

Evaluación de la captación de agua de lluvia a través de las tradicionales Qochas y su impacto en la recarga del acuífero Valle de León, Guanajuato, México

Assessment of rainwater harvesting through traditional Qochas and its impact on the recharge of the Valle de León Aquifer, Guanajuato, Mexico

Gema Palafox Torrez¹, Ángel Leonardo González González², Pablo Andrés Pineda Chapacho³, Ismael Orozco Medina^{4*}

¹ Licenciatura de Ingeniería Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México, CP. 36000. g.palafoxtorres@ugto.mx

² Licenciatura en Biología Experimental, División de Ciencias Naturales y Exactas, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México, CP. 36050. al.gonzalezgonzalez@ugto.mx

³ Doctorado en Ciencia y Tecnología del Agua, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México, CP. 36000. pa.pinedacapacho@ugto.mx

⁴ Departamento de Ingeniería Geomática e Hidráulica, División de Ingenierías, Campus Guanajuato, Universidad de Guanajuato, México, CP. 36000. i.orozco@ugto.mx

*Autor de correspondencia.

Resumen

La creciente demanda de agua subterránea y los efectos del cambio climático han aumentado la sobreexplotación del acuífero Valle de León, una de las principales fuentes de abastecimiento en el estado de Guanajuato, México. En este contexto, la presente investigación ha evaluado el potencial de captación de agua de lluvia a través de las tradicionales Qochas para la recarga del acuífero Valle de León. Lo anterior, por medio de una metodología basada en el uso de herramientas de Sistemas de Información Geográfica, álgebra de mapas y la cuantificación de las intensidades de precipitación con diferentes períodos de retorno y probabilidades de excedencia. Los resultados obtenidos han mostrado que aproximadamente el 38.4% del área del acuífero presenta condiciones altas o muy altas de aptitud para la recarga del acuífero. Además, las precipitaciones iguales o inferiores a 58.6 mm presentan una probabilidad superior al 50% de ser excedidas anualmente. Lo que indica una alta recurrencia de eventos aprovechables para la captación a través de las Qochas. Finalmente, los resultados mostraron que los volúmenes de captación directa en las 18 Qochas seleccionadas varían entre 22.93 m³ y 1,057.69 m³. Lo cual, en combinación con el escurrimiento superficial y las condiciones climáticas locales, indican un potencial significativo de recarga al acuífero Valle de León.

Palabras clave: acuífero Valle de León; Qochas, recarga hídrica; análisis espacial; sobreexplotación.

Introducción

La escasez de agua es uno de los desafíos más apremiantes del siglo XXI, especialmente en regiones donde la presión sobre los recursos hídricos subterráneos ha alcanzado niveles insostenibles (Gleick & Cooley, 2021). En las últimas décadas, el aumento de la población, el crecimiento urbano descontrolado, la expansión de la agricultura y los efectos del cambio climático, han generado un estrés creciente sobre los acuíferos. Esta situación compromete no sólo el desarrollo económico y social, sino también la seguridad hídrica de millones de personas, particularmente en zonas áridas y semiáridas como el centro-norte de México (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura [UNESCO], 2023). Actualmente, México enfrenta una compleja paradoja hídrica, aunque es el doceavo país en disponibilidad total de agua renovable, cerca del 40% de su población vive en regiones con estrés hídrico severo (Comisión Nacional del Agua [Conagua], 2024). En este contexto, el acuífero Valle de León ubicado en el estado de Guanajuato no es la excepción. Este acuífero registra un déficit anual superior a los 50 hm³ y un descenso en sus niveles freáticos de hasta 2 m/año. Lo cual, ha generado un desequilibrio hídrico crítico del acuífero y de disponibilidad hídrica para la región (IMCO, 2023). La mayor parte del volumen de agua extraído se destina a actividades agrícolas, muchas veces con bajos niveles de eficiencia hídrica.

