



Secretaría
Nacional de
Ciencia y
Tecnología

RECOPIACIÓN DE UNA EXPERIENCIA DE RECARGA HÍDRICA GESTIONADA EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE GUATEMALA



Sistematización de experiencias de recarga gestionada de acuíferos (MAR) en la Región Metropolitana de Guatemala (RMG) como herramienta clave para generar políticas de seguridad hídrica

Guatemala, noviembre 2024



Forma de citar este documento:

GREMIA y FUNCAGUA. (2023). Recopilación de una experiencia de recarga hídrica gestionada en la Región Metropolitana de Guatemala. Guatemala.

Proyecto financiado por la Gremial de Empresas para el Manejo Integral del Agua (GREMIA) y desarrollado con la Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (FUNCAGUA). 2023.

Comité técnico:

Ing. Jorge García Chiú

Ing. Ángela Méndez

Ing. Julio Escoto

Ing. Héctor Espinoza

Diagramación y diseño:

Lic. Eilyn Pineda

ÍNDICE

1. Introducción: Importancia y necesidad de la guía	6
2. Justificación de la guía: situación del agua subterránea en la Región Metropolitana de Guatemala	8
3. Objetivos y alcance de la guía	10
4. Marco conceptual	11
5. Pautas técnicas para la implementación de técnicas MAR	13
5.1 Identificación del problema	13
5.2 Identificación del sitio y viabilidad del proyecto	14
5.3. Selección de la obra	15
5.3.1. Pozos de infiltración y pozos secos para la recarga gestionada de acuíferos	20
5.4. Diseño de la obra	24
5.5. Construcción de la obra	24
5.6. Plan anual de mantenimiento	24
5.7. Evaluación del funcionamiento	25
6. Caso de estudio: pozos secos para la recarga gestionada de acuíferos	26
6.1. Identificación del problema	26
6.2. Identificación del sitio y viabilidad del proyecto	26
6.3. Selección de la obra	30
6.4. Diseño de la obra	30
6.4.1. Pruebas de infiltración y capacidad del pozo	30
6.4.2. Potencial de captación de agua en el pozo	32
6.4.3. Potencial de captación de agua desde techos de lámina	33
6.4.4. Potencial de captación de agua de escorrentía	34
6.5. Construcción de la obra	35
6.5.1 Filtración del agua captada en techos	44
6.6. Plan anual de mantenimiento	45
6.6.1. Problemas que pueden presentarse y su solución	46
6.7. Evaluación del funcionamiento	49
6.8. Costos de referencia (2021)	52
6.9 Evaluación del riesgo	53
7. Referencias	56
8. Apéndices	58
8.1. Ficha para orientar la selección del sitio de un pozo seco de infiltración	58

8.2. Permeabilidad de los suelos en la ciudad de Guatemala	59
8.3. Mapa geológico Zonas 1, 3, 4, 7 y 8	59
8.4. Mapa geológico Zona 2	60
8.5. Mapa geológico Zonas 1 y 5	60
8.6. Mapa geológico Zonas 6 y 18	61
8.7. Mapa geológico Zonas 11 y 12	61
8.8. Mapa geológico Zonas 15, 16 y 17	62
8.9. Mapa geológico Zonas 17 y 24	62
8.10. Parámetros de monitoreo de calidad del agua	63
8.11. Ejemplo de una gráfica generada por el dispositivo registrador (datalogger)	63
9. Anexos	64
9.1. Metodología de pruebas de infiltración	64
9.2. Coeficientes de escorrentía para fórmula racional	68

ACRÓNIMOS

ASR: Aquifer Storage and Recovery

ASTR: Aquifer storage Transfer and Recovery

EMPAGUA: Empresa Municipal de Agua de Guatemala

FUNCAGUA: Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala

GREMIA: Gremial de Empresas para el Manejo Integral del Agua

IARNA: Instituto de Agricultura, Recursos Naturales y Ambiente

INSIVUMEH: Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología

MAR: Managed Aquifer Recharge o Recarga Gestionada de Acuíferos (se usarán como sinónimos)

MGCS: Mancomunidad Gran Ciudad del Sur

RMG: Región Metropolitana de Guatemala

TNC: The Nature Conservancy

URL: Universidad Rafael Landívar

USAC: Universidad de San Carlos de Guatemala

PRESENTACIÓN

Guatemala es considerada la ciudad más grande de Centroamérica, se encuentra localizada en el centro-sur del país, con alturas que varían entre los 1500-1600 metros sobre el nivel del mar y por su posición geográfica tiene dos estaciones marcadas, la temporada de lluvia que se extiende de mayo a octubre y la temporada seca que abarca de noviembre a abril; desde el punto de vista hidrológico la República de Guatemala se divide en tres grandes vertientes la del Pacífico, la del Atlántico y la vertiente del Golfo de México todas ellas alimentadas por 38 cuencas fluviales. Guatemala es abundante en agua y cuenta con 18 ríos principales; sin embargo, la ausencia de un mecanismo para su gobernanza pone en grave riesgo la sostenibilidad del agua apta para el consumo, principalmente en el área metropolitana.

La disponibilidad de agua subterránea es altamente variable, los acuíferos más productivos del país son el aluvial de la planicie costera del Pacífico y el kárstico de piedra caliza que se extiende por debajo de la Sierra de los Cuchumatanes. Las áreas aluviales constituyen el 20% del país y contienen aproximadamente el 40% de las reservas de agua subterránea disponible. Las áreas de acuíferos kársticos y de piedra caliza fracturada, constituyen aproximadamente el 30% del país y se estima que contienen el 30% de las reservas subterráneas disponibles. (Instituto Nacional de Sismología, Vulcanología, Meteorología e Hidrología -Insivumeh-)

Conscientes de lo anterior, convencidos de que el agua representa un pilar fundamental para el desarrollo económico sostenible de cualquier sociedad y comprometidos con los objetivos trazados por la Gremial de Empresas para el Manejo Integral del Agua -GREMIA-, se comenzó en el año 2020 con el desarrollo de un plan para fomentar la recarga hídrica mediante el aprovechamiento del agua de lluvia, bajo la dirección y coordinación del Ingeniero Jorge García Chiu, aprovechando su vasta experiencia en el tema.

De esa cuenta, en 2021 la Junta Directiva de GREMIA autorizó el financiamiento de un proyecto piloto de Recarga Hídrica mediante el aprovechamiento del agua de lluvia y aprobó invitar a FUNCAGUA a participar del proyecto, generando así una alianza estratégica que permitió desarrollar el piloto y generar la presente guía que materializa el resultado final del mismo.

Esta guía es una recopilación de proyectos piloto del tipo pozos secos, una técnica de recarga gestionada de acuíferos (*MAR Managed Aquifer Recharge* por sus siglas en inglés) en Guatemala, complementados con conocimiento de experiencias internacionales. En el documento se registra el paso a paso de estas obras de recarga, logrando que lo puesto en práctica quede debidamente registrado y funcione como referencia en futuros proyectos similares, no solo a nivel local sino también como aporte regional.

La guía no agota el tema. Pretende ser un punto de partida para futuros documentos centrados en otro tipo de obras de MAR y en el correcto monitoreo y análisis de los resultados obtenidos en obras reales, por lo que se trata de una serie que se publicará anualmente, conforme se mejore y avance en la generación de información.

1. INTRODUCCIÓN: IMPORTANCIA Y NECESIDAD DE LA GUÍA

El recurso hídrico se encuentra cada vez más presionado en su disponibilidad, debido a la contaminación del agua en fuentes superficiales y subterráneas, al rápido crecimiento de la población y la variante disponibilidad del agua causada por el cambio climático. La población es ahora mucho más vulnerable a la inseguridad hídrica, tanto en el corto como en el mediano plazo, de manera estacional o permanente (Méndez, 2022).

En el mundo el abastecimiento del agua subterránea cubre una gran proporción de las necesidades de la población; empleándose 30% para uso doméstico y 40% en riego. El uso del agua subterránea crece un 5% cada año y el 25% del uso está comprometido al ser calificado como insostenible. La necesidad de combinar soluciones para la gestión del agua abordando la resiliencia climática y la seguridad hídrica es muy evidente (Zheng et.al., 2021 citados por Méndez, 2022:3).

La región metropolitana de Guatemala (RMG) depende en más de un 60% del abastecimiento del agua subterránea. Se ha llegado a estimar hasta un 83% de dependencia de las fuentes subterráneas al combinar la cobertura con pozos tanto en el sector municipal como industrial (FUNCAGUA, 2022). Se estima que existen más de 500 pozos en algunas microcuencas dentro de este territorio, como el caso de las microcuencas Villalobos y Las Vacas (Instituto de Investigación y Proyección sobre Ambiente Natural y Sociedad (IARNA), 2012, citado por Méndez, 2022:3).

FUNCAGUA (2018) citado por Méndez (2022:4) señala que: «aunque la RMG cuenta con un aporte de precipitación abundante para recarga hídrica ideal, en términos generales los acuíferos no se recargan localmente, sino en zonas externas, y las pocas zonas de captación de agua, no reúnen condiciones para la infiltración; la mayor parte de la RMG cuenta con un uso de suelo predominantemente urbano (poco permeable a impermeable), donde la cobertura forestal es limitada y las zonas de recarga disponibles son cada vez más escasas; por ende no existe recarga local para los acuíferos».

Ante este panorama, se reconoce la importancia de estudiar técnicas de MAR en Guatemala, como una alternativa para recuperar las fuentes de agua subterránea, práctica que además pueda ser incentivada a nivel municipal y en el sector privado. Para ello es necesario documentar, desde un punto de vista práctico, casos reales de obras de recarga, como las que se impulsan en el proyecto de pilotaje desarrollado por FUNCAGUA y GREMIA concebido en 2021 y desarrollado desde entonces, a la fecha.

MAR o recarga artificial, es una técnica donde intencionalmente se busca aumentar la disponibilidad de agua, volviéndose además una oportunidad para mejorar su calidad.

Méndez (2022:3) señala que MAR se emplea como una herramienta que fortalece la gestión de los recursos hídricos, pues en los diversos casos de éxito documentados a nivel internacional; se denota cómo a partir de una problemática de escasez o sobreexplotación se fortalecen de una u otra forma la cooperación interinstitucional,

se construyen nuevos procesos de interacción entre actores, surgen nuevas ideas de gobernanza y nuevas relaciones. De manera que, la técnica no solo mitiga una problemática en torno a la cantidad del recurso; sino además contribuye en estos procesos sociales.

Al respecto del uso de MAR, Fernández-Escalante y San Sebastián (en Escolero et al. 2017:913) señalan lo siguiente: «En estos tiempos en los que la escasez de recursos hídricos se ha convertido en un tema de interés general, la recarga artificial o técnica MAR se ha convertido en una alternativa sólida, seria, barata y segura para, combinada con las técnicas de gestión hídrica adicionales, encarar de manera frontal y solucionar problemas recurrentes relacionados con la escasez de agua y los efectos adversos del cambio climático. No es necesario ser un científico para desarrollar un dispositivo de recarga gestionada, si bien hace falta unos conocimientos básicos de los métodos más apropiados, la tendencia es a sistemas pasivos y permanentes y actualizar la sabiduría heredada de nuestros antepasados.» Para 2016 se reportaban en la literatura 139 casos de MAR en América Latina, de los cuales el 65% se ubicaron en Brasil. El resto distribuido entre México, países de América del Sur y en América Central y Caribe se encontraron proyectos únicamente en Costa Rica (Bonilla y Stefan en Escolero, Gutiérrez y Mendoza, 2017, citados por Méndez, 2022:3). Existe un vacío de experiencias en proyectos MAR en Guatemala que aborden todo su ciclo de elaboración y sus posteriores resultados, facilitando así comprender el impacto de esta técnica en la maximización del almacenamiento de agua y, en consecuencia, extender su aceptación y promoción como caso de éxito para la gestión del agua en el país, con potencial para reducir problemas de abastecimiento y sobreexplotación de acuíferos (Méndez, 2022:3).

2. JUSTIFICACIÓN DE LA GUÍA: SITUACIÓN DEL AGUA SUBTERRÁNEA EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE GUATEMALA

Desde 2018 FUNCAGUA realiza el monitoreo de niveles piezométricos (nivele estático y nivel dinámico) en pozos municipales en alianza con la Mancomunidad Gran Ciudad del Sur (MGCS). Las mediciones se realizan con sonda de inmersión de 500 metros de largo. En total se ha llegado a recopilar datos de niveles de más de 250 pozos en siete campañas de monitoreo (no se realizó monitoreo en época seca 2020 por las restricciones derivadas de la pandemia de COVID-19). Este monitoreo sistemático de los pozos dos veces al año (época seca y época lluviosa) se mantiene activo en la actualidad. (Méndez, 2022:13).

Méndez (2022) citando el estudio de FUNCAGUA (2022) que comparó los resultados de 91 pozos medidos en 2018 con datos de 48 pozos de 1978, registrados en un estudio realizado por INSIVUMEH en dicho año. Resalta algunos resultados relevantes de dicha comparación:

- Los pozos tienden a ser más profundos y de diámetros más reducidos. Esto podría asociarse a mejores técnicas de perforación (equipos más compactos y eficientes) como a una mayor densidad de pozos, ya que la urbanización demanda más pozos, aunque resulten menos productivos.
- Los niveles estáticos de los pozos en 1978 se ubicaban predominantemente en el rango de 31 a 75 m de profundidad (52% de los pozos estudiados). Para 2018 el nivel estático se ubica predominantemente en los rangos de 101 a 200 m (46%), de 201 a 300 (28%) y de 301 m o más (7%) de profundidad (en total el 81% de los pozos).

Se destaca que: «al realizarse comparaciones entre 2018 y 2021 se han evidenciado situaciones críticas de descensos en los niveles estáticos. En algunos municipios el 49% de los niveles estáticos ha descendido más de 10 metros en dicho período. En otros casos el descenso del nivel estático, aunque es menor a los 10 m (pero mayor a 1 metro) se reporta para el 56% de los pozos.» (FUNCAGUA, 2022, citado por Méndez, 2022).

«El problema de pozos que quedan deshabilitados porque el nivel del agua ha descendido más allá de su profundidad perforada es cada vez más recurrente. Algunos solo se deshabilitan estacionalmente, en la época seca, en otros casos se debe acudir a perforar nuevos pozos más profundos o a la práctica del telescopiado¹.» (Méndez, 2022:13).

¹ Técnica constructiva empleada en pozos mecánicos profundos, que consiste en hacer un entubado con el mayor diámetro y continuar dentro de éste, con un diámetro menor de tubería, permitiendo alcanzar una nueva y mayor profundidad, posibilitando así alcanzar zonas saturadas de agua más profundas.

Esta situación puede llegar a ser más grave según escenarios del cambio climático para la región. Pons y otros estimaron el Índice de Aridez² para las microcuencas de la RMG a 2030, 2050 y 2070 usando el escenario optimista de reducción de emisiones RCP 2.6. La línea base de dicho índice fue calculada para el período 1960–1990. Para el período base las 16 microcuencas de la RMG presentan índices de aridez con valores entre 1.42 y 2.10. Si bien se clasifican como regiones húmedas los resultados indican que las microcuencas experimentarán descensos en los valores de su índice de aridez para 2030 (es decir, que habrá menor disponibilidad de agua). El valor del índice variará en -3.2% y -6.3% dependiendo de la microcuenca (Pons, et.al., 2018, citados por Funcagua et.al., 2022).

Se estima que para escenarios de cambio climático optimistas en la reducción de emisiones (RCP 2.6), hacia los años 2030, 2050 y 2070 el Índice de Aridez³ en las 16 microcuencas de la RMG experimentará descensos en sus valores (con respecto a la línea base 1960–1990) de entre -3.2% y -6.3%, indicando que, aunque sigan categorizándose como regiones húmedas la disponibilidad de agua se reducirá. Específicamente «en el año 2070, 169 ha de la microcuenca de Las Cañas llegarán a clasificarse como semiáridas. Se observa que, incluso en el escenario más optimista, la parte norte de la RMG tenderá a futuro a parecerse a lo que actualmente se observa en las regiones de Zacapa y El Progreso.» (Pons, et.al., 2018, citados por FUNCAGUA, 2022:56).

En este contexto, de sobreexplotación y descenso acelerado del nivel de los acuíferos, crecimiento rápido de la población, pérdida de cobertura boscosa y contaminación de las aguas superficiales; todo exacerbado por el cambio climático las técnicas de recarga hídrica gestionada tienen potencial para convertirse en práctica valiosa en el territorio de la RMG, siendo complemento importante en una estructura de gestión integrada del recurso hídrico y marco legal, de manera que se puedan abordar las múltiples dimensiones que conducen a la inseguridad hídrica (Méndez, 2022).

2 El Índice de Aridez reúne los efectos combinados de temperatura y cantidad de lluvia sobre la disponibilidad del agua. Valores del índice entre 0.20–0.50 indican regiones semiáridas, entre 0.50–0.65 regiones subhúmedas y mayores a 0.65 refieren regiones húmedas.

3 El Índice de Aridez reúne los efectos combinados de temperatura y cantidad de lluvia sobre la disponibilidad del agua. Valores del índice entre 0.20–0.50 indican regiones semiáridas, entre 0.50–0.65 regiones subhúmedas y mayores a 0.65 refieren regiones húmedas.

3. OBJETIVOS Y ALCANCE DE LA GUÍA

La presente guía se concentra en recomendaciones de la técnica MAR con obras del tipo pozos secos (*shallow wells, dry wells*), basadas en la experiencia práctica de un pilotaje realizado en Ciudad de Guatemala y Villa Nueva RMG impulsado por GREMIA y FUNCAGUA en 2021.

Esta guía aborda la recarga en este tipo de obras con agua de lluvia captada en techos o agua de lluvia de escorrentía. No se aborda la técnica de MAR con agua de otras fuentes (ej. efluentes tratados de aguas residuales). La aplicabilidad de estas obras es para acuíferos superficiales y acuíferos no confinados (acuíferos libres).

La guía no profundiza en opciones de tratamiento post recuperación del agua recargada para usos específicos que puedan requerir filtración y cloración (ej. consumo humano, agua de proceso industrial).

