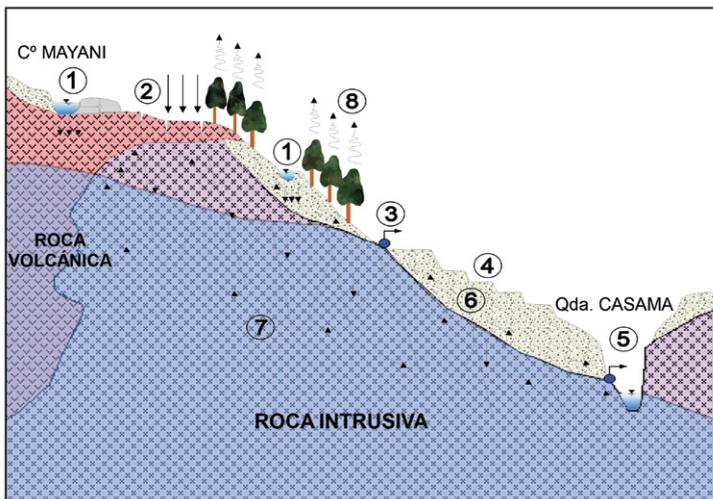
Mapa hidrogeológico de las amunas de Huarochiri.



El flujo subterráneo se produce fundamentalmente a poca profundidad, por los depósitos fluvioglaciares y coluviales y por las zonas de alteración y fracturación de la roca volcánica, si bien, también se produce un flujo profundo con un mayor periodo de residencia, que contribuye a la descarga por medio de fuentes permanentes localizadas en las partes bajas. Lo anterior se puede ver en el esquema conceptual de funcionamiento hidrogeológico representando en la Figura 6.

Figura 6.

Esquema conceptual de funcionamiento hidrogeológico de recarga de acuíferos mediante amunas.



- 1.- Acequia Amunera.
- 2.- Area de recarga.
- 3.- Manantiales.
- 4.- Reservorio con Andenes de cultivo
- 5.- Riachuelo permanente.
- 6.- Circulación en suelos coluviales.
- 7.- Circulación profunda en roca fractura
- 8.- Vegetación arbustiva.

Estos afloramientos de roca volcánica están cubiertos por suelos superficiales que sustentan la vegetación nativa del área, siendo suelos usados para agricultura, pastoreo y eriazos, compuestos por masas de bloques de roca con matriz arcillosa, de 5 a 15 m de espesor. Este depósito superficial, de alta permeabilidad, favorece la infiltración y la retención de agua en el suelo y contribuye a la infiltración profunda del acuífero fracturado.

Las rocas volcánicas por su gran exposición y extensión tienen gran capacidad de almacenamiento y constituyen la roca almacén. Se trata de un acuífero

fisurado, donde es aplicable la recarga mediante las amunas por inundación en ladera y/o vertido de agua en las discontinuidades del macizo rocoso. La descarga genera manantiales y bofedales y sustentan la vegetación local.

La precipitación en verano es frecuente en las cumbres de la Sierra de Huarochirí, con una lámina acumulada de 350 mm/año, no siendo suficiente para la recarga natural. La tasa de recarga que se produce no cubre las necesidades de agua para uso agrícola, ganadero y doméstico, especialmente durante la época seca, donde es álgida la demanda de agua subterránea, siendo necesario recurrir a estas técnicas de recarga artificial de acuíferos.

El caudal en las amunas puede llegar hasta 185 L/s y en las surgencias del área de recarga puede alcanzar los 5 L/s. Cuando no se realiza el mantenimiento de las amunas, los caudales entre junio a noviembre llegan a secarse, mientras que las principales fuentes no superan 1 L/s (Figura 7). Resulta evidente que una fracción considerable de agua se "pierde" en la satisfacción del déficit de humedad del suelo, lo cual permite mantener la vegetación en amplios sectores del borde meridional de las montañas de Lurín, otra fracción se incorpora a un sistema de flujo "intermedio" y eventualmente a un sistema más profundo, recargando a las fuentes del piso del valle de Lurín y el Rímac.

Figura 7.

Sistema de conducción mediante acequias.



Eficiencia de recarga artificial del acuífero

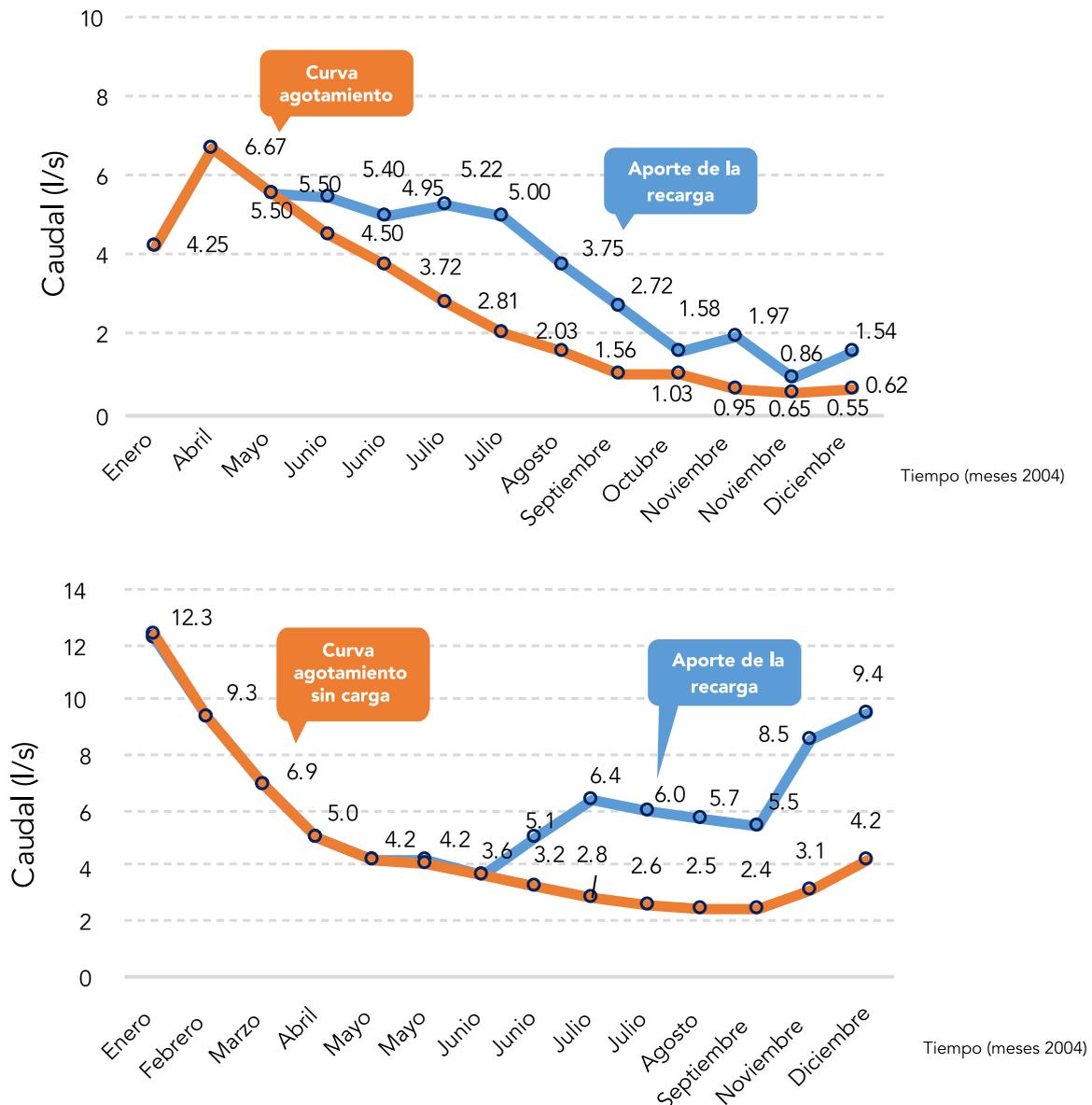
De acuerdo a la versión de los comuneros, entre los 15 a 20 días después de la recarga se produce el incremento en el caudal de los manantiales, que puede llegar a duplicarse o triplicarse, dependiendo del tipo de acuífero. El caso más representativo es el del manantial Lechica, en Santiago de Tuna, que presenta un caudal de 0,14 L/s en estiaje, y que, con las acciones de recarga, alcanza los 5 L/s. El manantial Chaute alcanza 4,6 l/s, pudiendo llegar a duplicarse con el aporte de las amunas y las lluvias. Este manantial se constituye en