Con base en lo anterior, es urgente implementar estrategias de mitigación que contribuyan a restaurar el equilibrio entre la extracción y la recarga del acuífero Valle de León. En este contexto, diversas acciones han sido propuestas en la literatura como: la tecnificación del riego, la restauración ecológica, la protección de zonas de recarga y el fortalecimiento institucional. Otras estrategias que se han popularizado son las Soluciones Basadas en la Naturaleza (SbN). Estas han cobrado relevancia como mecanismos sustentables para aumentar la infiltración, reducir la escorrentía y restaurar el ciclo hidrológico (Núñez, 2025). En particular la siembra de agua de lluvia, entendida como la infiltración del recurso superficial en zonas potenciales de recarga, representa una alternativa ancestral, eficiente y de bajo impacto ambiental. Esta práctica incluye técnicas como las Qochas, zanjas de infiltración, presas filtrantes y acequias de careo. Las cuales permiten aprovechar la precipitación y escorrentía superficial en recarga efectiva de los acuíferos. Las Qochas de infiltración objetivo de esta investigación son uno de los sistemas de siembra de agua lluvia más empleados en Perú y Ecuador, consisten en depresiones naturales del terreno que permiten retener temporal o permanentemente el agua de lluvia y de escorrentía superficial (ICOG, 2020). Las Qochas de infiltración no están impermeabilizadas, por lo que, además de servir como reservorios temporales de agua superficial, recargan los acuíferos y aumentan el caudal y el período de agotamiento de los manantiales, arroyos y ríos (Figura 1).



Figura 1. Qochas de infiltración acondicionadas por la unidad Sierra Azul del Ministerio de Agricultura de Perú.
Fuente: ICOG, 2020.

Con base en lo anterior, la presente investigación ha tenido como objetivo implementar una metodología de análisis espacial, basada en el uso de Sistemas de Información Geográfica, para identificar zonas con alto potencial de recarga hídrica en el acuífero Valle de León, ubicar las Qochas de infiltración como sistemas para la siembra de agua de lluvia y evaluar el potencial de las precipitaciones. Este enfoque metodológico pretende ser una herramienta práctica para apoyar a la toma de decisiones en la planificación territorial y la gestión sostenible del recurso hídrico, con miras a mejorar la adaptación al cambio climático y reducir la sobreexplotación de los acuíferos.

Caso de estudio

La presente investigación se ha desarrollado en el acuífero Valle de León, ubicado en el estado de Guanajuato, México (Figura 2). El acuífero constituye una de las principales fuentes de abastecimiento de agua subterránea para el municipio de León, que a su vez concentra la mayor densidad poblacional, urbana e industrial del estado. El acuífero Valle de León tiene una superficie de 1,321 km² (Figura 2) y se encuentra colindando al norte con el acuífero Ocampo, al noreste con el acuífero de la Cuenca Alta del Río Laja, al sur y sureste con el Silao-Romita, al suroeste con el acuífero del Río Turbio y La Muralla. Todos ellos ubicados en el estado de Guanajuato, mientras que al oeste y noroeste limita con los acuíferos San Diego de Alejandría y Lagos de Moreno, ubicados en el estado de Jalisco (Conagua, 2024). De acuerdo con datos oficiales, el acuífero Valle de León presenta una recarga media anual de 124.5 hm³, frente a una extracción de 176.4 hm³, lo que genera un déficit de 51.9 hm³ (Conagua, 2024). Este déficit está provocando un descenso de los niveles freáticos que varían de 1.5 a 2.0 m/año. Alcanzando en algunas zonas del acuífero hasta 30 m/año debido a las intensas extracciones para satisfacer la demanda del sector agrícola (Conagua, 2024; IMCO, 2023). Es importante resaltar que se ha decidido usar como caso de estudio este acuífero por su relevancia y se espera que mediante técnicas como la siembra de agua de lluvia se logre reducir su déficit y su estrés hídrico del acuífero, para avanzar hacia una gestión más sostenible de su recurso subterráneo.