Los objetivos de este documento son:

- Ofrecer información relevante sobre la recarga gestionada de acuíferos en términos generales, dando a conocer las distintas técnicas, beneficios y posibilidades de esta práctica.
- Ser una herramienta práctica para el desarrollo de proyectos de recarga gestionada de acuíferos en Guatemala, específicamente empleando la técnica de menor riesgo, de pozos secos, buscando que dichas intervenciones se realicen de manera segura y con buen desempeño.
- Incentivar la aplicación de este tipo de obras de bajo riesgo, para contribuir a que se genere más información sobre las mismas, reduciéndose las dudas e incertidumbre en su implementación y minimizando las fallas.
- Recomendar pautas para el monitoreo sistemático y mitigación del riesgo en las obras de recarga del tipo pozos secos.

4. MARCO CONCEPTUAL

La recarga gestionada de acuíferos también conocida como recarga artificial busca de manera intencional aumentar la disponibilidad del agua subterránea, almacenándola de manera natural en el acuífero, aunado a este proceso se da la oportunidad de que el agua sufra procesos que permiten mejorar su calidad (Méndez, 2022:24).

Méndez (2022:24) destaca que «para denominarla se usan también términos como recarga potenciada, recarga gestionada de acuíferos, recarga hídrica gestionada, bancos de agua y almacenamiento subterráneo sostenible. Además, que se sugiere evitar el uso del término “recarga artificial” puesto que suelen asociársele connotaciones negativas (Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO), 2005).»

Es importante mencionar que las técnicas de recarga no deben ser consideradas de ninguna manera como un método para la eliminación de desechos (Zheng et. al. 2021, citado por Méndez, 2021).

«Es el aumento de la alimentación natural de agua subterránea a los acuíferos o embalses de agua subterránea suministrando agua a través de pozos, inundando o cambiando las condiciones naturales». UNESCO (2002) citada por Quispe (2017) en Méndez, 2021:24.

El origen del agua que se utiliza en proyectos de recarga hídrica puede ser de lluvia captada en techos, de escorrentía superficial, cuerpos de agua superficiales o estaciones depuradoras de aguas residuales que cumplen altos estándares de tratamiento y monitoreo de sus efluentes. Este último caso no es el que recomienda este documento para su aplicación en Guatemala, sino más bien el del aprovechamiento del agua de lluvia que presenta, según monitoreos realizados por FUNCAGUA, parámetros fisicoquímicos de muy buena calidad.

La recarga hídrica no es una solución aislada, que por su aplicación podrá solucionar los problemas de sobreexplotación y garantizar agua abundante de por vida. Por el contrario, su práctica debe ser combinada con un amplio listado de métodos que aborden también: gestión de la demanda, reutilización del agua, incentivos para la construcción sostenible, entre otros aspectos que fortalecerán la gestión del recurso hídrico.

En general las técnicas de recarga hídrica gestionada son poco aplicadas por el desconocimiento sobre su alto potencial y por predominar en enfoque principalmente a la infraestructura hidráulica respecto a la gestión de los recursos hídricos, según el país. También se resalta poca continuidad en experiencias existentes y la escasa divulgación tanto en medios de comunicación como en los espacios educativos, de ahí que se destaque la poca difusión de experiencias de este tipo e investigaciones con rigor científico (Fernández y García (2008), citados por Méndez, 2022:24).

Desde el 3000 A.C. se reportan obras variadas que pueden catalogarse como prácticas de recarga hídrica. Algunos ejemplos son: tanques de percolación, represas de control y estanques de almacenamiento de agua en áreas áridas y semiáridas para almacenar agua, permitiendo la recarga indirecta de cuerpos de agua subterráneos. Muchos proyectos requieren bajos niveles de tecnología y pueden ser (y han sido por siglos) implementados con poco conocimiento de ingeniería (UNESCO, 2005, citado por Méndez, 2022:24).

A pesar de estas técnicas reportadas para la antigüedad, los proyectos de este tipo en Estados Unidos aparecen reportados a partir de 1936 y han ido creciendo en número con el paso del tiempo. Se reportan más de 1200 experiencias documentadas en 62 países. El repunte es principalmente a partir de 1990 (Zheng, et. al., 2021 y Escolero et. al. 2017 citados por Méndez, 2022:25).

5. PAUTAS TÉCNICAS PARA LA IMPLEMENTACIÓN DE TÉCNICAS MAR

Debido a la poca implementación que existe de este método en Guatemala, se elaboró un diagrama que indica los pasos a seguir para implementar proyectos MAR. El diagrama 1 muestra los pasos a seguir.

Diagrama 1. Pasos para seguir para la implementación de proyectos de MAR



Fuente. adaptado de Méndez (2022:57).

5.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

Se identifica un sitio que tiene potencial para ser intervenido con obras MAR cuando presenta de manera individual o simultánea, algunas de las siguientes características:

- Descensos reportados en los niveles piezométricos medidos en pozos de la región (se puede considerar que los descensos son importantes cuando hay abatimientos de 1 m/año, o más)³.
- Perforaciones de pozos para extracción de agua se realizan cada vez más profunda, resultando en costos de inversión, operación y mantenimiento de los sistemas de abastecimiento de agua cada vez más caros.
- Reportes que indican bajas en los rendimientos del caudal de los pozos (galones por minuto).
- Sobreexplotación del recurso hídrico (desbalance entre uso y recarga natural). Los estudios de balances hídricos y tasas de recarga y evapotranspiración son útiles para tener este conocimiento.
- Impermeabilización, de una proporción importante de la región de interés, impidiéndose la recarga por medios naturales.
- Concentraciones altas de algún contaminante de interés para la salud humana o que afecta el desarrollo normal de actividades económicas

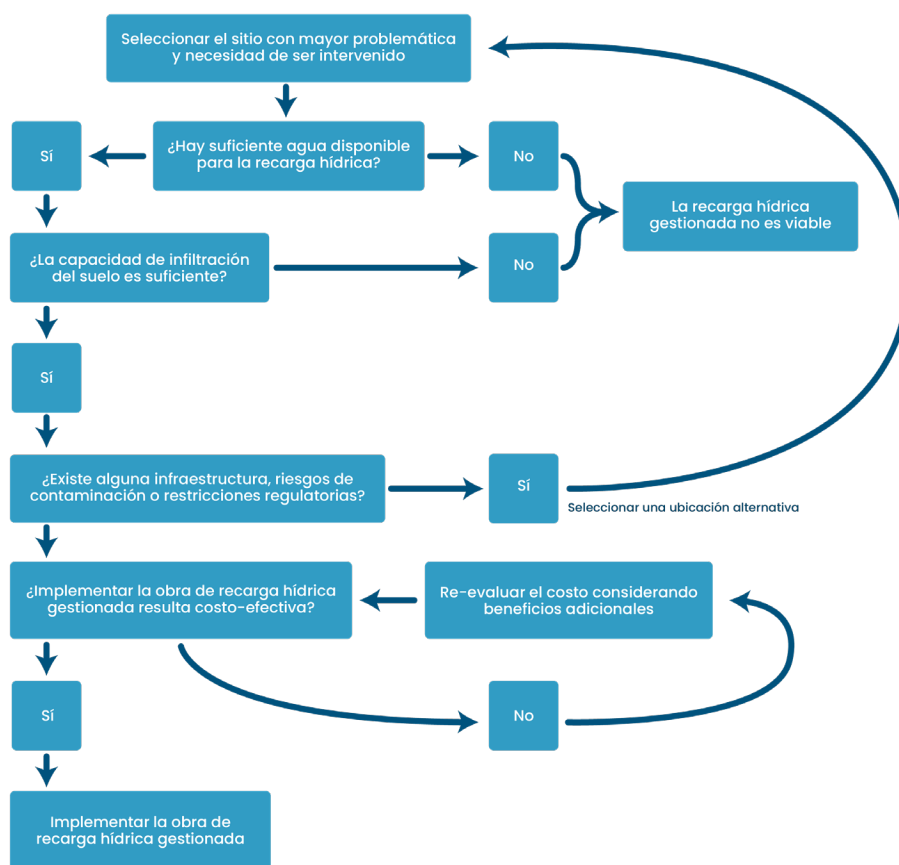
(por ejemplo: presencia de metales pesados, nitritos, flúor, salinidad, sólidos disueltos, etc. Por encima de concentraciones estipuladas por la normativa local o de la Organización Mundial de la Salud).

- Reportes de hundimientos en el terreno debido a la extracción de agua en los acuíferos que va produciendo espacios vacíos en las capas del suelo, en consecuencia, se ocasionan daños a la infraestructura existente (subsistencia).
- Períodos marcados de escasez de agua para diversos usos que coinciden con la estación seca del año, por lo cual resulta cada vez más necesario almacenar agua durante la estación lluviosa a fin de tener disponibilidad del recurso.

5.2 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO Y VIABILIDAD DEL PROYECTO

Debe realizarse un análisis para determinar si es viable implementar MAR, pues no basta solo con identificar la problemática. El agua que se empleará para la recarga debe estar disponible, aunque sea de manera estacional. El diagrama 2 muestra el esquema de análisis para identificar el sitio y la viabilidad.

Diagrama 2. Esquema de análisis para decidir si es viable un proyecto de MAR



Fuente. Elaboración propia. Adaptado de Alam et.al., 2021.

Para hacer una evaluación previa y poder determinar qué tan viable es una obra de MAR, Stefan (2022) propone una serie de preguntas orientadoras que se presentan a continuación.

¿Cuál es el principal problema? ¿Cómo está el balance hídrico de la zona interés?

Caracterización del déficit de agua tanto temporal como espacial.

¿Cuáles fuentes de agua están disponibles?

Evaluación cualitativa y cuantitativa de las fuentes de agua

¿Cuál es la ubicación óptima para obras de MAR?

Un mapa creado con datos locales realizando un análisis multicriterio puede orientar la decisión

En el sitio elegido: ¿cuáles son las condiciones específicas?

Caracterización hidrogeológica del sitio

¿Qué tipo de técnica de MAR puede ser aplicada en el sitio elegido?

Pre selección de una técnica apropiada de MAR

¿Cuál escenario de recarga es más eficiente?

Analizar diversos escenarios basados en datos reales, corridos en modelos utilizando software (ej. INOWAS, MODFLOW)

Por viabilidad costo efectiva se entiende que la obra es capaz de generar beneficios tomando en cuenta todas sus externalidades positivas y resultando menos costosa de implementar que una obra de ingeniería 100% consistente en obra gris, por ejemplo: se podrá comparar los costos de implementar pozos secos de recarga para rehabilitar un pozo de extracción que presenta bajas en su productividad vs. la perforación de un nuevo pozo de extracción desde cero, la compra de agua a un tercero o el acarreo y trasvase desde otras fuentes. Además, se pueden estimar los costos en que incurriría el beneficiario o beneficiarios de la obra en caso de verse obligados a asumir externalidades negativas como: paros en producción, compra de agua de proveedores externos, bajas en la eficiencia de abastecimiento de agua, conflictividad social, mala imagen, etc.

Por suficiente agua disponible se entiende que existe agua en las cantidades necesarias para la capacidad de infiltración que se estima puede aportar la obra. El agua para suministrar puede provenir de distintas fuentes, siendo principalmente captación de agua de lluvia desde techos o conducción dirigida de escorrentía. Esta disponibilidad se estima de mejor manera en el apartado de diseño.

5.3 SELECCIÓN DE LA OBRA

Las obras de MAR pueden clasificarse dependiendo de la infraestructura utilizada o del tipo de agua que reciben para la recarga, las cuales pueden ser interceptores o infiltradores de agua. En el caso de la técnica de interceptación de agua se tienen la modificación de cauces de arroyos y ríos y la captación de agua de lluvia (Mendoza en Escolero et al. 2017).

Por la fuente de agua que se recarga se puede tratar de: aguas pluviales captadas en techos (cosecha de agua de lluvia), aguas de escorrentía urbana, aguas de escorrentía en terrenos agrícolas, aguas tratadas provenientes de sistemas de tratamiento de aguas residuales y aguas superficiales captadas desde un cuerpo de agua (corrientes naturales, embalses, canales permanentes).

Las estrategias más utilizadas alrededor del mundo, y recopiladas por Fernández-Escalante et al. (2018), Zheng et. al. (2021), Escolero et al. (2017), UNESCO (2005) se describen en la tabla 1.

TABLA 1. ESTRATEGIAS Y TÉCNICAS ASOCIADAS CON MAR		
Estrategia principal	Técnicas asociadas	Descripción
Lagunas de infiltración	Estanques de infiltración, piscinas de infiltración (infiltration ponds, infiltration basins)	Estanque de infiltración
Infiltración desde lecho de río inducida	Estanques de percolación (recharge dams), canales de infiltración (riber bank infiltration)	

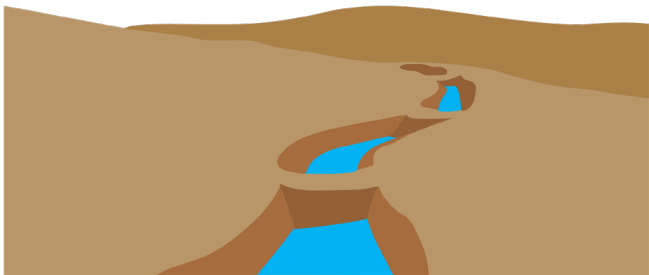
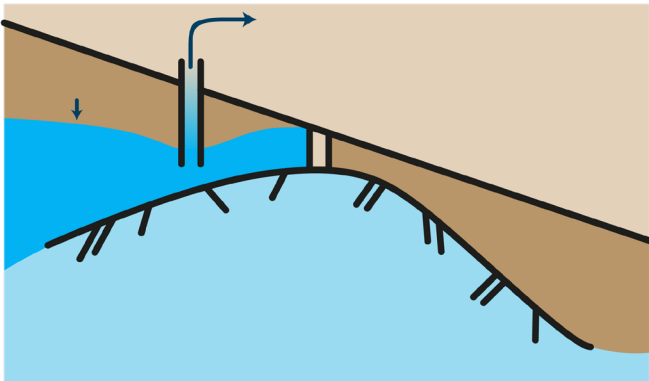
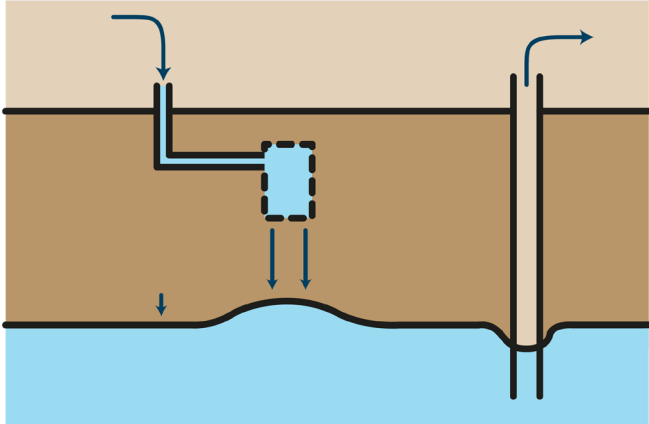
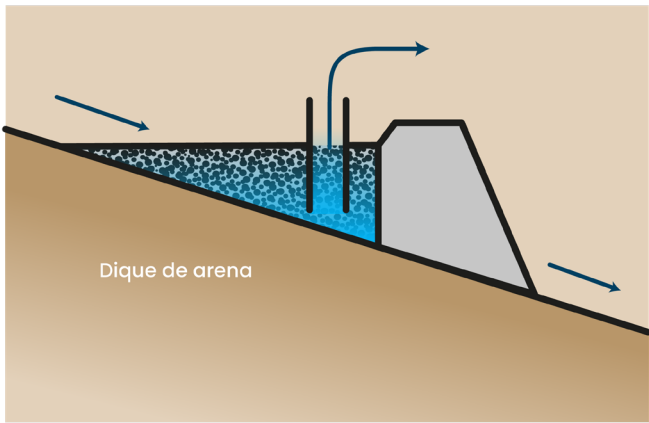
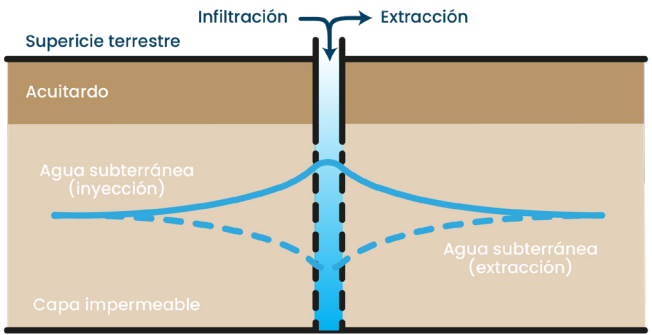
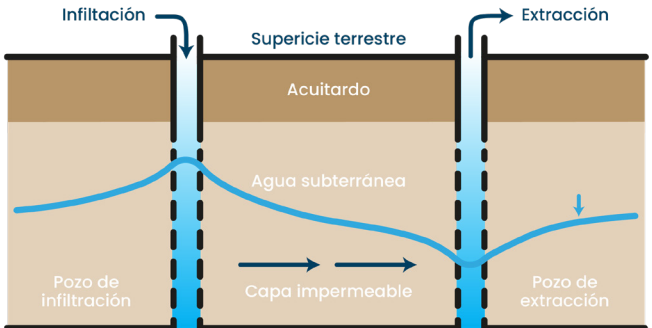
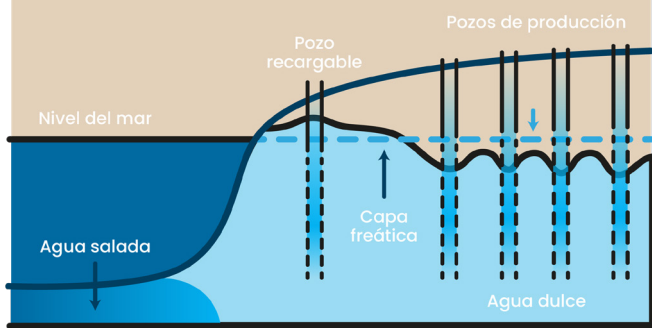
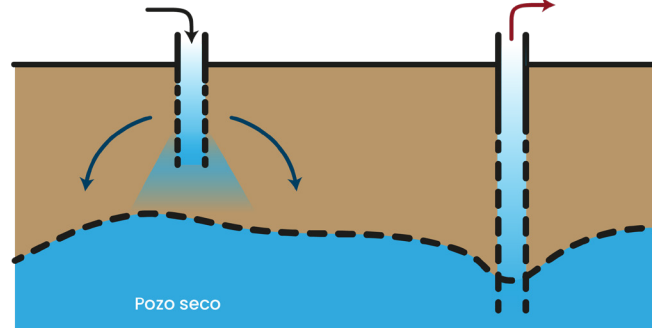
TABLA 1. ESTRATEGIAS Y TÉCNICAS ASOCIADAS CON MAR		
Estrategia principal	Técnicas asociadas	Descripción
Lagunas de infiltración	Zanjas de infiltración, presa subterránea, galerías de infiltración, banco de arena (sand dam)	
		
		
		

TABLA 1. ESTRATEGIAS Y TÉCNICAS ASOCIADAS CON MAR

Estrategia principal	Técnicas asociadas	Descripción
Pozos de infiltración por gravedad	ASR, ASTR, (borehole wells)	ASR  ASTR 
Barreras hidráulicas	Pozos costeros (coastal wells)	
Pozos secos de recarga gestionada de acuíferos	(shallow wells / dry wells)	

Fuente. Ilustraciones propias basadas en Sarfaraz et. al., 2021.