la fuente más importante del lugar, la que hace posible la producción agrícola y pecuaria de la comunidad La Merced, de Chaute.

Los aforos continuos realizados mediante un canal Parshall durante un ciclo hidrológico (GSSAC, 2004) indicaron que el incremento en el volumen de descarga de los manantiales alcanzó hasta el 60% respecto a junio 2004, cuando los manantiales empiezan a reducir su caudal (Figura 8). La recarga mediante amunas alargó el volumen de descarga de las fuentes durante el año, comprobándose

Figura 8.

Curva de agotamiento del manantial Chaute y del arroyo Casama, parte baja de Tupicocha.



el efecto de la recarga a las dos semanas, siendo el incremento de caudal más importante entre junio y julio. El efecto de la recarga se prolongó hasta noviembre, lo que es aprovechado para el cultivo de plantaciones perennes, como la tuna o chumbera y el melocotón o durazno.

Tabla 2.

Ventajas y desventajas del sistema de SyCA con amunas.

VENTAJAS



Prolonga el caudal de las fuentes, a partir del uso de esorrentía, lluvias, arroyos, lagunas, etc.

Incrementa la descarga de las fuentes y mantiene su flujo durante los meses secos

Mejora la calidad del agua, la circulación interna en el acuífero elimina la turbiedad.

Es económico, se realiza con mano de obra comunal y de forma masiva y organizada.

Permite mejorar la cubierta vegetal de las praderas en las zonas de recarga.

Gestión mancomunada del agua en microcuencas, fortalece cultura del agua, convivencia, la gobernabilidad y democracia

DESVENTAJAS



Requiere de mantenimiento de canales y bocatomas por lo menos anualmente.

Vulnerable frente avenidas y huaycos, por su ubicación dentro del cauce.

Los canales pueden colmatarse debido al aporte de sedimentos desde los cauces

Requiere mano de obra comunal, no siempre disponible.

Los terrenos son comunales y permite el acceso sin estricto control.

Requiere dedicación, participación de los usuarios y liderazgo de dirigentes, no siempre disponible.

Consideraciones finales

Las amunas de Huarochiri constituyen un ejemplo vivo de un sistema de recarga de acuífero ancestral, que ha pervivido en la región debido a su eficiencia, ya que este conocimiento del manejo de agua se ha transmitido entre generaciones. Se presentan las ventajas y desventajas del uso de este sistema de Siembra y Cosecha del Agua (Tabla 2).

El uso de las amunas, practicado en la cabecera de cuenca de la costa peruana, tiene gran potencial para su réplica. Para su aplicación requiere tomar en cuenta ciertas condiciones, descritas a continuación:

- Disponibilidad de pequeñas microcuencas de recepción, que generen suficiente agua para su uso como fuente de recarga.
- Áreas con presencia de acuíferos fisurados y descargas naturales localizadas, en roca con fracturas abiertas de buena estabilidad química, que favorecen la calidad del agua.
- Cuencas con gran área tributaria, escasa erosión y arrastre de sólidos y cauces rocosos, necesarios para evitar la generación de sólidos finos, que colmatan los intersticios de percolación.
- Suelos con grava y afloramientos de roca de buena transmisividad, necesarios para la recarga y circulación prolongada en el subsuelo, para compensar la disminución de caudal en estiaje.
- Disponibilidad de la comunidad para realizar acciones mancomunadas, planificadas y solidarias para su mantenimiento y la gestión de las amunas.
- Reconocimiento técnico y social de las amunas por autoridades y gobierno local, instituciones públicas y privadas, para su respaldo económico y político, en la estrategia de rehabilitación y réplica.

Su implementación y conservación debe considerarse como servicio ambiental y ser compensado por los usuarios directos o indirectos, en particular es una alternativa que debe ser considerada en el marco de la gestión del agua para uso doméstico y de riego.

LOS MAMANTEOS DE HUAMANTANGA, LIMA

Introducción

Huamantanga es una comunidad campesina ubicada a 3300 m s.n.m, en la zona media-alta de la cuenca Chillón (Fig.9), que constituye una de las cuatro fuentes hídricas para Lima, la segunda ciudad desértica más grande del mundo (Gammie y De Bievre, 2015). El rango altitudinal del área va desde 4600 m s.n.m., hasta 1600 m s.n.m., donde la zona de vida predominante es el desierto premontano tropical. Debido al amplio rango altitudinal, la temperatura media anual varía desde 0 a 30 °C. El perfil topográfico también es variado, con zonas planas y pendientes abruptas. La precipitación anual en la zona media-alta es de 600 mm/año, concentrada desde noviembre hasta abril, siendo marzo el mes más lluvioso. El período seco se produce entre mayo y octubre, en el que prácticamente no llueve.