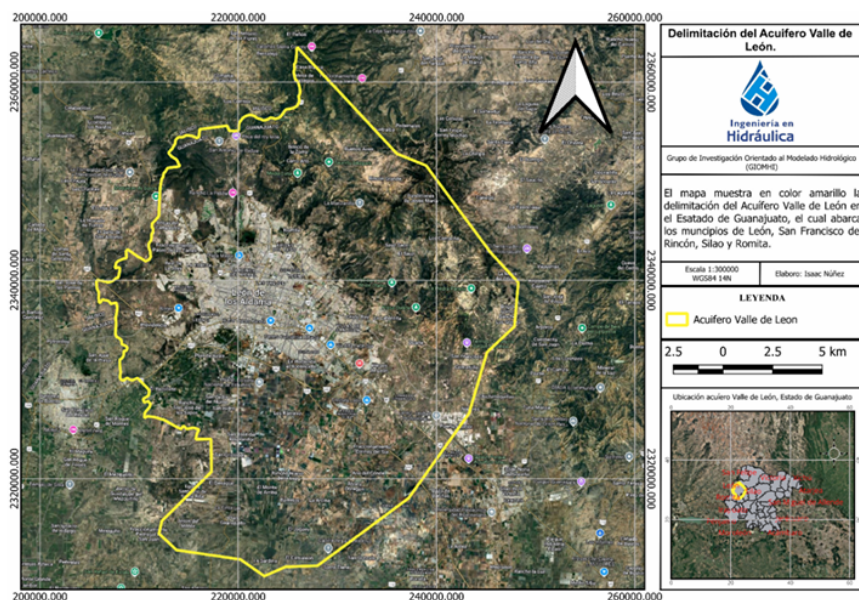


Figura 2. Ubicación y delimitación del acuífero Valle de León del estado de Guanajuato.
Fuente: Núñez, 2025.

Metodología

La metodología implementada se ha basado en un enfoque de análisis espacial multicriterio, utilizando herramientas de Sistemas de Información Geográfica (SIG) para identificar zonas con alto potencial de recarga hídrica mediante técnicas de siembra de agua de lluvia (SDALL). La metodología ha sido estructurada en cuatro etapas (Figura 3). La primera etapa ha consistido en el procesamiento geográfico del Modelo Digital de Elevaciones (DEM, por sus siglas en inglés), la edafología, la litología y el uso de suelo. El DEM utilizado en la estimación de las pendientes y ubicación de las Qochas de infiltración ha tenido una resolución espacial de 5m x 5m. La información geográfica restante se obtuvo del Instituto Nacional de Estadística y Geografía (INEGI), a una escala espacial de 1:250,000. El procesamiento geográfico se ha realizado usando las herramientas del Qgis que es un *software* de descarga libre a través del portal: <https://qgis.org>.

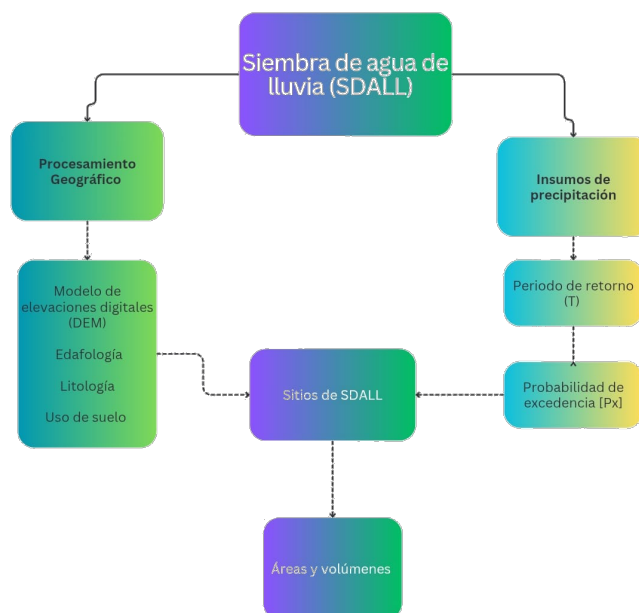


Figura 3. Diagrama de flujo de los pasos que comprende la metodología propuesta
Fuente: Elaboración propia.

La segunda etapa de la metodología ha consistido en evaluar el insumo de precipitación en el área de estudio. Para ello, se han utilizado ocho estaciones climatológicas con información de precipitaciones diarias en el período de 1993 a 2011. A través del período de retorno y la probabilidad de excedencia se ha cuantificado las magnitudes de las precipitaciones con frecuencia anual. El período de retorno se define como el tiempo promedio que transcurre entre la ocurrencia de dos eventos hidrológicos de igual o mayor magnitud (Chow *et al.*, 1988). El período de retorno se ha calculado utilizando la ecuación 1.

$$T = \frac{n + 1}{m} \quad (1)$$

Donde T es el período de retorno (en años), n es el número total de años de registros y m el número de orden. Es decir, la posición del evento en orden descendente. En el caso de la probabilidad de excedencia se define como la probabilidad de que un valor de la variable aleatoria sea excedido (Pizarro *et al.*, 2017). La probabilidad de excedencia se ha calculado usando la ecuación 2.

$$P(x) = \frac{1}{T} \quad (2)$$

Donde $P(x)$ es la probabilidad de excedencia al período de retorno (%).