La Guía Metodológica para Proyectos de Recarga Gestionada de Acuíferos de Chile clasifica las obras en tres tipos: recarga fuera del cauce, recarga en medio del cauce y recarga usando pozos secos (Comisión Nacional de Riego [CNR] y Commonwealth Scientific and Industrial Research Organisation [CSIRO], Chile, 2020). Puede resultar complicado ajustar una obra real de recarga en solo una de estas categorías, por eso se suele usar estos conceptos solo como orientación sobre un enfoque aplicado. Se prefiere el uso del término recarga gestionada de acuíferos (MAR) por ser más general y englobar varias técnicas como las mencionadas en la tabla 2. (Mendoza en Escolero et al., 2017).

Independientemente de la técnica de recarga gestionada que se utilice todas las obras tienen componentes en común que se enumeran a continuación (Tabla 2).

TABLA 2. OPCIONES PARA CONFORMAR UNA OBRA DE RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS (MAR)	
Elemento	Ejemplos de alternativas
Zona de captura	Presa, laguna de retención, dique, humedal, canal, techos.
Pretratamiento	Sistemas pasivos: humedales, biofiltros, decantación, cajas sedimentadoras, filtros de arena.
Recarga	Pozo de infiltración, zanja de infiltración, laguna de infiltración, lecho de río, pozo de inyección, etc.
Almacenamiento subterráneo	El acuífero donde se almacena el agua.
Recuperación	Pozo de recuperación (extracción de agua). Descarga intencionada a un ecosistema dependiente de agua subterránea.
Uso final	Riego, agua de proceso industrial, abastecimiento de agua potable, ecosistema acuático (algunos usos pueden requerir tratamiento adicional previo al uso como filtrado y cloración).

Fuente. Adaptado de Comisión Nacional de Riego de Chile (CNR), 2020.

Para aplicar una determinada técnica de MAR es importante hacer la pregunta ¿qué situación se desea resolver? Algunos problemas que pueden ser abordados según cada técnica se presentan en la Tabla 3.

TABLA 3. POSIBLES TÉCNICAS DE MAR ADAPTABLES SEGÚN PROBLEMÁTICA ESPECÍFICA.

Situación o problemática	Técnicas posibles MAR
Abatimiento de niveles piezométricos del acuífero	Pozos secos, pozos de infiltración
Intrusión salina	Pozos secos, pozos de infiltración, lagunas de infiltración
Picos de caudal en eventos extremos	Pozos secos, pozos de infiltración
Inundación en zonas urbanas	Pozos secos, pozos de infiltración, canales de infiltración, estanques de percolación
Pérdida de suelos en pendientes pronunciadas	Zanjas de infiltración o acequias
Poca humedad disponible en los suelos	Zanjas de infiltración, galerías de infiltración, presa subterránea
Rehabilitación de pozos de extracción	Pozos secos, pozos de infiltración, pozos de inyección
Aumento de concentración de contaminantes en el agua subterránea	Pozos secos, pozos de infiltración, lagunas de infiltración, pozos de inyección
Reducción de las pérdidas por evaporación	Banco de arena, presa subterránea
Depuración adicional de aguas previamente tratadas	Lagunas de infiltración, banco de arena
Mantenimiento de caudal ecológico en cuerpos de agua (restauración de un ecosistema)	Lagunas de infiltración, presa subterránea, estanques de percolación

Fuente. Elaboración propia.

5.3.1. POZOS DE INFILTRACIÓN Y POZOS SECOS PARA LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS

Son una técnica de infiltración que usa pozos de gran diámetro (0.8 a 1.0 m) para recargar un acuífero no confinado por gravedad o un acuífero superficial. Aunque este es su diámetro recomendado en la literatura se reportan diámetros variables desde 0.45 m hasta 1 m.

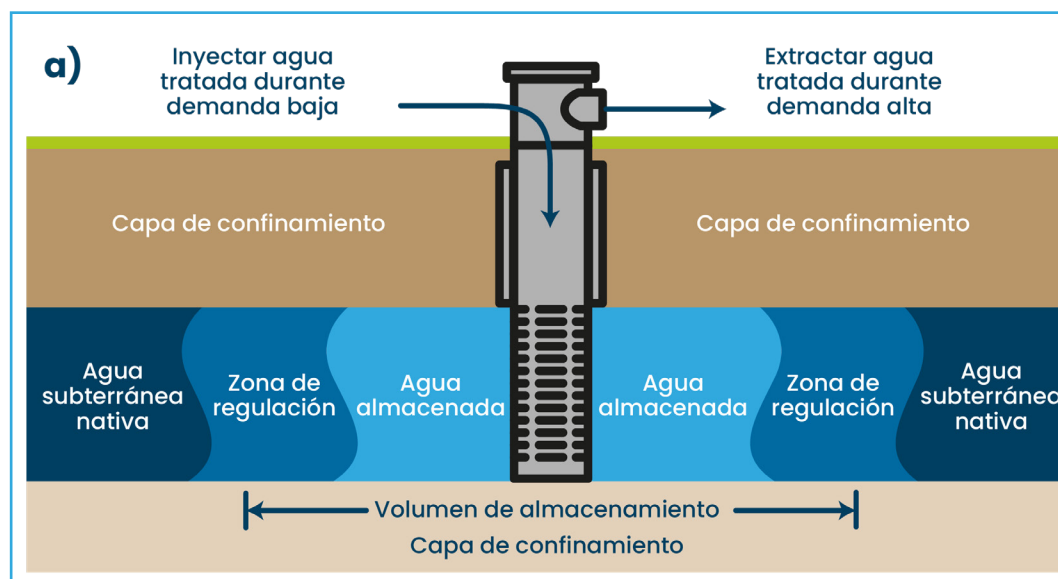
Su aplicación es útil en suelos que tienen capas de baja permeabilidad (arcillas) en sus primeros metros. Las profundidades varían entre los 2 m hasta los 24 m en pozos excavados a mano. Pozos secos perforados con maquinaria alcanza profundidades muy variables desde 35 m hasta 300 m.

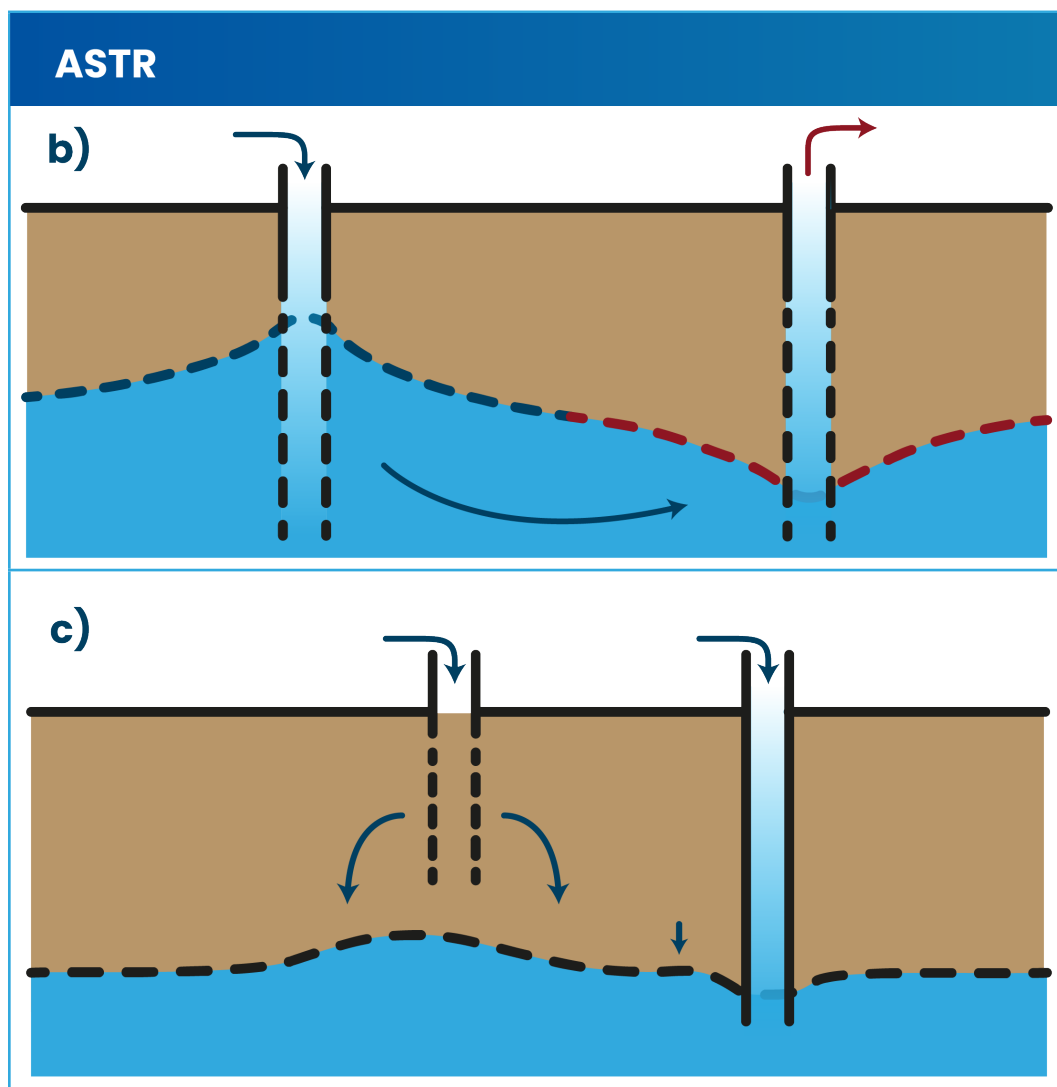
En ambos tipos el agua penetra por gravedad poco a poco hacia las capas profundas. Los pozos de infiltración se conectan de manera directa con la zona saturada. Los pozos secos por el contrario no alcanzan la zona saturada del acuífero, de manera que las capas que lo separan del mismo funcionan como un filtro natural del agua recargada.

Los pozos de infiltración pueden funcionar de diferentes maneras (Figura 1):

- La recarga y la extracción del agua suceden en el mismo pozo, traducido como almacenamiento del agua en un acuífero y recuperación (ASR, por sus siglas en inglés de Aquifer Storage and Recovery)
- La recarga del agua a través de un pozo y la extracción de un pozo separado cercano, que se beneficia de manera directa de dicha recarga. Esta técnica es llamada acuífero de almacenamiento del agua en un acuífero, transferencia y recuperación (ASTR, por sus siglas en inglés de aquifer storage transfer and recovery).
- La recarga del agua sucede de manera indirecta desde un pozo que no toca la zona saturada de un acuífero superior o acuífero libre y la extracción puede suceder en un pozo mecánico cercano que se beneficia de manera indirecta de la recarga.

Figura 1. Principio de funcionamiento de un pozo de infiltración (a) ASR, (b) pozo de infiltración ASTR (b) y (c) pozo seco





Ilustraciones propias basadas en Sarfaraz et. al., 2021.

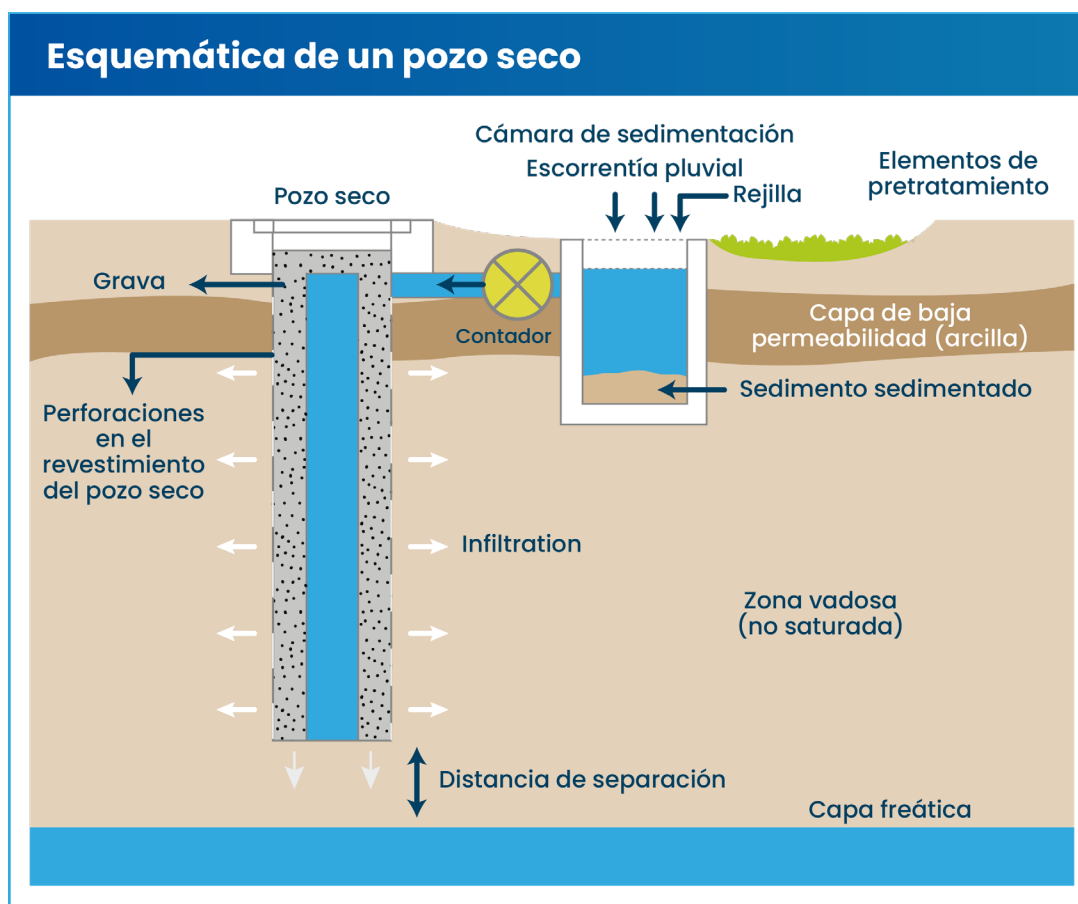
El origen del agua tanto de los pozos secos como de los pozos de infiltración puede ser de escorrentía o de techos (captación pluvial).

Los elementos constructivos básicos de los pozos de infiltración son:

- Caja desarenadora o cámara sedimentación
- Tubería de PVC perforada o ranurada (encamisado del pozo)
- Filtro de grava, piedrín y piedra bola (en el espacio entre la excavación y el tubo de PVC)

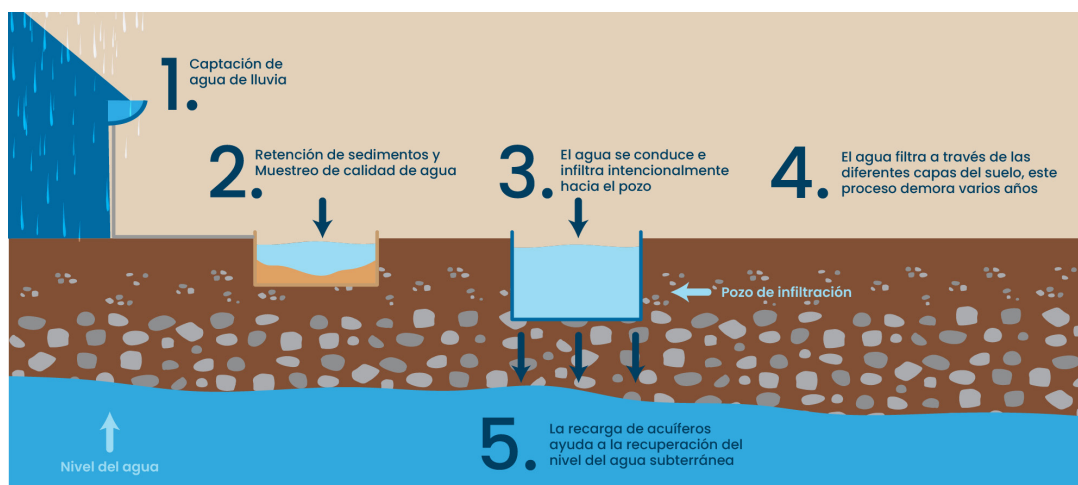
Brocal y tapadera

Figura 2. Esquema de un pozo seco alimentado con agua de escorrentía



Fuente. Elaboración propia basado en E. Edwards y B.Mandle (2017)

Figura 3. Esquema de un pozo seco alimentado con agua captada en techos



5.4 DISEÑO DE LA OBRA

En la etapa de diseño se utiliza la información disponible del sitio de interés para dimensionar la estructura.

Como insumos para el diseño es apropiado contar con:

- Datos de precipitación históricos procesados (Curvas de Intensidad, Duración y Frecuencia) correspondientes al sitio de interés
- Información sobre formaciones geológicas de la zona.
- Información sobre capas del suelo y su composición
- Resultados de las pruebas de infiltración localizadas. Las pruebas de infiltración son la fuente primordial de información para determinar la capacidad que tendrá la obra de recibir determinado volumen de agua.
- Información sobre el tipo de techo desde donde se captará el agua: material, estado, área total, estado de los bajantes, modificaciones y adecuaciones necesarias. O en su variante información sobre el uso del suelo y tipos de cobertura desde donde se captará el agua de escorrentía y la topografía y dirección de la pendiente del terreno.

Esta información permite realizar el dimensionamiento, decidir sobre el sitio exacto de emplazamiento y calcular materiales necesarios para realizar la obra, así como la ubicación de etapas de pretratamiento de ser necesarias (en caso de agua de escorrentía).

5.5 CONSTRUCCIÓN DE LA OBRA

Para la construcción de la obra se emplean como punto de partida los diseños presentados en el apartado 5.5. Esta propuesta de dimensionamiento es la que se ha empleado de manera exitosa en el proyecto piloto. Las medidas pueden variar en incrementos del diámetro y profundidad (dependiendo de los materiales encontrados). No se recomienda diámetros menores a 0.8 m.