En esta comunidad se practica la recarga de agua mediante amunas, siguiendo el mismo procedimiento explicado en el caso de las amunas de Huarochiri, pero con la salvedad de que en Huamantanga a este sistema se le denomina mamanteo.

En la parte alta de Huamantanga se han registrado 11 canales de infiltración, o amunas, todos en funcionamiento y captando, aproximadamente el 80% del caudal que pasa por las quebradas durante la época de lluvias (Bardales et al., 2017).

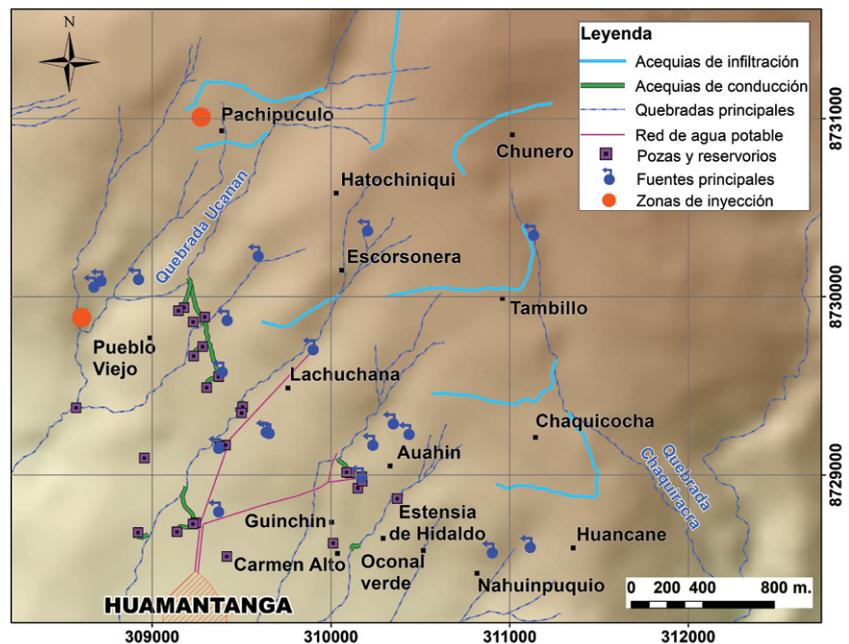
Figura 9.

Situación de los mamanteos de Huamantanga.



Figura 10.

Amunas de Huamantanga, y sistema hidrológico asociado.



Fuente: Condesan, 2015

Descripción del sistema de SyCA

Es un sistema análogo al de Huarochiri. En este caso se trata de 11 amunas, con una longitud media de 1 km cada una, que captan agua de las quebradas entre enero y abril. Algunas amunas vierten sus aguas en distintos tramos permeables en laderas y otras alimentan a unas qochas de infiltración, conocidas localmente como “lagunas de los abuelos” y que tienen un volumen de almacenamiento medio de 300 m³. En muchas de estas qochas el fondo no está impermeabilizado y presentan una alta capacidad de infiltración. Aguas abajo de la zona de mamanteo se han inventariado 70 manantiales, que se utilizan esencialmente para la agricultura, la ganadería y el abastecimiento a la población de Huamantanga.

Los comuneros suben a las acequias para su mantenimiento previo a la época de lluvias, sin embargo se estaba descuidando su mantenimiento debido a la pérdida de compromiso de la comunidad, a su escasa organización e incumplimiento de faenas y también asociado a la migración de jóvenes a la ciudad en búsqueda de trabajo mejor remunerado, dejando solos a los comuneros de edad avanzada, que ya no pueden subir a las alturas para realizar los trabajos de mantenimiento de las acequias (Bardales

Figura 11.

Pacchipucro. Arriba; captación y acequia de transporte. Abajo; puntos de recarga.



Fuente: Apaza 2010; Condesan 2013

et al., 2017). La restauración de la acequia Pacchipucro fue un proceso de compromiso y revaloración del conocimiento ancestral por la comunidad Fig.11.

En cuanto al uso del agua, este es casi exclusivamente para el riego, por lo cual el sistema de mamanteo está diseñado para incrementar el caudal de la fuente captada para este fin en cada parcialidad o comunidad (Anduy y Shigual).

Caracterización hidrogeológica

El área muestra extensos afloramientos volcánicos de la Fm. Calipuy, formada por lavas andesíticas púrpuras y piroclastos gruesos, tobas finamente estratificado, basaltos, riolitas y dacitas, aunque es común encontrar lavas gruesas andesíticas. También afloran conglomerados de hasta 100 m de espesor, en la base de los afloramientos volcánicos del cretácico, compuesto por cantos redondeados rojizos. El Grupo Casma también aflora en la zona estando constituido por una secuencia vulcano-sedimentaria marina en su parte inferior, a las que se superponen materiales volcánicos subaéreos.

La mayor parte de la amunas discurre e infiltra sus aguas en los coluviales de ladera y en los materiales volcánicos basales. En superficie, este tipo de roca presenta una zona de alteración que permite la infiltración y el flujo subterráneo poco profundo. La menor velocidad de circulación del agua subterránea permite que esta quede retenida un tiempo, antes de surgir por los manantiales ubicados aguas abajo.

El caudal de conducción de las acequias de mamanteo, durante su periodo de funcionamiento, suele fluctuar entre 50 y 80 L/s, con máximos de hasta 140 L/s, generando descargas de los manantiales de la parte baja que alcanzan caudales máximos de 5 a 10 L/s.

Las observaciones hidrológicas en Huamantanga permitieron estimar los volúmenes infiltrados. La acequia Cachipucro logró infiltrar alrededor de 240.000 m³, (23 L/s) de forma similar en otra de las acequias controladas se recargó 370.000 m³ (35 L/s), siempre durante la temporada de lluvias. En total, se estima que durante la temporada de lluvias es probable una infiltración potencial próxima a 1 hm³, que sería un 60% de las escorrentías de la parte alta (Condesan, 2014).

El equipo técnico de Condesan con el apoyo del laboratorio Ozark Underground, liderado por Tom Aley, especialista hidrogeólogo en trazadores, compartió su experiencia en la investigación de Huamantanga. Entre marzo y diciembre de 2015 se llevó a cabo un ensayo de trazadores utilizando trazadores fosforescentes, para evaluar la interconexión hidráulica y tiempo de tránsito de la recarga del sistema de mamanteo. El 21 enero 2015 se realizó la inyección del trazador en la acequia Pachipucro. En la Figura 11 se muestran los puntos de inyección y observación en cuatro manantiales del paso del trazador, entre ellos P1, P2, P3 y P4, utilizando filtros de carbón para detectar la llegada del trazador, muestreado con frecuencia semanal por 3 meses y luego quincenal hasta 10 meses.