La tercera etapa de la metodología ha consistido en la identificación y selección de las Qochas de infiltración. Es decir, la selección de las depresiones naturales del terreno que cumplen con los criterios para la siembra de agua de lluvia. Para ello, se ha utilizado el *script Fill* de Qgis y el DEM. La última etapa ha sido el dimensionamiento de las Qochas de infiltración y la estimación de los volúmenes de captación para la siembra de acuerdo al insumo de precipitación.

Resultados

El procesamiento geográfico realizado con las herramientas de Qgis ha permitido identificar las zonas con alto potencial de recarga en el acuífero Valle de León. Lo anterior, mediante un análisis de álgebra de mapas integrando la información geográfica descrita en la metodología (Figura 3). Es decir, esta metodología ha permitido combinar variables físicas y ambientales como topografía, tipo de suelo, cobertura vegetal y capacidad de infiltración para generar un índice de aptitud espacial. Posteriormente, el mapa fue reclasificado en cinco categorías: muy baja, baja, media, alta y muy alta aptitud. Esta clasificación facilitó la identificación visual de las zonas prioritarias para la implementación de las Qochas y la recarga del acuífero Valle de León. El análisis ha permitido determinar que aproximadamente el 38.4% de la superficie total del acuífero presenta condiciones de altas a muy altas para la recarga en el acuífero. Lo que equivale a una superficie de 506 km². Los valores cuantitativos más altos (cercanos a 10) indican condiciones más favorables para la implementación de la siembra de agua de lluvia (Figura 4).

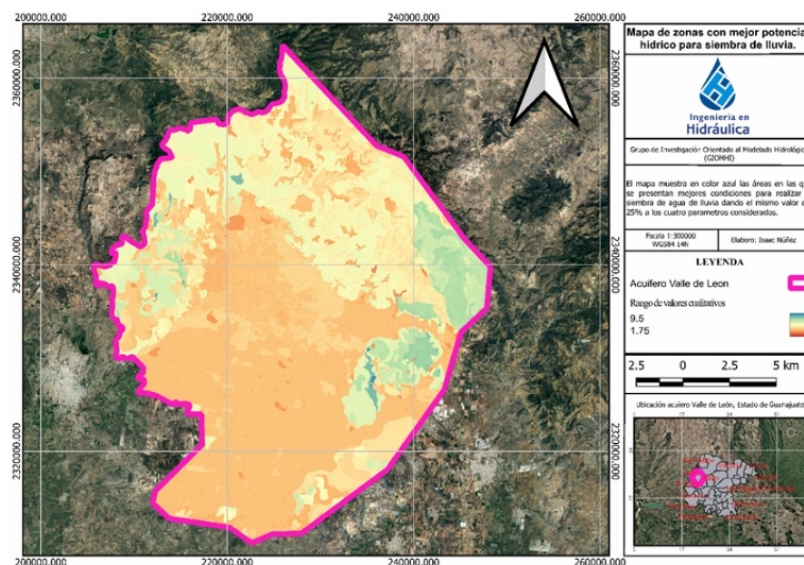


Figura 4. Áreas con potencial para la recarga del acuífero Valle de León.
Fuente: Núñez, 2025.

En la Figura 4 se puede observar que el mayor potencial de recarga se concentra en la zona del valle donde se localiza la ciudad de León y una amplia proporción de la superficie agrícola. Este resultado es particularmente relevante, ya que pone de manifiesto la importancia del proceso de infiltración natural y su alteración por la presencia de superficies urbanizadas y el uso intensivo del suelo agrícola. Es decir, se compromete dicha capacidad, ya sea por el sellamiento del terreno, la modificación de la cobertura vegetal o la contaminación difusa proveniente de agroquímicos. En este sentido, los resultados coinciden con lo reportado en otros estudios, donde se señala que las zonas de recarga frecuentemente coinciden con áreas de mayor presión antrópica, lo cual genera un escenario de vulnerabilidad para la seguridad hídrica.