5.6 PLAN ANUAL DE MANTENIMIENTO

El plan anual de mantenimiento consiste en realizar limpiezas periódicas de las unidades de pretratamiento (cajas sedimentadoras) y canales de conducción o bajantes y canaletas antes de que inicien las lluvias para remover polvo, hojas y materiales acumulados. También durante la temporada lluviosa para remover arenas sedimentadas y posibles ramas, objetos y otros materiales

que restan eficiencia a las cajas sedimentadoras y que también pueden asolar el pozo y reducir su capacidad de infiltración si no se realiza la limpieza de manera periódica. De manera adicional, el mantenimiento permite identificar la necesidad de reparaciones, sustitución de unidades (por ejemplo, tapaderas o brocales) y alargar así el tiempo de vida del pozo previniendo socavamientos o caída de las paredes de este.

Las recomendaciones puntuales de mantenimiento se reúnen en la sección 5.6.

5.7 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

Las obras de MAR deben evaluarse en su funcionamiento, pues de lo contrario no se podrá afirmar que se realiza una adecuada gestión de la recarga. Se recomienda medir como mínimo: volumen de agua infiltrado (m^3/mes) y calidad de agua infiltrada. Es importante dar seguimiento a los volúmenes de agua que son capaces de ser infiltrados en la obra. Esta medición puede ser directa llevando un control de las mediciones del contador (lecturas periódicas) o de manera indirecta, realizando estimaciones con datos de lluvia locales (idealmente medidos en el pluviómetro del sitio) y aplicando cálculos de escorrentía según las áreas del lugar y el material de cobertura.

El comportamiento particular de un pozo seco de recarga gestionada de acuíferos, a la hora de infiltrar el agua dirigida hacia él, puede ser estudiado con las variaciones de nivel registradas en un sensor específico para tal fin (datalogger) configurado para monitorear cambios en la presión dentro del pozo cada minuto. Si bien este requerimiento no es indispensable, permitirá observar mejor cómo trabaja el pozo y aportará información útil para el establecimiento de más obras similares en el mismo sitio o sitios cercanos.

Se debe llevar un seguimiento de la calidad del agua para tener certeza de que el agua captada que se ingresa a la obra no afectará las propiedades del agua presente en la zona saturada. Si bien, los materiales geológicos funcionan a manera de filtro natural, lo ideal es que el agua que se emplea para infiltrar en el pozo sea de la mejor calidad posible. Los parámetros de mayor importancia para el monitoreo puntual se presentan en el Apéndice 8.10

Evaluar el rendimiento permitirá que se reúna más y mejor información de las obras conforme pasa el tiempo, aportando insumos útiles sobre su mantenimiento, opciones de mejora y mejores prácticas en su realización.

Los detalles para la apropiada evaluación y monitoreo se presentan en el apartado 5.9.

6. CASO DE ESTUDIO: POZOS SECOS PARA LA RECARGA GESTIONADA DE ACUÍFEROS

6.1 IDENTIFICACIÓN DEL PROBLEMA

En ambos sitios intervenidos con estas obras existen pozos mecánicos para la extracción de agua con fines de aprovechamiento. La principal intención en este caso de estudio es la de prevenir el abatimiento de niveles piezométricos del acuífero y por ende se califica como una restauración o restablecimiento de pozos de extracción.

6.2 IDENTIFICACIÓN DEL SITIO Y VIABILIDAD DEL PROYECTO

La locación de un pozo seco para la recarga por gravedad debe seguir las recomendaciones que se presentan en la Tabla 4., según se use agua de escorrentía o agua captada desde techos:

TABLA 4. COMPARATIVA DE RECOMENDACIONES SEGÚN ORIGEN DEL AGUA PARA UN POZO SECO

Pozo seco – agua captada en techos	Pozo seco – agua de escorrentía
Zona de alta a media permeabilidad según mapa geológico (Anexo 7.2)	Zona de alta a media permeabilidad según mapageológico (Anexo 7.2)
Techos de lámina amplios y en buen estado	Aprovechar el desnivel natural del terreno
Canales de techo y bajantes en buen estado o posibilidad de instalarlos	Captar el agua desde una zona con cobertura vegetal y/o boscosa
Lejos de zonas con contaminación industrial (emisiones y chimeneas) que puedan corroer los techos o producir acumulación de contaminantes en las láminas del techo	Lejos de zonas con potencial escorrentía de aceites, lubricantes y materia fecal.
Espacio para la realización de la obra: excavación, acumulación de material extraído y colocación de tubería. Considerar que el diámetro mínimo de un pozo seco es de 0.80 m.	Espacio para la realización de la obra: excavación, acumulación de material extraído y colocación de tubería Considerar que el diámetro mínimo de un pozo seco es de 0.80 m.
Permitir la construcción de canales, cajas unificadoras y sedimentadoras en el trayecto hacia el pozo.	Permitir la construcción de canales, cajas unificadoras y sedimentadoras en el trayecto hacia el pozo

Fuente. Elaboración propia

Las siguientes figuras ejemplifican algunas de estas consideraciones:

Figura 4. Pozo seco para captar agua de escorrentía: Sitio 1



Imágenes Satelitales Google Earth



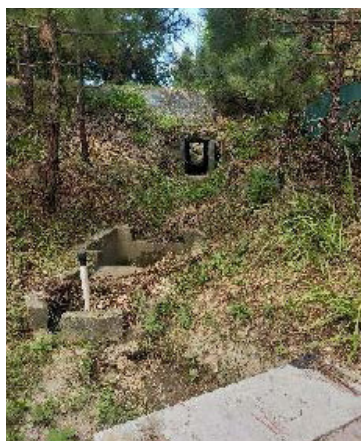
Descripción del sitio:

El pozo seco de infiltración (identificado como PR) se ubicó aprovechando la pendiente natural del terreno de aproximadamente 3 hectáreas para captar agua de escorrentía proveniente de la zona boscosa sombreada en amarillo. El agua de lluvia escurre por el terreno boscoso hasta pasar a través de la rejilla y llegar al canal impermeabilizado que aparece en la fotografía de la izquierda. El agua es conducida hasta el pozo. El desnivel del terreno es de unos 8 metros ya que va desde 1643 msnm y la ubicación del pozo en 1635 msnm en una distancia de 175 m. Esto se traduce a una pendiente del 4 al 5%.

Figura 5. Pozo seco para captar agua de escorrentía: Sitio 2



Imágenes Satelitales Google Earth



Descripción del sitio:

El pozo seco (identificado como PR) se ubicó aprovechando la pendiente natural del terreno de aproximadamente 3.5 hectáreas para captar agua de escorrentía proveniente de: la zona boscosa, zona de pastos y descarga de aguas pluviales de la zona de urbanización. El agua de lluvia escurre por la zona pavimentada y atraviesa una rejilla en la parte baja del muro verde (fotografía de la izquierda) desde ahí por la misma zona baja del terreno el agua es conducida hasta el pozo. El desnivel del terreno es de entre 8 y 10 metros ya que va desde 1272 msnm a la ubicación del pozo en 1262 msnm en una distancia de 150 m. Esto se traduce a una pendiente del 5 al 6%.

Figura 6. Pozo seco para captar agua de lluvia: Sitio 3



Descripción del sitio:

El pozo seco se ubicó aprovechando el bajante de agua de lluvia que evacúa el agua desde los techos al alcantarillado pluvial. El área de techo de lámina comprende 1624 m² y se señalan sombreados en color amarillo. La fotografía de la izquierda muestra el bajante de PVC en 3" de diámetro el cual se conectó para dirigir el agua al pozo seco.

Créditos de la fotografía: Jorge García Chiú

6.3 SELECCIÓN DE LA OBRA

En los sitios de intervención, se seleccionó el uso de pozos secos considerando el conocimiento previo de la geología de las zonas y las limitaciones en el uso del espacio y la topografía, pues otro tipo de obra (por ejemplo, zanjas o lagunas de infiltración) no hubiese sido posible de implementar.

6.4 DISEÑO DE LA OBRA

6.4.1. PRUEBAS DE INFILTRACIÓN Y CAPACIDAD DEL POZO

Las pruebas de infiltración se realizan conforme se perfora de manera manual en el sitio elegido. Permiten observar las capas de materiales predominantes en la zona y brindan un dato de cuánta agua puede ser “consumida” por el pozo en un período de tiempo. El método para realizar las pruebas de infiltración se detalla en el Anexo X que corresponde con el Método de Porchet.

Otros métodos que pueden ser usados son:

- Lefranc con carga variable (apto para suelos de permeabilidades moderadas)
- Sociedad Suiza Mécanica del Suelo (apto para suelos de permeabilidades bajas)
- Servicio Geológico de los Estados Unidos (USGS) (apto para suelos de permeabilidades moderadas)

Las pruebas de infiltración y caracterización de las capas del suelo permiten además identificar en qué zonas irá la tubería perforada y en cuáles no deberá perforarse.

El siguiente es un ejemplo de una zona de perforación y los datos de infiltración obtenidos para cada capa.

Figura 7. *Materiales extraídos en una perforación de pozo seco realizada en Villa Nueva, Guatemala. Fuente: cortesía Ing. García Chiú*



Tierra negra
0.0–0.5 m)



Arena y limos provenientes
de excavación

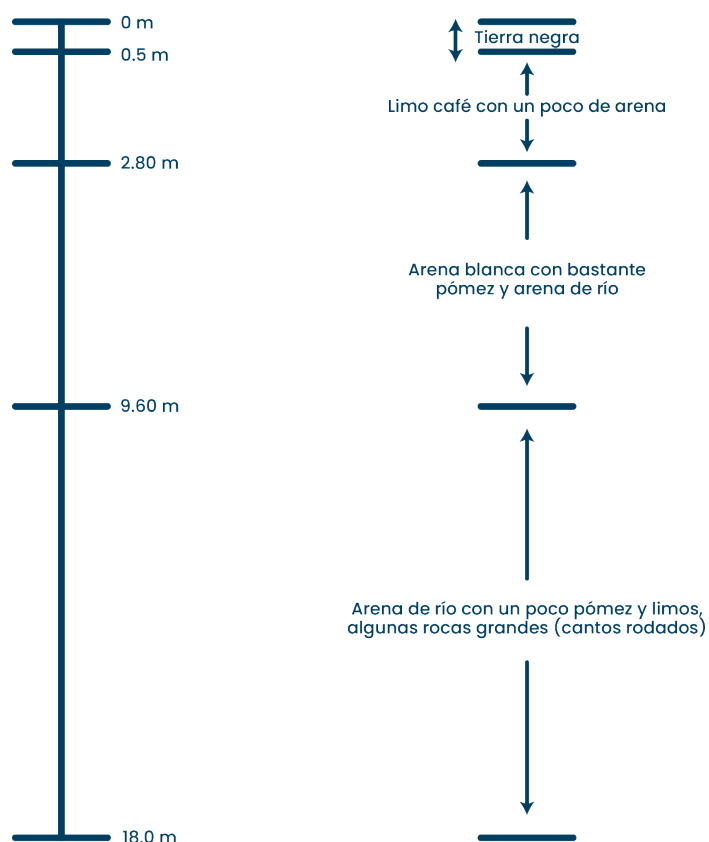
Para la zona de estudio se obtuvo los resultados que se muestran en la tabla 5.

TABLA 5. CÁLCULO DE LA PERMEABILIDAD SEGÚN ESTRATIGRAFÍA DE PERFORACIÓN DEL POZO				
Capa	t (min)	Descenso (cm)	Tasa infiltración T (min/cm)	Permeabilidad estimada (m/s)
Tierra negra	5.0	1.8	2.78	6.0×10^{-5}
Limo café con un poco de arena	5.0	2.2	2.27	7.33×10^{-5}
Arena blanca/amarilla con pómez	5.0	8.5	0.59	2.83×10^{-4}
Arena de río con limos	5.0	4.2	1.19	1.4×10^{-4}

Fuente. Ing. Jorge García Chiú

Figura 8. Perfil estratigráfico de la zona de estudio usada como ejemplo.

Esto permite obtener el siguiente perfil estratigráfico:



Fuente: Ing. Jorge García Chiú

Usando un criterio conservador, se decidió no considerar en la capacidad de absorción del pozo a las primeras dos capas menos permeables, por lo que los 3.0 m de la parte superior quedan sin perforaciones en la tubería. En el resto del pozo se instaló tubería perforada de 24" de diámetro en excavación de 0.90 metros.

6.4.2. POTENCIAL DE CAPTACIÓN DE AGUA EN EL POZO

La tasa de infiltración (T) se puede definir como la relación del período de tiempo de la prueba y la diferencia de lecturas. Con la permeabilidad obtenida por material y el espesor de cada capa dentro del pozo, para flujo perpendicular a las capas del suelo es posible obtener la capacidad de infiltración en litros/segundo y así integrar la capacidad total del pozo.

Con la permeabilidad obtenida y el área de cada capa dentro del pozo, es posible obtener la capacidad de infiltración en litros/segundo y así integrar la capacidad total del pozo (ver tabla 6).

TABLA 6. CAPACIDAD DE INFILTRACIÓN (l/s) SEGÚN ÁREA DE LAS CAPAS FILTRANTES ENCONTRADAS			
Capa	Permeabilidad estimada (m/s)	Área filtrante por capa en m ²	Capacidad de filtración l/s
Tierra negra	6.0×10^{-5}	1.8	2.78
Limo café con un poco de arena	7.33×10^{-5}	2.2	2.27
Arena blanca/amarilla con pómez	2.83×10^{-4}	8.5	0.59
Arena de río con limos	1.4×10^{-4}	4.2	1.19
Capacidad total de filtración en l/s			8.76

Fuente: Ing. Jorge García Chiú

De acuerdo con el resultado se puede decir que el pozo es capaz de infiltrar 8.76 litros en un segundo, o 31.5 m³ en una hora.

Conocer la capacidad que tiene el pozo para recibir agua permitirá calcular el área de techo o área de escorrentía cuya lluvia puede ser dirigida hacia el mismo. Este cálculo se detalla en la siguiente sección.

De acuerdo con pozos de infiltración construidos en la Ciudad de México reportan capacidades de 6 l/s, sin que se lleguen a presentar problemas de saturación. Los efectos de estos pozos se reflejaron en una recuperación de los niveles de agua en piezómetros ubicados a tres y 50 m de distancia del pozo de infiltración (Mendoza et.al., en Escolero et.al., 2017).

6.4.3 POTENCIAL DE CAPTACIÓN DE AGUA DESDE TECHOS DE LÁMINA

Como pudo determinarse en la sección anterior, con las pruebas de infiltración, espesor de las capas y profundidad total del pozo se obtuvo que puede infiltrar 8.76 l/s o 0.00876 m³/s.

En esta etapa es necesario contar con datos de precipitación de la zona donde pensamos construir el pozo. Idealmente se deberá contar con las curvas IDF⁴ de una estación meteorológica representativa para la zona de interés.

Es posible estimar el caudal máximo que producirá un aguacero a partir del método racional pensando en áreas pequeñas, como la aportada por un techo.

$$Q = \frac{CIA}{3.6}$$

Q : caudal (m³/s)

C : coeficiente de escurrimiento según material (adimensional)

I : intensidad de la precipitación (mm/h)

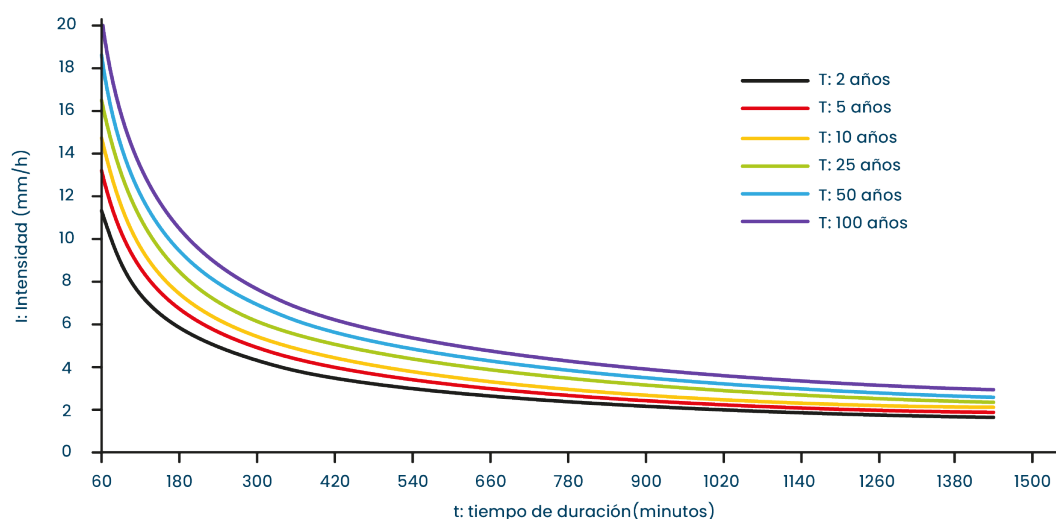
A : área del techo (km²)

Según el material del techo se puede cambiar el valor del coeficiente de escurrimiento C . Para el ejemplo se utilizará $C=0.80$ por tratarse de un techo de lámina en buen estado.

Dado que la variable limitante es el caudal que puede recibir el pozo se despeja el área del techo en donde se captará agua para dirigirla al pozo.

Para este ejemplo, como muestra de cálculo se usará la siguiente información de precipitación (curvas IDF):

Figura 9. Curvas de intensidad, duración y frecuencia (datos únicamente de ejemplo)



⁴ Las curvas IDF (Intensidad, duración y frecuencia) son calculadas por la autoridad meteorológica, en este caso el INSIVUMEH ha publicado las curvas IDF para estaciones meteorológicas clave en el país. Se recomienda usar los datos de la estación más cercana al sitio de interés.

Para un período de retorno de 2 años, en un aguacero de 180 minutos de duración se presenta una intensidad de precipitación de 6 mm/h.

$$0.00876 \frac{m^3}{s} = \frac{0.80 * 6 \text{ mm/h} * A}{3.6}$$

$$A = \frac{3.6 * 0.00876 \frac{m^3}{s}}{0.80 * 6 \text{ mm/h}}$$

$$A = 0.00657 \text{ km}^2 = 6570 \text{ m}^2$$

De manera análoga se puede calcular casos más conservadores a partir de los datos de las curvas IDF, como se muestra en la tabla 7

TABLA 7. ESCENARIOS DE PRECIPITACIÓN PARA PERÍODOS DE RETORNO ESPECÍFICOS SEGÚN LAS CURVAS IDF

Período de retorno T (años)	Intensidad de la precipitación a 180 minutos (mm/h)	Área de techo (m2)
2	6	6570
5	7	5631
10	8	4925

6.4.4 POTENCIAL DE CAPTACIÓN DE AGUA DE ESCORRENTÍA

El método racional puede emplearse para estimar también si el área y cobertura de una zona que aportará agua de escorrentía se adapta a la capacidad del pozo, o por el contrario se requerirá de más de un pozo seco de infiltración.