En la Figura 12 se representan los resultados de la observación de los trazadores; muestra la descarga de eosina en los cuatro manantiales evaluados, habiendo recibido la mayor concentración en el P3 y P2, que presentan mayor alineamiento con la zona de infiltración y una distancia de 700 m, concluyendo lo siguiente:

- ➔ Existe conexión hidráulica entre las aguas de recarga y la de descarga en manantiales.
- ➔ La máxima concentración del trazador se presenta en dos meses, lo cual indica una velocidad de tránsito de 12 m/d, posterior a su inyección.

➔ El trazador mantiene una concentración residual durante 10 meses, lo que indica el aporte de la descarga al manantial durante todo el año.

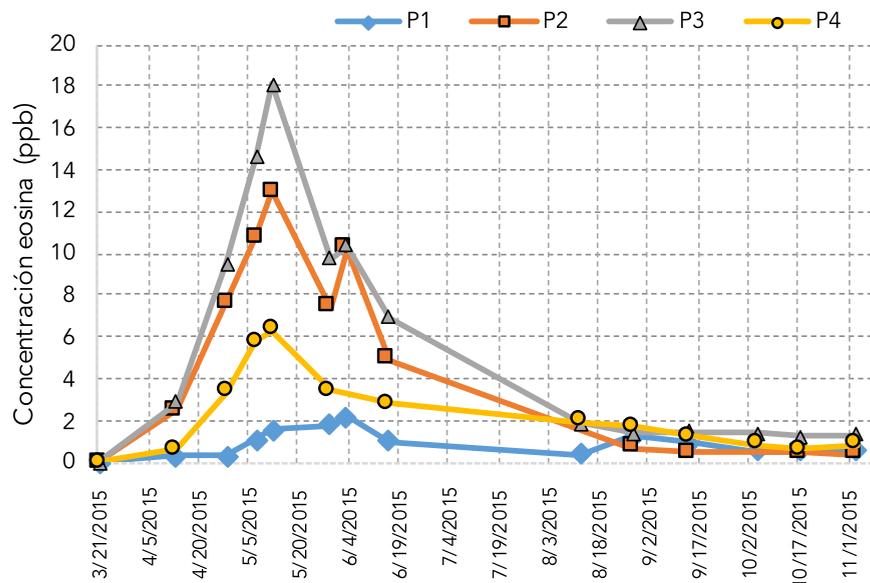
Consideraciones finales

El mamanteo es una técnica ancestral de recarga artificial de alta montaña practicada en Huamantanga. Su investigación fue apoyada por el Ministerio del Ambiente a través de CONDESAN, financiado por Aquafondo (Fondo de Agua para Lima) a mediados del 2013, dentro de los proyectos de SEDAPAL a través de MRSE (Mecanismo de Retribución por Servicios Ecosistémicos) para Lima. Otras Instituciones, como la SUNASS, reconocen al mamanteo como intervención costo/efectivo eficiente y así fue listada en el Catálogo de Intervenciones Verdes, elaborado para reguladores y Compañías de Agua en Latinoamérica ADERASA 2015 (Asociación de Entes Reguladores de Agua y Saneamiento de las Américas). Además, es sugerida a otras iniciativas MRSE del MINAM.

Convencidos de los beneficios y efectividad de esta técnica (hasta el año 2013 motivado por la revaloración del conocimiento ancestral), Aquafondo, FONDAM (Fondo de las Américas), TNC (*The Nature Conservancy*), la ONG Alternativa y apoyo de la Comunidad, restauraron uno de los once canales de mamanteo (Pacchipucro) en deterioro, mediante trabajos con las denominadas faenas.

Figura 12.

Descarga del trazador en manantiales (Condesan, 2015).



LAS QOCHAS DE HUACRAHUACHO

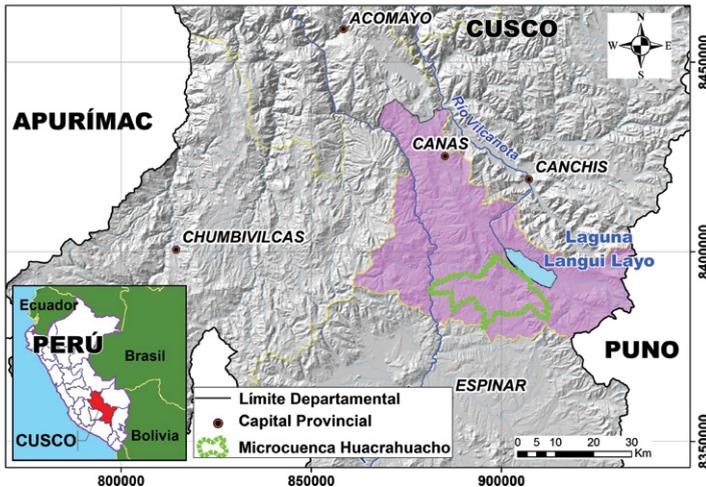
Introducción

La microcuenca Huacrahuacho se ubica 150 km al sur-este de la ciudad de Cuzco. Forma parte de los distritos de Kunturkanki y Checca, provincia de Canas, con una población de 1729 familias y 6000 habitantes, emplazada en una altiplanicie alto andina (entre 3900 a 4700 m s.n.m). La microcuenca drena hacia el río Apurímac. El 3,8% del área se encuentra bajo intervención humana y los pastizales cubren el 87%.

Aunque la variación entre las temperaturas diurnas y nocturnas es muy alta (con frecuentes heladas nocturnas en invierno), la temperatura media varía (4 a 14 °C). La precipitación anual es de 833 mm, con un 84% concentrada entre diciembre a abril, con períodos de déficit hídrico en los meses de mayo a noviembre. Según el análisis de variabilidad del régimen de lluvias, al dividir la serie anual de precipitación del período 1994 – 2008 se observa una acelerada caída de la precipitación a razón de -12 mm/año (Bustanza y Valer, 2017).

Figura 13.

Ubicación de la microcuenca Huacrahuacho (PACC Perú, 2012).



La producción pecuaria es muy importante, la ganadería de vacunos criollos y mejorados orientados a la producción de leche y carne va en aumento, seguida por la actividad agrícola. El patrón de consumo de agua es netamente rural. De toda la demanda consuntiva de agua, el 3,3% es para consumo humano, 5,7% para uso pecuario y el 91% restante para riego de pastos cultivados.