En el caso del análisis del insumo de las precipitaciones se han obtenido variaciones de las precipitaciones máximas anuales promedio (PMAP) de 34 mm a 97 mm (Figura 5). Con períodos de retorno de 1.5 años a 20 años. Es decir, las precipitaciones del orden de 34 mm tendrán una frecuencia de aproximadamente un año. Este resultado es muy relevante en la cuantificación de la aportación anual de las precipitación en el volumen de las Qochas de infiltración al permitir cuantificar una captación anual con base en la probabilidad de ocurrencia y de excedencia (Figura 5). Asimismo, se puede observar que eventos de precipitación menores o iguales a 58.6 mm presentan una probabilidad de excedencia superior al 50% de ocurrir anualmente (Figura 5). Esto quiere decir que eventos de precipitación con estas magnitudes ocurrirán cada año. Así que el diseño de la Qocha de infiltración deberá considerar como mínimo el volumen generado por estos eventos.

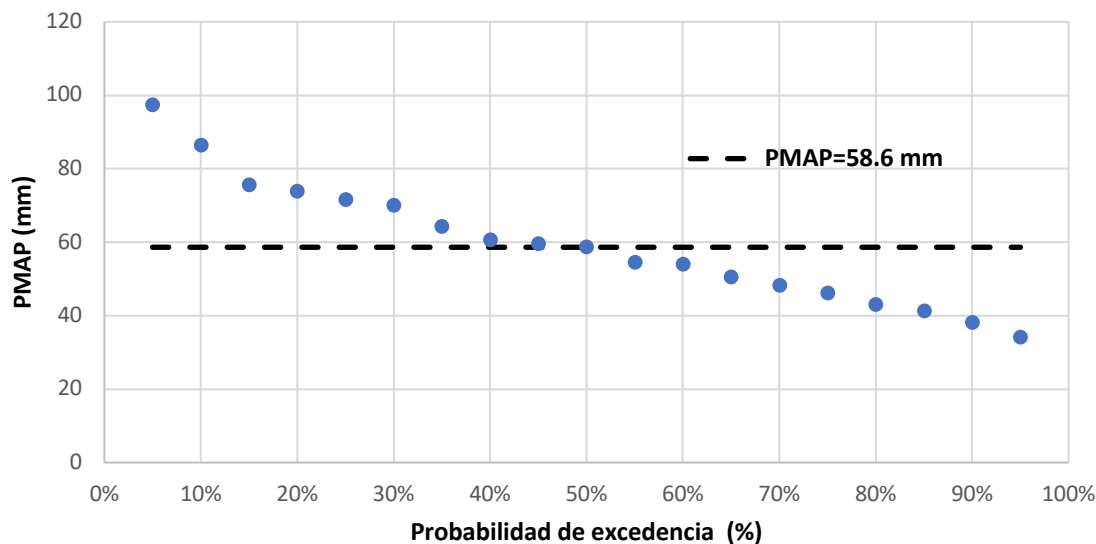


Figura 5. Precipitación máxima anual promedio vs probabilidad de excedencia promedio.
Fuente: Elaboración propia.

A partir de la metodología implementada en esta investigación se han identificado en las áreas de recarga del acuífero mostradas en la Figura 4 un total de 18 sitios potenciales para la implementación de las Qochas de infiltración. Los volúmenes promedio de captación directa en estas Qochas considerando una PMAP promedio han variado de 22.93 m³ a 1,057.59 m³ (Tabla 1).

Tabla 1. Volúmenes estimados de captación directa por Qocha para la siembra de agua de lluvia.

Clave	Área promedio de la Qocha (m ²)	Volumen de captación directa (m ³)
1	386	22.93
2	444	26.37
3	567	33.68
4	569	33.80
5	978	58.09
6	1,746	103.71
7	1,766	104.90
8	1,907	113.27
9	2,031	120.64
10	2,439	144.87
11	2,532	150.39
12	3,147	186.92
13	3,365	199.87
14	5,917	351.45
15	5,994	356.03
16	8,174	485.51
17	10,478	622.37
18	17,807	1,057.69

Fuente: Elaboración propia.

Es importante señalar que al volumen de captación directa obtenido en las 18 Qochas de infiltración debe añadirse el volumen proveniente de la escorrentía superficial y considerar las pérdidas por evaporación. Esta última dependerá directamente de la velocidad de infiltración, la exposición al viento y a la radiación solar. El considerar los todos procesos hace intuir que el volumen anual de recarga en el acuífero Valle de León podría ser significativo, especialmente en años con precipitaciones por encima del promedio anual y con eventos de alta intensidad. Haciendo que las Qochas no sólo funcionen como sistemas de almacenamiento temporal, sino también como estructuras activas de infiltración para contribuir en la recuperación del acuífero en periodos húmedos.