Cuando el sitio está compuesto por diferentes tipos de suelos y coberturas se debe calcular el coeficiente de escurrimiento global.

$$C = \frac{\sum_{i=1}^n C_i A_i}{A}$$

C: coeficiente de escurrimiento global

C_i: coeficiente de escurrimiento de cada área parcial (ver tabla en Anexo X)

A_i: área parcial

n: número de áreas parciales

A: área total de interés

Para un área de interés compuesta como sigue:

Vegetación/ cobertura	Topografía	Textura del suelo	Área parcial (Ai) (km ²)	Ci	$\frac{C_i A_i}{A}$
Boscosa	Ondulada (6-10%)	Franco arcillosa	0.0042	0.35	0.165
Pastizales	Ondulada (6-10%)	Franco arcillosa	0.0035	0.36	0.142
Pavimentada	Plana	No aplica	0.0012	1	0.135
Total (A)=			0.0089		0.442

Volviendo a la fórmula del método racional:

$$Q = \frac{CIA}{3.6}$$

$$Q = \frac{0.442 * 6 \frac{mm}{h} * 0.0089 km^2}{3.6}$$

$$Q = 0.00655 \frac{m^3}{s} < 0.00876 \frac{m^3}{s} \text{ (Capacidad del pozo)}$$

En conclusión, el área seleccionada sí puede ser usada como fuente de agua de escorrentía para el pozo seco de infiltración con las características del ejemplo.

Se debe considerar además que, en un evento de precipitación sobre suelo desnudo, la lluvia debe, primero, saturar el suelo para que exista escorrentía. Esta condición es variable según la duración e intensidad de cada evento, por lo que habrá un porcentaje de lluvia que no se dirige a la obra de recarga.

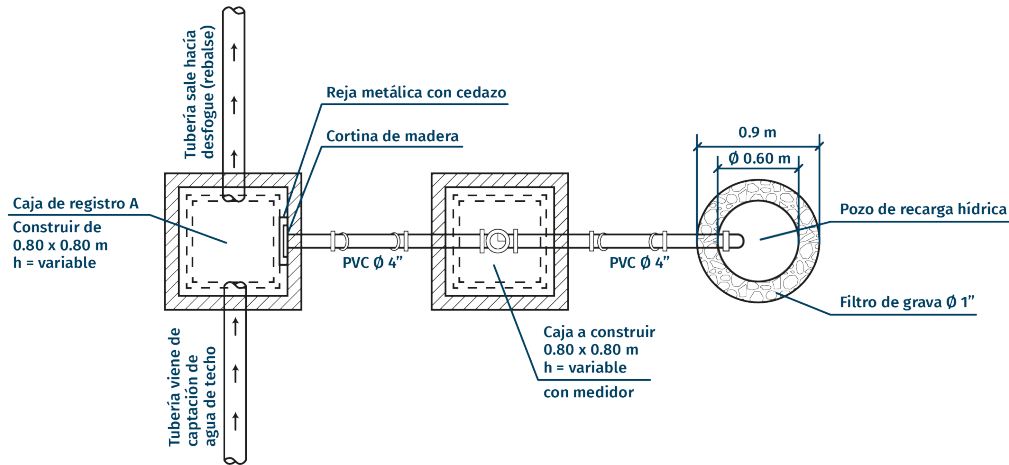
6.5 CONSTRUCCIÓN DE LA OBRA

Los pozos secos de recarga gestionada de acuíferos pueden construirse utilizando el diseño base mostrado en las figuras 10 y 11.

Los elementos que aparecen en el diseño son:

- Una caja de registro que unifique el agua traída desde diferentes fuentes pudiendo ser techos, escorrentía conducida por canales impermeabilizados o de ambas fuentes combinadas. Esta caja también permite atrapar arena o sólidos y tiene además un desfogue hacia otro punto alternativo en caso de producirse agua excedentaria.
- Una rejilla metálica que impide el paso de sólidos, hojas y otro material indeseado hacia la tubería de conducción al pozo.
- Una caja de registro con medidor de caudal (con el fin de contabilizar el volumen real que ingresa al pozo seco de infiltración).
- Pozo de seco infiltración rodeada con filtro de grava (profundidad variable según estratigrafía del suelo).

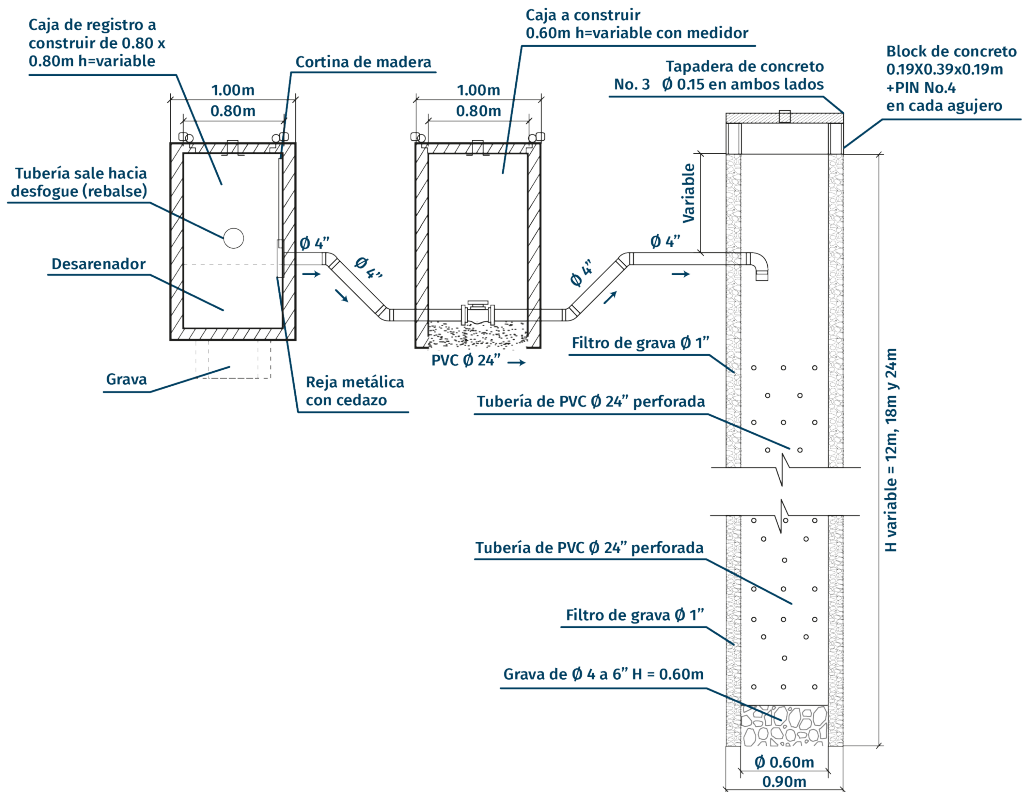
Figura 10. Vista en planta de un pozo de recarga gestionada de acuíferos o pozo seco



Fuente: Diseño por el Ing. Jorge García Chiú

El espacio entre la excavación y el tubo se rellena con grava (cantos rodados) lavada de un diámetro de $\frac{3}{4}$ " o similar, y el fondo del pozo (0.60 m) se dejó con piedra bola de 6 a 8 pulgadas de diámetro a manera de dissipador de energía para evitar socavamientos, en la parte superior de cada uno de los pozos se dejó un rebalse para el agua que no logre infiltrar en una tormenta muy intensa tenga como llegar a quebrada existente.

Figura 11. Vista lateral de un pozo de recarga gestionada de acuíferos o pozo seco

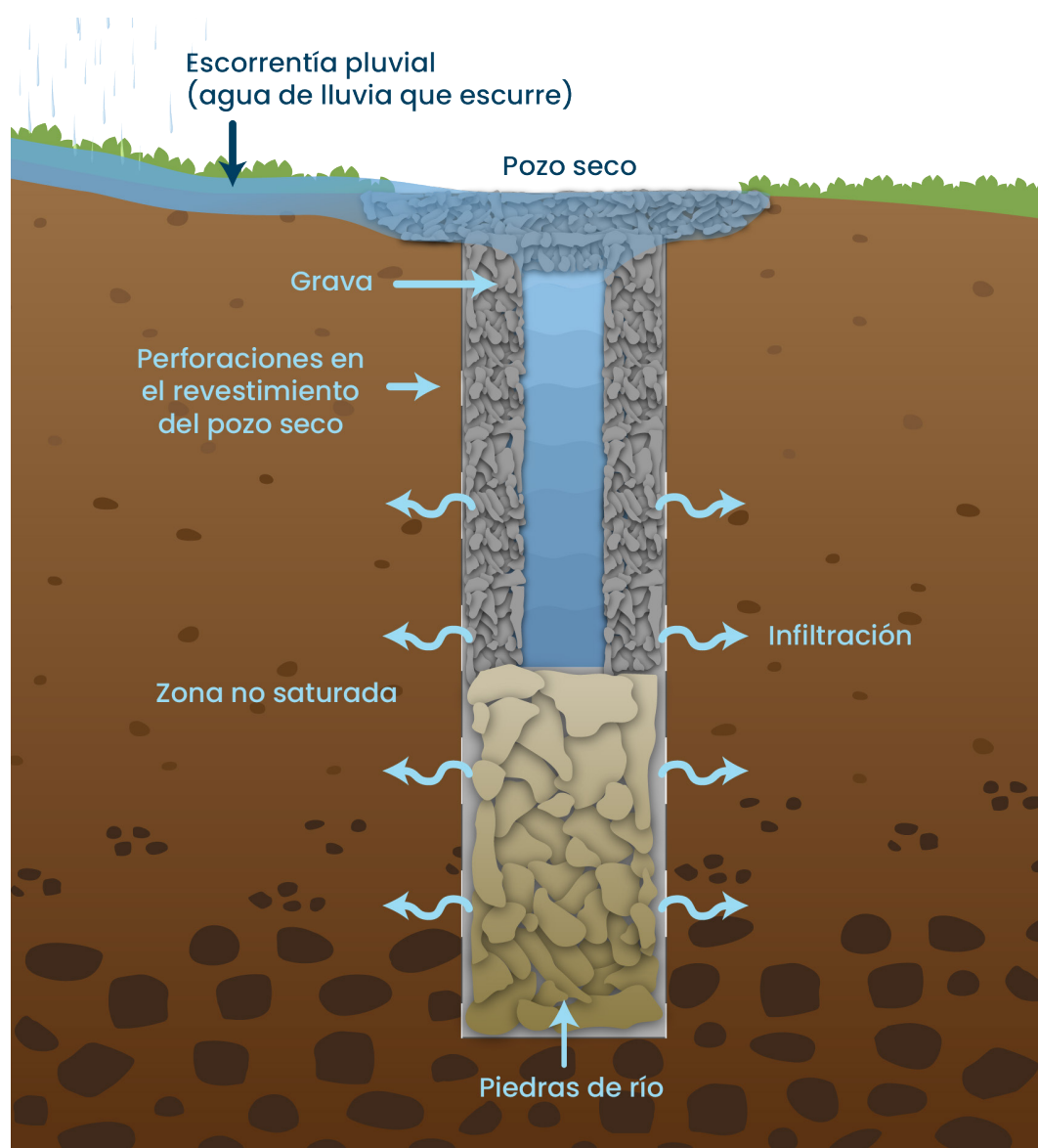


Fuente: Diseño por el Ing. Jorge García Chiú

Cuando se construye el pozo hay altos riesgos de seguridad para el personal que deben ser mitigados. De igual manera durante las labores del mantenimiento. Un pozo encamisado es menos riesgoso para el personal. Además, reduce la posibilidad de pérdida de la inversión si el pozo colapsa a lo interno y se tapa.

Si en la construcción de un pozo no se usara encamisado, se coloca piedra bola en la base a manera de soporte y para reducir el desgaste que producirá el ingreso del agua, reduciendo el problema de que se formen campanas o cavernas. La piedra ocupa un 60% del volumen del pozo lo cual es una desventaja pues resta eficiencia en el volumen de agua capaz de ser recargado.

Figura 12. Esquema de un pozo seco sin encamisado, usando únicamente piedra bola en la base y piedrín



Fuente: Elaboración propia.

DESCRIPCIÓN DE PROCESO CONSTRUCTIVO DE UN POZO SECO CON ENCAMISADO DE PVC



Inicio de la perforación manual del pozo por personal especializado en la excavación de pozos artesanales.

Durante esta etapa se aprovecha para hacer las pruebas de infiltración.



Medición del grosor de las capas del suelo, conforme se identifica cambio de material.

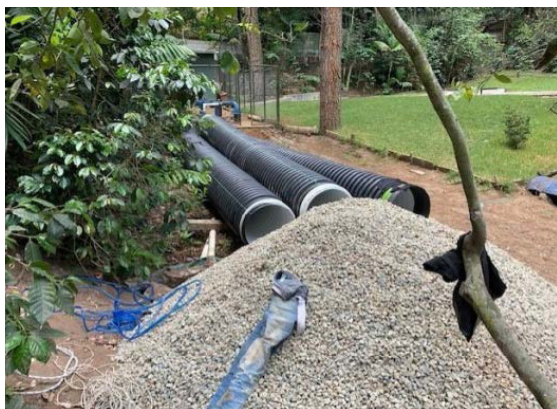


Conforme se avanza en la profundidad de la excavación se requiere la instalación de una polea que permita la extracción del material que la persona va retirando.

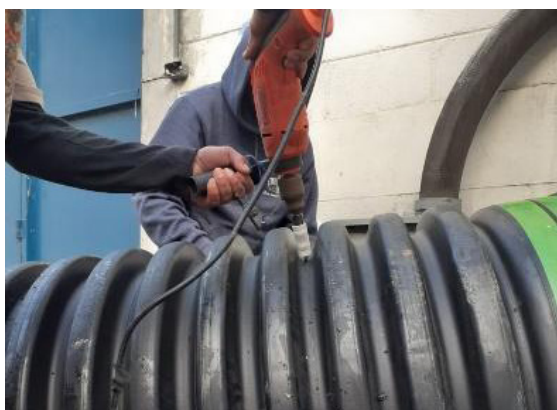


El pozo debe ser trabajado siempre entre dos o tres personas para garantizar la seguridad de quien excava, conforme se adentra en profundidad.

En la zona baja del pozo se puede experimentar sofocamiento, de ahí la importancia de mantener la comunicación y contar con la polea y cuerdas que faciliten subir a la persona.



Vista de los materiales: tubería de PVC de 24" de diámetro y piedrín para colocar en el espacio anular entre la perforación y la tubería.



Perforación de la tubería de PVC con barreno y detalle de los orificios.

Se utilizó broca de 1". La separación de los orificios sigue un patrón de separación de 60 cm verticalmente y 20 cm diametralmente.



Colocación de la tubería de PVC en el pozo excavado.



Colocación de sello sanitario de concreto en parte superior del pozo. En este caso la tubería de PVC del encamisado se llevó más arriba del nivel del suelo para fines demostrativos de la obra.



Detalle de dos pozos finalizados. En uno se observa el acabado con sello sanitario de concreto en la parte superior del pozo. Se observan tuberías de ingreso del agua para recarga.

En la fotografía de la derecha se observa el ingreso del agua (en este caso de lluvia) mediante un codo de PVC en tubería de 3".



Colocación de sello sanitario de concreto en parte superior del pozo. En este caso la tubería de PVC del encamisado se llevó más arriba del nivel del suelo para fines demostrativos de la obra.



Detalle de diferentes tipos de tapadera de concreto usadas para proteger los pozos del pilotaje. Las tapaderas pueden ser construidas a ras del suelo o elevadas con varias hiladas de blocks.

En la parte interna de las mismas debe ser posible amarrar una soga de la cual se suspende el sensor registrador de datos (datalogger).



Excavación de caja de registro previa al pozo, en la cual se instala el contador de volumen de agua que ingresa.

La fotografía de la derecha muestra el acabado final de esta caja de registro y el contador instalado.



Instalación del dispositivo registrador de datos protegido en una cápsula de PVC de 2" de diámetro con su respectivo tapón y suspendido por una soga desde la tapa del pozo.

El registrador de datos utilizado en este pozo no envía los datos de manera remota en tiempo real. Los registros se deben descargar directamente de la memoria del dispositivo visitando el sitio cada 15 días y extrayendo el sensor del pozo para realizar su lectura, pasando los datos de manera directa a la computadora.

En el Apéndice 8.11 se muestra una gráfica generada por el datalogger.

6.5.1 FILTRACIÓN DEL AGUA CAPTADA EN TECHOS

En pozos de recarga que recibirán agua proveniente desde techos, es posible instalar filtros especializados para el agua de lluvia, que remueven importantes cantidades de material particulado.

Estos filtros funcionan creando un vórtice que separa los sólidos del agua a través de una fina malla de 250 micrones, y existen en diferentes tamaños según el caudal que desee ser filtrado.

Los filtros funcionan por gravedad y se instalan en la bajada de agua previo a dirigirse al sitio de almacenamiento o hacia el pozo de recarga. Estos pueden abrirse y desmontarse para ser limpiados con un cepillo y agua, por lo cual su mantenimiento es sencillo. En Guatemala ya se cuenta con empresas que importan y venden este tipo de tecnología.

Figura 13. Ejemplos de filtros instalados en proyectos que captan agua de lluvia desde techos.



Detalle del mesh interno del filtro



Vista del efecto vórtice en el interior del filtro



Vista del filtro instalado en un proyecto



Especificaciones técnicas del filtro

6.6 PLAN ANUAL DE MANTENIMIENTO

Los pozos secos requieren la limpieza periódica de su material filtrante para evitar la colmatación de este y por tanto reducir la capacidad de infiltración. Es por esta razón que se recomienda que el agua que infiltre en los mismos sea de muy buena calidad, con un bajo contenido de sólidos disueltos totales (TDS) y materia orgánica.

En los pozos construidos en el pilotaje diseñados para captar agua de escorrentía y que cuentan con medio filtrante alrededor del encamisado de PVC se ha observado una reducción de su profundidad efectiva en aproximadamente 60 a 100 cm tras 15 meses de operación.