Descripción del sistema de SyCA

Las qochas son represas rústicas para almacenar agua de escorrentía, ubicadas en una depresión natural del suelo o laguna natural, en la que se construye un pequeño dique que permite incrementar el almacenamiento de escorrentías pluviales colectadas aguas arriba (Fig.14 y 15). Las observaciones de la tasa de infiltración de agua en el suelo (coeficiente de infiltración) han permitido clasificar las qochas en tres grupos (Bustanza y Valer, 2017):

- **Qochas de almacenamiento (bajo coeficiente de infiltración).** Se utilizan depresiones naturales de baja conductividad hidráulica, en las que construyen diques de tierra y roca, que permiten el almacenamiento de agua de escorrentía y su posterior uso. Las qochas de almacenamiento se caracterizan por presentar en su base y en sus bordes materiales impermeables.
- **Qochas de recarga de acuífero (alto coeficiente de infiltración).** Se utilizan depresiones naturales con alta conductividad hidráulica del suelo, por lo cual se almacena agua temporalmente. El suelo edáfico está constituido por limos, arenas y gravas, que se superponen a los acuíferos fracturados y porosos no consolidados. Estas qochas contribuyen a la recarga del acuífero y alimentan a las fuentes y a los bofedales, manteniendo a los pastos y la humedad del área.
- **Qochas mixtas (moderado coeficiente de infiltración).** Las qochas mixtas son qochas de "siembra" y de "cosecha de agua". Estas qochas se caracterizan por su base relativamente impermeable y con bordes semipermeables y, por lo tanto, implican moderada velocidad de infiltración del agua hacia el acuífero. Su principal característica es que el agua de lluvia que llena la qocha es infiltrada hasta llegar al límite del fondo impermeable. Este funcionamiento combinado se genera en la mayoría de las qochas.

Este tipo de sistemas de regulación superficial y subterránea de agua mediante qochas, tiene una serie de componentes interrelacionados, entre los que se pueden mencionar:

Figura 14.

Qochas de cosecha.

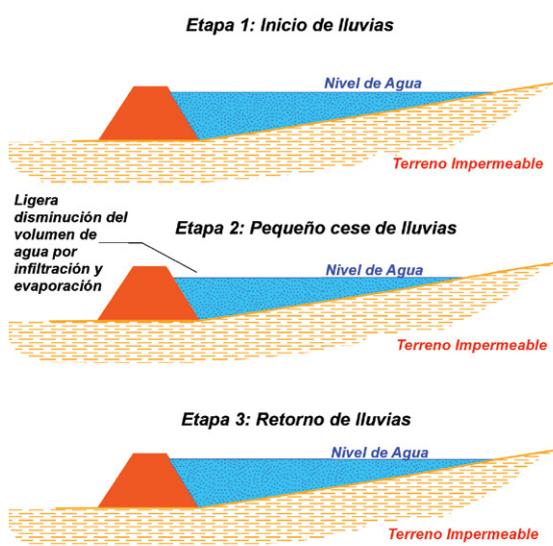
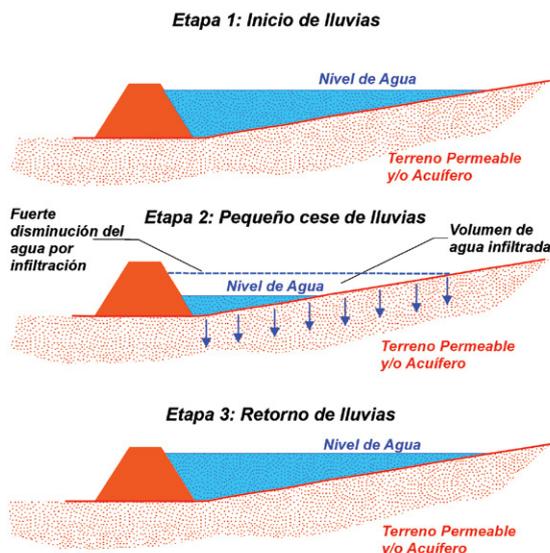


Figura 15.

Qochas de siembra.



Fuente: PACC - Perú May, 2016.

- **Área tributaria:** área donde las aguas de lluvia precipitan y drenan hacia la qocha.
- **Acequias colectoras:** son canales de trasvase de la parte alta que capta escorrentía de las quebradas adyacentes, incrementando el volumen la qocha.
- **Vaso de almacenamiento e infiltración de la qocha:** es el espejo de agua, permanente o temporal, dependiente de la condición del suelo.
- **Área de humedecimiento:** área ubicada por debajo de la qocha, donde ocurre la infiltración del agua que mejora las condiciones de humedad de los bofedales y el repoblamiento de pastos naturales.
- **Dique de retención:** muro de piedra, tierra compactada y/o champas, que retiene el agua, incrementando el volumen de almacenamiento o el área de infiltración.
- **Vertedor de demasías:** obra construida al extremo superior del dique, para la evacuación del agua excedente de la qocha, especialmente durante las tormentas extremas.
- **Acequias de excedencias:** es un canal excavado en la tierra, construido para evacuar agua excedente durante tormentas extremas, se inicia

en el vertedor de demasías y descarga aguas abajo de la qocha, mejora la humedad del suelo.

- **Zanjas de infiltración:** pueden ejecutarse en el área de alimentación de la qocha y en el entorno, para incrementar la infiltración de agua al suelo, reducir la erosión y la pérdida de suelos, complementando las funciones de siembra de agua de la qocha.

Cuando estos sistemas de Siembra y Cosecha de Agua se encuentran funcionando, la infiltración del agua mantiene la humedad de los pastos, en el área de influencia de la qocha.

Anualmente, antes de la temporada de lluvias se realiza el mantenimiento de los diques, el vertedero de demasías, las acequias de excedencias y las "estructuras verdes" como clausura de pastos, resiembra de pastos naturales, la forestación y reforestación con especies nativas.

Las Tablas 3 y 4 indican el número de qochas y volúmenes almacenados, así como zanjas de infiltración, acequias colectoras y excedentes, cuyas obras fueron ejecutadas por las familias comunales. El volumen almacenado en 135 qochas se estima en 74.991 m³, a nivel familiar en 258 m³ y 11 qochas comunales con 3.652 m³ de agua embalsados.

Tabla 3.

Qochas y volumen almacenado (PACC, 2016).

Descripción	Diques (m ³)	Zanjas de infiltración (m.l.)	Acequias colectoras (m.l.)	Acequia de excedencias (m.l.)
Qochas familiares				
I Concurso: Oct. 2012, Abr. 2013	469	200	108	--
II Concurso: Oct. 2013, Abr. 2014	2210	1850	4194	3135
Qochas comunales o grupales				
I Concurso: Oct. 2012, Abr. 2013	337	--	--	--
II Concurso: Oct. 2013, Abr. 2014	113	--	--	--
Metrado total	3129	2050	4302	3135

Tabla 4.

Qocha familiar y comunal. PACC- Perú 2016.