Conclusiones

Los resultados obtenidos en la presente investigación han permitido evaluar el impacto de la captación y siembra de agua de lluvia en la recarga del acuífero Valle de León. Asimismo, la investigación ha permitido obtener las conclusiones siguientes:

- La integración de herramientas SIG y el análisis espacial mediante álgebra de mapas permitió identificar que aproximadamente el 38.4% de la superficie del acuífero Valle de León presenta condiciones altas a muy altas de aptitud para realizar la recarga del acuífero. Lo cual, brinda un marco territorial claro para la implementación estratégica de Qochas de infiltración como sistemas de siembra de agua de lluvia.
- El análisis de la precipitación ha mostrado que eventos de 58.6 mm o menos tienen una probabilidad de excedencia superior al 50% de ocurrir anualmente. Esto implica que son eventos frecuentes y deben ser considerados como base en el diseño hidráulico de las Qochas, asegurando su funcionalidad recurrente en la captación y almacenamiento de agua de lluvia.
- La estimación de volúmenes de captación directa para las 18 Qochas potenciales muestra una amplia variabilidad (entre 22.93 m³ y 1,057.69 m³). Lo cual, junto con los aportes de la escorrentía superficial y las condiciones climáticas locales, sugiere un potencial significativo de recarga al acuífero, especialmente en años lluviosos. Esto posiciona a las Qochas como una solución efectiva tanto para almacenamiento temporal como para infiltración profunda.

Agradecimientos

A la Dirección de Apoyo a la Investigación y al Posgrado (DAIP) de la Universidad de Guanajuato por el financiamiento asignado a los estudiantes participantes en este Proyecto dentro de la Convocatoria Institucional del Verano de la Ciencia 2025. Asimismo, al comité organizador del XXX Verano de la Ciencia de la Universidad de Guanajuato.

Referencias

- Bolaños-Chavarría, S. & Betancur-Vargas, T. (2018). Estado del Arte sobre el Cambio Climático y las Aguas Subterráneas. Ejemplos en Colombia. *Revista Politécnica*, 14(26), 52-64.
<https://doi.org/10.33571/rpolitec.v14n26a5>
- Chow, V. T., Maidment, D. R., & Mays, L. W. (1988). *Applied Hydrology*. McGraw-Hill.
- Comisión Nacional del Agua (CONAGUA). (2024). Actualización de la disponibilidad media anual de agua en el acuífero Valle de León (1113), Estado de Guanajuato.
https://sigagis.conagua.gob.mx/gas1/Edos_Acuiferos_18/guanajuato/DR_1113.pdf
- Instituto Mexicano para la Competitividad A. C. (IMCO). (2023). Situación del agua en México.
<https://Imco.Org.Mx/Situacion-Del-Agua-En-Mexico/>
- Ilustre Colegio Oficial de Geólogos (ICOG). (2020). La siembra y cosecha del agua en Iberoamerica un sistema ancestral de gestion del agua que utiliza soluciones basadas en la naturaleza.
- Gleick, P. H., & Cooley, H. (2021). Freshwater Scarcity. *Annual Review of Environment and Resources*, 46(1), 319–348. <https://doi.org/10.1146/annurev-environ-012220-101319>
- Núñez, I. (2025). Análisis espacial para la identificación de zonas potenciales para siembra de agua de lluvia en el acuífero Valle de León. Tesis de Licenciatura
- Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). (2023). Informe Mundial de las Naciones Unidas sobre el Desarrollo de los Recursos Hídricos 2023: Asociarse para acelerar el cambio. <https://Www.Unesco.Org/Es/Articles/Unesco-Advierte-Que-2000-Millones-de-Personas-Carecen-de-Agua-Potable>.
- Pizarro, R., Sangüesa, C., Doll, U., Campos, D., Berríos, A., Vallejos, C., Mendoza, M., Pino, J., Fernández, P., Bonomelli, C., Guevara, C., Miguélez, M., Celis, V., Barrera, C., & Preller, D. (2017). *Sistema de captación de aguas lluvias (Scall) y su aplicación en el establecimiento de maqui*. Editorial Universidad de Talca.