En experiencias internacionales la colmatación puede reducir la capacidad de infiltración de los pozos en un 25% (Mendoza et.al., en Escolero et.al, 2017)

Los pozos secos que se construyen solo conteniendo grava y piedrín (sin encamisado) permiten que se retire el material para su limpieza en el exterior, a fin de volver a ser introducido para que el pozo opere por un nuevo período. Este mantenimiento debe ser hecho al menos una vez por año, sin embargo, puede variar la frecuencia según la calidad del agua que esté ingresando al pozo. Los pozos que captan agua de lluvia son menos propensos a experimentar esta situación de colmatación.

Por seguridad para evitar accidentes con personas y el ingreso y atrapamiento de animales se debe proteger la boca del pozo con su respectiva tapa removible. Se recomienda también para evitar el ingreso de luz solar y reducir el crecimiento de algas.

Figura 14. *Procesos de limpieza de sedimentos en pozos secos*



Pozo seco diseñado sin encamisado de PVC, con el material filtrante (piedra bola y grava) retirado para su limpieza y lavado.

Detalle del material fuera del pozo. Se observa sedimentos y arena acumulados que deben ser retirados para mejorar el rendimiento en la recarga del pozo.

6.6.1 PROBLEMAS QUE PUEDEN PRESENTARSE Y SU SOLUCIÓN

Algunas de las situaciones o problemas se pueden solucionar paulatinamente en tanto se observa el funcionamiento del pozo, por ejemplo, aumentar la profundidad de este o tomar la decisión de colocar encamisado si no se había colocado desde el inicio.

Los pozos que se diseñen para captar agua de escorrentía no deberían ser menores de 1 m de diámetro, para poder hacer mantenimiento y sacar sedimentos. Un diámetro menor dificultará la extracción de material e ingreso de personal para esta tarea.

El dispositivo datalogger (sensor registrador de datos) puede quedar atorado dentro del sedimento acumulado en el fondo. Cuando este queda atrapado la memoria se llena y no puede seguir registrando información de cambios de presión y/o nivel, y si mide probablemente serán lecturas erróneas. Lo ideal es poder vigilar cada semana si el datalogger no está quedando atrapado, pues a veces en menos de 15 días el sedimento es considerable y lo retiene.

Otra manera de prevenir el atoramiento del datalogger es protegerlo colocándolo no solo en una cápsula de PVC, sino dentro de un tubo de pvc (tipo piezómetro) que tenga entrada de agua en su parte más baja (Figura 14).

Figura 15. Ejemplo de un piezómetro instalado en un pozo seco para colocar el datalogger y protegerlo.



Una oportunidad de mejora en pozos someros que capten agua de escorrentía puede ser el dejar un metro de vacío en la parte superior del pozo (medido desde el borde del pozo hacia abajo), así el sedimento se acumulará en la parte superficial y no en la parte baja, facilitando así la limpieza.

Usar geotextil como barrera funciona para separar la piedra bola del fondo del pozo del área de piedrín de arriba.

Es necesario que en el sedimentador inicial exista un cedazo o rejilla para separar sólidos gruesos y basura vegetal que puede venir arrastrada. Mantener limpio el sedimentador permite prolongar la vida útil del pozo y proteger el datalogger del atrapamiento.

Figura 16. *Detalle del material geotextil que se puede colocar entre medios filtrantes para evitar que se mezclen y reducir acumulación de arena y sedimentos en el fondo del pozo*



Figura 17. *La acumulación de vegetación en el recorrido del agua de escorrentía debe controlarse para que no se desvíe el agua en su ruta hacia la caja de sedimentación y punto de recarga en el pozo.*

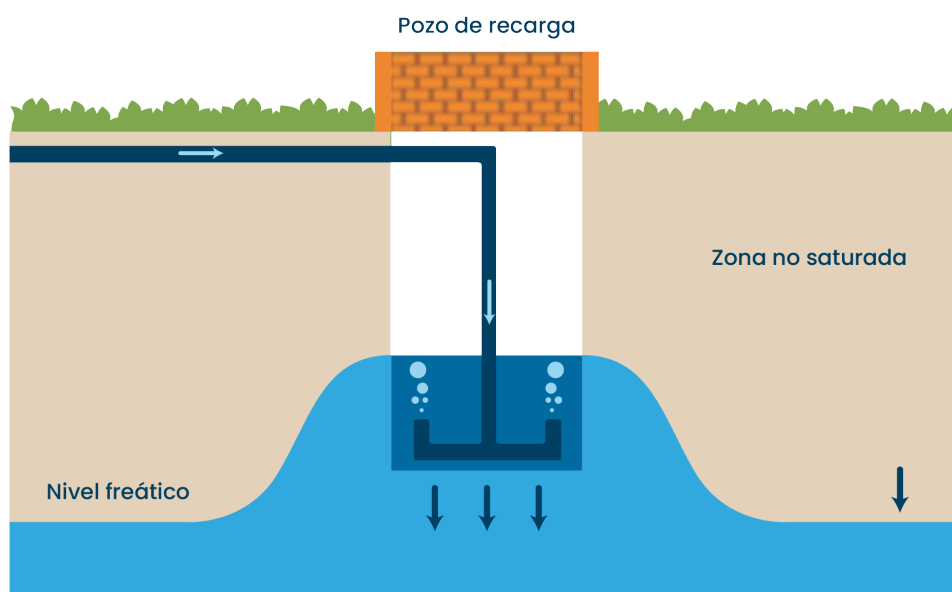


Figura 18. Las cajas de sedimentación deben ser limpiadas previo al inicio de la época lluviosa y periódicamente en la temporada de lluvias para evitar la acumulación de material en las mismas y en la boca del pozo.



Es importante asegurarse de que el ingreso del agua al pozo de recarga ocurra de manera lenta y no con turbulencia pues el aire que ingresa reduce la porosidad efectiva, por lo tanto, afecta la capacidad de infiltración del pozo y las capas de suelo circundantes. Una forma de garantizar el ingreso suave del agua se ha probado de forma exitosa en pozos construidos en Israel que usan un sistema con tubería de PVC “bottom-up”, colocando una “T” invertida en el extremo inferior de la tubería para evitar la disolución de aire de la atmósfera por caída libre.

Figura 19. Reducción de impacto por caída libre del agua en un pozo de infiltración, utilizando una “T” de PVC (adaptado de Fernandez-Escalante y San Sebastián en Escolero, et.al, 2017)

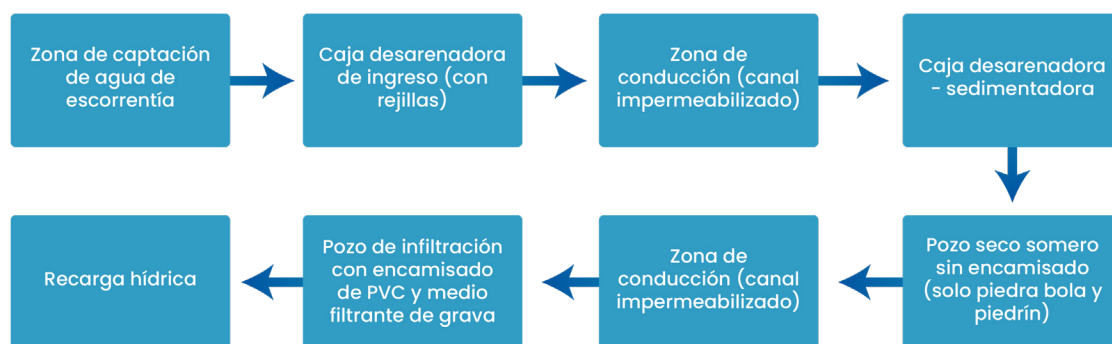


Fuente: Elaboración propia.

Si se tiene terreno disponible previo al pozo de recarga es aconsejable contar con varias etapas de sedimentación e intercalar diferentes estructuras de tratamiento para el agua de escorrentía pudiendo combinar pequeños estanques tipo humedales, lechos filtrantes y cajas de sedimentación.

La secuencia de estructuras intercaladas en el ejemplo documentado es la siguiente:

Figura 20. Elementos de pretratamiento intercalados previos al pozo de recarga gestionada de acuíferos en obra del pilotaje



Fuente. Elaboración propia

6.7 EVALUACIÓN DEL FUNCIONAMIENTO

La principal oportunidad que se tiene al diseñar un pozo seco y principalmente si es a nivel de pilotaje es poder evaluar su funcionamiento.

Esta evaluación abarca no solo medidas físicas como su capacidad de respuesta ante eventos de lluvias intensas, la respuesta ante inundaciones o atenuación de dichas situaciones y la generación de datos por parte de los dispositivos de medición.

En algunas ocasiones será necesario reacondicionar algunos elementos constructivos, mejorar las tapaderas, corregir la posición o dimensiones del contador o los ángulos de conducción del agua. Estos ajustes se determinan con la observación en campo durante el período de lluvias. El sitio donde se emplace el pozo podrá requerir acondicionamientos particulares que no estaban contemplados en el diseño original.

La etapa de evaluación del funcionamiento es una ventada de período de prueba. Algunas mejoras podrán ser detectadas durante los primeros meses de la época lluviosa, otras por el contrario se harán evidentes más entradas las lluvias, en los meses más intensos.

Evaluar el funcionamiento incluye observar detalles como:

- Conducción del agua pluvial o del agua de escorrentía hacia el pozo.
- Uniones de tuberías y elementos, detección de posibles fugas de agua, rebalses, etc.
- Correcciones en ángulos de inclinación de la tubería o cajas desarenadoras.
- Reposicionamiento o corrección en colocación del contador.
- Mejora de la obra con adición o reemplazo de materiales.
- Diseño de brocales y tapaderas
- Rejillas o pretratamientos adicionales.
- Necesidad de dispositivos de medición mejorados o adicionales

Las mejoras se podrán aplicar paulatinamente o dependiendo del inconveniente detectado, hasta terminar la época lluviosa. Puede afirmarse que la primera temporada es la que generalmente sirve como momento de evaluación.

El período de evaluación también permite contemplar más detalles a la hora de trabajar el plan de mantenimiento, cuya importancia se describió anteriormente.

Para que un proyecto pueda ser considerado un proyecto MAR es necesaria su evaluación y monitoreo, aún en fase piloto la obtención de datos permite un escalamiento controlado de la técnica y conclusiones sobre su viabilidad.

En los sitios donde se construyen pozos secos de recarga es recomendable instalar:

Dispositivo de monitoreo	Importancia	Ejemplo
Pluviómetro	Permite obtener datos de la cantidad de lluvia real que precipita en el sitio donde está la obra, aumentando la precisión de las estimaciones de agua recargada. Es posible asociar la información de la precipitación con los volúmenes de agua marcados en el contador para obtener información sobre el desempeño del pozo construido.	

Dispositivo de monitoreo	Importancia	Ejemplo
Contador / medidor	Permite que se cuantifique de manera directa el volumen de agua que ingresa al pozo, esto permite establecer un dato real de cuánta agua está siendo recargada o compensada por el propietario.	 
Sensor registrador de presión (idealmente medir también temperatura y conductividad)	El registrador de datos responde a las variaciones de nivel del agua en el pozo, guardando la información como variaciones en la presión. De esta manera se observa cómo responde la permeabilidad del pozo al ingreso del agua y cuánto tarda en absorberla. El rango de profundidad de operación del sensor debe ser el apropiado para la profundidad del pozo. En este caso se usaron en un rango de operación de 0 a 30.6 m. Si el sensor mide temperatura y conductividad también se puede registrar si ocurrieron cambios abruptos en la calidad del agua y su conexión con zonas de extracción de agua aledañas.	 

Dispositivo de monitoreo	Importancia	Ejemplo
Toma de muestra de agua periódicamente: Agua de lluvia se colecta directamente durante el evento de precipitación en el sitio o en el perímetro del sitio. Agua de escorrentía se colecta del agua acumulada en la caja de sedimentación tras el evento de precipitación	El agua que ingresa al pozo debe ser monitoreada de manera periódica para comprobar que su calidad es apta para la recarga (ver sección 6.4). Los parámetros más importantes según sea agua de lluvia o de escorrentía se presentan en el Apéndice 8.10	

6.8 COSTOS DE REFERENCIA (2021)

Los costos pueden rondar entre USD \$5000 y USD \$14 000 por pozo, esto depende de los materiales usados y de la profundidad de la excavación (a más profundidad más materiales requeridos y mano de obra).

Lo más costoso de este tipo de obras es la mano de obra, pues se requiere personas con verdadera experiencia en la excavación de pozos a mano.

En cuanto a materiales el precio puede elevarse si se utiliza tubería de concreto perforada, lo cual se recomienda al detectarse que el suelo es inestable y hay posibilidades de colapso de las paredes del pozo. El uso de tubería de concreto aumenta los costos de mano de obra, flete y equipo para su instalación. Un tubo de concreto de diámetro interior 91 cm y diámetro externo 112 cm con un largo útil de 92 cm cuesta alrededor de Q440 y reforzado con metal Q690. El peso de cada tubo es de alrededor de 160 kilogramos.

Si no hay riesgo de colapso usar PVC es viable. En casos a nivel internacional se reporta también el uso de tubería de acero.

El equipamiento para el monitoreo puede variar en costos, según dimensionamiento y nivel tecnológico del equipo. Algunos datos de referencia se detallan a continuación:

TABLA 8. COSTOS DE REFERENCIA PARA UN PROYECTO DE POZO SECO

Equipo	Precio (USD)
Contador de agua diámetro 3"	800
Contador de agua diámetro 4"	960
Flanges de PVC, empaque y tornillos para el contador	145
Registrador de datos sin telemetría (datalogger)	425
Dispositivo para descarga de datos a la computadora (aplica a registrador sin telemetría). Portátil. Puede usarse para leer múltiples dispositivos registradores.	340
Registrador de datos con telemetría (datalogger)	475
Plan de datos de internet para datalogger con telemetría (mensual)	12
Cable para registrador de datos con telemetría (cada metro)	10

6.9 EVALUACIÓN DEL RIESGO

Previo a realizar la infiltración de agua en un pozo seco de recarga hídrica es necesario evaluar determinados aspectos para mitigar el riesgo de fallos en la obra y de contaminación del acuífero. Los criterios se mencionan a continuación:

- **Evaluación de la geología del lugar y tipo de suelos:**

Dado que se penetrará el suelo con diferentes formaciones geológicas, se debe usar información oficial del Instituto Geográfico Nacional o si es posible a una escala de mayor detalle disponible a nivel local municipal, que puede estar disponible por información de proyectos realizados o de informes de pozos mecánicos perforados en años anteriores.

Terrenos planos y con el subsuelo que posea materiales granulares son ideales. Esto también puede confrontarse con el conocimiento local de proyectos cercanos y personas experimentadas en la elaboración de pozos artesanales en el municipio.

No se debe infiltrar en terrenos con formaciones poco permeables, como arcillas o limos, ni en formaciones rocosas que carecen de permeabilidad secundaria (fracturas). En este caso se debe explorar capas siguientes, para reconocer si existe zonas permeables posteriores a dichas capas.

Algunos ejemplos de rocas que no pueden utilizarse para infiltrar son las tobas soldadas (flujos piroclásticos de cenizas finas), rocas calizas y afloramientos de lavas volcánicas.

Estas formaciones predominan en la parte norte del departamento de Guatemala en municipios como Chuarrancho, San Juan Sacatepéquez, San Pedro Sacatepéquez, San Pedro Ayampuc, San José del Golfo, Mixco. Por lo

cual se debe conocer con certeza las capas predominantes en el sitio donde se desea realizar la intervención, antes de hacer la inversión en la obra.

Es muy conveniente siempre consultar con personas que tengan experiencia en la zona y hayan realizado estudios de suelos para proyectos previos, o consultar estudios de suelos preexistentes.

- **Topografía:**

No infiltrar en sitios con pendientes del 30% o más, o cerca de taludes pronunciados. Esto por el peligro de deslizamientos. La presencia de materiales como cenizas volcánicas y limos puede parecer muy estable cuando están secos, pero en momentos de saturación con agua pueden volverse inestables y provocar caída del material. En terrenos agrícolas empinados la práctica habitual para conservación de suelo agua son las zanjales de infiltración poco profundas y no se recomienda el uso de pozos secos para la infiltración.

Si se trabajará con obras de captación de agua de escorrentía se debe evaluar la dirección del movimiento del agua superficial debido a la topografía y desnivel del sitio, para conocer las rutas por donde viajará el agua en nuestro terreno de interés.

- **Nivel del agua subterránea:**

En sitios en donde los acuíferos son muy superficiales y se encuentra agua a 1 metro o 2 metros de profundidad, no se debe realizar pozos de infiltración, pues la naturaleza de las condiciones del sitio no permite que aplique el principio básico de las obras del tipo pozo seco, que es precisamente que exista un espacio de al menos cinco metros entre la base del pozo y la zona saturada del suelo.

- **Calidad del agua a infiltrar:**

El mejor criterio para determinar si la calidad del agua que se va a infiltrar en la obra es adecuada para dicho fin es comparar los resultados de las muestras de agua de lluvia que se tomen de manera periódica con la calidad del agua nativa subterránea. Si los resultados de la muestra del agua de lluvia son iguales o mejores que la calidad del agua nativa el nivel de riesgo de contaminación se mantiene al mínimo.

Otro criterio habitual en varios países que cuenta con normas específicas para la calidad del agua de infiltración (por ejemplo, México), es que el agua a infiltrar tenga parámetros de calidad dentro de los límites máximos permisibles para el agua de consumo humano.

Para fines prácticos en Guatemala se podrá utilizar la norma COGUANOR 29001 como guía de referencia en la sección 8.10 se presentan otros parámetros importantes para determinar en las muestras del agua a infiltrar.

TABLA 9. PARÁMETROS DE CALIDAD DEL AGUA PARA INFILTRACIÓN EN POZOS AL SUBSUELO DE LA NORMA OFICIAL MEXICANA NOM-015-CONAGUA-2007

Parámetro	Unidad de medida	Límite
Grasas y aceites	mg/l	15
Materia flotante	Unidad	0
Sólidos sedimentable	mg/l	2
Sólidos suspendidos totales	mg/l	150
Nitrógeno total	mg/l	40
Fósforo total	mg/l	20
Coliformes fecales	NMP/ 100 ml	No detectable

Se debe mantener siempre, mediante limpiezas rutinarias, libre de residuos sólidos o líquidos el área de captación de agua pluvial y las zonas por donde transite el escurrimiento superficial (si se capta de esta manera el agua). Esta condición también aplica en el caso de zonas de captación en azoteas, tejados o techos.