Microcuenca Huacrahuacho	Und.	Nº qocha Familiar	Nº qocha Comunal	Total
I Concurso: Oct. 2012 - Abr. 2013	Qocha	51	8	59
II Concurso: Oct. 2013 - Abr. 2014	Qocha	84	3	87
Total qochas	Qocha	135	11	146
Volumen x qocha	m ³	258	3652	74991
Volumen total	m ³	34819	40172	74991

Caracterización hidrogeológica

En las áreas de replicación de los sistemas de siembra y cosecha del agua, antes descritas, existen acuíferos multicapa, formados por materiales de la Fm. Murco, esencialmente areniscas marrón rojizas, con estratos medianos y limo-arcillitas rojizas, algo abigarradas y capas de arenisca. Aflora también el Grupo Moho, que consta en su base de areniscas limoarcillíticas rojas con niveles de caliza, intercaladas con estratos delgados de limolitas y lutitas marrón a gris verdosas. La Fm. Arcurquina la integran calizas micríticas con clastos aloquímicos beige a blanquecino, textura microcristalina uniforme y estructura circular. Por su parte en la Fm. Muñani se diferencian areniscas, con mayor presencia en la base de bancos masivos de areniscas y limoarcillíticas. Al techo, los estratos de arenisca con limoarcillitas rojiza oscura pasan a ser predominantes. El Grupo Puno consiste de areniscas rojizas a rosadas y conglomerados, de grano fino a grueso, generalmente arcósicas, con estratos

conglomeráticos masivos. El Grupo Tacaza son depósitos volcánicos, en la base de fase aglomerática y otra lávica superior. Finalmente, la Formación Maure, en la parte superior son tobas con diatomeas.

Para valorar la evidencia de la recarga de acuíferos, se ha realizado el "Estudio hidrodinámico de las pozas de infiltración y los manantiales de la microcuenca Huacrahuacho"; la metodología aplicada consiste en el muestreo de agua de las qochas y los manantiales, para determinar su concentración isotópica en deuterio y oxígeno-18. Este estudio permitió determinar la interrelación de los flujos entre las qochas y los manantiales muestreados. Los resultados muestran que las aguas de las qochas (E12) y (E22), contribuyen al caudal de los manantiales, riachuelos y bofedales situados aguas abajo, los que reciben la recarga de las aguas embalsadas. Se concluye que las dos qochas contribuyen a la recarga del acuífero y mantiene el caudal de los manantiales.

Consideraciones finales

Los sistemas de Siembra y Cosecha de Agua de la microcuenca Huacrahuacho fueron conducidas a nivel familiar y comunal, contribuyendo a los sistemas productivos, en particular a la producción pecuaria. El beneficio de las qochas se sustenta mediante la evidencia técnico-científica, así como con la percepción de los usuarios, quienes aportaron en la práctica. Desde la percepción de las familias y directivos comunales, así como la evidencia visual *in situ*, se han identificado los beneficios ratificados por los Grupos Focales, que concluyeron:

- Mejora la cobertura vegetal. Los pastos naturales del área se recuperaron y las especies palatables reaparecieron, importante para la alimentación pecuaria y para la economía familiar de Huacrahuacho.
- Función termorreguladora. Es evidente que los pastos naturales se recuperaron alrededor de la qocha, así como las especies nativas, en relación a otras plantaciones de la misma época y del mismo piso altitudinal.
- Recuperación de la biodiversidad y belleza paisajística. Se comprueba un entorno más acogedor, las aves se establecieron en las qochas, y se percibe armonía del ser humano con la naturaleza.
- Beneficios socioculturales. Se han revalorado conocimientos tradicionales, el manejo de qochas es una práctica ancestral datada desde la época Inca. Se ha fortalecido el trabajo comunitario (el Ayni y la Minka), así como las costumbres y festividades del agua.

PEQUEÑAS REPRESAS Y ATAJSOS DE ANTACOLLANA, CUZCO

Introducción

La Comunidad de Antacollana se ubica a 2 km al Norte de la ciudad de Espinar, provincia Yauri y Dpto. de Cuzco, en la margen derecha del río Cañipía, a 3950 m s.n.m. Cuenta con una población

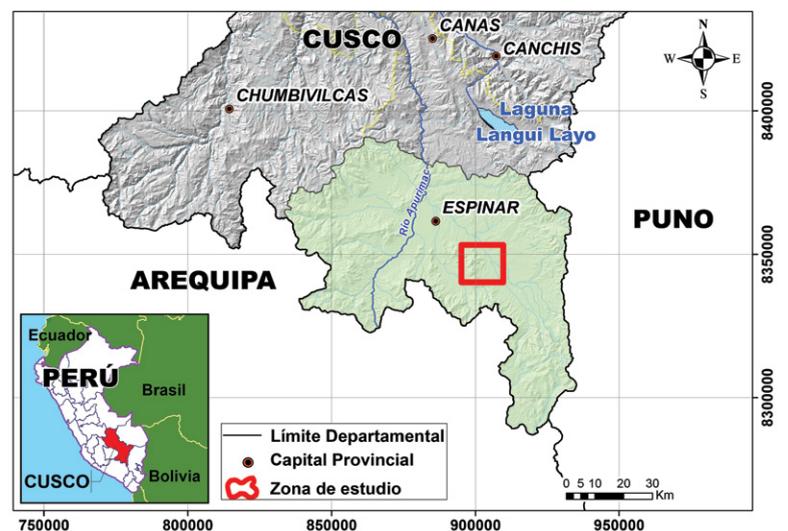
de 600 habitantes. En su geomorfología predominan extensas llanuras altiplánicas con ligeras pendientes comprendidas entre el 0 y el 8%, en suelos de origen aluvial, lomas suaves y altiplanicies disectadas, que conforman extensas praderas de pastoreo.

Su clima es frío y seco, con bajas temperaturas, hasta -8°C (junio a agosto), y el periodo de lluvias se concentra entre diciembre a marzo, con precipitaciones medias anuales de 650 a 770 mm/año y una evapotranspiración potencial de 1183 mm/año. La incidencia del sol es alta, con registros de hasta 2200 kWh/m² al año. El 50% de las extensas praderas nativas son de uso mancomunado, donde se practica la actividad pecuaria; vacunos, ovinos y camélidos (alpaca, llama) y alguna de vicuñas. La agricultura es complementaria a la ganadería, predominando cultivos de papa, granos andinos como la cañahua y quinua.

El acceso al agua de estas familias se vio limitado en tanto se parcelaron sus tierras comunales, y cada familia pasó a ser posesionaria de 10 a 15 ha de tierra, mayormente pradera natural, por lo que muchos campesinos quedaron aislados sin acceso a las fuentes de agua, que hasta entonces estuvieron compartidos (ríos y manantiales). La necesidad de acceso al agua fue crítica, muchas comunidades de la altiplanicie desde tiempos antiguos estaban sometidas al uso de agua de lluvia, para fines productivos, crianza y consumo humano. Por esta razón, ya existía el conocimiento y la práctica de almacenar agua para

Figura 16.