La frecuencia del monitoreo recomendada ideal en todo proyecto de recarga hídrica gestionada, es que sea la mayor posible, empleando dispositivos registradores automáticos. Sin embargo, dado que esto puede incrementar de manera considerable los costos del proyecto se pueden realizar muestreos de agua de manera periódica durante la temporada de lluvias y contar con una bitácora de control. Para agua de lluvia desde techos se recomienda un control al inicio de la temporada de lluvia, a mitad de la temporada y al final de la temporada de lluvia. Para agua de lluvia de escorrentía se recomienda un control mensual.

Las experiencias internacionales sugieren que el 95% de las muestras captadas deben estar dentro de los parámetros (Percentil 95) para considerar un riesgo mínimo de contaminación.

La normativa mexicana para obras de recarga con agua residual tratada NOM-014-CONAGUA-2003 fija una periodicidad quincenal para la realización de muestreos del agua que se infiltra. Sin embargo, como bien lo dice su nombre este control es para agua residual tratada, una práctica que no se recomienda en este documento y que requiere mucha más investigación para ser procedente en Guatemala.

7. REFERENCIAS

- Alam, S., Borthakur, A., Ravi, S., Gebremichael, M., S., Mohanty. 2021. Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. Science of The Total Environment. Vol 768. 144992. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>
- Comisión Nacional de Riego. 2020. Guía Metodológica Recarga Artificial de Acuíferos. (video). Gobierno de Chile. 7 min. 5 seg. son., color. Recuperado de: www.youtube.com/watch?v=5mvm_wBydBg&t=136s
- Daus, A. 2019. Almacenamiento y Recuperación de Agua en Acuíferos: Mejoramiento de la Seguridad en el Abastecimiento de Agua en el Caribe. Oportunidades y Desafíos. Banco Interamericano de Desarrollo. Recuperado de: publications.iadb.org/publications/spanish/document/Almacenamiento_y_recuperación_de_agua_en_acuíferos_Mejoramiento_de_la_seguridad_en_el_abastecimiento_de_agua_en_el_Caribe._Oportunidades_y_desafíos_es.pdf
- Escolero, O. Gutiérrez, C. Mendoza, E. (eds.). 2017. Manejo de la recarga de acuíferos: un enfoque en Latinoamérica. Instituto Mexicano de Tecnología del Agua. Morelos, México. Recuperado de: https://www.imta.gob.mx/biblioteca/libros_html/manejo-recarga-acuíferos-ehl.pdf
- Fernández, E; García, M. 2008. Título 3: Gestión de la recarga de acuíferos (MAR). 2da edición. Madrid, España. Serie Hidrogeología Hoy. Grafinat Método Gráfico. 137 p.
- Fernández-Escalante, E., San Sebastián, J., Villanueva, M., Calero, R. 2018. La recarga gestionada de los acuíferos como una técnica polivalente y efectiva de adaptación al cambio climático. Congreso Nacional del Medio Ambiente (CONAMA). Recuperado de www.researchgate.net/publication/330534550_La_recarga_gestionada_de_los_acuíferos_como_una_tecnica_polivalente_y_efectiva_de_adaptacion_al_cambio_climatico
- FUNCAGUA. 2017. Memoria de Labores: Inicios de la FUNCAGUA (2011-2017). Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana-FUNCAGUA. Guatemala. Recuperado de: www.funcagua.org.gt/2020/04/27/2017-memoria-de-labores-2011-2017-funcagua/
- FUNCAGUA. 2018. Plan de conservación del agua. Fundación para la Conservación del Agua en la Región Metropolitana de Guatemala. Recuperado de: <http://funcagua.org.gt/2020/04/27/2018-plan-de-conservacion-del-agua-para-la-region-metropolitana-de-guatemala-funcagua/>
- FUNCAGUA. 2020. Análisis comparativo de los niveles piezométricos parciales 2018 - 2019 de los pozos de agua de los municipios de la Mancomunidad Gran

Ciudad del Sur: Amatitlán, Mixco, San Miguel Petapa, Santa Catarina Pinula, Villa Canales y Villa Nueva. Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala.

FUNCAGUA. 2022. Informe del estado del agua de la Región Metropolitana de Guatemala 2022: el agua nos une. Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala. Guatemala.

Lloret, P.; Zabala, P.; Iturbide-Flores, M.; Godoy, J., Romero, J.; Díaz González, J.; Benitez, S.; Contreras, H. 2020. Plan Estratégico Fundación para la Conservación del Agua de la Región Metropolitana de Guatemala (2021-2026). [documento interno]. Guatemala, Guatemala. The Nature Conservancy. 92 p.

Méndez, A. (2022). Sistematización de experiencias de recarga gestionada de acuíferos (MAR) en la Región Metropolitana de Guatemala (RMG) como herramienta clave para generar políticas de seguridad hídrica. [Tesis de maestría]. Centro Agronómico Tropical de Investigación y Enseñanza. CATIE. Turrialba, Costa Rica. <https://repositorio.catie.ac.cr/handle/11554/62>

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 2005. Estrategias para la Gestión de Recarga de Acuíferos (GRA) en zona semiáridas. Gale, I (ed.).

Quispe, M.E. 2017. Recarga artificial de acuíferos en función de las características geohidráulicas para incremento de la disponibilidad hídrica en el manantial Collana – Cabanilla. Tesis de ingeniería agrícola. Facultad de ingeniería agrícola. Universidad Nacional del Altiplano. Puno, Perú.

Sarfaraz A., Anness B., Sujith R., Mekonnen G., ebremichael, Sanjay K. 2021. Managed aquifer recharge implementation criteria to achieve water sustainability. Science of The Total Environment. (768).144992., <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2021.144992>.

Schwab, G.O.; Frevert, R.K.; Edminster, T.W. Barnes, K.K. 1990. Ingeniería de conservación de suelos y aguas (p. 92 – 94). Limusa. México

Stefan, C. 2022. Groundwater Modelling for Managed Aquifer Recharge (en línea, seminario web). Guatemala, Guatemala. 180 min., son., color. Proyecto ERANET-LAC DIGIRES. 22 junio 2022.

Organización de las Naciones Unidas para la Educación, la Ciencia y la Cultura (UNESCO). 2005.

Voces del sur. 2018. En proceso el proyecto de recarga del acuífero de Salinas. Periódico Digital Voces del Sur. Puerto Rico. (en línea). Recuperado de: www.vocesdelsurpr.com/2018/04/en-proceso-el-proyecto-de-recarga-del-acuifero-de-salinas/

Zheng, Y., Ross, A., Villholth, K.G. and Dillon, P. (eds.). 2021. Managing Aquifer Recharge: A Showcase for Resilience and Sustainability. Paris, UNESCO.

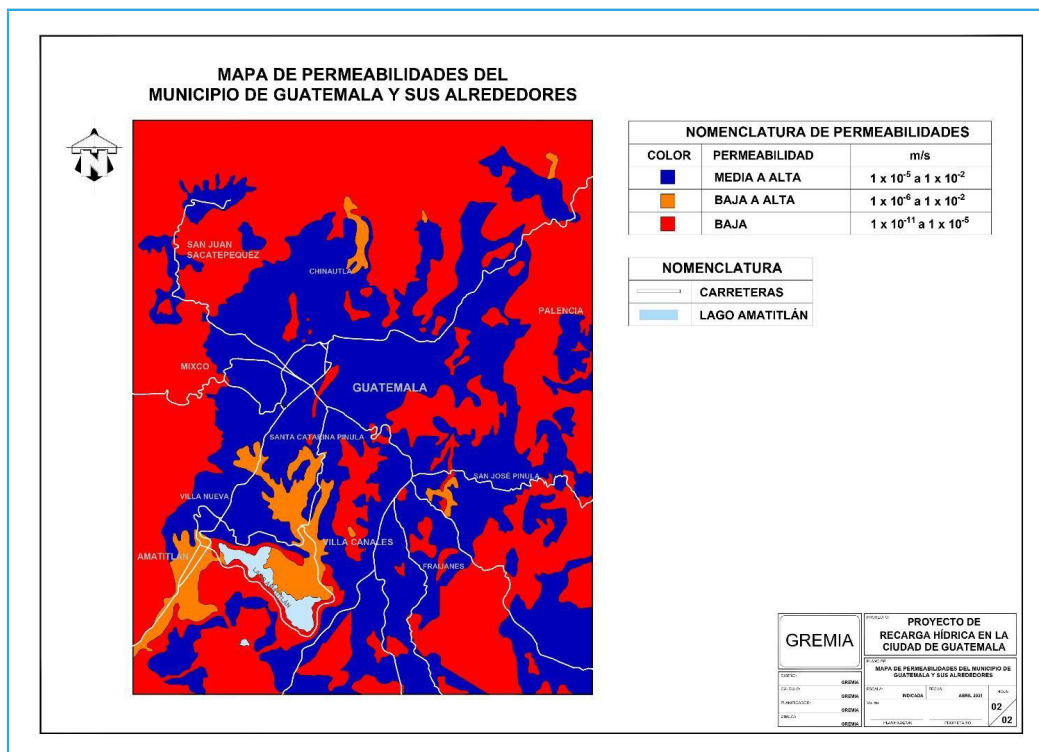
8. APÉNDICES

8.1 FICHA PARA ORIENTAR LA SELECCIÓN DEL SITIO DE UN POZO SECO DE INFILTRACIÓN

FICHA DE REGISTRO PARA VISITAS DE CAMPO: POTENCIALES UBICACIONES PARA POZOS DE INFILTRACIÓN

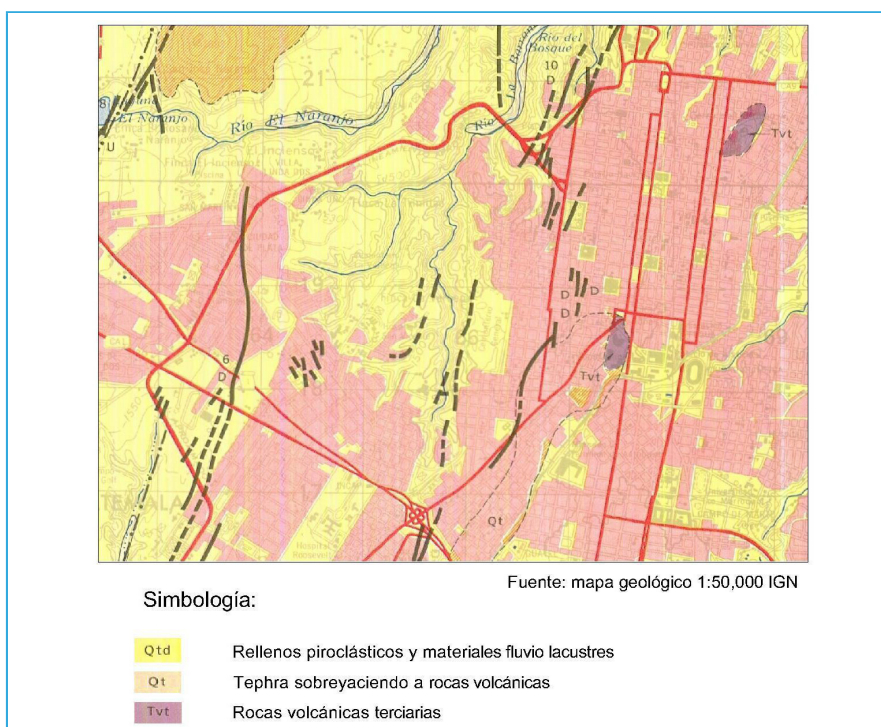
Nombre de quien completa la ficha:	Otros participantes:
Institución a la que pertenece:	
Fecha de elaboración de la ficha:	
DETALLES DE LA VISITA	
Lugar visitado (nombre y dirección):	
Propietario/Persona de contacto en el sitio:	
Comentarios sobre área de captación (estado de los techos, tipo de cobertura vegetal, infraestructura existente aprovechable):	
Comentarios sobre área disponible para pozos de infiltración (u otra infraestructura):	
¿Se identifican pozos de extracción de agua en las cercanías, nacimientos de agua, ríos?	
Actividades agrícolas, industriales o de otro tipo que se realizan cerca o dentro de este sitio (fuentes potenciales de contaminación para el agua captada e infiltrada):	
Facilidad de acceso al sitio, seguridad y claridad para establecer un responsable de mantenimiento de la obra en el futuro.	
¿Qué se conoce de la geología del área? ¿Se tiene un mapa con dicha información?	
El pozo seco de infiltración viable de construir recibirá agua desde: Captación de techos () Captación de escorrentía () Ambas ()	

8.2 PERMEABILIDAD DE LOS SUELOS EN LA CIUDAD DE GUATEMALA

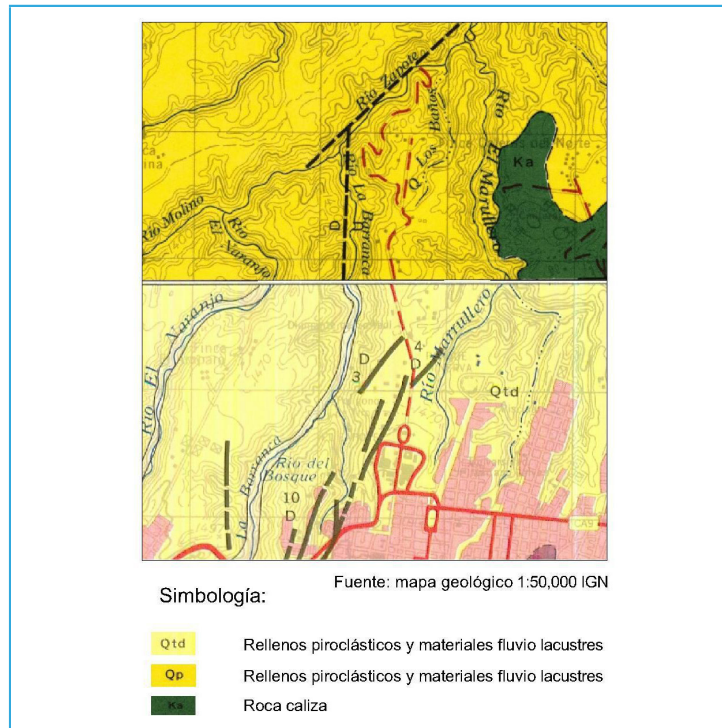


Fuente. Cortesía del Ing. Jorge García Chiú

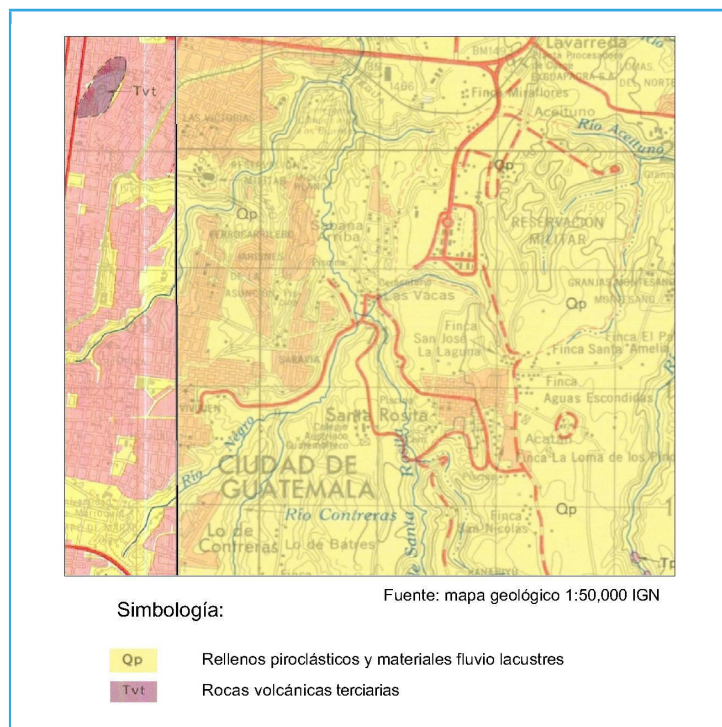
8.3 MAPA GEOLÓGICO ZONAS 1, 3, 4, 7 Y 8



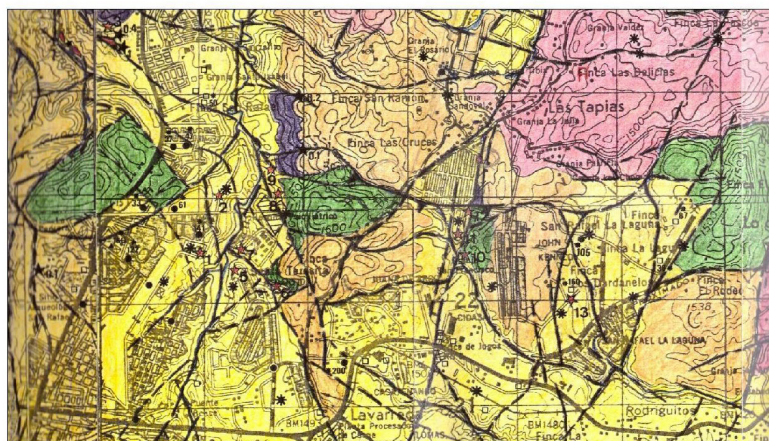
8.4 MAPA GEOLÓGICO ZONA 2



8.5 MAPA GEOLÓGICO ZONAS 1 Y 5



8.6 MAPA GEOLÓGICO ZONAS 6 Y 18

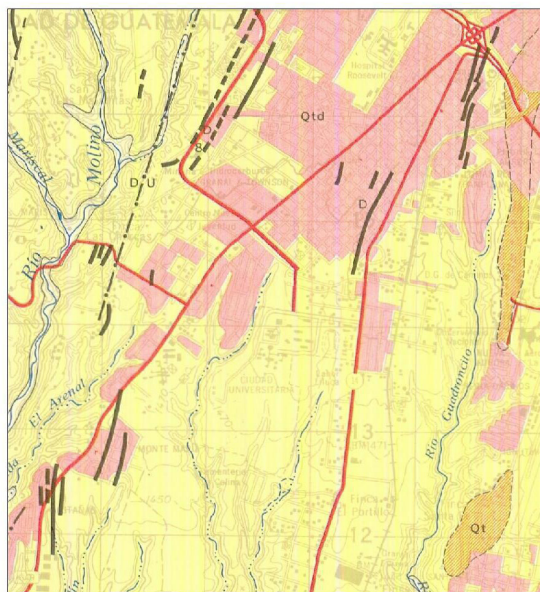


Fuente: mapa geológico 1:25,000 SOGREAH/EMPAGUA

Simbología:

- Cenizas y sedimentos volcánicos
- Depósitos volcano sedimentarios consolidados
- Lavas basálticas
- Calizas karstificadas con corales
- Calizas negras con capas de sílice y esquistos

8.7 MAPA GEOLÓGICO ZONAS 11 Y 12

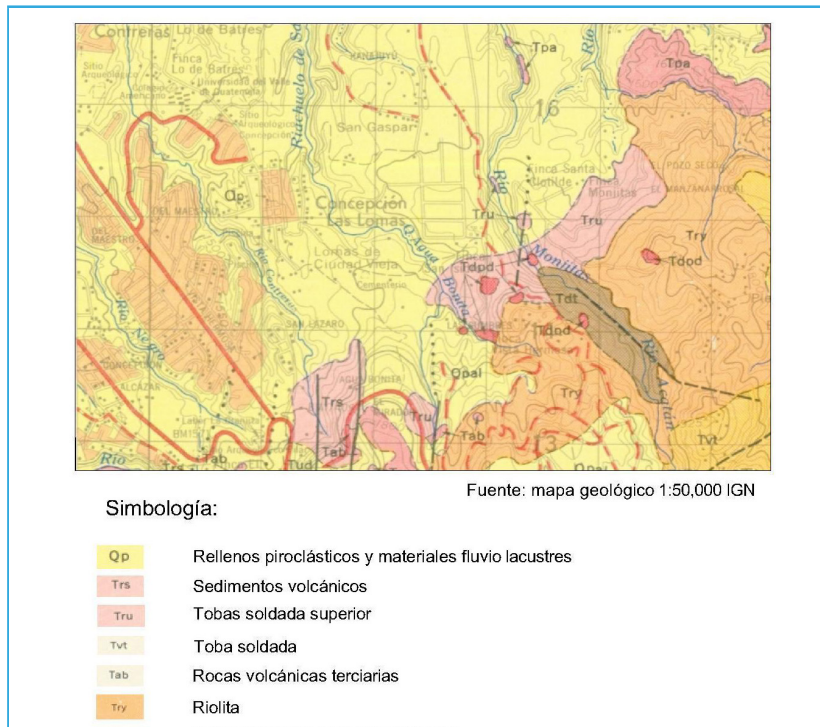


Fuente: mapa geológico 1:50,000 IGN

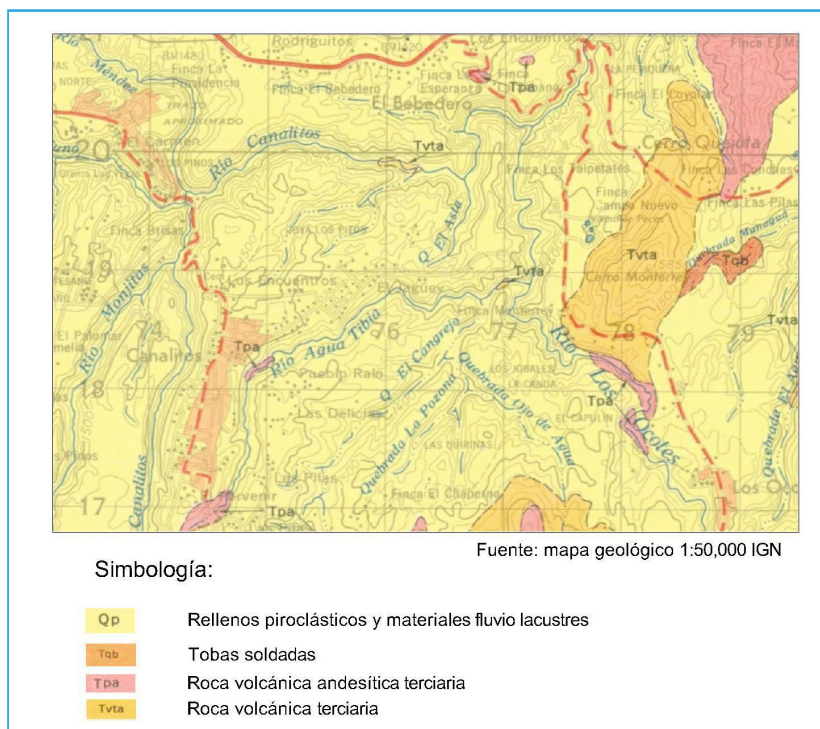
Simbología:

- Qtd Rellenos piroclásticos y materiales fluvio lacustres
- Qt Tephra sobreyaciendo a rocas volcánicas

8.8 MAPA GEOLÓGICO ZONAS 15, 16 Y 17



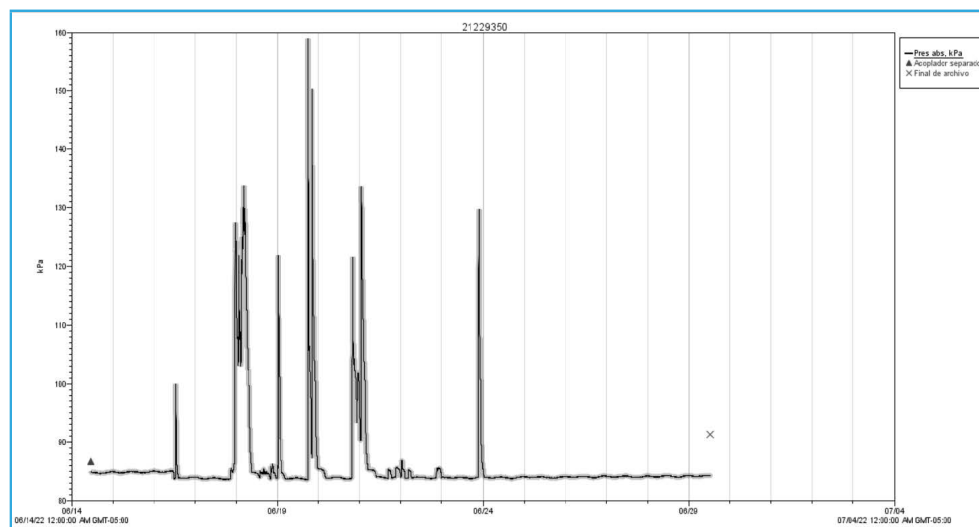
8.9 MAPA GEOLÓGICO ZONAS 17 Y 24



8.10 PARÁMETROS ADICIONALES PARA EL MONITOREO DE CALIDAD DEL AGUA DE LLUVIA

Agua de lluvia	Agua de escorrentía
Sólidos disueltos totales Metales pesados (plomo, arsénico, cromo VI) Flúor Se recomienda el uso de sondas multiparamétricas para controlar otros parámetros relevantes, tales como conductividad, concentración de nitratos o el pH	Sólidos disueltos totales, los sólidos en suspensión, el oxígeno disuelto, carbono orgánico, grasas y aceites. Se recomienda el uso de sondas multiparamétricas para controlar otros parámetros relevantes, tales como conductividad, concentración de nitratos o el pH

8.11 EJEMPLO DE UNA GRÁFICA GENERADA POR EL DISPOSITIVO REGISTRADOR (DATALOGGER)



Los registros de cambios en la presión por ingreso del agua en eventos de lluvia permiten determinar volúmenes de agua que ingresaron al pozo de recarga.

9. ANEXOS

9.1 METODOLOGÍA DE PRUEBAS DE INFILTRACIÓN

Equipo para realizar el análisis de infiltración de agua en el suelo a través del método de Porchet o cilindro invertido:

- a. Regla graduada de al menos 40 cm (puede ser una cinta métrica)
- b. Una coba o una pala liviana (barreno de suelos)
- c. Cronómetro
- d. Libreta de campo
- e. Envase con al menos 5 galones de agua o una fuente de agua próxima al lugar del análisis y una manguera lo más larga posible

Prueba de infiltración de Porchet

1. Identificar un área homogénea y representativa del bosque (en función de las unidades de mapeo (geología, suelos y uso del suelo o cobertura vegetal).
2. Realizar un agujero de forma cuadrada con 30 cm de largo, 30 cm de ancho y 50 cm de profundidad (o con ayuda de un barreno (diámetro 10 cm) y profundidad definida).
3. Llenar de agua hasta una altura de 35 cm., marcar inmediatamente el nivel del agua en el cilindro, que ha de servir de referencia a las lecturas posteriores.
4. Anotar en la forma de registro la hora en que marcó el nivel inicial del agua.
5. Para obtener una información completa hacer mediciones de la altura de agua en el agujero cada 5 minutos por al menos 120 minutos, o en todo caso, hasta llegar a la permeabilidad estabilizada, que se alcanzaría antes en suelos arenosos que en los arcillosos.
6. Si la infiltración es muy rápida la lámina de agua alcanza la base del agujero, se debe rellenar de nuevo con agua y registrar la nueva altura de la lámina. Siguiendo con las mediciones como se describió en los pasos previos.
7. La información puede recopilarse de la siguiente manera:

Hora	Enrase	Lectura	Tiempo acumulado	Lámina de infiltración
00:00:00	30	30	0	
00:05:00		25	5	5
00:10:00		20	10	5
00:15:00		18	15	2
00:20:00		14	20	4
00:25:00		13	25	1
00:30:00		10	30	3
00:35:00		9	35	1
00:40:00		8	40	1
00:45:00		7	45	1
00:50:00		6	50	1
00:55:00		5	55	1
00:60:00		4	60	1
01:05:00		3	65	1
01:10:00		2.5	70	0.5
01:15:00		1.5	75	1
01:15:00	30	30	75	
01:20:00		28.5	80	1.5
01:25:00		27	85	1.5
01:30:00		26	90	1
01:35:00		24.5	95	1.5
01:40:00		23.5	100	1
01:45:00		21.5	105	2
01:50:00		19.5	110	2
01:55:00		18	115	1.5
02:00:00		17.5	120	0.5

Se agrega una columna de tiempo acumulado en horas, simplemente dividiendo entre 60 el tiempo acumulado en minutos. Posteriormente se calcula la fp o “capacidad de infiltración acumulada” en centímetros por hora (cm/hr), solamente dividiendo la lámina de infiltración (cm) entre el tiempo acumulado en horas. El último dato de la columna fp o “capacidad de infiltración acumulada”

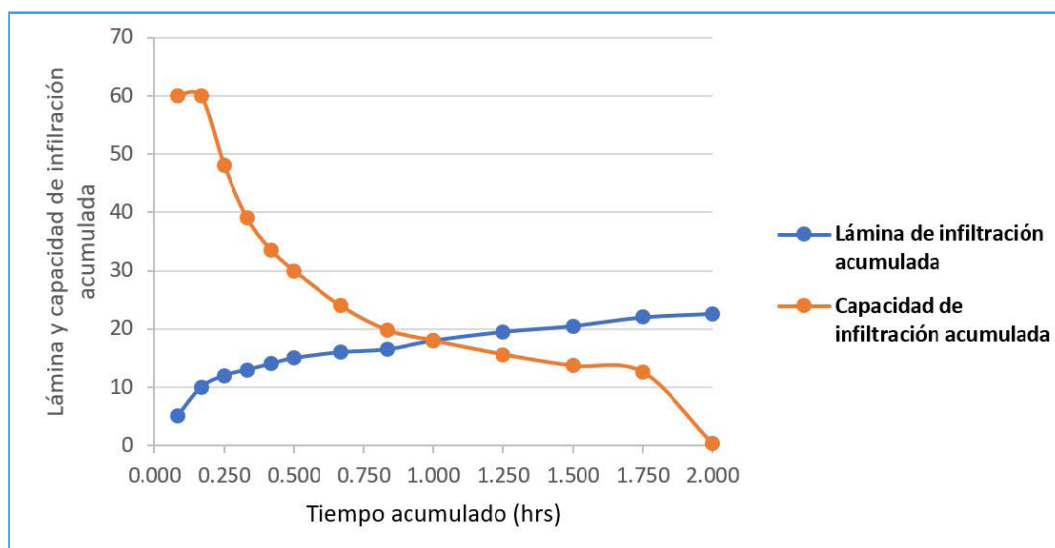
(cm/hr) es la f_c , dato que será de utilidad en los siguientes cálculos. Para la última columna " $\ln(f_p - f_c)$ " simplemente se calcula el logaritmo natural de $f_p - f_c$ para cada fila. Inicialmente se tabulan los datos de la prueba de infiltración según el cuadro anterior y luego se procede a incluir las siguientes columnas:

Tiempo (min)	Tiempo acumulado (min)	Tiempo acumulado (hrs)	Lectura (cm)	Lámina de infiltración (cm)	Lámina de infiltración acumulada (cm)	(f_p) Capacidad de infiltración acumulada (cm/hr)	$\ln(f_p - f_c)$
0	0	0.000	35				
5	5	0.0833	34.5	5	5.00	60.000	4.08933
5	10	0.1667	34.3	5	10.00	60.000	4.09434
5	15	0.2500	33.3	2	12.00	48.000	3.87120
5	20	0.3333	32.8	1	13.00	39.000	3.66356
5	25	0.4167	32.4	1	14.00	33.600	3.51453
5	30	0.5000	32.0	1	15.00	30.000	3.40120
10	40	0.6667	31.3	1	16.00	24.000	3.17805
10	50	0.8333	30.5	0.5	16.50	19.800	2.98568
10	60	1.0000	29.9	1.5	18.00	18.000	2.89037
15	75	1.2500	29.2	1.5	19.50	15.600	2.74727
15	90	1.5000	28.4	1	20.50	13.667	2.61496
15	105	1.7500	27.7	1.5	22.00	12.571	2.53143
15	120	2.0000	27.1	0.6	22.60	$f_c=0.300$	

Se puede elaborar la gráfica de la curva de capacidad de infiltración colocando en el eje Y el tiempo acumulado en horas y en el eje X la lámina de infiltración acumulada (cm) y la capacidad de infiltración acumulada f_p (cm/hr). En esta gráfica se debe observar como en función del tiempo, la lámina de infiltración acumulada aumenta mientras la capacidad de infiltración acumulada disminuye.

Como en el siguiente ejemplo:

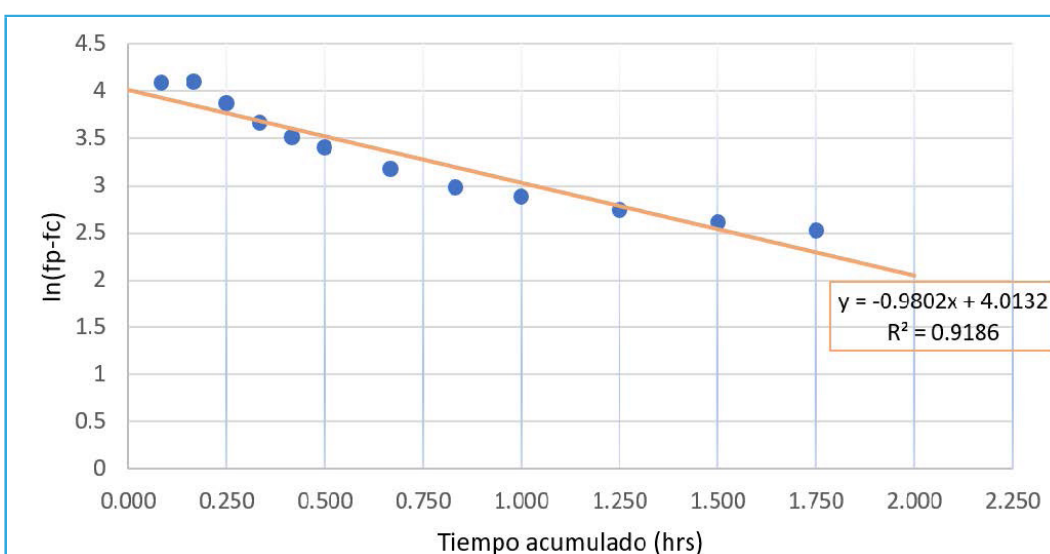
Figura 21. Curva de capacidad de infiltración



Se puede elaborar la gráfica de la curva de capacidad de infiltración colocando en el eje Y el tiempo acumulado en horas y en el eje X la lámina de infiltración acumulada (cm) y la capacidad de infiltración acumulada f_p (cm/hr). En esta gráfica se debe observar como en función del tiempo, la lámina de infiltración acumulada aumenta mientras la capacidad de infiltración acumulada disminuye.

Como en el siguiente ejemplo:

Figura 22. Recta de mejor ajuste para $\ln(fp-fc)$



Para calcular $f_o - f_c$ solamente hay que obtener la exponencial de $\ln(f_o - f_c)$ y luego f_o se calcula sumando $f_o - f_c$ con f_c .

f_c	0.3000
f_o	55.6255
K	0.9802
ln(f_o - f_c)	4.0132
f_o - f_c	55.3255

Lo cual permite definir la siguiente ecuación y calcular la capacidad de infiltración en el tiempo según la fórmula propuesta por Horton:

$$f = f_c + (f_o - f_c)e^{-kt}$$

$$\ln \ln(f_o - f_c) = \ln \ln(f_o - f_c) - kt$$

$$f = 0.30 + (55.3255 - 0.30) * e^{-0.9802 \cdot t}$$

Capacidad de infiltración f	
0.865	cm/h
207.6	mm/día

9.2 COEFICIENTES DE ESCORRENTÍA PARA FÓRMULA RACIONAL

Vegetación	Topografía	Textura de suelo		
		Gruesa	Media	Fina
		franco-arenoso	franco-limoso y franco-arcilloso	arcilloso
Bosques	Plano (0-5%)	0.10	0.30	0.40
	Ondulado (6-10%)	0.25	0.35	0.50
	Escarpado (11-30%)	0.30	0.50	0.60
Pastizales	Plano (0-5%)	0.10	0.30	0.40
	Ondulado (6-10%)	0.10	0.36	0.55
	Escarpado (11-30%)	0.22	0.42	0.60
Terrenos cultivados	Plano (0-5%)	0.30	0.50	0.60
	Ondulado (6-10%)	0.40	0.60	0.70
	Escarpado (11-30%)	0.52	0.72	0.82

Fuente. Schwab et.al., 1990.



Secretaría
Nacional de
Ciencia y
Tecnología

Recopilación de una experiencia de Recarga Hídrica Gestionada en la Región Metropolitana de Guatemala



RECOPILACIÓN DE UNA EXPERIENCIA DE RECARGA HÍDRICA GESTIONADA EN LA REGIÓN METROPOLITANA DE GUATEMALA

Guatemala, noviembre 2024