Ubicación de zona SyCA en Antacollana.



la época de escasez, utilizando depresiones naturales o excavaciones próximas a la superficie freática, con saturación de agua subterránea.

El proyecto se inició con la excavación de abrevaderos para ganado en las capas de arenas y tobas calcáreas saturadas aflorantes a superficie en la extensa pradera. Este proyecto fue promovido por el proyecto de Desarrollo Rural y MARENASS, implementado en 360 comunidades campesinas en los departamentos de Ayacucho, Cusco y Apurímac, por el FIDA de Naciones Unidas y por el Ministerio de Agricultura de Perú (1998- 2007). Se plantearon estrategias de motivación por concurso e incentivos y mapas parlantes para la identificación de proyectos familiares y comunales. La implementación fue realizada con la asistencia técnica de líderes "Yachachiqs", que identificaron áreas con agua de escorrentía, realizando diques o qochas, localizados en el cauce de las quebradas secas (Zamalloa, 2017).

Descripción del sistema de SyCA

Las experiencias de almacenamiento y recarga artificial de acuíferos someros se practican a partir de fuentes de escorrentía pluvial en las quebradas intermitentes, basándose en el conocimiento ancestral para la construcción de pequeños embalses y atajos (diques), utilizando depresiones naturales para almacenar escorrentías (Zamalloa, 2017).

Son dispositivos de bajo costo, que permiten la captura de la escorrentía pluvial en la época de mayor precipitación (650 a 770 mm/año), para ser retenida en "embalses". La captura de agua se realiza en las quebradas secas de escorrentía efímera, mediante la construcción de atajos con sistemas de pozas contiguas, una debajo de otra, aprovechando la depresión natural del terreno.

El sistema de almacenamiento y/o recarga consiste en pequeños depósitos excavados en el suelo entre 6 a 8 m³ de capacidad, algunos impermeabilizados mediante arcilla, plásticos y geomembranas. Los bordes de estas pozas son protegidos con rastrojo y arcilla para evitar el efecto del calor solar. La cantidad de pozas a instalar, depende de la cantidad de vacunos u ovinos que requiere el propietario.

Las pequeñas represas y atajos proporcionan agua para abrevar al ganado y consumo humano durante 7 a 8 meses durante la época seca; este periodo es crítico por la carencia de agua en las quebradas y la reducción del caudal de los ríos. Solo en el caso de represas con atajos en el cauce se refuerza el dique con mampostería de piedra y barro, provisto de canal de demasías, en caso de tormenta extremas. Estas pequeñas infraestructuras son reforzadas con vegetación (*Stipa lchu*) en los bordes. Animados por los buenos resultados, los campesinos ampliaron sus excavaciones hasta 3 y 4 pozas dispuestas en serie, de 6 a 8 m³ capacidad, lo que permitió disponer de agua para 8 a 10 vacunos y ovinos, y adicionalmente, para consumo humano.

Fueron 27 familias las que emprendieron la experiencia en Antacollana en el 2005 (Tabla 5), logrando construir 35 pequeños embalses en promedio de 12 m³, y en caso de grupo comunal, fueron 26 embalses en promedio 502 m³ de capacidad. En las 46 comunidades de Espinar se registraron 1388 familias, que lograron construir 1640 micropresas y de uso comunal fueron 123 grupos, los que lograron almacenar y recargar hasta 306.085 m³ de agua.

No se han realizado estudios hidrogeológicos para la caracterización del área de estas experiencias de Siembra y Cosecha del Agua. Sin embargo, se pueden indicar que aforan materiales de la formación

Tabla 5.

Construcción de pequeñas represas y atajos.

Sistema regulación	Unid	Familiar	Comunal	Total
Construcción micropresas 2004 2005	Und	35	26	61
Volumen almacenado qochas	m ³	12 m ³ /f	502 m ³ /c	134,472 m ³
En 46 Comunidades de Espinar	embalse	1388	1640	3028
Volumen almacenado	m ³	140,799	165,286	306,085

Yauri (Pleistoceno), constituida mayoritariamente por estratos de tobas arenosas y conglomeráticas lenticulares. Las tobas son de color gris blanquecino y se depositaron en delgadas capas que muestran estructuras de *slumping*, sobre estas estructuras la secuencia tobácea continúa normal y cerca al techo de la formación están intercaladas con varios niveles de tobas calcáreas de ambiente lagunar. Los depósitos aluviales están constituidos por acumulación de sedimentos, concentrados en los cursos más importantes, como el río Salado, y en las quebradas principales. Se trata de gravas y arenas de variado tamaño y moderadamente clasificadas.

Estas formaciones detríticas de tipo lacustre, en el área de proyecto, dan lugar a la existencia de acuíferos libres multicapa de moderada permeabilidad, donde el nivel freático suele quedar próximo a superficie, especialmente en superficies topográficas llanas o erosionadas, donde existen capas de arena y limo saturadas con vegetación freatofita, que es un indicador de la condición de saturación del suelo con agua subterránea. La ubicación de estas capas de areniscas permitieron ubicar los primeros abrevaderos con recarga de agua subterránea.

Figura 17.

Ubicación de micropresas y atajos

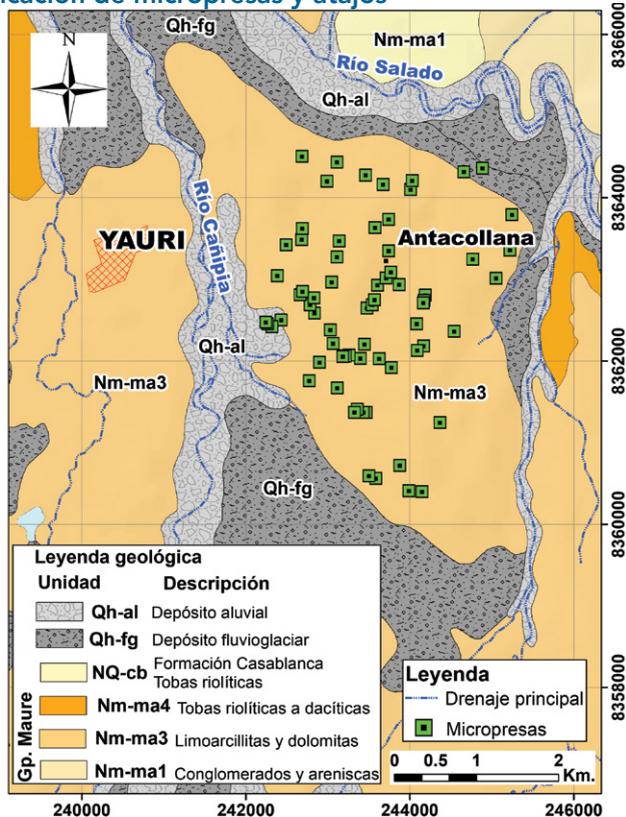


Figura 18.

Qochas y embalses con pastoreo de ganado.



Cortesía: Zamalloa T., mayo de 2017.

Consideraciones finales

Se destacan algunos lineamientos para su aplicación en el uso de las pequeñas infraestructuras de SyCA:

- ➔ Se construyen varias pozas en sentido de la pendiente (retroalimentación por infiltración); su uso se inicia desde las partes más altas de la microcuenca, para evitar las pérdidas por evaporación.
- ➔ Las pozas para el consumo humano fueron excavadas al costado para infiltrar el agua, a veces se capturan o drenan desde el flujo subterráneo, con lo cual se mantienen el agua de las pozas por más tiempo.
- ➔ Se prohíbe el ingreso de animales a las pozas. Se acondicionaron los accesos para evitar que abreen desde los bordes, a fin de evitar su deterioro y la contaminación de las aguas. Los animales no deben permanecer mucho tiempo cerca de las pozas.
- ➔ Los animales de las familias extrañas que cruzan por su territorio no pueden ingresar a los abrevaderos, solo si están admitidos por la comunidad.

CONCLUSIONES

La recarga artificial es una técnica útil, fiable, barata, que requiere mayor divulgación para su aplicación. Es necesario acercar estas alternativas a la población, políticos, juntas de regantes, etc.; estos últimos pueden ser los mayores beneficiados, ya que el 80% del consumo de agua en Perú se dedica al riego.

La gestión de la recarga tiene influencia positiva para el ambiente; restituye las reservas del acuífero y su capacidad de almacenamiento, mejora la calidad del agua y aumenta los recursos subterráneos. También contribuye con la regeneración de la flora y fauna y a favorecer la belleza paisajística del entorno.

Se requiere difundir técnicas y experiencias de recarga artificial a la población en general, sembrando

iniciativas que permitan a mediano y largo plazo, replicar mediante la implementación de proyectos y se constituyan los gestores hídricos del futuro.

Las experiencias de recarga en Perú descritas fueron practicadas en acuíferos fracturados y detríticos en un contexto de alta montaña, promovidas por ONGs y proyectos especiales, en los que se dieron actividades de sistematización y difusión de experiencias, que vienen siendo difundidos por el Ministerio de Agricultura y Ministerio del Ambiente de Perú.

Es necesario involucrar a las comunidades de regantes en las técnicas de recarga, sobre todo, aquellas que se abastecen con aguas subterráneas. Para lograr este objetivo, es necesario el apoyo político de organismos; comunidades, gobiernos locales y regionales, así como nacionales.

REFERENCIAS

- Apaza, D., Alencastre, A. and Arroyo, R. 2006. *Huachochiri: Las Amunas, recarga artificial de acuíferos en Los Andes. Gestión Social del Agua y Ambiente en Cuencas (GSAAC)*. Convenio IICA Países Bajos, 93 pp.
- Bardales, J., et al. 2017. *Siembra y cosecha de agua a través del sistema de mamanteo y la conservación de pastos en la comunidad de Huamantanga: Cuenca del Chillón*. Consorcio para el Desarrollo Sostenible Ecorregión Andina. CONDESAN, 73-89
- Bustinza, V. and Valer, F. 2017. *Siembra y Cosecha de Agua en la Microcuenca Huacrahuacho*. Ministerio de Agricultura de Perú. Programa de Adaptación al Cambio Climático (PACC Perú - Helvetas), 56-70
- CONDESAN. 2014. *Guía Metodológica para el Diagnóstico Hidrológico Rápido (DHR) y la Identificación de Acciones Efectivas en Beneficio de los Servicios Ecosistémicos Hídricos*. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Eco región Andina, 33 pp.
- CONDESAN, 2015. *Informe DHR de la Subcuenca del Río Shullcas*. Consorcio para el Desarrollo Sostenible de la Ecorregión Andina, 58 pp.
- Martos-Rosillo, S., Ruiz-Constán, A., González-Ramón, A., Mediavilla, R., Martín-Civantos, J.M., Martínez-Moreno, F.J., Jódar, J., Marín-Lechado, C., Medialdea, A., Galindo-Zaldívar, J., Pedrera, A., Durán, J.J. 2019. The oldest managed aquifer recharge system in Europe: new insights from the Espino recharge channel (Sierra Nevada, southern Spain). *Journal of Hydrology*, 578, 124047.
- Peña, F., 2014. *Hidrogeología de la cuenca Huaura*. INGEMMET de Perú, Boletín, n°5 Serie H. Hidrogeología, Lima - Perú.
- IPEN, 2014. *Hidrodinámica de las pozas de infiltración y manantiales de la microcuenca Huacrahuacho*. PACC Perú. 16 pp.
- Pulido, A. and Sbih, Y. B. 1995. Centuries of artificial recharge on the southern edge of the Sierra Nevada (Granada, Spain). *Environmental Geology*, 26(1), 57-63
- Pulido, A. and Sbih, B. 1993. The careos, a traditional system for artificial recharge in the southern Sierra Nevada (Granada, Spain). XXIVth IAH Congress, Oslo, I: 301310
- Sbih, B. and Pulido, A. (1996) - *Papel de los careros en la gestión de las aguas en La Alpujarra*, 1ª Conferencia Internacional Sierra Nevada. Conservación y Desarrollo Sostenible. Universidad de Granada, pp. 457-468.
- Suarez, W. 2012. *Caracterización climática y escenarios de cambio climático al 2030 y 2050, y oferta hídrica superficial actual y futura de las regiones Cusco y Apurímac, Cusco*. PACC Perú.
- Suarez, W. 2016. *Evidencias sobre la efectividad de prácticas de siembra y cosecha de agua, en base a estudios hidrológicos e hidrogeológicos de la microcuenca Huacrahuacho*. Programa Adaptación al Cambio Climático (PACC Perú), 68 pp.
- Zamalloa, T. 2017. *Experiencia de Cosecha de Agua en la Comunidad de Antacollana de Espinar, Cusco*. Proyecto Manejo de Recursos Naturales en la Sierra Sur - Marenass. 133-143 pp.



EMBAJADA
DE ESPAÑA
EN BOLIVIA



aecid



Cooperación
Española
CONOCIMIENTO/SANTA CRUZ